ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

СПРАВОЧНИК

под редакцией
академика
И. К. КИКОИНА

МОСКВА · АТОМИЗДАТ · 1976

УДК 53(031)

Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. акад. И. К. Кикоина. М., Атомиздат, 1976, 1008 с.

Справочник содержит данные по механическим, термодинамическим и молекулярно-кинетическим свойствам веществ, электрическим свойствам металлов, диэлектриков и полупроводников, магнитным свойствам диа-, пара- и ферромагнетиков, оптическим свойствам веществ, в том числе и лазерных, оптическим, рентгеновским и высокоразрешающим спектрам, ядерной физике, термоядерным реакциям, а также геофизике и астрономии.

Материал представлен в виде таблиц и графиков, сопровождаемых краткими сведениями о определениях соответствующих величин. Для удобства пользования приведены единицы измерения физических величин в различных системах и переводные множители.

В работе над справочником принимали участие

В. Т. АВЕРИН (гл. 7 и 14)
Б. А. АРТЕМОВ (гл. 21)
П. С. БАБАЕВ (гл. 4, 5, 6, 16)
И. А. БАЖИНОВА (гл. 1, 2, 25, 26)
Л. Ж. БАЛЬ (гл. 40)
Ц. И. БОЛОТИН (гл. 32)
А. А. БАРТОЛОМЕЙ (гл. 45)
Л. И. ВИНОКУРОВА (гл. 27)
З. Б. ГЕЛЬМАН (гл. 8, 9, 10, 11, 13)
И. С. ГРИГОРЬЕВ (гл. 15, 18, 35, 36, 39, 41, 42, 44, 46)
А. В. ЕЛЕВКИН (гл. 47)
Т. И. ИЛЮШИНА (гл. 30, 38)
К. А. КИКОИН (гл. 3)
В. Ф. КИТАЕВА (гл. 12)
В. М. КУЛАКОВ (гл. 37)
С. Д. ЛАЗАРЕВ (гл. 27)
Т. М. ЛИФШИЦ (гл. 29)
Е. А. ЛОБИКОВ (гл. 43)
М. А. МАЗИНЯ (гл. 35)
А. А. МАЛЮГИН (гл. 32, 33, 34)
И. А. МАСЛОВ (гл. 47)
Е. К. МЕЛЬНИКОВ (гл. 28)
Л. И. МИТАЧЕВ (гл. 12)
С. А. МИРОНОВ (гл. 28)
В. М. НОВИКОВ (гл. 35, 36)
О. Я. ОХОТРИН (гл. 31)
Я. С. ПЕТУХОВА (гл. 34)
Р. Д. ПИСАРЕВ (гл. 39)
Л. Н. ПРЕСНЯКОВ (гл. 31)
А. П. СЕНЧЕНКОВ (гл. 10, 20, 23, 41)
Р. В. СЕРОВ (гл. 11)
В. Г. ШАПИРО (гл. 30)
В. М. ШАТИНСКИЙ (гл. 37)
В. Н. ШЕВЕЛЬКО (гл. 33, 34, 42, 44)
С. С. ЯКИМОВ (гл. 38)

На первоначальном этапе работы над справочником координацию деятельности авторов-составителей осуществляли А. П. Сенченков и И. С. Григорьев. Обработка машинописного варианта выполнена И. С. Григорьевым, Ю. А. Дагиловым и Е. З. Мейлиховым.

1 $\frac{20100-006}{039(01)-76}$ 15 — 75

© Атомиздат, 1976

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редактора 9

I. ОБЩИЙ РАЗДЕЛ

Глава 1. Единицы измерения физических величин

1.1. Международная система единиц (СИ) . . 10
1.2. Единицы измерения механических величин 13
1.3. Единицы измерения тепловых величин . . 18
1.4. Единицы измерения электромагнитных величин 21
1.5. Единицы измерения акустических величин 31
1.6. Единицы измерения световых величин . . 22
1.7. Единицы измерения радиоактивности и ионизирующих излучений 23
1.8. Некоторые единицы измерения в атомной и ядерной физике 24
Приложение. Некоторые формулы электродинамики, записанные в различных системах единиц 25
Примечание. О проекте нового ГОСТа единиц физических величин 29
Список литературы 30

Глава 2. Фундаментальные физические постоянные

Список литературы 33

Глава 3. Периодическая система элементов

Список литературы 36

II. МЕХАНИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Глава 4. Механические свойства материалов

4.1. *Металлы* 37
4.2. *Сталь* 38
4.3. Сплавы цветных металлов 40
Сплавы меднения 40
Сплавы олова 44
Сплавы никеля, кобальта и свинца . . 48
Сплавы олова 49
Сплавы титана 50
Сплавы цинка 51
Сплавы платины 51
Сплавы вольфрама 51
4.4. *Металлокерамика, пластмассы и другие материалы* 52
Металлокерамические твердые сплавы . 52
Пластмассы 52
Пластмассы 53
Технические резины 54
4.5. *Минералы и сплавы* 54
Твердость минералов 54
Свойства волокон и проволок 55
Список литературы 55

Глава 5. Плотность веществ

5.1. Элементы 56
5.2. Газы и пары 57
5.3. Жидкости 58
5.4. Водные растворы 59
Плотность водного раствора этилового спирта 59
Плотность водного раствора метилового спирта 60
Плотность водных растворов веществ при различных температурах 60
5.5. Сплавы 65
5.6. Дерево, минералы и другие вещества 66
Список литературы 65

Глава 6. Сжимаемость веществ

6.1. Газы 67
6.2. Жидкости 71
6.3. Твердые тела 73
Список литературы 75

Глава 7. Акустика

7.1. Распространение звука в газах и парах 76
7.2. Распространение звука в жидкостях 79
7.3. Распространение звука в твердых телах и расплавах 86
Список литературы 90

Глава 8. Термометрия

8.1. Температурные шкалы 91
8.2. Жидкостно-стеклянные термометры . 93
8.3. Термометры сопротивления 94
8.4. Термоэлектрические термометры . . 98
8.5. Конденсационные термометры . . 102
8.6. Оптическая термометрия (пирометрия) и термоприемники 105
Список литературы 109

Глава 9. Температурные коэффициенты расширения и эффект Джоуля — Томсона

9.1. Тепловое расширение анизотропных твердых тел 110
9.2. Тепловое расширение изотропных твердых тел 114
9.3. Тепловое расширение жидкостей и газов 125
9.4. Эффект Джоуля — Томсона 138
Список литературы 141

Глава 10. Теплоемкость

10.1. Теплоемкость элементов и химических соединений при нормальных условиях . 142
10.2. Теплоемкость элементов в зависимости от температуры при нормальном давлении . 147
10.3. Теплоемкость неорганических соединений в зависимости от температуры при нормальном давлении 151

10.4. Теплоемкость органических соединений в зависимости от температуры при горении давления . . . 154
10.5. Теплоемкость C_p и отношение C_p/C_v для газов и жидкостей при различных значениях температуры и давления . . . 155
10.6. Растворы в жидких гелях . . . 161
10.7. Сплавы . . . 162
10.8. Технические материалы . . . 164
10.9. Теплоемкость при фазовых переходах . . . 165
Список литературы . . . 170

Глава 11. Фазовые переходы, плавление и кипение

11.1. Температура и скрытая теплота фазовых переходов . . . 171
11.2. Плавление . . . 185
11.3. Кипение . . . 192
11.4. Кипение и затвердевание растворов . . . 196
Список литературы . . . 198

Глава 12. Давление пара различных веществ

12.1. Вода и ртуть . . . 199
12.2. Элементы и простейшие соединения . . . 200
12.3. Неорганические вещества . . . 203
12.4. Органические вещества . . . 211
Список литературы . . . 221

Глава 13. Критические параметры веществ и вириальные коэффициенты

13.1. Вириальные коэффициенты . . . 242
13.2. Параметры критической точки перехода жидкость — газ . . . 245
Список литературы . . . 249

Глава 14. Коэффициент поверхностного натяжения

14.1. Жидкости . . . 250
14.2. Твердые тела . . . 255
Список литературы . . . 259

III. КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Глава 15. Теплопроводность

15.1. Элементы . . . 256
15.2. Газы и пары . . . 261
15.3. Жидкости . . . 262
15.4. Сплавы . . . 263
15.5. Огнеупорные материалы и высокотемпературные изоляционные материалы . . . 267
15.6. Строительные и теплоизоляционные материалы. Древесные породы и прочие вещества . . . 269
Список литературы . . . 271

Глава 16. Вязкость

16.1. Вязкость газов и паров при давлении выше атмосферного . . . 272
Водород . . . 272
Азот . . . 272
Кислород . . . 272
Гелий . . . 272
Аргон . . . 272
Воздух . . . 273
Окись углерода . . . 273
Этиленовый газ . . . 273
16.2. Вязкость газов при давлении ниже атмосферного . . . 274
16.3. Вязкость газов и паров при различных температурах . . . 274
16.4. Вязкость водяного пара . . . 278
16.5. Константы Сазерленда . . . 279
16.6. Вязкость элементов и неорганических соединений . . . 279
16.7. Кинематическая вязкость воды . . . 281
16.8. Вязкость органических соединений . . . 281
16.9. Вязкость кремнийорганических соединений . . . 283
16.10. Вязкость углеводородов . . . 284
16.11. Вязкость нуклидов и их соединений . . . 286
Список литературы . . . 287

Глава 17. Диффузия атомов и молекул

17.1. Диффузия в газах . . . 287
Коэффициент самодиффузии газов . . . 287
Коэффициенты взаимной диффузии в газах . . . 288
Диффузия заряженных частиц в газах. Амбиполярная диффузия . . . 290
17.2. Диффузия в жидкостях . . . 291
17.3. Диффузия в твердых телах . . . 295
Список литературы . . . 301

Глава 18. Эффективные размеры атомов и ионов

Список литературы . . . 303

IV. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Глава 19. Электрические свойства металлов и сплавов

19.1. Введение . . . 304
19.2. Простые металлы . . . 304
19.3. Влияние давления на проводимость металлов . . . 309
19.4. Сверхпроводники . . . 310
19.5. Электрические свойства некоторых металлов и сплавов . . . 312
19.6. Электрические свойства специальных электротехнических сплавов . . . 317
19.7. Электрические свойства сплавов железа и меди . . . 319
Список литературы . . . 320

Глава 20. Электрические свойства диэлектриков

20.1. Введение . . . 320
20.2. Проводимость, пробивное напряжение, диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь . . . 320
20.3. Электрические свойства наиболее распространенных диэлектриков . . . 326
20.4. Сегнетоэлектрики . . . 333
20.5. Пьезоэлектрики . . . 336
Список литературы . . . 340

Глава 21. Электрические свойства полупроводников

21.1. Введение . . . 341
21.2. Элементарные полупроводники . . . 343
21.3. Кремний и германий . . . 346
21.4. Полупроводниковые соединения: . . . 350
Соединения типа AIIBVI — AIIIBV . . . 357
Соединения типа AIIIBV—AIIIBVI . . . 362
Соединения типа AIIIBIV—AIIIBVI . . . 381
Соединения типа AIVBIV—AIVBVI . . . 400
Соединения типа AVIBV—AVIBVII . . . 409
Соединения типа AVIBIV и AVIBVI . . . 410
Соединения типа AVIIIBIII и AVIIIBVI . . . 414
Соединения типа AVIIIBIV—AVIIIBVI . . . 414
Список литературы . . . 415

Глава 22. Потенциалы ионизации и энергии диссоциации

22.1. Потенциалы ионизации атомов . . . 419
22.2. Потенциалы ионизации молекулы и радикалов . . . 421
22.3. Сродство к электрону и протону . . . 423
22.4. Фотоионизация атомов . . . 424
22.5. Перезарядка при атомных столкновениях . . . 425
22.6. Энергия диссоциации молекул . . . 425

22.7. Энергии разрыва связей в молекулах и радикалах . . . 426
Список литературы . . . 427

Глава 23. Газовый разряд

23.1. Введение . . . 427
23.2. Процессы на электродах . . . 427
23.3. Подвижность и рекомбинация заряженных частиц . . . 428
23.4. Самостоятельные разряды . . . 431
23.5. Дуговой разряд . . . 433
23.6. Низкотемпературная плазма . . . 436
23.7. Искровой разряд . . . 439
23.8. Высокочастотный разряд . . . 443
Список литературы . . . 444

Глава 24. Электронная эмиссия

24.1. Введение . . . 444
24.2. Работа выхода . . . 444
24.3. Термоэлектронная эмиссия . . . 445
Свойства термокатодов . . . 447
24.4. Фотоэлектронная эмиссия . . . 450
Свойства фотокатодов . . . 451
24.5. Вторичная электронная эмиссия . . . 454
Коэффициенты вторичной электронной эмиссии и неупругого отражения электронов . . . 457
Эффективные энергии вторичных электронов . . . 459
24.6. Автоэлектронная эмиссия . . . 460
Список литературы . . . 461

Глава 25. Термоэлектрические явления

25.1. Эффект Зеебека . . . 461
25.2. Эффект Пельтье . . . 465
25.3. Эффект Томсона . . . 466
Список литературы . . . 467

Глава 26. Гальваномагнитные и термомагнитные явления

26.1. Введение . . . 467
26.2. Коэффициенты Холла для металлов и сплавов . . . 470
26.3. Гальваномагнитные явления в магнитном, обычном, сырье и их сплавах . . . 475
26.4. Гальвано- и термомагнитные явления в ферромагнетиках . . . 478
26.5. Влияние магнитного поля на сопротивление металлов при различных температурах . . . 496
Список литературы . . . 505

Глава 27. Магнитные свойства диа- и парамагнетиков

Список литературы . . . 520

Глава 28. Магнитные свойства ферромагнетиков

28.1. Введение . . . 523
28.2. Основные физические характеристики ферромагнетиков . . . 523
Намагниченность насыщения и точка Кюри . . . 523
Намагниченность ферромагнетиков как функция напряженности магнитного поля и температуры . . . 526
Магнитная анизотропия . . . 531
Магнитострикция . . . 534
Коэффициент размагничивания . . . 545
28.3. Ферромагнетики, имеющие важное значение в технике . . . 546
Магнитомягкие материалы . . . 546
Магнитотвердые материалы . . . 557
Список литературы . . . 562

Глава 29. Ферриты

29.1. Ферриты-шпинели . . . 562
Простые ферриты . . . 566
Смешанные ферриты . . . 568
29.2. Ферриты со структурой граната . . . 569
Кристаллографические и другие характеристики . . . 574
Магнитные свойства . . . 577
29.3. Гексагональные ферриты . . . 585
29.4. Некоторые ферро- и ферримагнитные диэлектрики . . . 592
29.5. Марки и основные параметры некоторых ферритов, применяемых в СССР . . . 595
Список литературы . . . 597

Глава 30. Антиферромагнетики

30.1. Введение . . . 599
30.2. Магнитные и магнитостатические свойства легкоосных антиферромагнетиков . . . 600
30.3. Основные магнитные свойства легкоплоскостных антиферромагнетиков . . . 603
30.4. Метамагнетики . . . 611
30.5. Антиферромагнетики с взаимодействием Дзялошинского . . . 614
30.6. Диспозиционные и наноантиферромагнетики . . . 625
30.7. Органические антиферромагнетики . . . 605
30.8. Некоторые свойства антиферромагнетиков . . . 616
Список литературы . . . 630

V. ОПТИКА И РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Глава 31. Оптические свойства веществ

31.1. Показатели преломления . . . 634
Газы . . . 634
Жидкости . . . 635
Оптические стекла . . . 635
Кварц . . . 636
Кристаллы . . . 637
Различные материалы . . . 639
31.2. Коэффициенты отражения, пропускания оптических изделий . . . 639
31.3. Общности прозрачности и коэффициенты поглощения . . . 641
31.4. Излучение . . . 643
Излучение абсолютно черного тела . . . 643
Тепловое излучение тел . . . 646
Яркость некоторых источников света . . . 647
31.5. Светочувствительность фотографических материалов . . . 647
Список литературы . . . 647

Глава 32. Спектры элементов и некоторые параметры молекул

32.1. Классификация спектров атомов и молекул . . . 648
32.2. Переход от длин волн, измеренных в воздухе, к длинам волн в вакууме . . . 651
32.3. Вероятности радиационных переходов в атоме водорода . . . 652
32.4. Спектры некоторых элементов и благородных газов . . . 654
32.5. Спектры длин волн . . . 661
32.6. Параметры молекул . . . 667
Дипольные моменты молекул . . . 667
Электронные термы двухатомных молекул . . . 669
Список литературы . . . 672

Глава 33. Лазеры

33.1. Газовые лазеры на нейтральных атомах 673
33.2. Ионные лазеры 696
33.3. Молекулярные газовые лазеры 716
33.4. Лазеры на примесных кристаллах 738
33.5. Лазеры на ионных стеклах 732
33.6. Лазеры на полупроводниках 755
33.7. Жидкостные лазеры 757
Лазеры на хелатах редкоземельных элементов 757
Органические лазеры 758
33.8. Лазеры на химических красителях 759
Список литературы 761

Глава 34. Электро-, магнито- и акустооптические эффекты

34.1. Линейный электрооптический эффект (эффект Поккельса) 761
34.2. Линейный магнитооптический эффект (эффект Фарадея) 767
34.3. Квадратичный электрооптический эффект (эффект Керра) 775
34.4. Пьезооптический эффект 775
34.5. Оптическая активность 778
34.6. Нелинейные оптические эффекты 779
Генерация второй гармоники в кристаллах 779
Показатели преломления нелинейных кристаллов 780
Вынужденное рассеяние света 784
Характеристики частот Ω при ВКР 784
Список литературы 786

Глава 35. Рентгеновское излучение

35.1. Основные определения и обозначения в электростатике рентгеновского излучения 790
35.2. Закон Мозли и правило отбора для дипольных линий 797
35.3. Таблицы дипольных линий и классификация линий рентгеновского излучения для различных элементов 797
K-серия 797
L-серия 799
M-серия 803
N-серия 804
35.4. Относительные интенсивности линий 805
35.5. Ширина и форма линий рентгеновского излучения 809
35.6. Поглощение рентгеновского излучения при прохождении через вещество 809
Список литературы 809

VI. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Глава 36. Элементарные частицы

36.1. Введение 810
36.2. Основные группы и характеристики элементарных частиц 810
36.3. Унитарная симметрия и соотношение между массами адронов 811
36.4. Симметрия элементарных частиц 811
36.5. Элементарные частицы, стабильные по отношению к сильным распадам 812
36.6. Мезоны и мезонные резонансы 816
36.7. Барионы и барионные резонансы 819
36.8. Магнитные моменты элементарных частиц 824
36.9. Параметры распадов элементарных частиц 824
Список литературы 824

Глава 37. Ядерные свойства нуклидов

37.1. Таблицы нуклидов 824
37.2. Энергетические уровни нуклидов 866
37.3. Энергетические группы α-частиц 867
37.4. Квадрупольные характеристики ядер 867
37.5. Радиоактивные ряды 872
Список литературы 873

Глава 38. Мёссбауэровские ядра

38.1. Введение 874
38.2. Характеристики мёссбауэровских ядер 874
38.3. Параметры мёссбауэровских спектров 880
38.4. Изомерный сдвиг 883
Список литературы 883

Глава 39. Реакции под действием нейтронов

39.1. Основные характеристики нейтронов 883
39.2. Характеристики пороговых реакций. Энергии возбужденных состояний ядер 883
39.3. Реакции (n, γ) 884
39.4. Реакции (n, n') 886
39.5. Реакции $(n, 2n)$ 887
39.6. Реакции с испусканием заряженных частиц 888
39.7. Характеристики пороговых детекторов нейтронов 889
Список литературы 891

Глава 40. Реакции, приводящие к образованию нейтронов

40.1. Энергия связи нейтронов 891
40.2. Реакции (γ, n) 891
40.3. Реакции (p, n) 893
40.4. Реакции (d, n) 899
40.5. Реакции (α, n) 901
40.6. Реперные точки, используемые для калибровки нуклонных ускорителей 903
Список литературы 903

Глава 41. Прохождение нейтронов через вещество

41.1. Сечения взаимодействия нейтронов с веществом для нейтронов тепловых энергий 904
41.2. Графики полных нейтронных сечений в интервале энергий $0{,}01 \div 10^7$ эВ 914
41.3. Резонансные интегралы захвата 923
41.4. Циркулирующие постоянные вещества 924
Замедление нейтронов 924
Диффузия нейтронов 926
41.5. Когерентные явления при прохождении нейтронов через вещество 928
Список литературы 929

Глава 42. Деление ядер

42.1. Введение 929
42.2. Спонтанное деление 930
42.3. Сечения деления ядер 931
42.4. Нейтроны деления 931
42.5. Мгновенное γ-излучение, сопровождающее деление 935
42.6. Энергии, выделяемые при делении 936
42.7. Запаздывающие нейтроны 937
42.8. Продукты деления ядер 938
42.9. Фотоделение и деление ядер под действием заряженных частиц 939
Список литературы 942

Глава 43. Термоядерные реакции

43.1. Формула Гамова 942
43.2. Энергетические выходы термоядерных реакций 943

43.3. Звездные циклы 946
43.4. Эффективные сечения термоядерных реакций 947
Список литературы 950

Глава 44. Прохождение ионизирующего излучения через вещество

44.1. Основные обозначения и определения 952
44.2. Кинетические характеристики релятивистских частиц 952
44.3. Прохождение тяжелых заряженных частиц через вещество 952
Прохождение протонов через вещество 953
Пробег дейтонов, α-частиц и других тяжелых заряженных частиц 953
Прохождение осколков деления через вещество 955
44.4. Прохождение быстрых электронов через вещество 958
44.5. Прохождение γ-излучения через вещество 960
Прохождение узкого монохроматического пучка γ-квантов через вещество 961
Ослабление широких γ-квантов 964
Защита от γ-излучения 964
44.6. Относительная биологическая эффективность и допустимые уровни различных видов излучения 965
Список литературы 966

Глава 45. Космическое излучение

45.1. Введение 968
45.2. Первичное космическое излучение . 969
Состав 969
Энергетический спектр 968
45.3. Вторичное космическое излучение . . 969
Высотный ход интенсивности космического излучения 969
Геомагнитные явления 969
Электронно-фотонные каскадные ливни . 971
Список литературы 972

VII. АСТРОНОМИЯ И ГЕОФИЗИКА

Глава 46. Астрономия и астрофизика

46.1. Некоторые астрономические постоянные 973
46.2. Солнце 973
Характеристики Солнца 973
Положение в Галактике 973
Солнце как звезда 973
Излучение 974
Радиоизлучение 974
Солнечные пятна 975
46.3. Планеты и спутники 975
Орбиты планет 975
Физические характеристики планет . . 975
Фотометрические характеристики планет 976
Температурные условия на поверхности планет 976
Атмосферы планет 976
Спутники планет 977
Система колец Сатурна 977
Луна 977
Малые планеты 978
Кометы 978
Метеоры 979
46.4. Звезды 979
Спектральная классификация звезд . . 979
Звездные величины 980
Диаграмма Рассела-Герцшпрунга . . 980
Переменные звезды 981
Самые яркие звезды 981
Переменные звезды 981
Пульсары 983
Белые карлики 983
Пятна 984
46.5. Галактика и Вселенная 984
Галактика 984
Межзвездная среда 986
Поглощение света звезд, межзвездная пыль 986
Межзвездный газ 986
Излучение и поля в межзвездном пространстве 986
Внегалактические туманности (галактики) 986
Вселенная 987
46.6. Космическое радиоизлучение . . . 987
Спектральный состав радиоизлучения различных участков неба 987
Некоторые галактические источники радиоизлучения 988
Внегалактические источники радиоизлучения 988
Квазары 988
46.7. Космические полеты и искусственные спутники Земли 989
46.8. Космическая распространенность элементов 990
Список литературы 991

Глава 47. Геофизика

47.1. Общие характеристики Земли . . . 991
Фигура Земли 991
Строение Земли 992
47.2. Литосфера 992
Состав 992
Гравиметрия 994
Сейсмология 995
Земной магнетизм 996
Геотермика 996
47.3. Гидросфера 998
Распределение запасов воды на поверхности Земли 998
Состав океанической и пресной воды . 999
Плотность и электропроводность воды . 999
Физические свойства морского льда . . 1000
Звук и свет в океане 1000
Тепловой баланс океана 1000
47.4. Атмосфера 1000
Строение атмосферы 1000
Стандартная атмосфера 1001
Радиационный баланс атмосферы . . 1003
Электрические явления в атмосфере . . 1004
Стратификация атмосферы и зависимость от системы конвекции 1006
Список литературы 1005

ОТ РЕДАКТОРА

Развитие физических наук в последние десятилетия характеризуется неудержимым увеличением потока информации. Эта информация нуждается в систематическом обобщении и концентрации. Таблицы физических величин естественным образом концентрируют ту часть потока информации, которая допускает числовое выражение.

По отдельным узким разделам физики изданы и продолжают издаваться специализированные справочники и таблицы. К таким изданиям обычно обращаются специалисты.

Предлагаемые таблицы предназначены для широкого круга читателей, которым нужно получить информацию из областей физики, лежащих вне их более или менее узкой специальности. Поэтому в предлагаемых таблицах читатель не найдет, например, подробных данных ни о спектрах элементов, ни о свойствах растворов и т. п. «Таблицы физических величин» не претендуют на конкуренцию с такими многотомными изданиями, как знаменитый справочник Landolt Börnstein либо Technical Tables и др. Для повседневного пользования обычно требуется широко доступный справочник умеренного объема. Удовлетворению этой потребности и призваны служить предлагаемые читателю таблицы.

Составители понимают, что таблицы далеки от совершенства, и надеются, что читатели своими критическими замечаниями будут способствовать улучшению этой книги в последующих изданиях.

И. К. КИКОИН

I. ОБЩИЙ РАЗДЕЛ

ГЛАВА 1

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

1.1. МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (СИ)

В октябре 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам приняла Международную систему единиц, обозначаемую сокращенно СИ (SI). Эта система утверждена в СССР как Государственный стандарт (ГОСТ 8007—60 «Международная система единиц») и должна предпочтительно применяться во всех областях науки, техники и народного хозяйства.

Международная система единиц измерения физических величин — единая универсальная система. Она охватывает единицы измерения механических, тепловых, электрических, магнитных и других величин. В состав системы входят шесть основных единиц (метр, килограмм, секунда, ампер, градус Кельвина, свеча), две дополнительные (радиан и стерадиан) и 27 важнейших производных единиц из различных областей науки (табл. 1.1). В Государственных стандартах СССР применяется понятие размера единицы, выражающегося количественной мерой физической величины, содержащейся в единице измерения. Размер производных единиц определяется законами, связывающими физические величины, и выражен через размер основных или других производных единиц. Например, единица силы ньютон (н) установлена на основе второго закона Ньютона: она равна силе, которая сообщает ускорение 1 *м/сек*² массе 1 *кг*. При выборе размера соблюдается в отношении уравнение когерентности (связности) системы в уравнениях, определяющих единицы измерения производных величин, коэффициент пропорциональности должен быть величиной безразмерной и равен единице.

В Международной системе единиц четко разграничены единицы масс (килограмм) и силы (ньютон). Для измерения механической, тепловой и электрической энергий установлена одна универсальная единица — джоуль.

Государственный стандарт допускает применение других систем единиц, когда это удобно и необходимо, но преимущественное должно применяться система единиц СИ.

В настоящее время вводится новый стандарт единиц физических величин. Изменения наименований физических величин и их новые обозначения приведены в приложении.

Определение основных единиц системы СИ

Метр — длина, равная 1650763,73 длины волн излучения в вакууме, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома ^{86}Kr.

Килограмм — единица массы — представлен массой международного прототипа килограмма.

Секунда — 1/31556925,9747 часть тропического года для 1900 г. января 0 в 12 ч эфемеридного времени.

Ампер — сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 *м* один от другого в вакууме, вызывает между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ единицы силы Международной системы на каждый метр длины.

Градус Кельвина — единица измерения температуры по термодинамической температурной шкале, в которой для температуры тройной точки воды установлено значение 273,16° К (точно).

Свеча — единица силы света, значение которой принимается такой, чтобы яркость полного излучателя при температуре затвердевания платины была равна 60 *св/см*².

Таблица 1.1

Международная система единиц (СИ)

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение: русское	Сокращенное обозначение: международное	Размер единицы
Основные единицы				
Длина	метр	*м*	m	
Масса	килограмм	*кг*	kg	
Время	секунда	*сек*	s	
Сила электрического тока	ампер	*а*	A	
Термодинамическая температура	градус Кельвина	°K	°K	
Сила света	свеча	*св*	cd	
Дополнительные единицы				
Плоский угол	радиан	*рад*	rad	
Телесный угол	стерадиан	*стер*	sr	
Производные единицы				
Площадь	квадратный метр	$м^2$	m^2	$(1\ м)^2$
Объем	кубический метр	$м^3$	m^3	$(1\ м)^3$
Частота	герц	*гц*	Hz	$1:(1\ сек)$
Плотность (объемная масса)	килограмм на кубический метр	$кг/м^3$	kg/m^3	$(1\ кг):(1\ м)^3$
Линейная скорость	метр в секунду	*м/сек*	m/s	$(1\ м):(1\ сек)$
Угловая скорость	радиан в секунду	*рад/сек*	rad/s	$(1\ рад):(1\ сек)$
Линейное ускорение	метр на секунду в квадрате	$м/сек^2$	m/s^2	$(1\ м):(1\ сек)^2$
Угловое ускорение	радиан на секунду в квадрате	$рад/сек^2$	rad/s^2	$(1\ рад):(1\ сек)^2$
Сила	ньютон	*н*	N	$(1\ кг)\cdot(1\ м):(1\ сек)$
Давление (механическое напряжение)	ньютон на квадратный метр	$н/м^2$	N/m^2	$(1\ н):(1\ м)^2$
Динамическая вязкость	ньютон-секунда на квадратный метр	$н\cdot сек/м^2$	$N\cdot s/m^2$	$(1\ н)\cdot(1\ сек):(1\ м)^2$
Кинематическая вязкость	квадратный метр на секунду	$м^2/сек$	m^2/s	$(1\ м)^2:(1\ сек)$
Работа, энергия, количество теплоты	джоуль	*дж*	J	$(1\ н)\cdot(1\ м)$
Мощность	ватт	*вт*	W	$(1\ дж):(1\ сек)$
Количество электричества, электрический заряд	кулон	*к*	C	$(1\ а)\cdot(1\ сек)$
Электрическое напряжение, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	вольт	*в*	V	$(1\ вт):(1\ а)$
Напряженность электрического поля	вольт на метр	*в/м*	V/m	$(1\ в):(1\ м)$
Электрическое сопротивление	ом	*ом*	Ω	$(1\ в):(1\ а)$
Электрическая емкость	фарада	*ф*	F	$(1\ к):(1\ в)$
Магнитный поток	вебер	*вб*	Wb	$(1\ в)\cdot(1\ сек)$
Индуктивность	генри	*гн*	H	$(1\ вб):(1\ а)$
Магнитная индукция	тесла	*тл*	T	$(1\ вб):(1\ м)^2$
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	*а/м*	A/m	$(1\ а):(1\ м)$
Магнитодвижущая сила	ампер	*а*	A	$(1\ а)$
Световой поток	люмен	*лм*	lm	$(1\ св)\cdot(1\ стер)$
Яркость	свеча на квадратный метр или нит	$св/м^2$ или *нт*	cd/m^2, nt	$(1\ св):(1\ м)^2$
Освещенность	люкс	*лк*	lx	$(1\ лм):(1\ м)^2$

Таблица 1.2

Приставки для образования кратных и дольных единиц измерения

Приставка	Численное значение	Сокращенное обозначение		Приставка	Численное значение	Сокращенное обозначение	
		русскими буквами	латинскими буквами			русскими буквами	латинскими буквами
Пико	10^{-12}	п	p	Дека	10	да	da
Нано	10^{-9}	н	n	Гекто	10^{2}	г	h
Микро	10^{-6}	мк	μ	Кило	10^{3}	к	k
Милли	10^{-3}	м	m	Мега	10^{6}	М	M
Санти	10^{-2}	с	c	Гига	10^{9}	Г	G
Деци	10^{-1}	д	d	Тера	10^{12}	Т	T

Таблица 1.8

Единицы измерения механических величин

Наименование	Обозначение формулы определения: МКС/СГС	Обозначение формулы определения: МГТСС	МКС: Сокращенное обозначение: русское буквенное	МКС: Сокращенное обозначение: латинское буквенное	МКС: Размерность в системе МКС	СГС: Сокращенное обозначение: русское буквенное	СГС: Сокращенное обозначение: латинское буквенное	СГС: Размерность в системе СГС	МГТСС: Сокращенное обозначение: русское буквенное	МГТСС: Сокращенное обозначение: латинское буквенное	МГТСС: Размерность в системе МГТСС
Длина	L, r		м	m	—	см	cm	—	м	m	—
Время	t		сек	s		сек	s	—	сек	s	—
Масса	m	$m = F/g$	кг	kg	—	г	g	—	$кГ \cdot сек^2/м$	$kG \cdot s^2/m$	$м^{-1} \cdot кГ \cdot сек^2$
Сила	$F = ma$	F	$н$	N	$м \cdot кг \cdot сек^{-2}$	дин	dyn	$см \cdot г \cdot сек^{-2}$	кГ	kG	—
Плоский угол	$\varphi = l/r$		рад	rad	—	рад	rad	—	рад	rad	—
Частота	$\nu = 1/t$		гц	Hz	$сек^{-1}$	гц	Hz	$сек^{-1}$	гц	Hz	$сек^{-1}$
Угловая скорость	$\omega = \varphi/t$		рад/сек	rad/s	$сек^{-1}$	1/сек	1/s	$сек^{-1}$	рад/сек	rad/s	$сек^{-1}$
Угловое ускорение	$\varepsilon = \omega/t$		рад/сек²	rad/s²	$сек^{-2}$	1/сек²	1/s²	$сек^{-2}$	рад/сек²	rad/s²	$сек^{-2}$
Скорость	$v = l/t$		м/сек	m/s	$м \cdot сек^{-1}$	см/сек	cm/s	$см \cdot сек^{-1}$	м/сек	m/s	$м \cdot сек^{-1}$
Ускорение	$a = \Delta v/\Delta t$		м/сек²	m/s²	$м \cdot сек^{-2}$	см/сек²	cm/s²	$см \cdot сек^{-2}$	м/сек²	m/s²	$м \cdot сек^{-2}$
Площадь	$S = l^2$		м²	m²	$м^2$	см²	cm²	$см^2$	м²	m²	$м^2$
Объем	$V = l^3$		м³	m³	$м^3$	см³	cm³	$см^3$	м³	m³	$м^3$
Плотность	$\rho = m/V$		кг/м³	kg/m³	$м^{-3} \cdot кг$	г/см³	g/cm³	$см^{-3} \cdot г$	$кГ \cdot сек^2/м^4$	$kG \cdot s^2/m^4$	$м^{-4} \cdot кГ \cdot сек^2$
Удельный вес	$\gamma = mg/V$		н/м³	N/m³	$м^{-2} \cdot кг \cdot сек^{-2}$	дин/см³	dyn/cm³	$см^{-2} \cdot г \cdot сек^{-2}$	$кГ/м^3$	kG/m^3	$м^{-3} \cdot кГ$
Момент инерции	$J = mr^2$		кг·м²	kg·m²	$м^2 \cdot кг$	г·см²	g·cm²	$см^2 \cdot г$	$кГ \cdot м \cdot сек^2$	$kG \cdot m \cdot s^2$	$м \cdot кГ \cdot сек^2$
Количество движения	$J = mv$		кг·м/сек	kg·m/s	$м \cdot кг \cdot сек^{-1}$	г·см/сек	g·cm/s	$см \cdot г \cdot сек^{-1}$	$кГ \cdot сек$	$kG \cdot s$	$кГ \cdot сек$
Момент силы	$M = Fl$		н·м	N·m	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-2}$	дин·см	dyn·cm	$см^2 \cdot г \cdot сек^{-2}$	кГ·м	kG·m	$м \cdot кГ$
Работа, энергия	$A = Fl\cos\alpha$		дж	J	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-2}$	эрг	erg	$см^2 \cdot г \cdot сек^{-2}$	$кГ \cdot м$	kG·m	$м \cdot кГ$
Мощность	$W = A/t$		вт	W	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-3}$	эрг/сек	erg/s	$см^2 \cdot г \cdot сек^{-3}$	$кГ \cdot м/сек$	$kG \cdot m/s$	$м \cdot кГ \cdot сек^{-1}$
Давление	$P = F/S$		н/м²	N/m²	$м^{-1} \cdot кг \cdot сек^{-2}$	дин/см²	dyn/cm²	$см^{-1} \cdot г \cdot сек^{-2}$	$кГ/м^2$	kG/m^2	$м^{-2} \cdot кГ$
Динамическая вязкость	$\eta = (F/S) \times (\Delta l/\Delta v)$		н·сек/м²	N·s/m²	$м^{-1} \cdot кг \cdot сек^{-1}$	пуаз	P	$см^{-1} \cdot г \cdot сек^{-1}$	$кГ \cdot сек/м^2$	$kG \cdot s/m^2$	$м^{-2} \cdot кГ \cdot сек$
Кинематическая вязкость	$\zeta = \eta/\rho$		м²/сек	m²/s	$м^2 \cdot сек^{-1}$	см	St	$см^2 \cdot сек^{-1}$	$м^2/сек$	m^2/s	$м^2 \cdot сек^{-1}$

[1] γ — удельный вес тяжести.

1.2 ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Государственный стандарт допускает для измерения механических величин три системы единиц:

1) система СИ (МКС), основные единицы которой метр, килограмм, секунда;

2) система СГС, основные единицы которой сантиметр, грамм, секунда;

3) система МКГСС, основные единицы которой метр, килограмм-сила, секунда.

Преимущественно должна применяться система МКС. Кроме этих допускается применение внесистемных единиц: длины — микрон, ангстрем; массы — тонна, центнер, фунт; времени — час, минута; плоского угла — градус, минута, секунда; площади — ар, гектар; объема — литр; угла поворота — оборот; угловой скорости — оборот в минуту, оборот в секунду; давления — бар, техническая атмосфера и т. д.

В табл. 1.3 приведены наименования основных механических величин, их обозначения, формулы, с помощью которых определяются эти величины, единицы измерения и размерности* в системах МКС, СГС и МКГСС.

* Размерность устанавливает соотношение данной производной единицы с основными единицами системы на основании определяющих уравнений. Формулы размерности имеют важное значение при проверке правильности математических уравнений, выражающих функциональные зависимости между отдельными величинами физических величин.

Таблица 1.4

Соотношение между единицами длины

Единица измерения	Сокращенное обозначение	X-единица	Ангстрем	Нанометр	Микрометр	Миллиметр	Сантиметр	Дециметр
X-единица	X	1	$1{,}00206\cdot10^{-3}$	$1{,}00206\cdot10^{-6}$	$1{,}00206\cdot10^{-7}$	$1{,}00206\cdot10^{-11}$	$1{,}00206\cdot10^{-12}$	$3{,}945\cdot10^{-15}$
Ангстрем	Å	$0{,}0020\cdot10^{3}$	1	10^{-3}	10^{-4}	10^{-7}	10^{-8}	$3{,}167\cdot10^{-9}$
Нанометр (миллимикрон)	нм	$0{,}9975\cdot10^{3}$	10^{3}	1	10^{-3}	10^{-6}	10^{-7}	$3{,}937\cdot10^{-10}$
Микрометр (микрон)	мкм	$0{,}9975\cdot10^{6}$	10^{6}	10^{3}	1	10^{-3}	10^{-4}	$3{,}937\cdot10^{-7}$
Миллиметр	мм	$0{,}9975\cdot10^{10}$	10^{7}	10^{6}	10^{3}	1	10^{-1}	$3{,}937\cdot10^{-2}$
Сантиметр	см	$0{,}9975\cdot10^{11}$	10^{8}	10^{7}	10^{4}	10	1	0,3937
Дюйм	дюйм	$0{,}2535\cdot10^{14}$	$2{,}540\cdot10^{8}$	$2{,}540\cdot10^{7}$	$2{,}540\cdot10^{4}$	25,40	2,540	1
Фут	фут	$0{,}3042\cdot10^{14}$	$3{,}048\cdot10^{8}$	$3{,}048\cdot10^{7}$	$3{,}048\cdot10^{4}$	$3{,}048\cdot10^{1}$	30,48	12
Метр	м	$0{,}9975\cdot10^{10}$	10^{9}	10^{7}	10^{4}	10^{3}	10^{2}	39,37
Ярд	ярд	$0{,}9125\cdot10^{10}$	$9{,}1440\cdot10^{8}$	$9{,}1440\cdot10^{7}$	$9{,}1440\cdot10^{4}$	$9{,}1440\cdot10^{3}$	$9{,}1440\cdot10^{2}$	36
Километр	км	$0{,}9975\cdot10^{13}$	10^{12}	10^{10}	10^{7}	10^{6}	10^{5}	$3{,}937\cdot10^{4}$
Сухопутная миля	—	$1{,}6093\cdot10^{13}$	$1{,}6093\cdot10^{12}$	$1{,}6093\cdot10^{10}$	$1{,}6093\cdot10^{7}$	$1{,}6093\cdot10^{6}$	$1{,}6093\cdot10^{5}$	$6{,}336\cdot10^{4}$
Морская миля	—	$1{,}8524\cdot10^{13}$	$1{,}853\cdot10^{12}$	$1{,}853\cdot10^{10}$	$1{,}853\cdot10^{7}$	$1{,}852\cdot10^{6}$	$1{,}853\cdot10^{5}$	$7{,}293\cdot10^{4}$
Световой год	—	$9{,}441\cdot10^{25}$	$9{,}46\cdot10^{22}$	$9{,}46\cdot10^{21}$	$9{,}46\cdot10^{18}$	$9{,}46\cdot10^{15}$	$9{,}46\cdot10^{14}$	$3{,}724\cdot10^{19}$

Продолжение табл. 1.4

Единица измерения	Фут	Метр	Ярд	Километр	Сухопутная миля	Морская миля	Световой год
X-единица	$3{,}9876\cdot10^{-13}$	$1{,}00206\cdot10^{-14}$	$1{,}0955\cdot10^{-15}$	$1{,}00206\cdot10^{-18}$	$3{,}9367\cdot10^{-17}$	$5{,}41\cdot10^{-19}$	$1{,}06\cdot10^{-32}$
Ангстрем	$3{,}2808\cdot10^{-10}$	10^{-10}	$1{,}0936\cdot10^{-10}$	10^{-13}	$6{,}214\cdot10^{-14}$	$5{,}40\cdot10^{-14}$	$1{,}06\cdot10^{-25}$
Нанометр (миллимикрон)	$3{,}2808\cdot10^{-9}$	10^{-9}	$1{,}0936\cdot10^{-9}$	10^{-12}	$6{,}214\cdot10^{-13}$	$5{,}40\cdot10^{-13}$	$1{,}06\cdot10^{-24}$
Микрометр (микрон)	$3{,}2808\cdot10^{-6}$	10^{-6}	$1{,}0936\cdot10^{-6}$	10^{-9}	$6{,}214\cdot10^{-10}$	$5{,}40\cdot10^{-10}$	$1{,}06\cdot10^{-21}$
Миллиметр	$3{,}2808\cdot10^{-3}$	10^{-3}	$1{,}0936\cdot10^{-3}$	10^{-6}	$6{,}214\cdot10^{-7}$	$5{,}40\cdot10^{-7}$	$1{,}06\cdot10^{-18}$
Сантиметр	$3{,}2808\cdot10^{-2}$	10^{-2}	$1{,}0936\cdot10^{-2}$	10^{-5}	$6{,}214\cdot10^{-6}$	$5{,}40\cdot10^{-6}$	$1{,}06\cdot10^{-17}$
Дюйм	$8{,}3333\cdot10^{-2}$	$2{,}540\cdot10^{-2}$	$2{,}7778\cdot10^{-2}$	$2{,}5401\cdot10^{-5}$	$1{,}5783\cdot10^{-5}$	$1{,}37\cdot10^{-5}$	$2{,}68\cdot10^{-16}$
Фут	1	0,3048	0,3333	$3{,}048\cdot10^{-4}$	$1{,}8939\cdot10^{-4}$	$1{,}64\cdot10^{-4}$	$3{,}22\cdot10^{-15}$
Метр	3,2808	1	1,0936	10^{-3}	$6{,}2136\cdot10^{-4}$	$5{,}40\cdot10^{-4}$	$1{,}06\cdot10^{-14}$
Ярд	3	0,9144	1	$9{,}1440\cdot10^{-4}$	$5{,}6818\cdot10^{-4}$	$4{,}93\cdot10^{-4}$	$9{,}7\cdot10^{-15}$
Километр	$3{,}2808\cdot10^{3}$	10^{3}	$1{,}0936\cdot10^{3}$	1	0,62136	0,540	$1{,}06\cdot10^{-12}$
Сухопутная миля	$5{,}280\cdot10^{3}$	$1{,}6093\cdot10^{3}$	$1{,}760\cdot10^{3}$	1,6093	1	0,86875	$1{,}7\cdot10^{-12}$
Морская миля	$6{,}080\cdot10^{3}$	$1{,}853\cdot10^{3}$	$2{,}0265\cdot10^{3}$	1,853	1,1516	1	$1{,}95\cdot10^{-12}$
Световой год	$3{,}1063\cdot10^{16}$	$9{,}46\cdot10^{15}$	$1{,}035\cdot10^{16}$	$9{,}460\cdot10^{12}$	$5{,}878\cdot10^{12}$	$5{,}104\cdot10^{12}$	1

Таблица 1-6

Соотношение между единицами площади

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Барн	Квадратный дециметр	Квадратный миллиметр	Квадратный сантиметр	Квадратный метр	Квадратный дюйм	Квадратный фут	Квадратный ярд	Квадратный километр	Ар	Гектар
Барн	барн	1	10^{-26}	10^{-24}	10^{-28}	$1,55\cdot10^{-25}$	$1,0763\cdot10^{-27}$	$1,1960\cdot10^{-28}$	10^{-30}	10^{-34}	10^{-32}
Квадратный микрометр	$мкм^2$	10^{12}	1	10^{-6}	10^{-8}	$1,550\cdot10^{-6}$	$1,0763\cdot10^{-7}$	$1,1960\cdot10^{-8}$	10^{-10}	10^{-14}	10^{-16}
Квадратный миллиметр	$мм^2$	10^{22}	10^{6}	1	10^{-2}	$1,550\cdot10^{-3}$	$1,0763\cdot10^{-4}$	$1,1960\cdot10^{-6}$	10^{-6}	10^{-10}	10^{-12}
Квадратный сантиметр	$см^2$	10^{24}	10^{8}	10^{2}	1	0,1550	$1,0763\cdot10^{-3}$	$1,1960\cdot10^{-4}$	10^{-4}	10^{-8}	10^{-8}
Квадратный метр	$м^2$	$6,4516\cdot10^{24}$	$6,4516\cdot10^{10}$	$6,4516\cdot10^{6}$	$6,4516\cdot10^{4}$	1	$6,9444\cdot10^{-3}$	$7,7216\cdot10^{-4}$	$6,4516\cdot10^{-4}$	$6,4516\cdot10^{-10}$	$6,4516\cdot10^{-6}$
Квадратный дюйм	$дюйм^2$	$9,29030\cdot10^{22}$	$9,29030\cdot10^{8}$	$9,29030\cdot10^{4}$	$9,29030\cdot10^{2}$	$1,44\cdot10^{3}$	1	0,111	$9,29030\cdot10^{-4}$	$9,29030\cdot10^{-10}$	$9,29030\cdot10^{-6}$
Квадратный фут	$фут^2$	$8,36127\cdot10^{25}$	$8,3613\cdot10^{11}$	$8,3613\cdot10^{7}$	$8,3613\cdot10^{5}$	$1,30\cdot10^{4}$	9	1	0,83613	$8,3613\cdot10^{-9}$	$8,3613\cdot10^{-5}$
Квадратный ярд	$ярд^2$	10^{25}	10^{9}	10^{5}	10^{3}	$1,550\cdot10^{4}$	10,764	1,1960	1	10^{-8}	10^{-4}
Квадратный метр	$м^2$	10^{28}	10^{14}	10^{6}	10^{4}	$1,550\cdot10^{6}$	$1,0764\cdot10^{4}$	$1,1960\cdot10^{3}$	10^{6}	1	10^{-2}
Ар	$а$	10^{30}	10^{16}	10^{8}	10^{6}	$1,550\cdot10^{8}$	$1,0764\cdot10^{6}$	$1,1960\cdot10^{5}$	10^{8}	10^{2}	1
Гектар	$га$	10^{34}	10^{18}	10^{10}	10^{8}	$1,550\cdot10^{10}$	$1,0764\cdot10^{8}$	$1,1960\cdot10^{7}$	10^{10}	10^{4}	1

Таблица 1-6

Соотношение между единицами объема

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Кубический миллиметр	Кубический сантиметр	Кубический метр	Кубический дюйм	Литр	Кубический фут	Кубический ярд	Кубический метр
Кубический микрометр	$мкм^3$	1	10^{-9}	10^{-18}	$6,1023\cdot10^{-18}$	10^{-18}	$3,5314\cdot10^{-21}$	$1,3079\cdot10^{-24}$	10^{-18}
Кубический миллиметр	$мм^3$	10^{9}	1	10^{-9}	$6,1023\cdot10^{-9}$	10^{-6}	$3,5314\cdot10^{-12}$	$1,3079\cdot10^{-15}$	10^{-9}
Кубический сантиметр	$см^3$	10^{18}	10^{3}	1	$6,1023\cdot10^{-2}$	10^{-3}	$3,5314\cdot10^{-5}$	$1,3079\cdot10^{-6}$	10^{-6}
Кубический дюйм	$дюйм^3$	$1,63871\cdot10^{18}$	$1,6387\cdot10^{3}$	16,3871	1	$1,63871\cdot10^{-3}$	$5,787\cdot10^{-4}$	$2,1432\cdot10^{-5}$	$1,63871\cdot10^{-6}$
Литр	$л$	10^{21}	10^{6}	10^{3}	61,023	1	$3,5314\cdot10^{-2}$	$1,3079\cdot10^{-3}$	10^{-3}
Кубический фут	$фут^3$	$2,8317\cdot10^{19}$	$2,8317\cdot10^{4}$	$2,8317\cdot10^{1}$	$1,7279\cdot10^{3}$	28,3168	1	$3,7037\cdot10^{-2}$	$2,83168\cdot10^{-2}$
Кубический ярд	$ярд^3$	$7,6455\cdot10^{21}$	$7,6455\cdot10^{6}$	$7,6455\cdot10^{3}$	$4,6656\cdot10^{3}$	$7,6455\cdot10^{2}$	27,0	1	0,76455
Кубический метр	$м^3$	10^{18}	10^{6}	10^{3}	$6,1023\cdot10^{4}$	10^{3}	35,314	1,3079	1

Таблица 1.7

Соотношение между единицами массы

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Грам	Микрограмм	Миллиграмм	Грамм	Килограмм	Английская унция	Унция (международная)	Английский фунт
Грам	—	1	$6,48\cdot10^{4}$	$6,48\cdot10^{6}$	$6,48\cdot10^{-3}$	$6,47569\cdot10^{-3}$	$2,2857\cdot10^{-2}$	$2,0833\cdot10^{-2}$	$1,4285\cdot10^{-3}$
Микрограмм	мкг	$1,5432\cdot10^{-4}$	1	10^{-3}	10^{-7}	10^{-9}	$3,5274\cdot10^{-5}$	$3,2150\cdot10^{-5}$	$2,2046\cdot10^{-6}$
Миллиграмм	мг	$1,5432\cdot10^{-2}$	10^{3}	1	10^{-4}	10^{-6}	$3,5274\cdot10^{-2}$	$3,2150\cdot10^{-2}$	$2,2046\cdot10^{-3}$
Грамм	г	15,432	10^{4}	10^{7}	1	10^{-3}	$3,5274\cdot10^{-2}$	$3,2150\cdot10^{-2}$	$2,2046\cdot10^{-3}$
Килограмм	кг	$1,5432\cdot10^{4}$	10^{8}	10^{6}	10^{3}	1	35,274	32,150	2,2046
Английская унция	—	$4,375\cdot10^{-1}$	$2,8349\cdot10^{4}$	$2,8349\cdot10^{7}$	28,349	$2,8349\cdot10^{-2}$	1	0,91144	$6,25\cdot10^{-2}$
Английский фунт	—	$7,00\cdot10^{3}$	$4,5359\cdot10^{8}$	$4,5359\cdot10^{6}$	$4,5359\cdot10^{2}$	0,45359	16	14,58	1

Таблица 1.8

Соотношение между единицами плотности

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Грамм на кубический сантиметр	Грамм на кубический дюйм	Грамм на кубический фут	Унция на кубический сантиметр	Унция на кубический дюйм	Унция на кубический фут	Фунт на кубический сантиметр	Фунт на кубический дюйм	Фунт на кубический фут
Грамм на кубический сантиметр	г/см³	1	16,4	$2,83\cdot10^{4}$	$3,53\cdot10^{-2}$	0,579	$1,00\cdot10^{3}$	$2,20\cdot10^{-3}$	$3,61\cdot10^{-2}$	62,428
Грамм на кубический дюйм	г/дюйм³	$6,10\cdot10^{-2}$	1	$1,73\cdot10^{3}$	$2,15\cdot10^{-3}$	$3,53\cdot10^{-2}$	61,0	$1,34\cdot10^{-3}$	$2,20\cdot10^{-2}$	3,81
Грамм на кубический фут	г/фут³	$3,53\cdot10^{-5}$	$5,79\cdot10^{-4}$	1	$1,25\cdot10^{-6}$	$2,04\cdot10^{-5}$	$3,53\cdot10^{-2}$	$7,79\cdot10^{-5}$	$1,28\cdot10^{-3}$	$2,20\cdot10^{-2}$
Унция на кубический сантиметр	унция/см³	28,35	464,5	$8,03\cdot10^{4}$	1	16,4	$2,83\cdot10^{3}$	$6,25\cdot10^{-2}$	1,024	$1,77\cdot10^{3}$
Унция на кубический дюйм	унция/дюйм³	1,73	28,35	$4,90\cdot10^{3}$	$6,10\cdot10^{-4}$	1	$1,73\cdot10^{2}$	$3,82\cdot10^{-3}$	$6,25\cdot10^{-2}$	$1,08\cdot10^{2}$
Унция на кубический фут	унция/фут³	$1,00\cdot10^{-2}$	$1,64\cdot10^{-2}$	28,35	$3,53\cdot10^{-5}$	$5,79\cdot10^{-4}$	1	$2,21\cdot10^{-3}$	$3,62\cdot10^{-2}$	$6,25\cdot10^{-2}$
Фунт на кубический сантиметр	фунт/см³	4,54	$7,43\cdot10^{4}$	$1,28\cdot10^{7}$	16	$2,62\cdot10^{3}$	$4,53\cdot10^{2}$	1	16,4	$2,83\cdot10^{4}$
Фунт на кубический дюйм	фунт/дюйм³	27,680	$4,54\cdot10^{4}$	$7,84\cdot10^{7}$	0,976	16	$2,76\cdot10^{3}$	$6,10\cdot10^{-2}$	1	$1,73\cdot10^{3}$
Фунт на кубический фут	фунт/фут³	$1,602\cdot10^{-2}$	0,262	$4,54\cdot10^{4}$	$5,65\cdot10^{-4}$	$9,26\cdot10^{-3}$	16	$3,53\cdot10^{-4}$	$5,79\cdot10^{-4}$	1

Таблица 1.9

Соотношение между единицами времени

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Секунда	Минута	Час	Сутки	Неделя	Год
Секунда	*сек*	1	$1,667 \cdot 10^{-2}$	$2,777 \cdot 10^{-4}$	$1,1574 \cdot 10^{-5}$	$1,6534 \cdot 10^{-6}$	$3,1688 \cdot 10^{-8}$
Минута	*мин*	60	1	$1,667 \cdot 10^{-2}$	$6,9444 \cdot 10^{-4}$	$9,9206 \cdot 10^{-5}$	$1,9013 \cdot 10^{-6}$
Час	*ч*	$3,6 \cdot 10^{3}$	60	1	$4,1667 \cdot 10^{-2}$	$5,952 \cdot 10^{-3}$	$1,1414 \cdot 10^{-4}$
Сутки	*сутки*	$8,640 \cdot 10^{4}$	$1,44 \cdot 10^{3}$	24	1	0,14286	$2,7378 \cdot 10^{-3}$
Неделя	—	$6,048 \cdot 10^{5}$	$1,0080 \cdot 10^{4}$	$1,68 \cdot 10^{2}$	7	1	$1,9165 \cdot 10^{-2}$
Год	*год*	$3,1557 \cdot 10^{7}$	$5,260 \cdot 10^{5}$	$8,7658 \cdot 10^{3}$	$3,6524 \cdot 10^{2}$	52,178	1

Таблица 1.10

Соотношение между единицами измерения угла

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Радиан	Оборот	Градус	Минута	Секунда
Радиан	*рад*	1	0,159	57,296	$3,438 \cdot 10^{3}$	$2,063 \cdot 10^{5}$
Оборот (окружность)	*об*	6,28	1	360	$2,160 \cdot 10^{3}$	$1,296 \cdot 10^{6}$
Градус	°	$1,7453 \cdot 10^{-2}$	$2,78 \cdot 10^{-3}$	1	60	$3,6 \cdot 10^{3}$
Минута	′	$2,9089 \cdot 10^{-4}$	$4,633 \cdot 10^{-5}$	$1,666 \cdot 10^{-2}$	1	60
Секунда	″	$4,848 \cdot 10^{-6}$	$7,716 \cdot 10^{-7}$	$2,778 \cdot 10^{-4}$	$1,6666 \cdot 10^{-2}$	1

Таблица 1.11

Соотношение между единицами скорости

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Сантиметр в секунду	Метр в секунду	Километр в час	Узел
Сантиметр в секунду	*см/сек*	1	10^{-2}	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$1,9425 \cdot 10^{-2}$
Метр в секунду	*м/сек*	10^{2}	1	3,6	1,9425
Километр в час	*км/ч*	27,778	0,27778	1	0,53959
Узел	*узел*	51,479	0,5148	1,8532	1

Таблица 1.12

Соотношение между единицами силы

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Дина	Ньютон	Стен	Килограмм-сила
Дина	*дин*	1	10^{-5}	10^{-6}	$1,0197 \cdot 10^{-6}$
Ньютон	*н*	10^{5}	1	10^{-1}	0,10197
Стен	*сн*	10^{6}	10^{1}	1	101,97
Килограмм-сила	*кГ*	$9,8066 \cdot 10^{5}$	9,8066	$9,8066 \cdot 10^{-3}$	1

Таблица 1.13

Соотношение между единицами давления

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Паскаль на квадратный метр	Дина на квадратный сантиметр	Килограмм-сила на квадратный метр	Бар	Бары	Атмосфера физическая	Атмосфера техническая	Миллиметр ртутного столба
Паскаль на квадратный метр (паскаль)	*н/м²*	1	10	0,10197	10^{-5}	10^{-5}	$9,8692 \cdot 10^{-6}$	$1,0197 \cdot 10^{-5}$	$7,50 \cdot 10^{-3}$
Дина на квадратный сантиметр (баррер)	*дин/см²*	0,1	1	$1,0197 \cdot 10^{-2}$	10^{-6}	10^{-6}	$9,8692 \cdot 10^{-7}$	$1,0197 \cdot 10^{-6}$	$7,50 \cdot 10^{-4}$
Килограмм-сила на квадратный метр (или *кгс/м²*)	*кГ/м²*	9,8066	98,066	1	$9,8066 \cdot 10^{-5}$	$9,8066 \cdot 10^{-5}$	$0,6784 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	$7,356 \cdot 10^{-2}$
Бар (миллибаррер)	*бар*	10^5	10^6	$1,0197 \cdot 10^4$	1	10^3	0,98692	1,0197	$7,50 \cdot 10^2$
Бары	*пз*	10^1	10^2	$1,0197 \cdot 10^3$	10^{-3}	1	$9,8692 \cdot 10^{-4}$	$1,0197 \cdot 10^{-3}$	7,50
Атмосфера физическая	*атм*	$1,0133 \cdot 10^5$	$1,0133 \cdot 10^6$	$1,0333 \cdot 10^4$	1,0133	$1,0133 \cdot 10^3$	1	1,0333	$7,6 \cdot 10^2$
Атмосфера техническая (килограмм на квадратный сантиметр)	*ат (кГ/см²)*	$9,8066 \cdot 10^4$	$9,8066 \cdot 10^5$	10^4	0,98066	98,066	0,96784	1	$7,356 \cdot 10^2$
Миллиметр ртутного столба (торр)	*мм рт. ст.*	$1,3332 \cdot 10^2$	$1,3332 \cdot 10^3$	13,595	$1,3332 \cdot 10^{-3}$	0,13332	$1,3157 \cdot 10^{-3}$	$1,355 \cdot 10^{-3}$	1

Таблица 1.14

Соотношение между единицами работы и энергии

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Эрг	Джоуль	Килограммометр	Ватт-час	Калория	Литр-атмосфера	Электрон-вольт
Эрг	*эрг*	1	10^{-7}	$1,0197 \cdot 10^{-8}$	$2,7778 \cdot 10^{-11}$	$2,3884 \cdot 10^{-8}$	$9,8692 \cdot 10^{-10}$	$6,2419 \cdot 10^{11}$
Джоуль (ватт-секунда)	*дж (вт·сек)*	10^7	1	0,10197	$2,7778 \cdot 10^{-4}$	0,23889	$9,8692 \cdot 10^{-3}$	$6,2419 \cdot 10^{18}$
Килограммометр	*кГ·м*	$9,8066 \cdot 10^7$	9,8066	1	$2,724 \cdot 10^{-6}$	2,3427	0,6781 10^{-3}	$6,1205 \cdot 10^{19}$
Ватт-час	*вт·ч*	$3,60 \cdot 10^{10}$	$3,60 \cdot 10^3$	$3,1703 \cdot 10^5$	1	$8,6001 \cdot 10^4$	36,827	$2,25 \cdot 10^{22}$
Калория	*кал*	$4,1868 \cdot 10^7$	4,1868	0,42693	$1,1628 \cdot 10^{-6}$	1	$4,1311 \cdot 10^{-2}$	$2,6126 \cdot 10^{19}$
Литр-атмосфера	*л·атм*	$1,0133 \cdot 10^7$	$1,0133 \cdot 10^{-2}$	$1,0333 \cdot 10^4$	$2,815 \cdot 10^{-6}$	24,206	1	$6,325 \cdot 10^{20}$
Электрон-вольт	*эв*	$1,6021 \cdot 10^{-12}$	$1,6021 \cdot 10^{-19}$	$1,634 \cdot 10^{-21}$	$4,450 \cdot 10^{-23}$	$3,8276 \cdot 10^{-20}$	$1,5813 \cdot 10^{-23}$	1

Таблица 1.15

Соотношение между единицами мощности

Единица мощности	Сокращенное обозначение	Эрг в секунду	Ватт	Килограммометр в секунду	Лошадиная сила	Лошадиная сила (англ. и США)	Калория в секунду
Эрг в секунду	*эрг/сек*	1	10^{-7}	$1,0197 \cdot 10^{-8}$	$1,3596 \cdot 10^{-10}$	$1,3410 \cdot 10^{-10}$	$2,3884 \cdot 10^{-8}$
Ватт (джоуль в секунду)	*вт (дж/сек)*	10^7	1	0,10197	$1,3596 \cdot 10^{-3}$	$1,3410 \cdot 10^{-3}$	$2,3884 \cdot 10^{-1}$
Килограммометр в секунду	*кГ·м/сек*	$9,8066 \cdot 10^7$	9,8066	1	$1,3333 \cdot 10^{-2}$	$1,3151 \cdot 10^{-2}$	2,3427
Лошадиная сила	*л. с.*	$7,355 \cdot 10^9$	$7,355 \cdot 10^3$	75	1	0,9863	175,67
Лошадиная сила (английская)	*л. с.*	$7,457 \cdot 10^9$	$7,457 \cdot 10^3$	76	1,0139	1	178,11
Калория в секунду	*кал/сек*	$4,1868 \cdot 10^7$	4,1868	0,42693	$5,6924 \cdot 10^{-3}$	$5,6145 \cdot 10^{-3}$	1

1.3. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ВЕЛИЧИН

Государственный стандарт ГОСТ 8550—61 «Тепловые единицы» устанавливает систему, основными единицами которой являются: метр (*м*), килограмм (*кг*), секунда (*сек*), градус Кельвина (°К) (по абсолютной термодинамической шкале). Стандарт допускает применение внесистемных единиц, основанных на калории в качестве единицы количества теплоты (табл. 1.16). Согласно ГОСТ 8550—61 1 *кал* = 4,1868 *дж*.

Таблица 1.16

Тепловые единицы

Наименование величины	Тепловые единицы системы (СИ) кг — килограмм — секунда — градус			Тепловые единицы, основанные на калории		
	Обозначение единиц измерения		Размерность	Обозначения единиц измерения		Абсолютная погрешность в единицах СИ
	русскими буквами	латинскими буквами		русскими буквами	латинскими буквами	
Количество теплоты, термодинамический потенциал	*дж*	J	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-2}$	*кал*	cal	4,1868
Теплоемкость системы, энтропия системы	*дж/град*	J/deg	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-2} \times$ $\times град^{-1}$	*кал/град*	cal/deg	4,1868
Удельная теплоемкость, удельная энтропия	*дж/(кг × × град)*	J/(kg·deg)	$м^2 \cdot сек^{-2} \cdot град^{-1}$	*кал/(г·град)*	cal/(g·deg)	$4,1868 \cdot 10^3$
Удельный термодинамический потенциал, удельная теплота фазового превращения, удельная теплота химической реакции	*дж/кг*	J/kg	$м^2 \cdot сек^{-2}$	*кал/г*	cal/g	$4,1868 \cdot 10^3$
Температурный градиент	*град/м*	deg/m	$м^{-1} \cdot град$	—	—	
Тепловой поток	*вт*	W	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-3}$	*кал/сек*	cal/s	4,1868
Поверхностная плотность теплового потока	*вт/м²*	W/m²	$кг \cdot сек^{-3}$	*кал/(см²·сек)*	cal/(cm²·s)	$4,1868 \cdot 10^4$
Коэффициент теплоотдачи	*вт/(м² × × град)*	W/(m²·deg)	$кг \cdot сек^{-3} \cdot град^{-1}$	*кал/(см² × × сек·град)*	cal/(cm²·s·deg)	$4,1868 \cdot 10^4$
Коэффициент теплопроводности	*вт/(м × × град)*	W/(m·deg)	$м \cdot кг \cdot сек^{-3} \times$ $\times град^{-1}$	*кал/(см × × сек·град)*	cal/(cm·s·deg)	$4,1868 \cdot 10^2$
Коэффициент температуропроводности	$м^2/сек$	m²/s	$м^2 \cdot сек^{-1}$	*м²/ч*	m²/h	$2,7778 \cdot 10^{-4}$

Температурные шкалы

В настоящее время существуют четыре температурные шкалы, установленные международными рекомендациями (табл. 1.17).

Абсолютная термодинамическая шкала, в соответствии с решением X Генеральной конференции по мерам и весам 1954 г., определяется при помощи тройной точки воды и имеющей основной реперной точки. Этой точке соответствует температура 273,16°К (точно). Нижней границей шкалы служит точка абсолютного нуля температуры. Температура абсолютной термодинамической шкалы обозначается *T*°К.

Стоградусная термодинамическая шкала имеет начало отсчета в точке, лежащей на 0,0100° ниже тройной точки воды (т. е. в точке плавления льда при нормальном давлении). Температура на этой шкале $t = (T - 273,15)$°С. Интервал температуры по первой и второй шкалам имеет одно и то же значение.

Стоградусная международная шкала основана на определенном количестве постоянных и экспериментально воспроизводимых температур равновесия (реперных точек), которым присвоены определенные числовые значения (точка кипения кислорода, плавления льда, кипения серы, кипения воды, затвердевания серебра, затвердевания золота). Температура обозначается символом *t* и выражается в градусах стоградусной шкалы t°С.

Абсолютная международная шкала построена по принципам международной шкалы температур, но с началом отсчета от абсолютного нуля. Температура на этой шкале выражается формулой $T = (t + 273,15)$°К, где *t* — температура по стоградусной международной температурной шкале.

Из этих четырех температурных шкал ГОСТом утверждены две основные шкалы: первая (абсолютная термодинамическая шкала) и третья (стоградусная международная температурная шкала).

Таблица 1.17

Сравнение температурных шкал*

Шкала	Обозначение	Точка плавления льда	Точка кипения воды	Интервал
Цельсия	*t*, °С	0	100	100
Абсолютная	*T*, °К	273,16	373,16	100
Реомюра	*t*°, R	0	80	80
Фаренгейта	*t*, °F	32	212	180

* Формулы перевода: $\frac{t - 273}{5} = \frac{t°C}{5} = \frac{t°R}{4} = \frac{(t - 32)°F}{9}$.

Таблица 1.18

Электрические и магнитные единицы

Наименование величины	Формулы определения в системе		Наименование единицы в системе		Размерность в системе			
	МКСА	СГС	МКСА	СГСЭ СГСМ	МКСА	СГСЭ	СГСМ	СГС
Количество электричества (кулон)	$q = It$ (t — время)	$q = r\sqrt{F}$ (F — сила) (r — расстояние)	кулон (к)	—	$сек \cdot a$	$см^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2}$	$см^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Поверхностная плотность зарядов	$\sigma = q/S$ (S — площадь)		кулон на квадратный метр (к/м²)	—	$м^{-2} \cdot сек \cdot a$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{-3/2} \cdot г^{1/2}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Напряженность электрического поля	$E = F/q$		вольт на метр (в/м)	—	$м \cdot кг \cdot сек^{-3} \cdot a^{-1}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-2}$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-2}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Разность электрических потенциалов	$U = A/q$ (A — работа)		вольт (в)	—	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-3} \cdot a^{-1}$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-2}$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-2}$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Электрическая емкость	$C = q/U$		фарада (ф)	сантиметр (см)	$м^{-2} \cdot кг^{-1} \cdot сек^4 \cdot a^2$	$см$	$см^{-1} \cdot сек^2$	$см$
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon$ (ε — относительная диэлектрическая проницаемость)	$\varepsilon_a = \varepsilon$	фарада на метр (ф/м)	—	$м^{-3} \cdot кг^{-1} \cdot сек^4 \cdot a^2$	ε_0	$см^{-2} \cdot сек^2$	—
Сила тока (ток)	—	$I = q/t$	ампер (а)	—	a	$см^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-2}$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-2}$
Электрическое сопротивление	$R = U/I$		ом (ом)	—	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-3} \cdot a^{-2}$	$см^{-1} \cdot сек$	$см \cdot сек^{-2}$	$см^{-1} \cdot сек$
Электрическое смещение (электрическая индукция)	$D = \varepsilon_0 E = \frac{q}{S}$	$D = \varepsilon E$	кулон на квадратный метр (к/м²)	—	$м^{-2} \cdot сек \cdot a$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{-3/2} \cdot г^{1/2}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Диэлектрическая восприимчивость	$\xi = \varepsilon_0(\varepsilon - 1)$	$\xi = \frac{\varepsilon - 1}{4\pi}$	фарада на метр (ф/м)	—	$м^{-3} \cdot кг^{-1} \cdot сек^4 \cdot a^2$	ε_0	$см^{-2} \cdot сек^2$	—

Наименование величины	Формулы перехода в системе		Наименование величины в системе		Размерность в системе			
	МКСА	СГС	МКСА	СГС и СГСЭ	МКСА	СГСЭ	СГСМ	СГС
Поток электрического смещения (поток индукции)	$N = DS$		кулон (к)	—	$сек \cdot с$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2}$	$см^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Напряженность магнитного поля	$H = \frac{I}{2\pi r}$	$H = \frac{2I}{cr}$ (c — скорость света)	ампер на метр (а/м)	эрстед (э)	$м^{-1} \cdot а$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-2}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Абсолютная магнитная проницаемость	$\mu_a = \mu_0 \mu$ (μ — относительная магнитная проницаемость)	$\mu_a = \mu$	генри на метр (гн/м)	—	$кг \cdot м \cdot сек^{-2} \cdot а^{-2}$	$см^{-2} \cdot сек^{2}$	$см^{-2}$	—
Магнитная индукция	$B = \mu_a H = \frac{\mu I}{2\pi r}$	$B = \mu \frac{2I}{cr}$	тесла (т)	гаусс (гс)	$кг \cdot сек^{-2} \cdot а^{-1}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Магнитный поток	$\Phi = BS$		вебер (вб)	максвелл (мкс)	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-2} \cdot а^{-1}$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2}$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Индуктивность	$L = \frac{\Phi}{I}$	$L = \frac{\Phi c}{I}$	генри (гн)	сантиметр (см)	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-2} \cdot а^{-2}$	$см^{-1} \cdot сек^{2}$	см	см
Магнитный момент (рамки с током)	$P_m = IS$	$P_m = \frac{1}{c} IS$	ампер × квадратный метр ($а \cdot м^2$)	—	$м^2 \cdot а$	$см^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-2}$	$см^{5/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{5/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Магнитодвижущая сила	$F = \Sigma I = nI$ (n — количество витков)	$F = \frac{1}{c} 4\pi \Sigma I$	ампер (а), ампер-виток (ав)	гильберт (гб)	а	$см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-2}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Напряженность магнитного поля (намагниченность)	$J = P_m/V$		ампер на метр (а/м)	—	$м^{-1} \cdot а$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-2}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Магнитная восприимчивость	$\varkappa_m = \mu - 1$	$\varkappa_m = \frac{\mu - 1}{4\pi}$	—	—	—			—

1.4. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Согласно системе СИ основными единицами измерения электромагнитных величин являются метр, килограмм, секунда и ампер. Построенная на этих единицах система электромагнитных величин называется МКСА (см. табл. 1.18 на стр. 19). Систему единиц МКСА обычно применяют при написании уравнений электромагнитного поля в рационализированной форме. Рационализация уравнений электромагнитного поля имеет своей целью исключение множителя 4π из наиболее важных и часто применяемых уравнений. В системе МКСА при рационализированной форме уравнений электромагнитного поля электрическая ε_0 и магнитная μ_0 постоянные принимаются равными:

$$\varepsilon_0 = \frac{10^9}{4\pi c^2} = 8{,}854 \cdot 10^{-12}\ \text{ф/м};\quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \text{гн/м},$$

где c — скорость света в вакууме, м/сек.

Государственным стандартом допускается, когда это необходимо, применение систем единиц, построенных на основе системы СГС (СГСЭ, СГСМ, СГС — система Гаусса). При этом единицы всех электрических и магнитных величин выражаются через сантиметр, грамм и секунду при помощи соотношений, определяющих электрические и магнитные закономерности.

Система СГСЭ (абсолютная электростатическая система) основана на законах электростатических взаимодействий зарядов. Система СГСМ (абсолютная магнитная система) основана на магнитных взаимодействиях токов. В абсолютной гауссовой системе (СГС) единицы для всех электрических величин совпадают с единицами СГСЭ, а единицы для всех магнитных величин совпадают с единицами СГСМ.

В системе СГСЭ $\varepsilon_0 = 1$, $\mu_0 = 1{,}11 \cdot 10^{-21}$.

В системе СГСМ: $\mu_0 = 1$, $\varepsilon_0 = 1{,}11 \cdot 10^{-21}$.

В системе СГС $\varepsilon_0 = \mu_0 = 1$. В случае использования систем единиц СГСЭ, СГСМ, СГС уравнения электромагнитного поля записывают в нерационализированной форме.

В табл. 1.18 приведены единицы измерения электрических и магнитных величин в четырех системах: МКСА, СГСЭ, СГСМ, СГС. Соотношения между единицами электромагнитных величин различных систем приведены в табл. 1.19.

Таблица 1.19

Соотношение между электромагнитными единицами

Наименование величин	МКСА	СГСЭ	СГСМ	СГС
Сила тока (ток)	1 *а*	$3 \cdot 10^9$	10^{-1}	$3 \cdot 10^9$
Количество электричества (заряд)	1 *к*	$3 \cdot 10^9$	10^{-1}	$3 \cdot 10^9$
Поверхностная плотность заряда	1 *к/м²*	$3 \cdot 10^5$	10^{-5}	$3 \cdot 10^5$
Разность электрических потенциалов	1 *в*	$3{,}34 \cdot 10^{-3}$	10^8	$3{,}34 \cdot 10^{-3}$
Электрическая емкость	1 *ф*	$8{,}99 \cdot 10^{11}$	10^{-9}	$8{,}99 \cdot 10^{11}$
Электрическое сопротивление	1 *ом*	$1{,}11 \cdot 10^{-12}$	10^9	$1{,}11 \cdot 10^{-12}$
Диэлектрическая проницаемость	1 *ф/м*	$1{,}13 \cdot 10^{11}$	$1{,}26 \cdot 10^{-10}$	$1{,}13 \cdot 10^{11}$
Напряженность электрического поля	1 *в/м*	$3{,}34 \cdot 10^{-5}$	10^6	$3{,}34 \cdot 10^{-5}$
Электрическое смещение (электрическая индукция)	1 *к/м²*	$3{,}77 \cdot 10^5$	$1{,}26 \cdot 10^{-5}$	$3{,}77 \cdot 10^5$
Поток электрического смещения (поток индукции)	1 *к*	$3{,}77 \cdot 10^{10}$	$1{,}26$	$3{,}77 \cdot 10^{10}$
Магнитный поток	1 *вб*	$3{,}34 \cdot 10^{-8}$	10^8	10^8
Магнитная индукция	1 *вб/м²*	$3{,}77 \cdot 10^{-5}$	10^4	10^4
Напряженность магнитного поля	1 *а/м*	$3{,}77 \cdot 10^{-3}$	$1{,}26 \cdot 10^{-2}$	$1{,}26 \cdot 10^{-2}$
Магнитная проницаемость	1 *гн/м*	$8{,}85 \cdot 10^{-10}$	$7{,}96 \cdot 10^5$	$7{,}96 \cdot 10^5$
Магнитодвижущая сила	1 *а*	$3{,}77 \cdot 10^{10}$	$1{,}26$	$1{,}26$
Магнитный момент	1 *а·м²*	$3 \cdot 10^{13}$	10^3	10^3
Индуктивность (взаимная индуктивность)	1 *гн*	$1{,}11 \cdot 10^{-12}$	10^9	10^9

1.5. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Основными единицами для измерения акустических величин являются: метр, килограмм, секунда (система МКС). Государственным стандартом для измерения акустических величин допускается также применение системы СГС. Государственным стандартом не рекомендуется применять для измерения звукового давления единицу *бар*. Вместо нее рекомендуется пользоваться квадратным метром, а в системе СГС допускается дина на квадратный сантиметр. В табл. 1.20 приведены акустические единицы системы МКС и системы СГС. В табл. 1.21 приведены внесистемные акустические единицы.

Таблица 1.20

Единицы измерения акустических величин

Наименование величины	Система СИ (MKS)			Система СГС			Коэффициент перевода в единицы МКС
	Сокращенное обозначение		Размерность	Сокращенное обозначение		Размерность	
	русское буквенное	международное буквенное		русское буквенное	международное буквенное		
Звуковое давление	*н/м²*	N/m²	$м^{-1}\cdot кг\cdot сек^{-2}$	*дин/см²*	dyn/cm²	$см^{-1}\cdot г\cdot сек^{-2}$	10^{-1}
Объемная скорость	*м³/сек*	m³/s	$м^{3}\cdot сек^{-1}$	*см³/сек*	cm³/s	$см^{3}\cdot сек^{-1}$	10^{-6}
Акустическое сопротивление	*н·сек/м⁵*	N·s/m⁵	$м^{-4}\cdot кг\cdot сек^{-1}$	*дин·сек/см⁵*	dyn·s/cm⁵	$см^{-4}\cdot г\cdot сек^{-1}$	10^{5}
Механическое сопротивление	*н·сек/м*	N·s/m	$кг\cdot сек^{-1}$	*дин·сек/см*	dyn·s/cm	$г\cdot сек^{-1}$	10^{-3}
Плотность звука	*вт/м²*	W/m²	$кг\cdot сек^{-3}$	*эрг/(сек·см²)*	erg/(s·cm²)	$г\cdot сек^{-3}$	10^{-3}
Плотность звуковой энергии	*дж/м³*	J/m³	$м^{-1}\cdot кг\cdot сек^{-2}$	*эрг/см³*	erg/cm³	$см^{-1}\cdot г\cdot сек^{-2}$	10^{-1}

Таблица 1.21

Внесистемные акустические единицы

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение	Определение единицы измерения
Уровень звукового давления	децибел	*дб*	Уровень звукового давления, выраженный десятичным логарифмом отношения которого к условному порогу давления, равному 0,00002 *н/м²*, принятому за нулевой уровень, равны единице
Уровень громкости	*фон*	—	Уровень громкости звука, для которого уровень звукового давления равногромкого с ним звука частотой 1000 *гц* равен *1 дб*
Частотный интервал	октава	—	Частотный интервал между двумя частотами, логарифм отношения которых при основании два равен единице

1.6. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕТОВЫХ ВЕЛИЧИН

Согласно Международной системе единиц основными единицами для измерения световых величин является метр, килограмм, секунда, свеча (табл. 1.22).

Таблица 1.22

Световые единицы

Наименование величины	Обозначение в формуле	Основные единицы измерения		Внесистемные единицы	
		Название и обозначение	Определение	Название и их обозначение	Соотношение единиц
Сила света	*I*	международная свеча, *св*	1/60 силы света, излучаемой в направлении нормали с 1 *см²* абсолютного эталона	—	—

Продолжение таблицы 1.22.

Наименование величины	Обозначение и формула	Основные единицы измерения		Внесистемные единицы	
		Название и обозначение	Определение	Название и обозначение	Соотношение единиц
Световой поток	$\Phi = I\tau$ (τ — телесный угол)	люмен, *лм*	Световой поток, испускаемый точечным источником света силой света 1 *св* внутри телесного угла 1 *стер*	—	—
Световая энергия (количество света)	$Q = \Phi t$ (t — время)	люмен-секунда, *лм·сек*	—	—	—
Светность (светимость)	$R = \Phi/S$ (S — площадь)	люмен на квадратный метр, *лм/м²*	Светность источника, каждый квадратный метр которого дает световой поток 1 *лм*	—	—
Освещенность (интенсивность светового потока)	$E = \Phi/S$	люкс, *лк*	Освещенность поверхности, на каждый квадратный метр которой падает световой поток 1 *лм*	фот, *ф*	1 *лк* = 10^{-4} *ф*
Яркость	$B = \frac{I}{\pi} E$	нит, *нт*	Яркость поверхности, дающей силу света 1 *св* с каждого квадратного метра в направлении нормали	стильб, *сб*	1 *нт* = 10^{-4} *сб*
Освещенность	$C = Bt$	свеча-секунда, *св·сек*		—	—
Количество освещения	$H = Et$	люкс-секунда, *лк·сек*		—	—

Таблица 1.23

1.7. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ И ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение	
		русское буквенное	латинское буквенное
Активность нуклида в радиоактивном источнике	распад в секунду	*распад/сек*	-
Плотность потока ионизирующих частиц или квантов	частица (квант) в секунду на квадратный метр	*частица (квант)/(сек·м²)*	s $\cdot$ m^{-2}
Интенсивность излучения	ватт на квадратный метр	*вт/м²*	W/m²
Поглощенная доза излучения (доза излучения)	джоуль на килограмм[1]	*дж/кг*	J/kg
Мощность поглощенной дозы излучения (мощность дозы излучения)	ватт на килограмм	*вт/кг*	W/kg
Экспозиционная доза рентгеновского и γ-излучений	кулон на килограмм[2]	*к/кг*	k/kg
Мощность экспозиционной дозы рентгеновского и γ-излучений	ампер на килограмм	*а/кг*	A/kg

[1] Джоуль на килограмм — поглощенная доза излучения, измеряемая энергией 1 *дж* любого вида ионизирующего излучения, переданной массе 1 *кг* облученного вещества.

[2] Кулон на килограмм — экспозиционная доза рентгеновского и γ-излучений, при которой сопряженная корпускулярная эмиссия на каждый килограмм сухого атмосферного воздуха производит в воздухе ионы, несущие заряд, равный одному кулону электричества каждого знака.

Таблица 1.24

Внесистемные единицы измерения радиоактивности и ионизирующих излучений

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение		Множитель перевода в единицу системы СИ
		русским буквами	латинским буквами	
Активность нуклида в радиоактивном источнике	кюри*	*кюри*	Ci	$3{,}700 \cdot 10^{10}$
Поглощенная доза излучения (доза излучения)	рад	*рад*	rad	10^{-2}
Мощность поглощенной дозы излучения (мощность дозы излучения)	рад в секунду	*рад/сек*	rad/s	10^{-2}
Экспозиционная доза рентгеновского и γ-излучений	рентген**	*р*	R	$2{,}0978 \cdot 10^{-4}$
Мощность экспозиционной дозы рентгеновского и γ-излучений	рентген в секунду	*р/сек*	R/s	$2{,}5816 \cdot 10^{-4}$

* Кюри — активность препарата радиоактивного нуклида, в котором в 1 *сек* происходит 3,700 10^{10} актов распада. Масса радиоактивного нуклида, активность которого равна 1 кюри: $Q = 8{,}9 \cdot 10^{-14} \cdot AT$ (*г, сек*); $Q = 3{,}3 \cdot 10^{-17} \cdot AT$ (*г, мин*), $Q = 5{,}9 \cdot 10^{-16} \cdot AT$ (*г, ч*), $Q = 7{,}1 \cdot 10^{-15} \cdot AT$ (*г, сут*), $Q = 2{,}6 \cdot 10^{-14} \cdot AT$ (*г, год*), где A — атомная масса, T — период полураспада, Q — масса радиоактивного нуклида, *г*.

** Рентген — доза рентгеновского и γ-излучений, при которой сопряженная корпускулярная эмиссия в 0,001293 *г* воздуха производит в воздухе ионы, несущие заряд 1 ед. СГСЭ электричества каждого знака. (Напр.: 0,001293 *г* — примерно масса 1 *см*³ воздуха при температуре 0°С и давлении 760 *мм рт. ст.*. Доза облучения 1 *р* соответствует образованию $2{,}08 \cdot 10^{9}$ пар ионов в 1 *см*³ воздуха.)

Биологический эквивалент рентгена (*бэр*) — количество энергии, поглощенной живой тканью (для человека или млекопитающего) при облучении любым видом ионизирующей радиации и вызывающей такой же биологический эффект, как поглощенная доза 1 *рад* рентгеновского или γ-излучения.

Доза (*бэр*) = Доза (*рад*) × КК, где КК — коэффициент качества, зависящий от вида излучения (линейная плотность ионизации) рассматриваемого биологического процесса и значений указанной дозы и мощности дозы.

1.6. НЕКОТОРЫЕ ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ В АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

1. Атомная (кислородная) единица массы (*а.е.м.*) равна 1/16 массы атома изотопа кислорода ^{16}O:

1 *а.е.м.* = $1{,}6597 \cdot 10^{-27}$ *кг*.

2. Принята новая (углеродная) атомная единица массы, равная 1/12 массы атома изотопа ^{12}C:

1 *а.е.м.* = $1{,}6603 \cdot 10^{-27}$ *кг*.

3. *Барн* — единица измерения эффективного поперечного сечения ядерных реакций:

1 *барн* = 10^{-24} *см*².

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1.25

Некоторые формулы электродинамики, записанные в различных системах единиц*

Формула	СИ (МКСА)	СГСЭ	СГСМ	СГС
Закон Кулона	$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$	$F = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$	$F = \frac{q_1 q_2}{r^2}$	
Сила, действующая на заряд в электрическом поле	$F = qE$			
Связь между напряженностью поля и смещением	$D = \varepsilon_0 \varepsilon E$		$D = \varepsilon E$	
Теорема Гаусса (поток смещения сквозь замкнутую поверхность)	$N = \oint D \cos(\widehat{D, n})\, ds = q$ (n — нормальный вектор)	$N = \oint D \cos(\widehat{D, n})\, ds = 4\pi q$		
Напряженность поля точечного заряда	$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}$	$E = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}$	$E = \frac{q}{r^2}$	
Напряженность поля в плоском конденсаторе	$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}$	$E = \frac{4\pi\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}$	$E = \frac{4\pi\sigma}{\varepsilon}$	
Напряженность поля в цилиндрическом конденсаторе[3*]	$E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{\tau}{r}$	$E = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{2\tau}{r}$	$E = \frac{2\tau}{r}$	
Напряженность поля на оси диполя[4*]	$E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{p_e}{r^3}$	$E = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{2p_e}{r^3}$	$E = \frac{2p_e}{r^3}$	
Электрический момент диполя	$p_e = ql$			
Сила взаимодействия двух диполей, расположенных на одной оси[5*]	$F = -\frac{3}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{p_{e1} p_{e2}}{r^4}$	$F = -\frac{6}{\varepsilon_0} \cdot \frac{p_{e1} p_{e2}}{r^4}$	$F = -\frac{6p_{e1} p_{e2}}{r^4}$	
Поляризованность диэлектрика	$P = \frac{p_e}{V} = E$			
Связь между диэлектрической проницаемостью и диэлектрической восприимчивостью	$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon = \varepsilon_0 (1 + \xi)$	$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon = \varepsilon + 4\pi\xi$	$\varepsilon = 1 + 4\pi\xi$	

Продолжение табл. 1.2[6]

Величина	СИ (УЖСА)	СГСМ	СГСЭ	СГС
Связь между напряженностью поля и потенциалом	$E = -\operatorname{grad} U$			
Потенциал поля точечного заряда	$U = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{r}$	$U = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{q}{r}$	$U = \frac{q}{\varepsilon r}$	
Потенциал внутри цилиндрического конденсатора[16]	$U = U_1 = E r \ln \frac{r}{R_1}$			
Связь между емкостью, зарядом и потенциалом	$q = CU$			
Емкость уединенного шара	$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R$	$C = \varepsilon_0 \varepsilon R$	$C = \varepsilon R$	
Емкость плоского конденсатора	$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{l}$	$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{4\pi l}$	$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi l}$	
Емкость цилиндрического конденсатора	$C = \frac{2\pi\varepsilon_0 \varepsilon l}{\ln R_2/R_1}$	$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon l}{2\ln R_2/R_1}$	$C = \frac{\varepsilon l}{2\ln R_2/R_1}$	
Емкость двухпроводной линии[17]	$C = \frac{\pi\varepsilon_0 \varepsilon l}{\ln a/R}$	$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon l}{4\pi \ln a/R}$	$C = \frac{\varepsilon l}{4\pi \ln a/R}$	
Энергия заряженного проводника	$W = \frac{qU}{2} = \frac{U^2 C}{2} = \frac{q}{2C}$			
Объемная плотность энергии электрического поля	$w = \frac{ED}{2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} = \frac{D^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon}$	$w = \frac{ED}{8\pi} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{8\pi} = \frac{D^2}{8\pi\varepsilon_0 \varepsilon}$	$w = \frac{ED}{8\pi} = \frac{\varepsilon E^2}{8\pi} = \frac{D^2}{8\pi\varepsilon}$	
Определение силы тока проводимости	$I = \frac{dq}{dt}$			
Закон Ома	$I = \frac{U}{R}$			
Мощность тока	$P = UI$			
Сила, действующая на элемент тока в магнитном поле (формула Ампера)	$dF = \mu_0 \mu I B \cdot dl \sin(\widehat{\mathbf{B}, d\mathbf{l}})$	$dF = \mu I B \cdot dl \sin(\widehat{\mathbf{B}, d\mathbf{l}})$	$dF = \mu_0 I B \cdot dl \sin(\widehat{\mathbf{B}, d\mathbf{l}})$	$dF = \frac{9}{c} I B \cdot dl \sin(\widehat{\mathbf{B}, d\mathbf{l}})$
Момент, испытываемый контуром с током в магнитном поле	$M = B p_m \sin(\widehat{\mathbf{B}, \mathbf{p}_m})$			

Величина	СИ (МКСА)	СГСМ	СГСЭ	СГС
Магнитный момент контура с током	$p_m = IS$		$p_m = \frac{1}{c} IS$	
Работа перемещения контура с током в магнитном поле	$A = I\Delta\Psi$		$A = \frac{1}{c} I\Delta\Phi$	
Связь между индукцией и напряженностью магнитного поля	$B = \mu_0 H$	$B = \mu H$	$B = \mu_0 H$	$B = \mu H$
Закон Био, Савара и Лапласа	$H = \frac{1}{4\pi} \oint \frac{I dl \sin(\widehat{\mathbf{r}, \mathbf{dl}})}{r^2}$	$H = \oint \frac{I dl \sin(\widehat{\mathbf{r}, \mathbf{dl}})}{r^2}$		$H = \frac{1}{c} \oint \frac{I dl \sin(\widehat{\mathbf{r}, \mathbf{dl}})}{r^2}$
Напряженность магнитного поля бесконечно длинного прямолинейного проводника с током	$H = \frac{I}{2\pi r}$	$H = \frac{2I}{r}$		$H = \frac{1}{c} \cdot \frac{2I}{r}$
Напряженность поля в центре контура, обтекаемого током	$H = \frac{I}{2R}$	$H = \frac{2\pi I}{R}$		$H = \frac{1}{c} \cdot \frac{2\pi I}{R}$
Напряженность поля на оси длинного соленоида*	$H = I\frac{n}{l} = In_0$	$H = 4\pi I \frac{n}{l} = 4\pi I n_0$		$H = \frac{1}{c} \cdot 4\pi I n_0$
Сила взаимодействия двух параллельных токов	$F = \frac{\mu_0\mu}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2 l}{r}$	$F = \mu \frac{2I_1 I_2 l}{r}$	$F = \mu_0 \frac{2\mu I_1 I_2 l}{r}$	$F = \frac{2}{c^2} \cdot \frac{2I_1 I_2 l}{r}$
Связь между магнитным потоком и магнитной индукцией	$d\Phi = B dS \cos(\widehat{\mathbf{B}, \mathbf{n}})$			
Магнитодвижущая сила	$F = \Sigma I$	$F = 4\pi\Sigma I$		$F = \frac{1}{c} 4\pi \Sigma I$
Намагниченность	$J = \frac{p_m}{V} = \chi H$			
Связь между магнитной проницаемостью и магнитной восприимчивостью	$\mu = 1 + \chi$	$\mu = 1 + 4\pi\chi$		
Связь между потокосцеплением, силой тока и индуктивностью контура	$\Psi = LI$			$\Psi = \frac{1}{c} LI$
Индуктивность соленоида*	$L = \mu_0\mu \frac{n^2 S}{l} = \mu_0\mu n_0^2 V$	$L = 4\pi\mu \frac{n^2 S}{l} = 4\pi\mu n_0^2 V$	$L = 4\pi\mu_0\mu \frac{n^2 S}{l} = 4\pi\mu_0\mu n_0^2 V$	$L = 4\pi\mu \frac{n^2 S}{l} = 4\pi\mu n_0^2 V$
Индуктивность двухпроводной линии	$L = \mu_0 \frac{l}{\pi} \ln a/R$	$L = 4l \ln a/R$	$L = 4\mu_0 l \ln a/R$	$L = 4l \ln a/R$
Электродвижущая сила индукции	$\mathscr{E}_i = -\frac{d\Psi}{dt}$			$\mathscr{E}_i = -\frac{1}{c} \cdot \frac{d\Phi}{dt}$

Продолжение табл. 1.25

Величина	СИ (МКСА)	СГСМ	СГСЭ	СГС
Электродвижущая сила самоиндукции	$\mathcal{E}_{si} = -L\frac{dI}{dt}$			$\mathcal{E}_{si} = -\frac{1}{c^2}L\frac{dI}{dt}$
Объемная плотность энергии магнитного поля	$w = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} = \frac{\mu_0\mu H^2}{2}$	$w = \frac{BH}{8\pi} = \frac{B^2}{8\pi\mu} = \frac{\mu H^2}{8\pi}$	$w = \frac{BH}{8\pi} = \frac{B^2}{8\pi\mu_0\mu} = \frac{\mu_0\mu H^2}{8\pi}$	$w = \frac{BH}{8\pi} = \frac{B^2}{8\pi\mu} = \frac{\mu H^2}{8\pi}$
Вектор Пойнтинга (плотность потока электромагнитной индукции)	$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$	$\mathbf{S} = \frac{1}{4\pi}\mathbf{E} \times \mathbf{H}$		$\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi}\mathbf{E} \times \mathbf{H}$
Скорость распределения электромагнитных волн	$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon\mu_0\mu}}$	$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$	$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$	$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$
Уравнения Максвелла 1. Закон Фарадея	$\mathrm{rot}\,\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$			$\mathrm{rot}\,\mathbf{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
2. Закон полного тока (закон Ампера)	$\mathrm{rot}\,\mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	$\mathrm{rot}\,\mathbf{H} = 4\pi\mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$		$\mathrm{rot}\,\mathbf{H} = \frac{1}{c} \times \left(4\pi\mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}\right)$
3. Уравнение Пуассона (теорема Гаусса)	$\mathrm{div}\,\mathbf{D} = \rho$	$\mathrm{div}\,\mathbf{D} = 4\pi\rho$		
4. Непрерывность силовых линий магнитной индукции (теорема Гаусса)	$\mathrm{div}\,\mathbf{B} = 0$			

* Все величины должны измеряться в системе единиц СИ (МКСА). В частности, для ε_0 и μ_0 должны подставляться значения, в системе СИ (МКСА) $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\mu_0 = 1{,}26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м; в системе СГСМ $\varepsilon_0 = 1 \cdot 10^{-20}$ Ф/м, $\mu_0 = 1$; в системе СГСЭ $\varepsilon_0 = 1$, $\mu_0 = 1 \cdot 10^{-20}$ Гн/м.

** ε — плотность заряда на единицу длины проводника.

*** Предполагается, что $r \gg l$ (l — длина диполя).

**** U_1 — потенциал, R_1 — радиус внутреннего цилиндра.

***** L — длина линии; R — радиус проводов; a — расстояние между проводами ($a \gg R$).

****** n — общее число витков; n_1 — число витков на единицу длины.

******* S — площадь сечения соленоида, n — общее число витков; n_1 — число витков на единицу длины.

ПРИМЕЧАНИЕ

О проекте нового ГОСТа единиц физических величин

В настоящее время Комитетом стандартов при Совете Министров одобрен проект нового стандарта единиц физических величин, предусматривающий унификацию единиц, применяемых в научно-технических документах и литературе. Новый стандарт устанавливает единицы величин физических величин, допускаемых к применению в СССР, их наименования, обозначения и определения. В основу совокупности единиц установленной стандартом для обязательного применения, положена система единиц Международной системы (СИ) единиц.

В настоящее время в СИ принято пять основных единиц: метр, килограмм, секунда, кельвин, ампер, моль. В соответствии с решениями XIII Генеральной конференции по мерам и весам вводятся новые определения секунды, кельвина и кандалы.

Секунда — 9192631770 периодов излучения, соответствующего переходу между уровнями $F = 4$, $m_F = 0$ и $F = 3$, $m_F = 0$ основного состояния атома ^{133}Cs в отсутствие внешних полей.

Кельвин — 1/273,16 часть термодинамической температуры тройной точки воды.

Кандела — единица силы света, определяется на основании того, что яркость черного излучателя при температуре затвердевания платины (около 2042°К) равна 0,6 кд·см$^{-2}$.

Государственный стандарт предусматривает изменение наименований некоторых физических величин и их новые обозначения. Эти изменения приведены в табл. 1.26.

Стандартом допускаются к применению наряду с единицами СИ несистемные единицы (тонна, минута, час, сутки, градус Цельсия, гектар, литр) и их сочетания с единицами СИ, а также единицы, представляющие собой десятичные кратные и дольные от этих единиц. Десятичные кратные и дольные от единиц и первой степени образуются умножением на один из множителей, помещенных в табл. 1.2.

Новый государственный стандарт вводит единицы относительных величин, сходных по свойствам между собой (табл. 1.27).

Стандарт вводит некоторые изменения в обозначения единиц физических величин.

1. Разрешается применять русские или международные обозначения; одновременное применение в одном и том же издании обоих видов обозначений не допускается.

2. Для буквенных обозначений единиц должен применяться шрифт такой, в котором они используются: прямой при прямом шрифте текста и курсивный (наклонный) — при курсивном.

3. Обозначения единиц должны печататься строчными (малыми) буквами за исключением обозначений единиц, наименования которых образованы по фамилиям ученых. Эти обозначения должны печататься с прописной (заглавной) буквы. Изменения стандартов русских обозначений единиц физических величин приведены в табл. 1.28.

Таблица 1.26

Изменение наименований физических величин и их новые (соответствующие) обозначения*

Величина	Наименование единицы		Русское обозначение единицы		Международное обозначение
	Принятое ранее	По проекту стандарта	Принятое ранее	По проекту стандарта	
Термодинамическая температура Кельвина	градус Кельвина	кельвин	°К	К	К
Разность температур	градус	1) кельвин 2) градус Цельсия	*град*	1) К 2) °С	1) К 2) °С
Сила света	свеча	кандела	*св*	кд	cd
Давление	ньютон на квадратный метр	паскаль	*н/м²*	Па	Pa
Динамическая вязкость	ньютон-секунда на квадратный метр	паскаль-секунда	*н·сек/м²*	Па·с	Pa·s
Акустическое сопротивление	ньютон-секунда на метр в пятой степени	паскаль-секунда на метр в третьей степени	*н·сек/м⁵*	Па·с/м³	Pa·s/m³
Удельное акустическое сопротивление	ньютон-секунда на метр в третьей степени	паскаль-секунда на метр	*н·сек/м³*	Па·с/м	Pa·s/m

* Изменения русских обозначений физических величин приведены в табл. 1.28.

Таблица 1.27

Единицы относительных величин

Наименование	Единица				Примечание
	Наименование	Обозначение		Значение в единицах СИ или определение	
		русское буквенное	международное буквенное		
Относительная величина (безразмерное отношение физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную: к. п. д., относительное удлинение, относительная плотность и т. п.)	процент	%	%	10^{-2}	—
	промилле	‰	‰	10^{-3}	—
	миллионная доля	млн$^{-1}$	ppm	10^{-6}	—
Логарифмическая величина (логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную)	бел	Б	Б	1Б — $\lg (P_2/P_1)$ при $P_2 = 10P_1$. 1Б — $2\lg (F_2/F_1)$ при $F_2 = \sqrt{10}\, F_1$	P_1, P_2 — одноименные энергетические величины (мощности, энергии и т. п.) F_1, F_2 — одноименные силовые величины (напряжения, силы тока, давления и т. п.)
Частотный интервал	децибел	дБ		0,1Б	
	октава	—	—	1 октава — $\log_2 (f_2/f_1)$ при $(f_2/f_1) = 2$	f_1, f_2 — частоты
	декада	—	—	1 декада — $\lg (f_2/f_1)$ при $(f_2/f_1) = 10$	
Количество информации	бит	бит	—	—	1 бит — количество информации, полученное при осуществлении одного из двух равновероятных событий

Таблица 1.28

Изменение русских обозначений единиц физических величин

Наименование величины	Наименование единицы	Прежнее русское	По проекту стандарта	Наименование единицы	Наименование единицы	Прежнее русское	По проекту стандарта
Время	секунда	сек	с	Электрическое сопротивление	ом	ом	Ом
	час	ч	ч	Электрическая проводимость	сименс	сим	См
Телесный угол	стерадиан	стер	ср	Напряженность магнитного поля	эрстед	э	Э
Частота	герц	гц	Гц	Магнитный поток	вебер	вб	Вб
Длина	парсек	пк	пк		максвелл	мкс	Мкс
Площадь	барн	барн	б ($1б = 10^{-28}$ м^2)	Магнитная индукция	тесла	тл	Т
Сила	ньютон	н	Н		гаусс	гс	Гс
Давление	паскаль	па	Па	Магнитодвижущая сила	гильберт	гб	Гб
Кинематическая вязкость	стокс	ст	Ст	Индуктивность	генри	гн	Г
Работа	джоуль	дж	Дж	Активность нуклида в радиоактивном источнике (активность нуклида)	резерфорд	рд	рад
Энергия	электрон-вольт	эв	эВ		резерфорд/с	рд/с	рад/с
Мощность	ватт	вт	Вт		кюри	ки	Ки
Сила электрического тока	ампер	а	А	Поток ионизирующих частиц	частица в секунду	частица/сек	частиц/с
Количество электричества	кулон	к	Кл				
Электрическое напряжение, электрический потенциал, электродвижущая сила	вольт	в	В	Плотность потока ионизирующих частиц	частица на квадратный метр	частица/см^2·сек	частиц/(с·м^2)
Электрическая емкость	фарада	ф	Ф				

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдун Г. Д. Единицы физических величин. М., Стандартгиз, 1967.
2. Коэффициенты перевода единиц измерения физико-технических величин. М., Атомиздат, 1967.
3. Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности. М., «Наука», 1969.

ГЛАВА 2

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

В табл. 2.1 и 2.2 представлены уточненные значения фундаментальных физических постоянных, рекомендованные рабочей группой СОДАТА (август 1973 г.) [3]. Эта наиболее достоверная на сегодняшний день система информация о фундаментальных физических постоянных получена в результате анализа новейших экспериментальных данных [1]. Значения физических постоянных вычисляются методом наименьших квадратов по формулам, которые выражают любую постоянную посредственно через значения выбранных физических

Таблица 2.1

Значения фундаментальных физических постоянных в системах единиц СИ и СГС [1—3]

Величина	Обозначение формулы	Значение	Множитель и единица СИ	Множитель и единица СГС
Скорость света	c	2,99792458 (12)	10^8 *м·сек*$^{-1}$	10^{10} *см·сек*$^{-1}$
Постоянная тонкой структуры	α	7,2973506 (60)	10^{-3}	10^{-3}
	α^{-1}	137,03604 (11)	1	1
Заряд электрона	e	1,60218(12) (40)	10^{-19} *к*	10^{-20} ед. СГСМ
		4,803242 (14)		10^{-10} ед. СГСЭ
Постоянная Планка	h	6,626176 (36)	10^{-34} *дж·сек*	10^{-27} *эрг·сек*
	$\hbar = h/2\pi$	1,0545887 (57)	10^{-34} *дж·сек*	10^{-27} *эрг·сек*
Число Авогадро	N	6,0220943 (81)	10^{23} *моль*$^{-1}$	10^{23} *моль*$^{-1}$
Атомная единица массы	а. е. м.	1,6605655 (86)	10^{-27} *кг*	10^{-24} *г*
Масса покоя электрона	m_e	9,109534 (47)	10^{-31} *кг*	10^{-28} *г*
	m_e	5,4858026 (21)	10^{-4} а. е. м.	10^{-4} а. е. м.
Масса покоя протона	M_p	1,6726485 (86)	10^{-27} *кг*	10^{-24} *г*
	M_p	1,007276470 (11)	а. е. м.	а. е. м.
Масса покоя нейтрона	M_n	1,6749543 (86)	10^{-27} *кг*	10^{-24} *г*
	M_n	1,008665012 (37)	а. е. м.	а. е. м.
Отношение массы протона к массе электрона	M_p/m_e	1836,15152 (70)	1	1
Отношение заряда электрона к его массе	e/m_e	1,758819 (45)	10^{11} *к·кг*$^{-1}$	10^7 ед. СГСМ·*г*$^{-1}$
		5,272759 (16)	1	10^{17} ед. СГСЭ·*г*$^{-1}$
Магнитный квантовый поток	Φ_0	2,067846 (54)	10^{-15} *вб·м*^{2}	10^{-7} *гс·см*^{2}
	h/e	4,135701 (11)	10^{-15} *дж·сек·к*$^{-1}$	10^{-7} *эрг·сек*·ед. СГСМ
		1,4795234 (46)	—	10^{-17} *эрг·сек*·ед. СГСЭ
Отношение постоянной Планка к массе электрона	$h/2m_e$	3,6369455 (60)	10^{-4} *дж·сек·кг*$^{-1}$	*эрг·сек·г*$^{-1}$
	h/m_e	7,273891 (12)	10^{-4} *дж·сек·кг*$^{-1}$	*эрг·сек·г*$^{-1}$
Число Фарадея	$F = Ne$	9,648456 (27)	10^4 *с·кмоль*$^{-1}$	10^9 ед. СГСМ·*моль*$^{-1}$
Постоянная Ридберга	$R_\infty = [\mu_0 e^2/4\pi]^2 (m_e e^4/4\pi\hbar^2 c)$	2,892599 (16)	—	10^{14} ед. СГСЭ·*моль*$^{-1}$
		1,0973731143 (10)	10^7 *м*$^{-1}$	10^5 *см*$^{-1}$
Боровский радиус	$a_0 = [\mu_0 e^2/4\pi]^{-1} (\hbar^2/m_e e^2) = \alpha/4\pi R_\infty$	5,2917706 (44)	10^{-11} *м*	10^{-9} *см*
Классический радиус электрона	$r_e = [\mu_0 e^2/4\pi](e^2/m_e c^2) = \alpha^2/4\pi R_\infty$	2,8179380 (70)	10^{-15} *м*	10^{-13} *см*
Магнетон Бора	$\mu_B = [c](e\hbar/2m_e)$	9,274078 (36)	10^{-24} *дж·тл*$^{-1}$	10^{-21} *эрг·гс*$^{-1}$
Магнитный момент электрона в магнетонах Бора	μ_e/μ_B	1,0011596577 (35)	1	1
Магнитный момент электрона	μ_e	9,284832 (36)	10^{-24} *дж·тл*$^{-1}$	10^{-21} *эрг·гс*$^{-1}$
Гиромагнитное отношение протона в H_2O	γ_p	2,675130 (78)	10^8 *рад·сек*$^{-1}$·*тл*$^{-1}$	10^4 *рад·сек*$^{-1}$·*гс*$^{-1}$
	$\gamma_p/2\pi$	4,257602 (13)	10^7 *гц·тл*$^{-1}$	10^3 *гц·гс*$^{-1}$

Наименование	Обозначение, формула	Значение	Множитель в системе единиц СИ	Множитель в системе единиц СГС
То же, исправленное на диамагнетизм в H_2O	γ_p $\gamma_p/2\pi$	2,6751987 (55) 4,257707 (13)	10^8 рад·сек$^{-1}$·тл$^{-1}$ 10^7 гц·тл$^{-1}$	10^4 рад·сек$^{-1}$·гс$^{-1}$ 10^3 гц·гс$^{-1}$
Магнитный момент протонов в H_2O, в магнетонах Бора	μ_p'/μ_B	1,52099322 (10)	10^{-3}	10^{-3}
Магнитный момент протонов в магнетонах Бора	μ_p/μ_B	1,52103220 (16)	10^{-3}	10^{-3}
Магнитный момент протона	μ_p	1,4106171 (60)	10^{-26} дж·тл$^{-1}$	10^{-23} эрг·гс$^{-1}$
Магнитный момент протонов в H_2O в единицах магнетона	μ_p'/μ_N	2,7927740 (11)	1	1
μ_p'/μ_N, исправленное на диамагнетизм H_2O	μ_p/μ_N	2,792782 (17)	1	1
Ядерный магнетон	$\mu_N = [e]\left(\frac{eh}{2M_pc}\right)$	5,050824 (20)	10^{-27} дж·тл$^{-1}$	10^{-24} эрг·гс$^{-1}$
Комптоновская длина волны электрона	$\lambda_C = h/m_ec$ $\lambda_C/2\pi$	2,4263089 (40) 3,8615905 (64)	10^{-12} м 10^{-13} м	10^{-10} см 10^{-11} см
Комптоновская длина волны протона	$\lambda_{C,p} = h/M_pc$ $\lambda_{C,p}/2\pi$	1,3214099 (22) 2,1030852 (36)	10^{-15} м 10^{-16} м	10^{-13} см 10^{-14} см
Комптоновская длина волны нейтрона	$\lambda_{C,n} = h/M_nc$ $\lambda_{C,n}/2\pi$	1,3195909 (22) 2,1001941 (35)	10^{-15} м 10^{-16} м	10^{-13} см 10^{-14} см
Газовая постоянная	R_0	8,31441 (26)	10^3 $\frac{дж}{моль \cdot град}$	10^7 эрг·моль$^{-1}$·град$^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = R_0/N$	1,380662 (44)	10^{-23} дж·град$^{-1}$	10^{-16} эрг·град$^{-1}$
Постоянная Стефана—Больцмана	$\sigma = \pi^2k^4/60\hbar^3c^2$	5,67032 (71)	10^{-8} вт·м$^{-2}$·град$^{-4}$	10^{-5} эрг·сек$^{-1}$·см$^{-2}$·град$^{-4}$
Первая постоянная излучения	$C_1 = 8\pi hc$	4,095575 (39)	10^{-24} дж·м	10^{-15} эрг·см
Вторая постоянная излучения	$C_2 = hc/k$	1,438786 (46)	10^{-2} м·град	см·град
Гравитационная постоянная	G	6,6720 (41)	10^{-11} м^3·кг$^{-1}$·сек$^{-2}$	10^{-8} дин·см^2·г$^{-2}$
Стандартный объем идеального газа	V_0	22,41383 (70)	м^3·моль$^{-1}$	10^3 см^3·моль$^{-1}$

Таблица 2.2

Значения фундаментальных физических постоянных в других единицах [1—3]

Именные значения	Значение
Атомная единица массы	931,5016 (26) *Мэв*
Масса электрона	0,5110034 (14) *Мэв*
Масса протона	938,2795 (27) *Мэв*
Масса нейтрона	939,5731 (27) *Мэв*
Электронвольт	$1{,}6021892\ (46)\cdot 10^{-19}$ *дж*
	$1{,}6021892\ (46)\cdot 10^{-12}$ *эрг*
	$2{,}4179696\ (63)\cdot 10^{14}$ *гц*
Постоянная Ридберга R_∞	$8{,}066479\ (21)\cdot 10^{3}$ *м*$^{-1}$
	$8{,}066479\ (21)\cdot 10^{5}$ *см*$^{-1}$
	$2{,}179907\ (12)\cdot 10^{-18}$ *дж*
	$2{,}179907\ (12)\cdot 10^{-11}$ *эрг*
	13,606804 (36) *эв*
	$3{,}28984200\ (26)\cdot 10^{15}$ *гц*
Магнетон Бора $\mu_Б$	$1{,}676885\ (49)\cdot 10^{-5}$ *эрг/гс*
	$0{,}788378\ (9)\cdot 10^{-10}$ *эв·тл*$^{-1}$
	$1{,}3996106\ (43)\cdot 10^{10}$ *гц·тл*$^{-1}$
	46,68698 (14) *м*$^{-1}\cdot$*тл*$^{-1}$
	$46{,}68698\ (14)\cdot 10^{-4}$ *см*$^{-1}\cdot$*тл*$^{-1}$
Ядерный магнетон μ_N	$0{,}671733\ (29)$ *эрг/тл*$^{-1}$
	$3{,}1524515\ (53)\cdot 10^{-8}$ *эв·тл*$^{-1}$
	$7{,}622700\ (42)\cdot 10^{6}$ *гц·тл*$^{-1}$
	$2{,}542650\ (14)\cdot 10^{-4}$ *м*$^{-1}\cdot$*тл*$^{-1}$
	$2{,}542659\ (14)\cdot 10^{-4}$ *см*$^{-1}\cdot$*тл*$^{-1}$
Газовая постоянная	$3{,}65846\ (16)\cdot 10^{-4}$ *эрг/тл*$^{-1}$
	$8{,}20562\ (36)\cdot 10^{-2}$ *м*$^3\cdot$*атм·кмоль*$^{-1}\cdot$*эрг*$^{-1}$

постоянных и комбинации с так называемыми вспомогательными константами, которые можно считать точно известными. Выбранными физическими постоянными являются: α^{-1} — обратная величина постоянной тонкой структуры; e — заряд электрона; N — число Авогадро. Примером вспомогательной константы является R_∞ — постоянная Ридберга для бесконечной массы, значение которой известно с точностью до $1\cdot 10^{-7}$.

В табл. 2.1 значения физических постоянных из колонки 3 нужно умножить на соответствующие множители для системы СИ и СГС из колонок 4 и 5. Числа в скобках в табл. 2.1 и 2.2 — стандартные отклонения в последних двух значащих цифрах числа. В формулах для обозначения констант в системе СГС употребляется выражение, стоящее в круглых скобках (в колонке 2). При переходе к системе СИ выражение в круглых скобках нужно умножить на коэффициент в квадратных скобках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Taylor B. N., Parker W. H., Langenberg D. N.** Rev. Mod. Phys., 1969, v. 41, p. 375; **Тейлор Б., Паркер В., Лангенберг Д.** Фундаментальные константы и квантовая электродинамика. Пер. с англ. Под ред. Б. А. Малинина. М., Атомиздат, 1972.
2. **Kotsch.–Schmidt N. e.a.** Particle Properties, CERN, April 1974; Physics Letters, v. 50B, N 1, 1974.
3. Фундаментальные константы физики и химии. Рекомендации по представлению в справочной литературе численных экспериментальных данных. Пер. с англ. М., ВНИИ ГОССТ, 1975. (CODATA, 1973, No. 11); Успехи физ. наук, 1975, т. 115, в. 4, с. 623.

ГЛАВА 3

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ

Периодическая система отражает закон изменения физико-химических свойств элементов с изменением заряда ядра Z и числа электронов во внешней оболочке атомов (периодический закон).

В первоначальном варианте таблицы Д. И. Менделеева элементы располагались в порядке возрастания атомных масс и группировались по сходству химических свойств. Объяснение периодическому закону и структуре периодической системы в дальнейшем было дано на основе квантовой теории строения атома. Оказалось, что последовательность расположения элементов в таблице определяется зарядом ядра, а периодичность физико-химических свойств связана с существованием электронных оболочек атома, постепенно заполняющихся с возрастанием Z.

Состояние электрона в атоме определяется главным квантовым числом n, орбитальным квантовым числом l, его проекцией m, спиновым числом s и его проекцией σ. Электроны с разными n и l составляют разные оболочки. С учетом принципа Паули число электронов в оболочке с индексом l не может быть больше $2(2l+1)$. В зависимости от значения l — 0, 1, 2... оболочки обозначают буквами s, p, d, f, ...

Современная таблица химических элементов составлена таким образом, что при переходе от какого-либо атома к следующему заряд увеличивается на единицу и к оболочке добавляется один электрон. Заряд ядра определяет порядковый номер элемента.

По способу заполнения электронных оболочек все элементы разбиты на периоды. В первый период входят два элемента (H, He), у которых застраивается $1s^2$-оболочка. Второй и третий периоды содержат по 8 элементов, у которых застраивается сначала s^2-оболочка, ($2s^2$ и $3s^2$), а затем — p^6-оболочки ($2p^6$ и $3p^6$). Первые три периода обычно называют малыми.

Периоды с четвертого по седьмой занимают в таблице по два ряда и обычно называются большими. У элементов четвертого и пятого периодов прежде всего

ПЕРИОДЫ	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ I	II	III	IV	V
2	Li 6,939 3 ЛИТИЙ $2s^1$	Be 9,0122 4 БЕРИЛЛИЙ $2s^2$	5 10,811 B БОР $2s^2 2p^1$	6 12,01115 C УГЛЕРОД $2s^2 2p^2$	7 14,0067 N АЗОТ $2s^2 2p^3$
3	Na 22,9898 11 НАТРИЙ $3s^1$	Mg 24,312 12 МАГНИЙ $3s^2$	13 26,9815 Al АЛЮМИНИЙ $3s^2 3p^1$	14 28,086 Si КРЕМНИЙ $3s^2 3p^2$	15 30,9738 P ФОСФОР $3s^2 3p^3$
4	K 39,102 19 КАЛИЙ $4s^1$	Ca 40,08 20 КАЛЬЦИЙ $4s^2$	Sc 44,956 21 СКАНДИЙ $3d^1 4s^2$	Ti 47,90 22 ТИТАН $3d^2 4s^2$	V 50,942 23 ВАНАДИЙ $3d^3 4s^2$
	29 63,546 Cu МЕДЬ $(3d^{10}) 4s^1$	30 65,37 Zn ЦИНК $3d^{10} 4s^2$	31 69,72 Ga ГАЛЛИЙ $4s^2 4p^1$	32 72,59 Ge ГЕРМАНИЙ $4s^2 4p^2$	33 74,9216 As МЫШЬЯК $4s^2 4p^3$
5	Rb 85,47 37 РУБИДИЙ $5s^1$	Sr 87,62 38 СТРОНЦИЙ $5s^2$	Y 88,905 39 ИТТРИЙ $4d^1 5s^2$	Zr 91,22 40 ЦИРКОНИЙ $4d^2 5s^2$	Nb 92,906 41 НИОБИЙ $4d^4 5s^1$
	47 107,868 Ag СЕРЕБРО $4d^{10} 5s^1$	48 112,40 Cd КАДМИЙ $4d^{10} 5s^2$	49 114,82 In ИНДИЙ $5s^2 5p^1$	50 118,69 Sn ОЛОВО $5s^2 5p^2$	51 121,75 Sb СУРЬМА $5s^2 5p^3$
6	Cs 132,905 55 ЦЕЗИЙ $6s^1$	Ba 137,34 56 БАРИЙ $6s^2$	La 138,91 57 ЛАНТАН $5d^1 6s^2$	*58–71 Hf 178,49 72 ГАФНИЙ $5d^2 6s^2$	Ta 180,948 73 ТАНТАЛ $5d^3 6s^2$
	79 196,967 Au ЗОЛОТО $(5d^{10}) 6s^1$	80 200,59 Hg РТУТЬ $5d^{10} 6s^2$	81 204,37 Tl ТАЛЛИЙ $6s^2 6p^1$	82 207,19 Pb СВИНЕЦ $6s^2 6p^2$	83 208,980 Bi ВИСМУТ $6s^2 6p^3$
7	Fr [223] 87 ФРАНЦИЙ $7s^1$	Ra [226] 88 РАДИЙ $7s^2$	Ac [227] 89 АКТИНИЙ $6d^1 7s^2$	**90–103 Ku [261] 104 КУРЧАТОВИЙ $6d^3 7s^2$	Ns 273 105 НИЛЬСБОРИЙ $6d^4 7s^2$

* ЛАНТАНОИДЫ

140,12 $4f^2 6s^2$ 58 Ce ЦЕРИЙ	140,907 $4f^3 6s^2$ 59 Pr ПРАЗЕОДИМ	144,24 $4f^4 6s^2$ 60 Nd НЕОДИМ	[145] $4f^5 6s^2$ 61 Pm ПРОМЕТИЙ	150,35 $4f^6 6s^2$ 62 Sm САМАРИЙ	151,96 $4f^7 6s^2$ 63 Eu ЕВРОПИЙ
					157,25 $4f^7 5d^1 6s^2$ 64 Gd ГАДОЛИНИЙ

** АКТИНОИДЫ

232,088 $6d^2 7s^2$ 90 Th ТОРИЙ	[231] $5f^2 6d^1 7s^2$ 91 Pa ПРОТАКТИНИЙ	238,08 $5f^3 6d^1 7s^2$ 92 U УРАН	[237] $5f^4 6d^1 7s^2$ 93 Np НЕПТУНИЙ	[244] $5f^6 7s^2$ 94 Pu ПЛУТОНИЙ	[243] $5f^7 7s^2$ 95 Am АМЕРИЦИЙ
					[247] $5f^8 6d^1 7s^2$ 96 Cm КЮРИЙ

застраиваются s^2-оболочки ($1s^2$ и $5s^2$). После этого заполняется d^{10}-оболочка предыдущих слоев ($3d^{10}$ и $4d^{10}$) и, наконец, p^6-оболочки ($4p^6$ и $5p^6$). Оба эти периода содержат по 18 элементов.

Оболочки элементов шестого и седьмого периодов также застраиваются в одинаковой последовательности: сначала заполняются внешние s^2-оболочки ($6s^2$ и $7s^2$), после этого появляется один электрон на предыдущей d-оболочке (в атомах La и Ac), но в последующих элементах в основном заполняются более глубокие f-оболочки ($4f^{14}$ и $5f^{14}$) и лишь после этого достраивается d-оболочка ($5d^{10}$ и $6d^{10}$).

Элементы, у которых заполняются не внешние, а более глубокие оболочки, называются переходными. Так, в четвертом периоде к переходным относятся элементы от Sc до Zn, у которых застраивается 3d-оболочка, в

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

VI	VII	VIII	ПЕРИОДЫ
	1,00797 1:2 **H** 1 $1s^1$ ВОДОРОД	4,0026 3:4 **He** 2 $1s^2$ ГЕЛИЙ	1
8 15,9994 16–18 **O** $2s^2 2p^4$ КИСЛОРОД	9 18,9984 19 **F** $2s^2 2p^5$ ФТОР	20,183 21 22 **Ne** 10 $2s^2 2p^6$ НЕОН	2
16 32,064 32 34;36 **S** $3s^2 3p^4$ СЕРА	17 35,453 35;37 **Cl** $3s^2 3p^5$ ХЛОР	39,948 38;40 **Ar** 18 $3s^2 3p^6$ АРГОН	3
Cr 24 51,996 52–54 $3d^5 4s^1$ ХРОМ	**Mn** 25 54,9380 55 $3d^5 4s^2$ МАРГАНЕЦ	ТРИАДЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ → 26 55,847 54 56–58 **Fe** $3d^6 4s^2$ ЖЕЛЕЗО	27 58,9332 59 **Co** $3d^7 4s^2$ КОБАЛЬТ	28 58,71 58 60–62;64 **Ni** $3d^8 4s^2$ НИКЕЛЬ
34 78,96 74 76–78 **Se** $4s^2 4p^4$ СЕЛЕН	35 79,904 79;81 **Br** $4s^2 4p^5$ БРОМ	83,80 78 80;82–84 **Kr** 36 $4s^2 4p^6$ КРИПТОН	4	
Mo 42 95,94 94–97 98 100 $4d^5 5s^1$ МОЛИБДЕН	**Tc** 43 [97] 97 98 99 $4d^5 5s^2$ ТЕХНЕЦИЙ	ТРИАДЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ → 44 101,07 96 98–102 104 **Ru** $4d^7 5s^1$ РУТЕНИЙ	45 102,905 103 **Rh** $4d^8 5s^1$ РОДИЙ	46 106,4 102 104–106;108 110 **Pd** $4d^{10}$ ПАЛЛАДИЙ
52 127,60 120 122–126 128 130 $5s^2 5p^4$ ТЕЛЛУР	53 126,9044 127 **I** $5s^2 5p^5$ ИОД	131,30 124 126 128–132 134 136 **Xe** 54 $5s^2 5p^6$ КСЕНОН	5	
W 74 183,85 180 182–184 186 $5d^4 6s^2$ ВОЛЬФРАМ	**Re** 75 186,2 185 187 $5d^5 6s^2$ РЕНИЙ	ТРИАДЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ 76 190,2 184 186–190;192 194 **Os** $5d^6 6s^2$ ОСМИЙ	77 192,2 191;193 **Ir** $5d^7 6s^2$ ИРИДИЙ	78 195,09 190 192 194;195;196 198 **Pt** $5d^9 6s^1$ ПЛАТИНА
84 [209] 208 209 210–214 216 $6s^2 6p^4$ ПОЛОНИЙ	85 [210] 210 211 215 $6s^2 6p^5$ АСТАТ	[222] 219 220 221 216–218 222 $6s^2 6p^6$ РАДОН	6	
106			7	

158,924 159 **Tb** 65 $4f^9 6s^2$ ТЕРБИЙ	162,50 160–164 **Dy** 66 $4f^{10} 6s^2$ ДИСПРОЗИЙ	164,930 165 **Ho** 67 $4f^{11} 6s^2$ ГОЛЬМИЙ	167,26 162 164 166–170 168 **Er** 68 $4f^{12} 6s^2$ ЭРБИЙ	168,934 169 **Tm** 69 $4f^{13} 6s^2$ ТУЛИЙ	173,04 168 170–174 176 **Yb** 70 $4f^{14} 6s^2$ ИТТЕРБИЙ	174,97 175 176 **Lu** 71 $5d^1 6s^2$ ЛЮТЕЦИЙ

[247] 247 **Bk** 97 $(5f^8 6d^1 7s^2)$ БЕРКЛИЙ	[249] 246 248 249–252 254 **Cf** 98 $(5f^9 6d^1 7s^2)$ КАЛИФОРНИЙ	[254] 253 254 **Es** 99 $(5f^{11} 7s^2)$ ЭЙНШТЕЙНИЙ	[257] 254 (256) **Fm** 100 $(5f^{12} 7s^2)$ ФЕРМИЙ	[258] (256) **Md** 101 $(5f^{13} 7s^2)$ МЕНДЕЛЕВИЙ	[259] (254) **No** 102 $(5f^{14} 7s^2)$ (НОБЕЛИЙ)	[262] **Lr** 103 $(5f^{14} 6d^1 7s^2)$ ЛОУРЕНСИЙ

пятом — от Y до Cd (4d-переходные элементы), в шестом — от La до Hg, в седьмом — все элементы, стоящие после Ac.

Седьмой период остался незавершенным, поскольку у элементов с $Z \geq 83$ отсутствуют устойчивые изотопы, причем их нестабильность возрастает с увеличением Z. Таблица, таким образом, заканчивается последним из полученных искусственным путем элементов № 106.

Неустановившиеся названия, недостоверные электронные конфигурации и гипотетические массовые числа наиболее долгоживущих изотопов радиоактивных элементов приведены в скобках.

Взаимодействие электронов в оболочках приводит к тому, что у некоторых элементов оболочки заполняются не так, как им предписывает система: в четвертом периоде в атомах Cr и Cu число d-электронов увеличивает-

ся на два по сравнению с предшествующим на V и Ni за счет одного из 4s-электронов; в пятом периоде подобная «аномалия» наблюдается у Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, причем у Pd в d-оболочку опередил оба 5s-электрона; наконец, в шестом периоде на один s-электрон меньше, чем остальные, имеют атомы Os, Pt и Au; в f-переходных металлах «конкурируют» по энергии d- и f-состояния, поэтому у некоторых элементов очередной электрон попадает не в 4f (5f)-, а в 5d (6d)-оболочку: это происходит у Gd, Tb, Lu в группе редких земель и у Pa, U, Np, Cm, Bk, Lw — в группе актиноидов.

Кроме горизонтального разделения элементов в таблице по периодам производится вертикальное разделение их по группам. Элементы, входящие в каждую группу, имеют одинаковое строение внешних электронных оболочек. В помещенном на развороте «коротком» варианте таблицы каждый из больших периодов разбит на два ряда, помещенных один под другим, поэтому наряду с главными группами появляются побочные (промежуточные). В первых двух группах главную подгруппу составляют элементы, имеющие соответственно один и два s-электрона на внешней оболочке (2, 3, 4, 6, 8 и 10-й ряды), а в побочную подгруппу выделяются элементы с конфигурациями внешних оболочек $d^{10}s^1$ и $d^{10}s^2$ (5, 7, 9 й ряды). В группах с III по VII переходные элементы относятся к побочным подгруппам (4, 6, 8, 10-й ряды), а заполняющие p-оболочками — к главным (2, 3, 5, 7, 9-й ряды). Водород может быть отнесен к первой главной подгруппе, как имеющий один электрон в s-оболочке, и к седьмой, поскольку ему не хватает до заполненной оболочки одного электрона (пунктирная линия в таблице указывает на эти две возможности). У элементов благородных газов, составляющих восьмую группу, застроены все оболочки. Эти элементы замыкают периоды. Названия элементов главных подгрупп в таблице смещены влево, а побочных — вправо. В отдельные группы (триады) выделяются переходные элементы с почти заполненными d-оболочками (группы Fe, Pd и Pt). Особые группы составляют также элементы с застраивающимися 4f- и 5f-оболочками (лантаноиды и актиноиды).

Многие физические свойства элементов связаны с положением, которое они занимают в периодической системе. Так, атомные веса элементов возрастают с увеличением порядкового номера (исключение из этого правила составляют пары: Ar—K, Co—Ni, Te—J); некоторые свойства элементов в конденсированной фазе определяются их принадлежностью к той или иной группе: все чистые полупроводники входят в четвертую главную подгруппу (C, Si, Ge, Sn), только переходные металлы с незастроенными d- или f-оболочками обладают ферромагнитными (Fe, Co, Ni, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb) и антиферромагнитными (Cr, Mn, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) свойствами и т. д. Химические свойства элементов, входящих в одну группу, также сходны.

Наряду с рассмотренной здесь короткой формой системы элементов часто используют длинную, в которой нет подгрупп, а всем элементам, имеющим одинаковую структуру внешних электронных оболочек, находится по отдельной группе [1]. «Длинную» таблицу нередко изображают в ступенчатой форме (рис. 3.1),

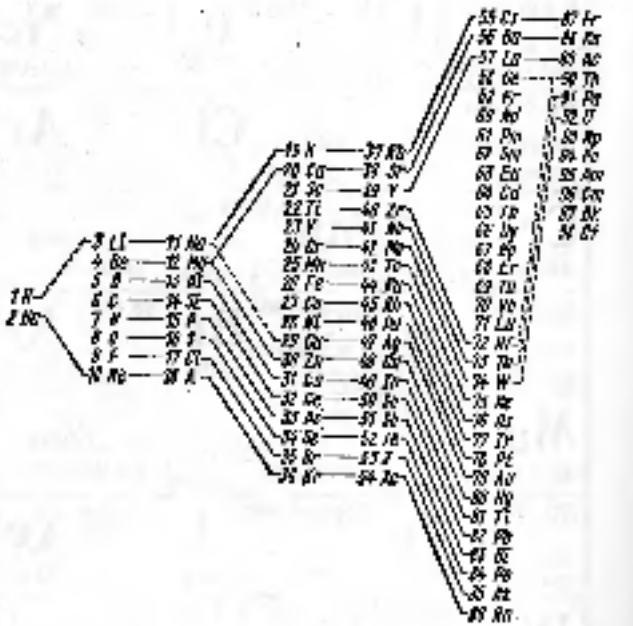


Рис. 3.1. «Длинная» периодическая система элементов

располагая периоды один за другим симметрично относительно оси таблицы, а элементы, принадлежащие к одной группе, соединяя линиями [2]. Предложены также другие варианты изображения системы в виде различных правых (спиралей, круговых диаграмм и т. п.). Но короткая форма, введенная Д. И. Менделеевым, является наиболее общеупотребительной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lexikon der Physik. Bd 3. Stuttgart, 1969.
2. Handbuch der Physik. Bd 36. Springer Verlag, 1956.

II. МЕХАНИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

ГЛАВА 4

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

4.1. МЕТАЛЛЫ

В таблицах приведены предел текучести $\sigma_т$, временное сопротивление разрыву $\sigma_{вр}$, модуль упругости E, модуль сдвига G, вязкость η, твердость материала по Бринеллю $H_Б$ (иногда твердость материала указана по Роквеллу H_R, в обоих случаях твердость пересчитана в единицу системы СИ).

Модуль продольной упругости (модуль Юнга) E и модуль сдвига G для однородных и изотропных материалов связаны с коэффициентом Пуассона μ (отношением поперечного сжатия на единицу ширины к продольному удлинению на единицу длины):

$$G = E/2(1+\mu).$$

Твердость материала связана с временным сопротивлением разрыву соотношением $\sigma_{вр} \approx H_Б/3$.

Таблица 4.1

Упругие свойства металлов [2, 6]

Материал	$\sigma_{вр}$, 10^8 н/м²	$\sigma_т$, 10^8 н/м²	$H_Б$, 10^8 н/м²	E, 10^{11} н/м²	G, 10^{11} н/м²	μ	η при $t = 20°C$, $10^6 \frac{н}{см \cdot сек}$
Алюминий отожженный	8,96—10,75 [1]	5,69—6,44 [1]	18,4 [1]	6,85 [1]	2,46 [1]	0,359—0,369 [1]	1,25
Ванадий отожженный	56,5	52,2	74,2	14,6	—	—	—
Висмут литой	—	—	—	3,19 [2]	1,2 [2]	0,33 [2]	—
Вольфрам отожженный	69,9—80,9	10,9	196*—245 [2]	34,2—40	8,6—21,5	—	9,37 [5]
Железо литое	1,84—22,5 [2]	—	—	10—13 [2]	3,5—5,3 [2]	0,23—0,31 [2]	14
Золото отожженное	12,4	—	18,9	8,06	2,91	0,422 [3]	12
Индий	5,05 [1]	3,0 [1]	0,98 [1]	5,2 [2]	—	—	10
Иридий	—	—	212 [4]	5,2 [2]	—	—	—
Калий литой	—	—	—	4,99 [2]	1,92 [2]	0,3 [2]	—
Кадмий	6,3	—	19,6	5,2	—	—	—
Калций	6,0 [6]	—	41,6 [6]	—	—	—	—
Кобальт отожженный	48,9	—	129,2	19,6—20,6	—	—	—
Литий литой	29,4	11,2	4,4	15,6	0,89	—	—
Медь деформированная	20—25 [7]	6,86 [7]	32 [7]	11,2 [7]	4,15 [7]	0,358—0,378 [7]	4,83** [7]
Молибден литой	30,8	29,4	134** [9]	30900** [3]	11510** [3]	0,324	—
Никель отожженный	34,3—56,1	20,5	90—120	20,2 [2]	7,7 [2]	0,300 [2]	6,3 [10]
Ниобий отожженный	32,2—40,6	—	73,6	15,6	—	—	—
Олово литое	1,47—2,4	1,17	4,6—5,2	4,06—5,86	1,64—1,78	0,33	36 [10]
Осмий	—	—	348,7	55,5	—	—	—
Палладий литой	18,2	—	31	11,3 [2]	6,11	0,390 [2]	—
Платина отожженная	14,0	—	29,9	14,7	6,09	0,387 [2]	1,7 [10]
Родий отожженный	55	—	54	27,6	—	—	—
Рутений отожженный	—	—	179,6	42,2	—	—	—
Свинец литой	1,47—1,75	0,49—0,98	3,75—4,18	1,62 [2]	0,562 [2]	0,446	15 [10]
Серебро отожженное	13,5	—	20,6	8,05	2,59	0,38—0,407 [8]	2,24 [8]
Тантал отожженный	31—44,7	—	44,1—122,4	18,6	—	—	—
Титан отожженный	29,6	7,5	102,8	—	—	—	—
Хром отожженный	—	—	68,8	—	—	—	—
Цинк литой	2,94—3,92	—	29,2—44,1	12,7	—	—	410
Цирконий	24,7	11,3	33,3	—	—	—	—

* Для спеченного штабика.
** При $t = 18°C$.
*** При $t = 45°C$.

Таблица 4.2

Упругие свойства сталей различных марок.

Для сталей различных марок $E = (19,5 \div 20,6) \cdot 10^{10}$ н/м², $G = (7,9 \div 8,9) \cdot 10^{10}$ н/м², $\mu = 0,25 \div 0,31$ [17]

Марка (состав, вес. %)		$\sigma_{пц}$, 10^8 н/м²	$\sigma_{т}$, 10^8 н/м²	$\sigma_{в}$, 10^8 н/м²
Ст. 0,8	(Fe; 0,05—0,1% C; 0,17—0,37% Si)	32,4	20,6	128,3
Ст. 10	(Fe; 0,07—0,013% C; 0,17—0,37% Si)	35,2	21,5	134,1
Ст. 20	(Fe; 0,17—0,27% C; 0,17—0,37% Si; 0,35—0,65% Mn)	52	43	162,1
Ст. 30	(Fe; 0,27—0,35% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn)	50,0—60,9	29,2	175,3
Ст. 40	(Fe; 0,37—0,44% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn)	59—71,3	33,4	212,2
Ст. 55	(Fe; 0,52—0,6% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn)	69,5—81,6	39,2	249,7
Ст. 70	(Fe; 0,67—0,76% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn)	76,4—88	43,0	263,4
Ст. 85	(Fe; 0,82—0,9% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn)	112,6	98	295,7
15Г	(Fe; 0,22—0,18% C; 0,17—0,37% Si; 0,7—0,1% Mn)	42—53	24,5	159,6
30Г	(Fe; 0,27—0,34% C; 0,17—0,37% Si; 0,7—0,1% Mn)	56,9—66,8	31,7	212,4
45Г	(Fe; 0,42—0,49% C; 0,17—0,37% Si; 0,7—0,1% Mn)	67,6—79,1	37,2	236
60Г	(Fe; 0,57—0,65% C; 0,17—0,37% Si; 0,9—1,2% Mn)	76,5—90	43	263,4
70Г	(Fe; 0,67—0,75% C; 0,17—0,37% Si; 0,9—1,2% Mn)	82—94	47	285,4
10Г2	(Fe; 0,07—0,12% C; 0,17—0,37% Si; 1,2—1,6% Mn)	41—57	26,4	182,9
30Г2	(Fe; 0,27—0,34% C; 0,17—0,37% Si; 1,4—1,8% Mn)	64,9—74,4	39,1	237
45Г2	(Fe; 0,42—0,49% C; 0,17—0,37% Si; 1,4—1,8% Mn)	76,2—90	47,8	239,7
50Г2	(Fe; 0,47—0,55% C; 0,17—0,37% Si; 1,4—1,8% Mn)	81,2—93	50,8	242,4
2Х13	(Fe; 0,16—0,24% C; 12,0—14,0% Cr; <0,6% Si; <0,6% Mn; <0,025% S; <0,03% P)	68,6	50	212,4—283,4
25ГЛ	(Fe; 0,2—0,3% C; 1,35—1,55% Si; 0,3—0,45% Mn)	49—64	29,4—34,3	134,1—156,1
35ГЛ	(Fe; 0,2—0,3% C; 1,7—1,9% Si; 0,3—0,45% Mn)	50—68,7	34,3—44	206,6
45ГЛ	(Fe; 0,35—0,45% C; 1,35—1,55% Si; 0,3—0,45% Mn)	60	39,4	196,9
Х18Н20	(Fe; 0,35% C; 0,86% Mn; 0,37% Si; 0,67% Cr; 1,78% Ni)	60,1	48	—
30ХМЛ	(Fe; 0,3% C; 0,5% Mn; 0,4% Si; 0,8% Cr; 0,2% Mo)	80,1	67,8	216,2
40ХГЛ	(Fe; 0,30% C; 1,38% Mn; 0,57% Si; 0,63% Cr)	89	54	—
30Н2ХГ2МЛ	(Fe; 0,3—0,35% C; 0,5—1,0% Mn; 0,6—0,9% Cr; 1,75—2,25% Ni; 0,15—0,25% Mo)	73,3—100,7	53,9—127,3	—
Г13Л	(Fe; 1,0—1,0% C; 10—13% Mn; <10% Si)	78,2—99	24,5—39,1	166,3—196,8
35МЛ	(Fe; 0,25—0,35% C; 0,5—0,8% Mn; 0,25—0,45% Si; 0,25—0,5% Cr; 0,3% Ni; 0,05% S; 0,05% P)	46	22,1	123
Х25Н2Л	(Fe; 0,4—0,6% C; 0,4—0,7% Mn; 1,0—2,0% Si; 24—26% Cr; 1,5—2,0% Ni; 0,04% Si; 0,04% P) (при t — 200°C)	38,4—43,3	14,4—15,4	196,7
15Х, закаленная	(Fe; 0,12—0,18% C; 0,17—0,37% Si; 0,4—0,7% Mn; <0,035% S; <0,035% P; 0,7—1,0% Cr; <0,25% Ni; <0,2% Cu)	12	57,6	—
20Х, закаленная	(Fe; 0,17—0,23% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn; <0,035% S; <0,035% P; 0,7—1,0% Cr; <0,25% Ni; <0,2% Cu)	77	57,8	—
40Х, закаленная	(Fe; 0,37—0,45% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn; <0,035% S; <0,035% P; 0,8—1,1% Cr; 0,25% Ni; <0,2% Cu)	115—121	87,5—88,5	372,5—396,5
30ХМ, закаленная	(Fe; 0,26—0,34% C; 0,17—0,37% Si; 0,4—0,7% Mn; <0,035% S; <0,035% P; 0,8—1,1% Cr; 0,15—0,25% Mo; <0,025% Ni; <0,2% Cu)	96	81,9	—
35ХС, закаленная	(Fe; 0,3—0,38% C; 1,0—1,3% Si; 0,5—0,8% Mn; <0,035% S; <0,035% P; 1,3—1,6% Cr; <0,25% Ni; <0,25% Cu)	91	76,9	—
40ХС, закаленная	(Fe; 0,37—0,45% C; 1,2—1,6% Si; 0,5—0,8% Mn; <0,035% S; <0,035% P; 1,3—1,6% Cr; <0,25% Ni; <0,2% Cu)	120	106	—
20ХГ, закаленная	(Fe; 0,17—0,25% C; 0,17—0,37% Si; 0,9—1,2% Mn; <0,035% S; <0,035% P; 0,9—1,2% Cr; <0,25% Ni; <0,2% Cu)	86,2	72	—
40ХГ, закаленная	(Fe; 0,37—0,45% C; 0,17—0,37% Si; 0,9—1,2% Mn; <0,035% S; <0,035% P; 0,9—1,2% Cr; <0,25% Ni; 0,2% Cu)	96	77	—

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}$, 10^6 н/м²	$\sigma_т$, 10^6 н/м²	H_B, 10^6 н/м²
30ХГТ, закаленная	(Fe; 0,24—0,32% C; 0,17—0,37% Si; 0,8—1,1% Mn; ≤ 0,035% S; ≤0,035% P; ≤ 0,2% Cu; 1,0—1,3% Cr; ≤ 0,25% Ni; 0,06—0,12% Ti)	144	125	—
35СГ, закаленная	(Fe; 0,32—0,4% C; 1,1—1,4% Si; 1,1—1,4% Mn; ≤ 0,35% S; ≤ 0,35% P; ≤ 0,25% Cr; ≤ 0,25% Ni; ≤ 0,2% Cu)	86,2	—	—
35ХГСА, закаленная	(Fe; 0,32—0,39% C; 1,1—1,4% Si; 0,8—1,1% Mn; ≤ 0,025% S; ≤ 0,025% P; 1,1—1,4% Cr; ≤ 0,2% Ni; ≤ 0,2% Cu)	160	134,1	—
25П, закаленная	(Fe; 0,2—0,3% C; 0,17—0,37% Si; 0,6—0,8% Mn; ≤ 0,04% S; ≤ 0,04% P; 0,3% Cr; ≤ 0,5—0,9% Ni; (≤ 0,3% Cu)	64,3—73	48—59,5	—
30П, закаленная	(Fe; 0,25—0,35% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn; ≤ 0,04% S; ≤ 0,04% P; 0,3% Cr; 0,8—1,2% Ni; ≤ 0,3% Cu)	63,2—73	46—59,5	—
20ХП, закаленная	(Fe; 0,17—0,23% C; 0,17—0,37% Si; 0,4—0,7% Mn; ≤ 0,035% S; ≤ 0,035% P; ≤ 0,2% Cu; 0,45—0,75% Cr; 1,0—1,4% Ni)	96	78,7	—
40ХН, закаленная	(Fe; 0,45% C; 0,93% Mn; 0,66% Cr; 1,25% Ni)	102,2	91	275,6
12ХН2, закаленная	(Fe; 0,16% C; 0,53% Mn; 0,55% Cr; 2,08% Ni)	102	86,2	298,6
20ХН3А, закаленная	(Fe; 0,23% C; 0,37% Mn; 0,71% Cr; 3,71% Ni)	89,5	28,0	.
30ХН3А, закаленная	(Fe; 0,33% C; 0,56% Mn; 0,71% Cr; 3,34% Ni)	63	57,2	.
12Х2Н4А, закаленная	(Fe; 0,26% C; 0,6% Mn; 1,5% Cr; 4,2% Ni)	125,6	108,7	327,4
18Х2Н4ВА, закаленная	(Fe; 0,2% C; 1,56% Cr; 4,2% Ni; 0,79% W)	105,9	77	308,2—372,5
35ХМЮА, закаленная	(Fe; 0,35—0,42% C; 0,17—0,37% Si; 0,3—0,6% Mn; ≤ 0,025% S; ≤ 0,025% P; 1,35—1,65% Cr; ≤ 0,2% Ni; ≤ 0,2% Cu; 0,7—0,11% Al; 0,15—0,25% Mo)	96	81,6	—
38ХВФЮ, закаленная	(Fe; 0,35—0,43% C; 0,17—0,37% Si; 0,2—0,4% Mn; ≤ 0,36% S; ≤ 0,30% P)	96	81,6	—
25Х2ГНТА, закаленная	(Fe; 0,23—0,29% C; 0,2—0,5% Si; 0,8—1,1% Mn; 1,4—1,8% Cr)	144	129	—
60С2, закаленная и отпущенная	(Fe; 0,58 C; 1,66% Si)	42	76,5	—
70С3, закаленная	(Fe; 0,72% C; 2,54% Si)	46,9	76	—
60С2ГН2А, закаленная	(Fe; 0,6% C; 1,37% Si; 1,4% Ni)	40	69,5	—
Ст. 2	(Fe; 0,09—0,15% C; 0,12—0,3% Si; 0,25—0,5% Mn; ≤ 0,05% S; 0,04% P; ≤0,3% Ni, Cu; ≤ 0,08% As)	32,5—40,4	20,1—21,1	—
Ст. 3	(Fe; 0,14—0,22% C; 0,12—0,3% Si; 0,4—0,65% Mn; ≤ 0,5% S; 0,04% P; ≤ 0,3% Ni; Cu; ≤ 0,08% As)	38,4—46,2	22—24	—
Ст. 5	(Fe; 0,21—0,37% C; 0,05—0,35% Si; 0,5—0,8% Mn; ≤ 0,05% S, ≤ 0,04% P; ≤ 0,3% Cr, Ni; ≤ 0,08 % As)	48—58,5	27,6—25,9	—

Таблица 4.3

Упругие свойства мартенситностареющих сталей [11]

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}$, 10^6 н/м²	$\sigma_т$, 10^6 н/м²	H_B, 10^6 н/м²
Н12М10К15 (Fe; 12,2% Ni; 14,1% Co; 10% Mo); закаленная и состаренная	250	245	—
кованая и состаренная	200	245	—
Н12К12М7В7 (Fe; 11,9% Ni; 12% Co; 7,8% Mo; 6,7% W), закаленная и состаренная	250	—	—
Н12М10К12ТЮ (Fe; 12,3% Ni; 9,6% Mo; 12% Co; 0,79% Ti; 0,94% Al), кованая и состаренная	294	269	—

Таблица 4.4

Упругие свойства сплавов алюминия

Для алюминиевых сплавов различных марок $E = (6,9 \div 7,1) \cdot 10^{10}$ *н/м²*; $G = (2,6 \div 2,7) \cdot 10^{10}$ *н/м²*; $\mu = 0,3 \div 0,33$ [7, 18]

Марка	Состав, вес. %	Состояние	$\sigma_{пр}$, 10^8 н/м²	$\sigma_{в}$, 10^8 н/м²	$\sigma_{ср}$, 10^8 н/м²
АМг	Al; 1,0—1,6% Mn	Нагартованный Полунагартованный Отожженный	21,5 12,7 12,7	37,12 — 4,9	53,9 39,2 29,4
АМг	Al; 0,15—0,4% Mn; 2,0—2,8% Mg	Полунагартованный Отожженный (АМгМ)	24,5 18,6	20,6 9,8	58,8 44,1
АМг5П	Al; 0,2—0,6% Mn; 4,7—5,7% Mg	Отожженный (АМг6ПМ)	26,4	14,7	68,5
АМг3	Al; 0,3—0,6% Mn; 3,2—3,6% Mg; 0,5—0,8% Si	Полунагартованный (АМг3П) Отожженный (АМг3М)	24,5 19,6	17,6 9,8	68,5 49
АМг5	Al; 0,3—0,6% Mn; 4,0—0,6% Mg	Полунагартованный (АМг5П) Отожженный (АМг5М)	29,4 25,4	19,6 13,7	78,3 63,7
АМг7	Al; 0,3—0,6% Mn; 6,0—7,5% Mg	Полунагартованный (АМг7П) Отожженный (АМг7М)	38,2 31,3	24,5 16,6	93 78,3
Д1 Д1П	Al; 3,8—4,8% Cu; 0,4—0,8% Mn; 0,4—0,8% Mg	Закаленный и естественно состаренный (Д1Т) Отожженный (Д1М)	41,1 26,5	23,5 10,8	110,4 44,1
Д6	Al; 4,6—6,2% Cu; 0,5—1,0%; Mn; 0,65—1,0% Mg	Закаленный и естественно состаренный (Д6Т) Отожженный (Д6М)	45 21,5	29,4 10,8	— —
Д16	Al; 3,8—4,9% Cu; 0,3—0,9% Mn; 1,2—1,8% Mg	Плакированные листы, закаленные и естественно состаренные Плакированные листы, отожженные	41,1 27,3	17,63 9,8	102,7 48,4
Д31	Al; 2,6—3,6% Cu; 0,3—0,7% Mn; 0,3—0,7% Mg	Закаленный и естественно состаренный (Д31Т) Отожженный (Д31М)	33,3 21,2	16,6 7,83	78,5 —
Д18П	Al; 2,2—3,0% Cu; 0,2—0,5% Mg	Закаленный и естественно состаренный (Д18ПТ) Отожженный (Д18М)	29,4 15,7	16,6 5,9	68,5 37,2

Марка	Состав, вес. %	Состояние	$\sigma_{вр}$, 10^6 н/м²	$\sigma_{т}$, 10^6 н/м²	H_B, 10^6 н/м²
АВ	Al; 0,2—0,6% Cu; 0,15—0,35% Mn; 0,45—0,9% Mg; 0,5—1,2% Si	Закаленный и естественно состаренный Закаленный (АВТ) Отожженный (АВМ)	32,4 21,6 17,7	27,5 11,7 —	93 63,6 29,4
АК2	Al; 3,5—4,5% Cu; 0,4—0,8% Mg; 0,5—1,0% Si; 1,8—2,8% Ni; 0,5—1,0% Fe	Закаленный	41,1	27,4	112,6
АК4	Al; 1,9—2,5% Cu; 1,4—1,8% Mg; 0,6—1,2% Si; 1,0—1,5% Fe; 1,2—1,6% Ni	Искусственно состаренный	43,1	26,4	117,5
АК4-1	Al; 1,9—2,5% Cu; 1,4—1,8% Mg; 1,0—1,6% Ni; 1,0—1,5% Fe	—	43,1		117,6
АК6	Al; 1,8—2,6% Cu; 0,4—1,0% Mn; 0,4—0,8% Mg; 0,7—1,2% Si	—	41,1	29,4	102,8
АК8	Al; 0,4—1,0% Mn; 0,4—0,8% Mg; 3,9—4,8% Cu; 0,6—1,2% Si	—	48	37,2	132,2
В-92	Al; 4,5% Mg; 3,3% Zn	Закаленный и состаренный	43,6—51,3	28,7—45,2	—
В-92п	Al; 3,2% Zn; 4,1% Mg; 0,7% Mn; 0,1% Zr	То же	44,5	28,7	—
В-95	Al; 1,4—2,0% Cu; 0,4—1,0% Mn; 1,8—2,8% Mg; 5,0—7,0% Zn; 0,1—0,25% Cr	»	53,9	45	146,9
В-96	Al; 8,5% Zn; 2,7% Mg; 2,3% Cu	»	67	53,2	—
В65	Al; 3,9—4,5% Cu; 0,3—0,5% Mn; 0,15—0,3% Mg	Закаленный и естественно состаренный	39,2	—	—
ВД17	Al; 2,6—3,2% Cu; 0,45—0,7% Mn; 2,0—2,2% Mg	Закаленный и искусственно состаренный	43,1	29,4	112,6
Д20	Al; 6—7% Cu; 0,4—0,8% Mn; 0,1—0,2% Ti	То же	41,1	29,4	—

Марка	Состав, вес. %	Состояние	$\sigma_{вр}$, кг/мм²	$\sigma_{т}$, кг/мм²	$\sigma_{в}$, кг/мм²
АЛ11	Al; 1,25—1,75% Mg; 3,75—6,0% Cu; 1,75—2,25% Ni;	Закаленный и частично состаренный	25,4	—	97,9
АЛ12	Al; 10—13% Si	—	21,5	—	63,8
АЛ3	Al; 0,2—0,8% Mg; 1,5—3,5% Cu; 4,0—6,0% Si; 0,2—0,8% Mn	Закаленный и частично состаренный	27,4	—	77,4
АЛ30	Al; 0,35—0,5% Mg; 1,5—3,5% Cu; 4,0—6,0% Si; 0,2—0,8% Mn	То же	28,4	—	117,5
АЛ4	Al; 0,17—0,3% Mg; 8,0—13,0% Si; 0,25—0,5% Mn	Закаленный и полностью состаренный	26,4	—	68,6
АЛ4В	Al; 0,2—0,4% Mg; 8,0—11,0% Si; 0,2—0,5% Mn	То же	21,5	—	122,4
АЛ5	Al; 0,35—0,6% Mg; 1,0—1,5% Cu; 4,5—5,5% Si	Закаленный и частично состаренный	26,4	—	88,1
АЛ6	Al; 2,0—3,0% Cu; 4,5—6,0% Si	То же	27,5	—	93
АЛ7В	Al; 3,0—5,0% Cu	»	29,4	—	88,1
АЛ8	Al; 9,5—11,5% Mg	Закаленный	32,4	—	78,3
АЛ9	Al; 0,2—0,4% Mg; 6,0—8,0% Si	Закаленный и частично состаренный	27,5	—	88,1
АЛ9В	Al; 0,2—0,5% Mg; 6,0—8,0% Si	То же	28,4	—	112,6
АЛ10В	Al; 0,2—0,5% Mg; 5,0—8,0% Cu; 4,0—6,0% Si	Закаленный и полностью состаренный	27,5	—	122,4
АЛ11	Al; 0,1—0,3% Mg; 6,0—8,0% Si; 10—14% Zn	—	22,6	—	88,1
АЛ12	Al; 9,0—11,0% Cu	Закаленный и полностью состаренный	19,6	—	—

Марка	Состав, вес. %	Состояние	$\sigma_{вр}$, 10^8 н/м²	$\sigma_{т}$, 10^8 н/м²	σ_{-1}, 10^8 н/м²
АЛ13	Al; 4,5—6,5% Mg; 0,8—1,3% Si; 0,1—0,4% Mn	—	19,6	—	87,7
АЛ14В	Al; 0,2—0,4% Mg; 1,5—3,0% Cu; 6,0—8,0% Si; 0,2—0,6% Mn	Закаленный и частично состаренный	20,4	—	117,5
АЛ15В	Al; 3,5—5,0% Cu; 3,0—5,0% Si; 1,3% Fe	То же	27,5	—	117,5
АЛ16В	Al; 2,0—4,0% Cu; 3,0—5,0% Si; 0,2—0,5% Mn; 2,0—4,0% Zn; 1,1% Fe	»	26,4	—	127,3
АЛ18В	Al; 7,9—9,5% Cu; 1,5—2,5% Si; 0,2—0,8% Mn; 1,1—1,8% Fe	»	20,5	—	112,6
AlCuA 132	Al; 0,1—1,3% Mg; 0,5—1,5% Cu; 11,0—13,0% Si; 2,0—3,0% Ni	»	29,4	—	122,4
RR-58	Al; 0,05—0,2% Mg; 0,9—2,0% Cu; 1,5—2,8% Si; 0,8—1,7% Ni; 1,4% Fe; 0,05—0,3% Ti + Nb	Состаренный	20,5	—	73,4
RR53П	Al; 0,65—0,9% Mg; 1,4—1,65% Cu; 0,6—0,8% Si; 1,0—1,4% Ni; 0,8—1,3% Fe; 0,16—0,33% Ti + Nb	Закаленный и полностью состаренный	34,3		127,3
АЛ17В	Al; 1,5—3,5% Cu; 3,0—6,0% Si; 0,7—0,6% Mn; 4,0—7,0% Zn; 1,1% Fe	Закаленный и частично состаренный	26,4	—	127,3
АСС-6-5	Al; 5—6% Sb; 4—5% Pb; 0,5—0,7% Mg	Литой в кокиль Прокатанный и отожженный	7,93 7,93	— —	30,7 29,9
АСМ	Al; 3,5—5% Sb; 0,5—0,7% Mg; ≤ 0,5%Si + Fe	Прокатанный и отожженный	8,23	—	26
АЦ-2,5	Al; 2,7—3,4% Ni	Литой в кокиль То же	13,7 16,6	— —	34,3 68,5
AlCuA 750	Al; 1,0% Ni; 1,0% Cu; 6,0% Sn	» Холоднокатаный	15,2 15,8	— —	44,1 49
XA750	Al; 0,5% Ni; 1,0% Cu; 2,5% Si; 6,5% Sn	Литой в кокиль Литой в кокиль и термообработанный	15,2 20,6	6,85 13,8	9,8 4,9

Марка	Состав, вес. %	Состояние	$\sigma_{пр}$, 10^8 н/м²	$\sigma_{т}$, 10^8 н/м²	H_B, 10^8 н/м²
XB950	Al; 0,4% Mg; 1,2% Ni; 2,0% Cu; 6,5% Sn	Литой в кокиль и термообработанный	20,6	13,7	71,4
XB905	Al; 0,3% Ni; 1,0% Cu; 6,0% Sn; 1,5% Si	Холоднокатаный Холоднокатаный и отожженный	12,6 14,8	16,2 6,6	68,5 93,0
Al—30% Sn	Al; 0—3,0% Cu; 25—30% Sn	Холоднодеформированный и отожженный	8,7—6,9	2,0	21,2—26,4

Таблица 4.5

Упругие свойства сплавов меди [7,8]

Марка	Состав, вес. %	$\sigma_{пр}$, 10^8 н/м²	$\sigma_{т}$, 10^8 н/м²	H_B, 10^8 н/м²	E, 10^{10} н/м²
ЛА 67-2,5	66—68% Cu; 2—3% Al; Zn	30,6—40,8	—	91,8	—
ЛАЖМц 66-6-3-2	64—68% Cu; 6—7% Al; 2—4% Fe; 1,5—2,0% Mn; Zn	66,3	—	163,2	—
ЛАЖ 60-1-1	59—61% Cu; 1,5—2,0% Al; 0,2—0,7% Si; 0,75—1,5% Fe; 0,1—0,6% Mn; Zn	40,8	25,5	91,8	—
ЛК80-3Л	79—81% Cu; 2,6—4,5% Si; Zn	30,6—46,0	16,3	96,9—112,2	—
ЛКС 80-3-3	79—81% Cu; 2,5—4,5% Si; 2—4% Pb; Zn	30,6—40,8	14,3	91,6—100,2	—
ЛМцС 58-2-2	57—60% Cu; 1,5—2,5% Mn; 1,5—2,5% Pb; Zn	30,6—40,8	24,5	31,4—91,8	—
ЛМцОС 58-2-2-2	56—60% Cu; 1,5—2,5% Mn; 1,5—2,5% Sn; 0,5—2,5% Pb; Zn	30,6	—	91,8—100,2	—

Марка	Состав, вес. %	$\sigma_{вр}$, 10^7 Н/м²	$\sigma_{т}$, 10^7 Н/м²	HB, 10^7 Н/м²	C, 10^{10} Н/м²
ЛМцЖ 52-4-1	53—58% Cu; 0,6—1,5% Fe; 3—4% Mn; Zn	51	30,6	100,2—142,6	—
ЛМцЖ 55-2-7	50—55% Cu; 0,5—1,5% Fe; 4—5% Mn; Zn	51	—	91,8—122,4	—
ЛС-59-1Л	57—61% Cu; 0,8—1,9% Sb; Zn	20,4—42,8	15,3	91,6—91,8	—
ЛЦ(Мц)ЖА 60-1-2-1-1	58—62% Cu; 0,5—1,5% Al; 0,5—1,1% Fe; 1,5—2,5% Mn; Zn	40,8—49,0	16,4—20,4	100,2—112,2	—
ПМц-48	48% Cu; Zn	21,4	—	133	—
ПМц-54	54% Cu; Zn	35,7		130,6	—
Бр. ОФ 10-1 (литье в кокиль)	Cu; 9—11% Sn; 0,8—1,2% P	25,6—35,7	20,4	91,8—122,4	10,5
Бр. ОЦ 10-2 (литье в кокиль)	Cu; 9—11% Sn; 2—4% Zn	20,4—25,5	—	91,8—107,1	10,2
Бр. ОЦН 5-2-5 (литье в кокиль)	Cu; 4,5—5,5 Sn; 1—3% Zn; 4,5—5,5% Ni	35,7	15,4	81,6	—
Бр. ОНС 11-4-3 (литье в кокиль)	Cu; 10—22% Sn; 3% Pb; 4% Ni	20,4—28,6	18,4	—	—
Бр. ОЦС 6-6-3 (литье в кокиль)	Cu; 5,0—6,0% Sn; 5,0—7,0% Zn; 4,0—6,0% Pb	18,4—25,5	8,16—10,2	66,3—76,5	9,18
Бр. ОЦС 6-5-5 (литье в кокиль)	Cu; 4,0—6,0 Sn; 4,0—6,0% Zn; 4,0—6,0% Pb	20,4—25,5	8,16—10,2	61,2—76,5	9,18

Марка	Состав, вес. %	$\sigma_{вр}$, 10^6 н/м²	$\sigma_{т}$, 10^6 н/м²	H_B, 10^6 н/м²	δ, 10^{10} н/м²
Бр. ОЦСН 3-7-5-1 (литье в кокиль)	Cu; 2,5—4,5% Sn; 6,0—9,5% Zn; 3,0—6,0% Pb; 0,5—1,5% Ni	21,4	—	61,2	—
Бр. ОЦС 3-12-5 (литье в кокиль)	Cu; 2,0—4,0% Sn; 8,0—15,0% Zn; 3,0—6,0% Pb	21,4	—	61,2	—
Бр. ОФ 6,5-0,4: мягкая твердая	Cu; 6—7% Sn; 0,3—0,4% P	35,7—40,9 71,4—81,6	20,4—25,5 60,2—66,3	71,4—91,8 163,2—204	— —
Бр. ОФ 4-0,25: мягкая твердая	Cu; 3,5—4% Sn; 0,25% P	34,2 61,2	— 35,7	65,1—71,4 163,2—175,4	10,2 10,2
Бр. ОЦ 4-3: мягкая твердая	Cu; 3,5—4% Sn; 2,7—3,3% Zn	35,7 76,1	— —	61,2 163,2	— 12,65
Бр. ОЦС 4-4-2,5: мягкая твердая	Cu; 3—5% Sn; 3—5% Zn; 1,5—2,5% Pb	30,6—35,7 56,1—64,3	12,9 28,6	61,2 163,2—163,6	— —
Бр. ОФ 7-0,2 мягкая	Cu; 6—8% Sn; 0,1—0,25% P	36,7	23,5	76,5	11,0
Бр. ОЦС 4-4-4 мягкая	Cu; 3,5—4,5% Sn; 4% Zn; 2% Pb	31,6	13,3	63,2	—
Бр. А5: мягкая твердая	Cu; 4—6% Al	36,7 81,6	16,3 51	61,2 200,4	10,2 11,2
Бр. А7: мягкая твердая	Cu; 6—8% Al	42,8 102	— —	71,4 107,1	11,7—13,3

Марка	Состав, вес. %	$\sigma_{пр}$, 10^8 н/м²	σ_T, 10^8 н/м²	H_B, 10^8 н/м²	E, 10^{10} н/м²
Бр. АЖ 9-4: мягкая: твердая	Cu; 8—10% Al; 2—4% Fe	56,1 61,2	22,4 25,7	112,2 163,2—204	11,4 11,8
Бр. АЖН 10-4-4: мягкая: твердая	Cu; 9,5—11% Al; 3,5—5,5% Fe; 3,5—5,5% Ni	61,2 76,5	— —	141,6—163,3 269,5	— 13,3
Бр. АМЦ 9-2: мягкая: твердая	Cu; 8—10% Al; 1,5—2,5% Mn	40,8 61,2	30,6 51	163,2 —	— —
Бр. АЖНЦ 10-3-1,5: мягкая: твердая	Cu; 9—11% Al; 2—4% Fe; 1—2% Mn	40 62,2	— 60	— —	— —
Бр. Мц5: литая: мягкая: твердая	Cu; 4,5—5% Mn	28,5 30,6 61,2	15,3 — 51	71,4 81,6 163,2	10,7 — —
Бр. Б2: литая: мягкая: твердая	Cu; 0,2—0,5% Ni; 1,9—2,2% Be	51 51 132,6—142,8	— 25,5—35,7 130,6	142,8 119,3 357	— 11,9 13,5—14,4
МНЖ 5-1: мягкий: твердый	Cu; 5—6,5% Ni + Co; 1,0—1,4% Fe; 0,3—0,8% Mn	24,5—28,6[a] 45,9—51[b]	— —	35,7—51 112,2—122,4	— —
МГА 13-3: мягкий: твердый	Cu; 12—15% Ni + Co; 2,3—3% Al	71,4[c] 91,8—10,2[e]	— —	76,5[d] 255—275,4[e]	— —
МНА 6-1,5: мягкий: твердый	Cu; 5,5—6,5% Ni + Co; 1,5—1,8% Al	36,7[d] 66,3[e]	— —	61,2—71,4 204[e]	— —
МНЦ 15-20: мягкий: твердый	Cu; 13,5—16,5% Ni + Co; 18—22% Zn	40,8 68,3	— —	71,4 108,3	12,6 12,6
МНЦС 17-18-1,8: мягкий: твердый	61—64,9% Cu; 16,5—18,0% Ni + Co; 1,6—2,0% Pb; Zn	40,8 66,3	— —	— —	12,9 12,9

Марка	Состав, вес. %	$\sigma_{пр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_{т}$, 10^7 н/м²	H_B, 10^7 н/м²	E, 10^{10} н/м²
МН 19: мягкий твердый	Cu; 18—20% Ni + Co	36,7 56,1	— —	71,4 122,4	14,3 14,3
МНЖКМц 30-0,8-1: мягкий твердый	Cu; 29—30% Ni + Co; 0,6—1,0% Fe; 0,8—1,3% Mn	38,8 61,2	— —	71,4 193,6	15,7 15,7
ТП: мягкий твердый	Cu; 0,57—0,63% Ni + Co	36,6 36,7	— —	51—61,2 —	12,2 12,2
ТБ: мягкий твердый	Cu; 16,3—16,3% Ni + Co	32,6 56,1	— —	71,4 122,4	7,9 8,5
МНМц 3-12: мягкий твердый	Cu; 2,5—3,5% Ni + Co; 11,5—13,5% Mn	43,9 86,7	— —	122,4 —	12,9 12,9
МНМц 43-1,5: мягкий твердый	Cu; 39—41% Ni + Co; 1—2 %Mn	45,9 66,3	— —	81,6 159,1	16,9 16,9
МНМц 43-0,5: мягкий твердый	Cu; 42,5—44% Ni + Co; 0,1—1,2% Mn	40,8 66,3	— —	86,7 178,5	12,2 12,2

а — отожженный; б — деформированный на 50%; в — состаренный; г — закаленный при 900°С; д — отожженный при 400°С после закалки при 900°С.

Таблица 4.6

Упругие свойства сплавов никеля, кобальта и свинца [7, 8]

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{пр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_{т}$, 10^7 н/м²	H_B, 10^7 н/м²	E, 10^{10} н/м²
НМц 2,5, отожженный (Ni + Co; 2,3—3,3% Mn)	45,9—51	16,8—22,4	—	21,4
МП12, закаленный и состаренный (Pb; 14—16% Sb; 2,7—3,3% As)	—	—	43,9—46,9	—
МСМ1, закаленный и состаренный (Pb; 9,5—10,5% Sb; 2,0—2,5% As)	—	—	35,7—40,8	—

Упругие свойства сплавов олова [7, 8]

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_{т}$, 10^7 н/м²	H_B, 10^7 н/м²	E, 10^{10} н/м²
Б83 (Sn; 10—12% Sb; 5,5—6,5% Cu)	9,16	6,83	30,6	4,0
Б89 (Sn; 7,25—8,25% Sb; 2,5—3,5% Cu)	8,16	6,32	24,79	5,81
Б91 (Sn; 4,5% Sb; 4,5% Cu)	8,16	—	22,4	—
Б98 (Sn; 3,5% Sb; 3,5% Cu)	6,83	5,4	14,28	—
Б99А (Sn; 5,0% Sb; 2,0% Cu)	6,0	4,89	16,42	—
БО6 (Pb; 5,5—6,5% Sb; 5,5—6,5% Cu)	6,83	—	17,24	—
Б6 (Pb; 5,0—6,0 Sn; 14—16% Sb; 2,5—3,0 Cu)	6,93	—	32,64	—
БТ (Pb; 9,0—11,0% Sn; 14—16% Sb; 0,7—1,1% Cu)	6,12	5,92	—	—
БН (Pb; 9,0—11,0% Sn; 13—15% Sb; 1,5—2,0% Cu)	7,14	6,12	29,58	
Б16 (Pb; 16—17% Sn; 15—17% Sb; 1,5—2,0% Cu)	7,95	—	30,6	—
БС (Pb; 16—18% Sb; 1,0—1,5% Cu)	4,28	—	20,4	—
БК2 (Pb; 1,5—2,5% Sn)	9,49	—	20,09	
Сплав II (Pb; 1,0—2,0% Sn)	7,85	—	27,54	—
БК (Pb; ≤ 0,25 Sb)	10,2	—	32,64	2,24
Л 199 (87—91,1% Sn; 8,9% Zn; 43% Fe)	7,65	—	14,28	—
Л 163 (60—71% Sn; 30—38,1% Pb; 5,0% Zn)	5,3	—	12,85	—
Л 145 (44,8% Sn; 32,0% Pb; 18,2% Cd)	6,83	—	15,01	—
Л 141 (67—75% Sn; 32,25% Pb)	5,93	—	23,77	—
Л 130 (52% Sn; 30% Pb; 13% Cd)	7,75	—	30,6	—

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_{т}$, 10^7 н/м²	H_{B}, 10^7 н/м²	σ_{-1}, 10^{8} н/м²
ПОС 90 (89—90% Sn; ≤ 0,15% Sb; Pb)	4,39	—	13,26	—
ПОС 50 (49,5% Sn; ≤ 0,8% Sb; Pb)	3,88	—	15,2	—
ПОС 25	2,86	—	10,71	—
ПОС 20 (19—20% Sn; ≤ 0,3% Sb; 80—82% Pb)	2,74	—	10,2	—
ПОС 10	3,26	—	11,02	—
ПОСС 5-3 (4,5—5,5% Sn; 2—3% Sb; 92% Pb)	10,81	—	9,89	—
ПСр 2,5 (5,0—6,0% Sn; 2,2—2,8% Ag; 83—91% Pb);	11,22	—	—	—
ПОЦ 60 (60% Sn; 40% Zn)	7,24	5,71	19,04	—
ПСР 1,5А (0,75—1,25% Sn; 1,3—1,7% Ag; ≤ 0,4% Sb; 97,5% Pb)	3,37	—	23,15	—
ПСР 2,5 А(0,25% Sn; 2,3—2,7% Ag; ≤ 0,4% Sb; 97,5% Pb)	3,16	—	9,38	—

Таблица 4.8

Упругие свойства сплавов титана [7, 8, 12, 13]

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_{т}$, 10^7 н/м²	H_{B}, 10^7 н/м²	G, 10^{10} н/м²	σ_{-1}, 10^{8} н/м²	μ
ВТ3 (Ti; 4—6,2% Al; 2—5% Cr)	96,9—117,3	86,7—107,1	27,5—36,7*	11,2	4,33	0,3
ВТ3-1 (Ti; 4—6,2% Al; 1,5—2,5% Cr; 1—2,5% Mo)	96,9—122,4	86,7—112,2	27,5—36,7*	11,7	4,39	0,3
ВТ4 (Ti; 4—7% Al; 1—2% Mn)	81,6—91,8	71,4—81,6	—	11,2—12,2	4,26	0,31
ОТ4 (Ti; 2—3,5% Al; 1—2% Mn)	71,4—86,7	56,1—66,3	61,2—71,4*	11,2—12,2	4,08	—
ВТ5 (Ti; 5,5% Al)	81,6—96,9	71,4—86,7	—	10,6	4,39	0,3
ВТ6 (Ti; 5,0—6,5% Al; 3,5—4,5% V)	91,8—102	81,6—91,8	326,4—367,2	11,6	—	—
ВТ8 (Ti; 5,8—6,8% Al; 2,8—3,8% Mo)	107,1—120,4	96,9—112,2	316,2—357	11,2	4,31	0,3
ВТ9, закаленный и состаренный (Ti; 2,8—3,8% Mo; 5,8—6,8% Al; 1,8—2,8% Sn)	112—127	98—113	—	—	—	—
ВТ10, отожженный (Ti; 5—6% Al; 2,8—3,5% Cr; 2—3% Sn)	98—115	90—98	—	11,8	—	—
ВТ14, закаленный и состаренный (Ti; 3,5—4,5% Al; 2,5—3,6% Mo; 0,7—1,5% V)	113—137	106—127	333—353	10,8	—	—
ВТ15, закаленный и состаренный (Ti; 3—4% Al; 7—8% Mo; 10—11,5% Cr)	133—147	123—142	—	—	—	—

* Твердость по Роквеллу, шкала С.

Таблица 4.9

Упругие свойства сплавов цинка [7, 8]

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}$, 10^8 н/м²	$\sigma_т$, 10^8 н/м²	σ_B, 10^8 н/м²	E, 10^{10} н/м²
(Zn; 4% Al; 0,04% Mg)	25,5—30,0	—	71,4—91,8	—
(Zn; 4% Al; 1% Cu; 0,04% Mg)	27,5—33,7	—	61,6—102	—
(Zn; 4% Al; 3% Cu; 0,05% Mg)	32,6—38,8	—	81,6—122,4	—
ЦАМ 10-5 (Zn; 9—12% Al; 4—4,5% Cu; 0,3—0,06% Mg)	30,6	—	102	—
ЦАМ 9-1,5 (Zn; 8—11% Al; 1,0—2,0% Cu; 0,03—0,06% Mg)	30,6	—	98,0	—
ЦМ-1 (Zn; 0,8—1,2% Cu)	20,4—30,6	—	45,9—76,5	—
ЦАМ 6,2—4 (Zn; 0,2—0,25% Al; 3,5—4,5% Cu)	30,6—36,7	—	76,5—91,8	12,8
ЦАМ 4-1 (Zn; 3,7—4,3% Al; 0,6—1,0% Cu; 0,02—0,05% Mg)	37,7—44,9	—	91,8—107,1	13,3
ЦАМ 10-1 (Zn; 9—11% Al; 0,6—1,0% Cu; 0,02—0,05% Mg)	40,8—46,9	—	91,8—112,2	13,3
ЦАМ 10-5 (Zn; 9—11% Al; 4,5—5,5% Cu)	35,7—45,9	—	91,8—112,2	—
ЦА 15 (Zn; 14—16% Al; 0,04% Mg)	25,5—40,8	—	61,2—102	11,5

Таблица 4.10

Упругие свойства сплавов платины [7, 8]

Сплав (состав, вес. %)	Состояние	$\sigma_{вр}$, 10^8 н/м²	$\sigma_т$, 10^8 н/м²	σ_B, 10^8 н/м²
96,5% Pt; 3,5% Rh	Наклепанный	42,8	—	132,6
	Отожженный	17,8	—	71,4
90% Pt; 10% Rh	Наклепанный	64,3	—	169,3
	Отожженный	32,1	—	91,8
80% Pt; 20% Rh	Наклепанный	92,8	—	214,2
	Отожженный	49,9	—	152,4
95% Pt; 5% Ir	Холоднообработанный	50	—	142,8
	Отожженный	26,8	—	91,9
90% Pt; 10% Ir	Холоднообработанный	64,3	—	191,7
	Отожженный	39,3	—	132,6
80% Pt; 20% Ir	Холоднообработанный	103,5	—	270,3
	Отожженный	71,5	—	204
70% Pt; 30% Ir	Холоднообработанный	143	—	285,6
	Отожженный	114,2	—	266,2
95% Pt; 5% Au	Наклепанный	45,4	—	156,1
	Отожженный	32,1	—	93,8
90% Pt; 10% Au	Наклепанный	64,3	—	225,4
	Отожженный	55,4	—	145,9
30% Pt; 70% Au	»	46,4	—	137,7
10% Pt; 90% Au	»	25,7	—	61,2
90,92% Au; 9,08% Cu	»	56,5	—	—

Таблица 4.11

Упругие свойства сплавов вольфрама [7, 8]

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}$, 10^8 н/м²	$\sigma_т$, 10^8 н/м²	σ_B, 10^8 н/м²
ВК (47—63% Co; 27—33% Cr; 13—17% W; ≤ 2% Ni; ≤ 2% Fe; 1—2% Si; 1,0% Mn; 1,8—2,5% C)	61,2—71,4	—	45,9—47,9
ВЭК (58—62% Co; 26—32% Cr; 4—5% W; ≤2% Ni; ≤2% Fe; 2,5% Si; 1,0—2,5% C)	61,2—71,4	—	40,8—42,8

Таблица 4.12

Упругие свойства металлокерамических твердых сплавов [7, 8]

Состав (смесь, вес. %)	$\sigma_{в.изг}$, 10^7 н/м²	$\sigma_{сж}$, 10^7 н/м²	H_{RA}, 10^8 н/м²	E, 10^{10} н/м²
97% WC; 3% Co	102—122,4	601,8	92,8—94,9	68,9
94% WC; 6% Co	163,2—193,6	510	91,8—92,8	64,3
91% WC; 9% Co	153—193,8	489,6	90,8—91,8	60,2
80% WC; 20% Co	204—244,8	346,8	84,7—87,7	51
70% WC; 30% Co	—	—	81,6—83,6	—
94% WC; 1% TiC; 5% Co	142,8—163,2	571,2	93,8—94,8	64,3
86% WC; 5% TiC; 9% Co	173—163,2	460	90,8—91,8	60,2
82% WC; 10% TiC; 8% Co	153—173,4	—	91,8—92,8	—
78% WC; 16% TiC; 6% Co	112,2—127,5	438,6	91,8—93,3	63
69% WC; 25% TiC; 6% Co	91,8—112,2	—	91,8—92,8	—
34% WC; 60% TiC; 6% Co	71,4—81,6	397,6	93,8—94,9	38,8
85% WC; 4% TiC; 1% TaC (NbC); 10% Co	173,4—193,8	—	90,8—91,8	56,1
80,5% WC; 6% TiC; 5,5% TaC (NbC); 9% Co	173,4—204	—	91,8—92,8	57,1
76% WC; 7,5% TiC; 6,9% TaC (NbC); 10% Co	173,4—204	458	90,8—91,8	53
62% WC; 12% TiC; 18% TaC (NbC); 8% Co	122,4—142,8	520,2	92,8—93,8	61,3
59% WC; 12% TiC; 18% TaC (NbC); 11% Co	132,6—153	408	91,8—92,8	57,1
70,5% WC; 13,5% TiC; 7,5% TaC (NbC); 8,5% Co	132,6—153	479,4	92,8—93,8	51
ВК2 (98% WC; 2% Co)	102	—	91,8	—
ВК3 (97% WC; 3% Co)	102	—	90,8	
ВК6 (94% WC; 6%Co)	122,4	—	89,8	—
ВК8 (92% WC; 8% Co)	132,6	—	89,3	
ВК4 (96% WC; 4% Co)	122,4	—	91,3	—
ВК6 мелкозернистый (94% WC; 6% Co)	122,4	—	90,8	—

Таблица 4.13

Упругие свойства биметаллов [7, 8]

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	H_B, 10^8 н/м²	E, 10^{10} н/м²
90/10 (90% Al; 10% Cu):				
мягкий	9,18—11,2	4,08—5,1	34,7—38,8	7,45
твердый	18,4—20,4	13,3—15,3	61,2—65,3	—
5/90/5 (5% Cu; 90% Al; 5% Cu):				
мягкий	9,18—11,2	4,08—5,1	30,6—34,7	7,24
твердый	18,4—20,4	14,3—16,3	61,2—65,3	—
80/20 (20% Cu; 80% Al):				
мягкий	10,2—12,2	4,59—5,61	37,7—41,8	7,65
твердый	19,4—21,4	16,3—18,4	66,3—71,4	—
10/80/10 (10% Cu; 80% Al; 10% Cu):				
мягкий	10,2—12,2	4,59—5,61	32,6—36,7	7,34
твердый	19,4—21,4	16,5—18,4	67,3—71,4	—
70/30 (70% Al; 30% Cu):				
мягкий	12,2—14,3	5,1—6,12	38,8—42,9	8,27
твердый	20,4—23,5	17,3—19,4	71,4—76,5	—
15/70/15 (15% Cu; 70% Al; 15% Cu):				
мягкий	12,2—14,3	5,1—6,12	38,8—42,8	7,55
твердый	30,4—23,5	18,4—20,4	73,4—77,5	—
Д16АМ	23,5—24,5	—	—	—
Д16АТ	42,3—44,4	28,1—28,6	—	—
Д16АТ11	44,4—47,4	34,7—35,7	—	—
Д1АМ	23,5—24,5	—	—	—
Д1АТ	37,7—38,8	19,4—20,4	—	—

Таблица 4.14

Упругие и прочностные свойства пластмасс [9, 16]

Пластмасса	σ_p, 10^8 н/м²	$\sigma_{н.сж}$, 10^8 н/м²	$\sigma_{б.изг}$, 10^8 н/м²	$\Pi_Б$, 10^{10} н/м²	E, 10^{10} н/м² (при растяжении)
Аминопласт	3,6	9,8	5,9—7,8	34—51	0,74—0,98
Асботекстолит	6,4—11,7	12,3—30,1	10,8—8,6	29,4—44	1,37—1,96
Винипласт	3,92—5,88	7,84—15,7	9,8—11,8	14,7—15,7	0,039
Гетинакс электротехнический (П)	7,84	16,2—98,4	9,8	24,5	1,16—2,06
Гранулированный сополимер	3,9	—	8,3	11,8	0,2—0,26 (при изгибе)
Древесно-слоистый пластик ЛСП-Б (длинный лист)	21,6	15,2	25,5	24,6	2,9
Древесный хортитеволокнистый волокнит К-ФВ95	2,94	12,7	4,9—6,9	26,5	—
Капроновая смола:					
первичная	5,9	7,8	8,6	9,8—11,8	0,098—0,123
вторичная	6,86—7,8	8,8—9,8	9,8	—	0,098—0,123
Капрон стеклонаполненный	14,7—17,6	11,8	20,6—24,5	19,6—21,6	0,74—0,83
Линейный материал ПУ-1 А и Б	4,9—5,88	7,8—8,3	6,86—7,8		—
ЭП-12 А	—	—	5,9	9,8	—
Пенопласт плитовый ПВХ-2	0,44—0,45	0,147	—	—	0,046—0,02
Пенопласт ФК-90	0,17	0,098	—	—	—
Полиамид:					
наполненный П-68 Т20	4,9—5,9	9,3—9,8	9,3—9,8	14,7—17,6	0,116—0,196
стеклонаполненный СП-68	7,35—8,3	10,8	12,25—14,7	27,4—29,4	0,78
Полиакрилатных ноориентированный	2,9—4,9	5,15—5,9	3,8—10,8	—	—
Полиэтиленамид	5,9—6,37	6,7—7,8	6,8	9,8—11,8	—
Полиэтиленов стеклонаполненный	12,7—14,7	11,8—12,85	21,6—24,5	19,6—21,6	—
Поликарбонат (лифиль)	5,9—8,7	7,8—8,8	7,8	14,7—16,7	0,216—0,245
Поликарбонат стеклонаполненный	12,35—14,75	13,03	17,15—21,06	—	—
Полипропилен ПП-1	2,45	5,9	7,8	6,17	0,088—0,117 (при изгибе)
Полипропилен стеклонаполненный	5,5	4,8	6,9	—	—
Полистирол:					
эмульсионный А	3,4—3,9	9,8	9,8	13,7—14,7	0,255
суспензионный ПС-С	3,9	—	4,9	—	—
стеклонаполненный	7,25—10,3	9,8—11,7	10,3—13,0	—	—
Полиформальдегид стабилизированный	5,9—6,9	12,7	7,8	19,6—39,2	—
Полиэтилен:					
высокого давления кабельный П-2006-5	1,18—1,37	—	0,74	1,16—2,45	0,015—0,026
высокого давления П 2006-Т	1,37	1,23	1,18—1,67	12,7 (по Гинкелду)	2,015—0,025
низкого давления П-4007-Э	2,16	2,45	2,16	4,4—5,7	0,054 (при изгибе)
среднего давления	2,65—3,23	—	2,45—3,9	6,5—6,4	0,078—0,098
Пресс-материал:					
горячего прессования ВЭИ-11	—	—	2,45	—	—
холодного прессования ВЭИ-11	—	—	1,96	—	—
АГ 4ПС	88,2	39,2	53,8	—	—
К-41-5	17,15	12,99	4,9	—	—
Сополимер МСН-А	—	8,8—9,8	—	15,7—17,6	—
Сополимер стирола с метилстиролом	—	—	6,9	—	0,304
Стекло органическое ПА, ПБ, ПВ	4,9	11,8—15,7	7,8—13,7	6,9—11,8	0,314—0,392
Стекло текстолит СТЭР-1-30	29,4	29,4	39,2	—	2,45
Текстолит:					
поделочный ПТК	9,8	24,5	15,7	29,4—34,3	0,39—0,63
металлургический	-	19,6	—	39,4	—
графитированный	6,8	10,6	11,8	-	—
Фаолит А	1,7	3,9	4,9	24,5—32,3	—
Фторопласт-3	2,9—3,9	1,98—5,6	5,9—7,8	-	9,8—12,7
Фторопласт-4	2,2	1,18	1,37	2,9—3,9	0,046—0,093 (при t=60°С)
Фторопласт 4Д-Б	1,37	1,96	1,09	2,9—3,9	0,046—0,083 (при t=60°С)

Наименование	$\sigma_в$, 10^8 н/м²	$\sigma_{н.\ сж.}$, 10^8 н/м²	$\sigma_{и.\ изг.}$, 10^8 н/м²	$H_Б$, 10^8 н/м²	E, 10^{10} н/м² (при растяжении)
Этрол этилцеллюлозный ЭПТ:					
технический	2,9	4,4	3,3—3,9	4,4—5,9	0,216
ацетобутиратцеллюлозный АВЦЭ-45-20	1,7—4,6	5,15—14,7	1,47—8,8	3,9—5,9	—
нитроцеллюлозный	2,45—4,9	13,7—19,6	2,9—5,9	5,9—13,7	0,176—0,27
Целлулоид белый технический	3,4	—	4,9	5,9	0,113

Таблица 4.15

Свойства технических резин [7, 8]

Сорт резины	Прочность при растяжении, 10^8 н/м²	Удлинение при разрушении, %	Твердость, 10^8 н/м²
Мягкая эластичная	29,4—58,8	200—400	4,4—6,37
Средней твердости и эластичности	44—73,5	300—600	6,86—10,78
Жесткая, упругая	44—98	250—600	11,2—17,4
Теплостойкая, мягкая	44—127,4	300—600	5,1—6,45
Теплостойкая, неэластичная	29,4—78,5	100—200	12,3—17,4
Маслостойкая, средней и твердой эластичности	49—98	300—600	7,25—10,78
Маслостойкая, неэластичная	44—58,8	300—600	11,8—16,3
Маслостойкая, мягкая	74	600—700	4,2—5,7

4.5. МИНЕРАЛЫ И ВОЛОКНА

Таблица 4.16

Твердость минералов [10, 18]

Минерал	Химическая формула	Микротвердость, 10^8 н/м²	Твердость по шкале Мооса
Азурит	$2\ CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$	—	3,77—3,83
Алмаз (природный, боровит)	C	9659	10
Берилл	$Be_3Al_2[Si_6O_{18}]$	1121—1458	7,5—8,0
Гранат	$Fe_3Al_2[SiO_4]_3$	1203—1264	—
Графит	C	6,8—11,8	1—2
Кварц	SiO_2	1002—1212	7
Корунд	Al_2O_3	2014—2157	9
Опал	$SiO_2 \cdot nH_2O$	—	5,5—6,5
Топаз	$Al_2[SiO_4][F,OH]_2$	1388—1439	8
Турмалин	$[Ni, Ca](NaAl)_3[Si_6Al_3B_3 \cdot (O, OH)_{30}]$	1049—1162	—

Таблица 4.17

Свойства волокон и проволок [14, 16]

Материал	Форма	σ_B, 10^9 н/м²	E, 10^{11} н/м²	Удлинение, %
Ацетат	Волокно	17,6—21,5	—	25
Бамбук	»	34,5	3,3	—
Вискоза	»	26,5—44	—	15—24
Графит	Усы	2050	98	—
Капрон	Волокно	49—63,5	—	15—35
Лен	»	98	—	2,5—3
Медноаммиак	»	20,5—30,5	—	15
Сталь	Проволока	340	19,6	—
Стекло	Волокно	210	—	—
Нитрон	»	44	—	16—21
Шелк	»	41	—	—
Шерсть	»	15,6—17,2	—	—
B	»	590	50	—
Be	Проволока	152	29	—
C	Нить	122	4,1	—
W	Проволока	275	40	—
Al_2O_3	Усы	106—1760	41	—
BeO	»	1960	41	—
SiO_2	Волокно	138—148	55	—
WC	Кристаллы	34,5	49—60	—
ZrC	»	41	19	—
TiC	»	31—41	47	—
SiC	Усы	305	45	—
B_4C	»	960	45	—
TiB_2	Кристаллические волокно	12,8	37—50	—

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tellor W.** A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry. V. 5. Lond. — N. Y. — Toronto, 1942.
2. **Кей Д., Лабн Т.** Справочник физика-экспериментатора. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1949.
3. **Tellor W.** A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry. V. 3. Lond. — N. Y. — Toronto, 1942.
4. **Tellor W.** Ibid. V. 15. Lond —N. Y. —Toronto, 1942.
5. **Tellor W.** A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry. V. 11. Lond. —N. Y. — Toronto, 1943.
6. **Кузнецов В. Д.** Физика твердого тела. Т. 4. Томск, Полиграфиздат, 1947.
7. **Справочник** по машиностроительным материалам. Под ред. Г. И. Погодина—Алексеева. Т. 2. М., Машгиз, 1959.
8. **Справочник** конструктора точных приборов. Под ред. И. Я. Лепина. М., Машгиз, 1959.
9. **Сусеов Н. И.** Замена металлов пластмассами. М., Машгиз, 1962.
10. **Лебедев С. И.** Определение микротвердости материалов. М., Изд-во АН СССР, 1963.
11. **Елерман А. Ф., Жуков О. П., Перлис М. Д.** Мартенситностареющие стали с прочностью более 200 кГ/мм². — «Металловедение и термическая обработка металлов», 1971, № 4, с. 9.
12. **Титановые** сплавы. Ч. 1. М., ОНТИ. ВИАМ, 1959.
13. **Толмачев И. Д., Альтовский Р. М.** Коррозия и защита танков. М., «Машиностроение», 1971.
14. **Волокнистые** композиционные материалы. Пер. с англ. Под ред. Ф. З. Бакшеева. М., «Мир», 1967.
15. **Handbook** of Chemistry and Physics 35 th edition. Cleveland, Ohio.
16. **Алешин Е. Я., Аниськов Н. Ф., Благов Б. Н.** Проектирование деталей из пластмасс. Справочник. М., «Машиностроение», 1969.
17. **Справочник** по машиностроительным материалам. Под ред. Г. И. Погодина—Алексеева. Т. 1. М., Машгиз, 1959.
18. **Металловедение** алюминия и его сплавов. Отв. ред. И. Н. Фридляндер. М., «Металлургия», 1971.

ГЛАВА 5

ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВ

5.1. ЭЛЕМЕНТЫ

Таблица 5.1

Плотность чистых элементов ρ, 10^3 кг/м^3 [1—8]

Элемент	t, °C	ρ
Алюминий:		
твердый	20	2,70
жидкий	659	2,382
Барий	20	3,78
Бериллий	20	1,84
Бор:		
кристаллический	20	3,33
аморфный	20	2,34
Бром жидкий	20	3,12
Ванадий	20	5,96
Висмут электролитический	20	9,747
Вольфрам	20	18,6—19,1
Гадолиний	20	6,91
Галлий	32, 38	6,093
Гафний	20	13,3
Германий	20	5,46
Европий	20	3,217
Железо	20	7,87
Золото	20	19,3
Индий	20	7,28
Иод	20	4,94
Иридий	17	22,42
Иттербий	20	5,5
Иттрий	20	3,80
Калий	20	8,648
Калий	20	0,87
Калий:		
твердый	62,1	0,851
жидкий	62,1	0,83
Кальций	29	1,55
Кобальт	21	8,71
Кремний:		
кристаллический	20	2,42
аморфный	15	2,35
Лантан		6,15
Литий	20	0,534
Магний	5	1,741
Марганец	20	7,42
Медь:		
твердая	20	8,90
жидкая	—	8,217
Молибден	20	9,01
Натрий:		
твердый	—188	1,0066
	20	0,9712
	97,6	0,9519
жидкий	97,6	0,9267
Неодим	20	6,96
Никель	20	8,6—8,9
Ниобий	15	8,4
Олово:		
белое	20	7,29
твердое	226	7,184
жидкое	226	6,99
серое	20	5,8
Осмий	20	22,5
Палладий	20	12,16
Платина	20	21,37
Празеодим	20	6,775
Рений	20	20,53
Родий	20	12,44
Ртуть:	0	13,596
жидкая		
	20	13,546
	—38,8	13,690
твердая	—38,8	14,193
	—168	14,383
Рубидий	20	1,532
Рутений	0	12,06
Самарий	20	7,6
Свинец:		
твердый	20	11,342
	325	11,005
жидкий	325	10,645
	400	10,597
	850	10,078
Селен:		
аморфный	20	4,8
кристаллический	20	4,5
жидкий	—	4,27
Сера:		
ромбическая	20	2,07
моноклинная	20	1,96
аморфная	20	1,92
жидкая	113	1,81
Серебро:		
литое	20	10,42—10,59
жидкое	—	9,51
Скандий	20	2,5
Стронций	20	2,54
Сурьма	20	6,618
аморфная	20	6,22
Таллий	20	11,86
Тантал	20	16,6
Теллур:		
кристаллический	20	6,25
аморфный	20	6,02
Тербий	20	4,36
Титан	18	4,5
Торий	20	11,3—11,1
Углерод (алмаз)	20	3,52
Углерод (графит)	20	2,25
Уран	18	18,7
Фосфор:		
белый	20	1,83
красный	20	2,20
металлический	15	2,34
Хром	20	7,1
Цезий	20	1,873
Церий	20	6,9
Цинк:		
твердый	20	6,92
жидкий	—	6,48
Цирконий	20	6,44
Эрбий	20	4,77

Таблица 5.2

5.2. ГАЗЫ И ПАРЫ

Плотность газов и паров при 0°С и 760 *мм рт. ст.*, *кг/м*³ [1—4]

Элемент или соединение	Формула	ρ	Элемент или соединение	Формула	ρ
Азот	N_2	1,2506	Неон	Ne	0,8999
Аммиак	NH_3	0,7714	Нитрозил:		
Аргон	Ar	1,7839	фтористый	NOF	2,176*
Ацетилен	C_2H_2	1,1709	хлористый	NOCl	2,992
Бор фтористый	BF_3	2,99	Озон	O_3	2,22
н-Бутан	C_4H_{10}	2,703	Окись азота	NO	1,3402
i-Бутан	C_4H_{10}	2,677	Пропан	C_3H_8	2,0037
Водород:	H_2	0,08987	Пропилен	C_3H_6	1,916
бромистый	HBr	3,644	Радон	Rn	9,73
иодистый	HI	5,789	Сера:		
мышьяковистый	H_3As	3,48	двуокись	SO_2	2,9263
селенистый	H_2Se	3,5643	гексафторид	SF_6	6,50*
сернистый	H_2S	1,5392	Силан:		
теллуристый	H_2Te	5,81	диметил	$SiH_2(CH_3)_2$	2,73
фосфористый	H_3P	1,530	метил	SiH_3CH_3	2,08
хлористый	HCl	1,6391	хлористый	SiH_3Cl	3,03
Воздух	—	1,2928	трифтористый	$SiHF_3$	3,89
Гелий	He	0,1785	Стибин (15°С, 754 *мм рт. ст.*)	SbH_3	5,30
Германий тетрагидрид	GeH_4	3,420	Сульфурил фтористый	SO_2F_2	3,72*
Диметиламин	$(CH_3)_2NH$	1,960*	Триметиламин	$(CH_3)_3N$	2,580*
Дифтордихлорметан	CF_2Cl_2	5,510	Триметилбор	$(CH_3)_3B$	2,52
Диазин	C_2N_2	2,335*	Углерод:		
Закись азота	N_2O	1,978	двуокись	CO_2	1,9768
Кислород	O_2	1,42904	окись	CO	1,2500
Кремний:			сероокись	COS	2,72
фтористый	SiF_4	4,9605	Фосфор:		
гексагидрид	Si_2H_6	2,85	фтористый	PF_3	3,907*
тетрагидрид	SiH_4	1,44	оксифторид	POF_3	4,8
Криптон	Kr	3,74	пентафторид	PF_5	5,81
Ксенон	Xe	5,89	Фтор	F_2	1,695
Метан	CH_4	0,7168	Фторокись азота	NO_2F	2,90
Метилен хлорид	CH_2Cl	2,307	Хлор	Cl_2	3,22
Метиламин	CH_5N	1,388	Хлор:		
Метиловый эфир	C_2H_6O	2,1096	двуокись	ClO_2	3,09*
Метилфторид	CH_3F	1,545	окись	Cl_2O	3,89*
Метилхлорид	CH_3Cl	2,307	Хлорокись азота	NO_2Cl	2,57
Мышьяк фтористый	AsF_5	7,71	Этан	C_2H_6	1,356
			Этилен	C_2H_4	1,2605

* При *t* = 25°С.

Таблица 5.3

Плотность газов в жидком и твердом состояниях, 10³ *кг/м*³ [1,5]

Газ	Жидкое		Твердое	
	t, °С	ρ	*t*, °С	ρ
Азот	—195,09	0,8043	—253	1,03
Азота окись	—20	1,0	—	—
Аммиак	—10,7	0,66	—	—
»	+16,3	0,61	—	—
Аргон	—183,15	1,3739	—233	1,66
Ацетилен	—23,5	0,52	—	—
Водород:	—249,89	0,0672	—260	0,076
сернистый	—61	0,86	—	—
фосфористый	—90	0,746	—	—
фтористый	+13,6	0,988	—	—
хлористый	—85,8	1,194	—	—
Воздух (20,99 O_2)	—147	0,92	—	—
Гелий	—268,38	0,1139	—	—
Криптон	—147,18	2,3707	—	—
Ксенон	—109,1	3,06	—	—

Газ	Жидкое		Твердое	
	t, °C	ρ	t, °C	ρ
Кислород	—182,7	1,14	—253	1,41
	—906	1,25	—	—
Метан	—164	0,415	—	—
Метилхлорид	+18	0,920	—	—
Неон	—245,9	1,204	—	—
Азот	—183	1,71	—	—
Сера двуокись	—10	1,46	—	—
Углерод:				
двуокись	—60	1,19	—79	1,59
окись	—190	0,79	—	—
Фтор	—187	1,11	—	—
Хлор	—33,6	1,56	—	—
	+20	1,41	—	—
Этан	—88	0,546	—	—
Этилен	—102	5,566	—	—
	—21	0,41	—	—

5.3. ЖИДКОСТИ

Таблица 5.4

Плотность жидкостей, 10^3 кг/м³ [1—4]

Жидкость	t, °C	ρ	Жидкость	t, °C	ρ
Ацетон	20	0,792	Гексан	20	0,626
Бензин	20	0,68—0,72	Ртуть	0	13,596
Бензол	0	0,899	Спирт амиловый	20	0,814
Вода	4	1,00	Спирт:		
Глицерин	20	1,26	бутиловый	20	0,8078
Керосин	20	0,82	изобутиловый	20	0,8011
2-Крезол	20	0,86	изопропиловый	20	0,7854
Кислота:			пропиловый	20	0,8044
азотная	20	1,502	метиловый	20	0,7928
бензилтиоловая	62	0,853	этиловый	20	0,7893
уксусная	20	1,049	Сероуглерод	0	1,293
Масло:			Углерод четыреххлористый	20	1,595
арахисовое	20	0,8	Фенол	20	1,024
крезол	15	1,04—1,10	Хлорбензол	20	1,066
машинное	20	0,90—0,92	Хлороформ	20	1,489
парафиновое	20	0,67—0,8	Эфир	0	0,736
скипидарное	20	0,87	Этилацетат	20	0,901
Метилацетат	25	0,9274	Этилбромид	20	1,439
Молоко	20	1,03	Этилиодид	20	1,933
Морская вода	20	1,01—1,05	Этилхлорид	0	0,9214
Нефть	20	0,81—0,86			

Таблица 5.5

Плотность масел и воска при 15°С по отношению к плотности воды при 15°С [3, 4]

Вещество	ρ	Вещество	ρ
Воск:		Жир:	
китайский	0,809—0,811	китовый	0,917—0,924
обыкновенный	0,961—0,968	кроличий	0,934—0,936
миртовый	0,995	костный	0,914—0,916
японский	0,970—0,980	конский	0,919—0,953
Жир:		свиной (сырец)	0,913—0,916
бараний	0,937—0,953	свиной (жировая ткань)	0,934—0,938
говяжий	0,931—0,938	спермацет	0,905—0,945
гусиный	0,923—0,930	трескового печени	0,964—0,974
дельфина	0,926	тюлений	0,915—0,926
кашалота	0,878—0,884	человеческий	0,9178

Вещество	ρ	Вещество	ρ
Масло:		Масло:	
букового ореха	0,922	маковое	0,924—0,926
виноградных зерен	0,917—33	миндальное	0,914—0,921
горчицы белой	0,912—16	мускатное	0,945—0,996
горчицы черной	0,961—69	оливковое	0,915—0,920
грецкого ореха	0,925—27	пальмовое	0,924
земляного ореха	0,917—0,923	ореховое	0,917
кветовое	0,966—0,967	персиковое	0,918—0,925
кокосового ореха	0,925	подсолнечное	0,924—0,926
какао	0,964—0,974	рапсовое	0,913—0,917
кедровое	0,928—0,934	семечек ореха	0,925—0,927
хорошее 40°/16°	0,907—0,912	соевое	0,924—0,927
кукурузное	0,921—0,928	тунговое	0,939—0,939
кунжутное 23°/26°	0,919	тыквенное	0,923—0,925
льняное 100°	0,890	хлопковое	0,917—0,918
лимонное	0,930—0,936	Смазка хлопковая	0,919—0,923

5.4. ВОДНЫЕ РАСТВОРЫ

Таблица 5.6

Плотность водного раствора этилового спирта, отнесенная к плотности воды при 4°С [1]

Концентрация спирта, мас. %	15°С	20°С	25°С	Концентрация спирта, мас. %	15°С	25°С	28°С
0	0,99913	0,99824	0,99709	60	0,91787	0,91393	0,90983
2	0,99643	0,99453	0,99338	62	0,91344	0,90940	0,90533
4	0,99197	0,99102	0,98944	64	0,90896	0,90488	0,90079
6	0,98977	0,98776	0,98651	66	0,90443	0,90034	0,89622
8	0,98581	0,98470	0,98336	68	0,89987	0,89576	0,89162
10	0,98307	0,98185	0,98039	70	0,89528	0,89115	0,88700
12	0,98019	0,97913	0,97752	72	0,89066	0,88651	0,88234
14	0,97803	0,97651	0,97474	74	0,88601	0,88185	0,87766
16	0,97563	0,97393	0,97199	76	0,88134	0,87716	0,87295
18	0,97324	0,97134	0,96922	78	0,87664	0,87244	0,86821
20	0,97080	0,96870	0,96640	80	0,87192	0,86770	0,86344
22	0,96829	0,96590	0,96352	82	0,86716	0,86292	0,85864
24	0,96566	0,96317	0,96052	84	0,86237	0,85812	0,85380
26	0,96290	0,96021	0,95739	86	0,85755	0,85326	0,84893
28	0,95997	0,95711	0,95412	88	0,85270	0,84840	0,84403
30	0,95688	0,95385	0,95071	90	0,84781	0,84349	0,83909
32	0,95360	0,95042	0,94743	92	0,84286	0,83852	0,83410
34	0,95017	0,94684	0,94342	94	0,83786	0,83350	0,82906
36	0,94657	0,94311	0,93957	96	0,83279	0,82842	0,82396
38	0,94282	0,93924	0,93560	98	0,82762	0,82329	0,81876
40	0,93893	0,93524	0,93151	90	0,82235	0,81795	0,81348
42	0,93491	0,93113	0,92732	92	0,81694	0,81255	0,80690
44	0,93076	0,92693	0,92306	94	0,81139	0,80700	0,80255
46	0,92655	0,92264	0,91870	96	0,80564	0,80129	0,79689
48	0,92225	0,91828	0,91429	98	0,79972	0,79541	0,79106
				100	0,79368	0,78933	0,78507

Таблица 5.7

Плотность водного раствора метилового спирта при 15°С, отнесенная к плотности воды при 4°С [1]

Концентрация спирта, мас. %	0	2	4	6	8	Концентрация спирта, мас. %	0	2	4	6	8
0	0,99913	0,99548	0,99196	0,98854	0,98547	60	0,89761	0,89341	0,88890	0,88433	0,87971
10	0,98241	0,97945	0,97660	0,97377	0,97093	70	0,87507	0,87033	0,86548	0,86051	0,85551
20	0,96814	0,96533	0,96251	0,95963	0,95668	80	0,85048	0,84536	0,84009	0,83475	0,82937
30	0,95166	0,95056	0,94731	0,94401	0,94067	90	0,82390	0,81849	0,81285	0,80713	0,80143
40	0,93720	0,93376	0,93001	0,92627	0,92242	100	0,79577	—	—	—	—
50	0,91862	0,91451	0,91044	0,90631	0,90210						

Таблица 5.8

Отношение плотности водных растворов веществ при различных температурах к плотности воды при температуре 4°С [1]

Концентрация, %,	$AgNO_3$, 25°С	$AlCl_3$, 18°С	$AlCl_3$, 15°С	$Al_2(SO_4)_3$, 18°С	$Al(NO_3)_3$, 18°С	$BaBr_2$, 20°С	$Ba(C_2H_3O_2)_2$, 18°С	$BaCl_2$, 20°С	BaI_2, 20°С	$C_6H_6O_6$, 20°С
1	1,0070	1,0075	1,0072	1,0090	1,0065		1,0059	—	—	1,0005
2	1,0154	1,0164	1,0144	1,0196	1,0144	1,0156	1,0133	1,0158	1,0154	1,0030
4	1,0327	1,0344	1,0289	1,0401	1,0305	1,0335	1,0262	1,0341	1,0331	1,0077
6	1,0506	1,0526	1,0435	1,0616	1,0469	1,0519	1,0433	1,0526	1,0513	1,0125
8	1,0690	1,0711	1,0586	1,0837	1,0638	1,0710	1,0607	1,0715	1,0701	1,0179
10	1,0882	1,0900	1,0734	1,1062	1,0811	1,0907	1,0745	1,0921	1,0896	1,0221
12	1,1080	1,1093	1,0890	1,1293	1,0989	1,1111	1,0908	1,1126	1,1099	1,0271
14	1,1284	1,1290	1,1047	1,1529	1,1171	1,1323	1,1075	1,1342	1,1308	1,0320
16	1,1495	1,1491	1,1207	1,1779	1,1357	1,1543	1,1246	1,1564	1,1526	1,0370
18	1,1716	—	1,1372	1,2017	1,1549	1,1770	1,1421	1,1793	1,1776	1,0420
20	1,1942	—	1,1537	1,2272	1,1745	1,2006	1,1589	1,2031	1,1984	1,0470
22	—	—	1,1709	1,2534	1,1946	—	1,1762	1,2277	—	1,0520
24	—	—	1,1882	1,2803	1,2151	—	1,1970	1,2531	—	1,0571
26	—	—	1,2058	1,3079	1,2365	—	1,2161	1,2793	—	1,0622
28		—	1,2241	—	1,2582	—	1,2376	—	—	1,0674
30	1,3905	—	1,2422	—	1,2805	1,3325	1,2554	—	1,3289	1,0727
35	1,3931	—	1,2905	—	—	1,4067	1,3059	—	1,404	1,0860
40	1,4743	—	1,3415	—	—	1,4926	1,3608	—	1,490	1,0996
45	1,565	—	—	—	—	—	—	—	1,687	1,1126
50	1,666	—	—	—	—	—	—	—	1,698	1,1253
55	1,766	—	—	—	—	—	—	—	1,826	1,1398
60	1,916	—	—	—	—	—	—	—	1,970	1,1533

Продолжение табл. 5.8

Концентрация, %,	$CuSO_4$, 18°С	$CaCl_2$, 15°С	$Cr_2(SO_4)_3$ зеленый, 18°С	$Cr_2(SO_4)_3$ фиолетовый, 18°С	$Cu(NO_3)_2$, 20°С	$CuSO_4$, 20°С	$CuCl_2$, 20°С	$FeCl_3$, 20°С	$Fe(NO_3)_3$, 17,5°С	$Fe_2(SO_4)_3$, 17,5°С
1	1,0066	1,006	1,0081	1,0091	1,007	1,009	1,007	1,007	1,0090	1,007
2	1,0162	1,014	1,0172	1,0191	1,015	1,019	1,017	1,015	1,0160	1,016
4	1,0383	1,030	1,0366	1,0395	1,032	1,040	1,036	1,032	1,0320	1,033
6	1,0590	1,045	1,0551	1,0604	1,050	1,062	1,056	1,049	1,0472	1,050
8	1,0803	1,060	1,0751	1,0817	1,069	1,064	1,075	1,067	1,0620	1,067
10	1,1023	1,076	1,0959	1,1034	1,088	1,107	1,096	1,085	1,0770	1,084
12	1,1260	1,093	1,1172	1,1257	1,107	1,131	1,117	1,104	1,0934	1,103
14	1,1465	1,110	1,1392	1,1480	1,126	1,154	1,138	1,123	1,1096	1,122
16	1,1729	1,127	1,1618	1,1722	1,147	1,180	1,160	1,142	1,1268	1,141
18	1,1982	1,145	1,1861	1,1966	1,168	1,206	1,182	1,162	1,1440	1,161
20	1,2243	1,163	1,2091	1,2218	1,189	—	1,205	1,182	1,1592	1,181
22	—	1,181	1,2339	1,2479	—	—	—	—	1,1812	—
24	—	1,200	1,2594	1,2750	—	—	—	—	1,2012	—
26	—	1,220	1,2856	1,3032	—	—	—	—	1,2212	—
28	—	1,240	1,3125	1,3325	—	—	—	—	1,2416	—
30	1,3714	1,260	1,3401	—	—	—	—	1,291	1,2622	1,307
35	1,4551	1,313	1,4129	—	—	—	—	1,353	1,3164	1,375
40	1,5470	1,371	1,4893	—	—	—	—	1,418	1,3746	1,449
50	—	1,505	—	—	—	—	—	1,551	1,4972	1,613
55	—	1,581	—	—	—	—	—	—	1,5722	1,709
60	—	1,663	—	—	—	—	—	—	1,6572	1,796

Концентрация, %,	$C_6H_8O_7$-H_2O, 15°C	$C_6H_8O_7$, 20°C	$CsBr_2$, 20°C	$CoCl_2$, 20°C	CsI_2, 20°C	$Co(NO_3)_2$, 25°C	$CdBr_2$, 20°C	$CdCl_2$, 20°C	CdI_2, 20°C	$Cd(NO_3)_2$, 20°C
1	—	1,0021	—	—	—	—	—	—	—	—
2	1,0074	1,0060	1,0052	1,0148	1,0150	1,0137	1,0158	1,0159	1,0158	1,0154
4	1,0149	1,0139	1,0326	1,0316	1,0323	1,0291	1,0339	1,0339	1,0328	1,0328
6	1,0227	1,0219	1,0504	1,0496	1,0500	1,0448	1,0524	1,0524	1,0507	1,0502
8	1,0300	1,0299	1,0688	1,0659	1,0683	1,0608	1,0714	1,0715	1,0690	1,0683
10	1,0382	1,0381	1,0877	1,0835	1,0873	1,0771	1,0910	1,0912	1,0819	1,0869
12	1,0470	1,0465	1,1071	1,1015	1,1069	1,0937	1,1112	1,1115	1,1075	1,1061
14	1,0549	1,0549	1,1272	1,1198	1,1270	1,1106	1,1322	1,1324	1,1278	1,1261
16	1,0632	1,0635	1,1480	1,1356	1,1485	1,1279	1,1540	1,1540	1,1489	1,1468
18	1,0718	1,0721	1,1696	1,1578	1,1709	1,1455	1,1766	1,1762	1,1709	1,1682
20	1,0805	1,0810	1,1919	1,1775	1,1929	1,1630	1,2000	1,1992	1,1937	1,1904
25	—	1,1036	1,2489	1,2384	1,2530	1,2106	1,2505	1,2501	1,2546	1,2488
30	1,1244	1,1270	1,3125	1,2846	1,3195	1,250	1,3280	1,3273	1,3219	1,3124
35	—	1,1513	1,381	1,3373	1,3928	1,311	1,4049	1,4040	1,3967	1,3822
40	1,1709	1,1764	1,457	1,3967	1,4734	1,365	1,4902	1,4883	1,4801	1,4590
45	1,1948	1,2025	1,541	—	—	1,422	—	1,5748	1,5726	1,5438
50	1,2204	1,2296	1,635	—	—	—	—	1,6702	—	1,6356
60	1,2738	1,2865	—	—	—	—	—	—	—	—

Концентрация, %,	H_2SO_4, 15°C	H_2SO_4, 15°C	HBr, 20°C	HCOOH, 20°C	$H_2C_2H_4O_4$, 15°C	HCl, 25°C	CCl_3CO_2H, 15°C	HF, 20°C	HI, 20°C	$HClO_4$, 18°C
1	1,0085	1,0067	1,0063	1,0019	1,0015	1,0032	1,0050	—	1,0064	1,0071
2	1,0160	1,0120	1,0124	1,0044	1,0090	1,0082	1,0109	—	1,0127	1,0157
4	1,0375	1,0300	1,0269	1,0093	1,0179	1,0181	1,0228	—	1,0277	1,0334
6	1,0575	1,0398	1,0417	1,0141	1,0273	1,0279	1,0348	—	1,0431	1,0517
8	1,0785	1,0688	1,0568	1,0196	1,0371	1,0376	1,0471	—	1,0569	1,0706
10	1,1000	1,0681	1,0723	1,0256	1,0469	1,0474	1,0597	1,035	1,0751	1,0900
12	1,1220	1,0820	1,0883	1,0296	1,0565	1,0574	1,0726	—	1,0918	1,1100
14	1,1445	1,0975	1,1048	1,0345	1,0661	1,0675	1,0860	—	1,1091	1,1306
16	1,1675	1,1128	1,1219	1,0393	1,0761	1,0775	1,0995	—	1,1270	1,1519
18	1,1905	1,1285	1,1369	1,0441	1,0865	1,0878	1,1135	—	1,1456	1,1740
20	1,2135	1,1447	1,1579	1,0488	1,0969	1,0980	1,1279	1,070	1,1649	1,1969
22	—	1,1614	1,1767	1,0537	1,1072	1,1083	1,1428	—	1,1850	1,2206
24	—	1,1785	1,1961	1,0585	1,1175	1,1187	1,1581	—	1,2059	1,2450
26	—	1,1961	1,2161	1,0633	1,1282	1,1290	1,1738	—	1,2277	1,2700
28	—	1,2143	1,2367	1,0681	1,1393	1,1392	1,1900	—	1,2503	1,2956
30	—	1,2331	1,2580	1,0729	1,1505	1,1493	1,2067	1,101	1,2737	1,3218
35	—	1,2829	1,3150	1,0847	—	—	—	1,116	1,3357	1,3900
40	—	1,3370	1,3772	1,0968	1,2078	1,1980	1,2991	1,130	1,4029	1,4640
45	—	1,3969	1,4446	1,1085	—	—	1,3521	1,143	1,4755	—
50	—	1,4602	1,5173	1,1207	1,2696	—	1,4103	1,155	—	—
55	—	1,5304	1,5963	1,1320	1,3027	—	1,4733	—	—	—
60	—	1,6070	1,6787	1,1424	—	—	1,5380	—	—	—
65	—	1,6904	1,7675	1,1543	—	—	1,6059	—	—	—
70	—	—	—	1,1655	—	—	1,6736	—	—	—

Продолжение табл. 5.8

Концентрация, вес. %	HNO_3, 20°C	H_2O_2, 18°C	H_3PO_4, 20°C	H_2SO_4, 20°C	H_2SiF_6, 17,7°C	HBr, 20°C	K_2CO_3, 20°C	$KCl_2H_3O_2$, 18°C	$K_2C_4H_4O_6$, 20°C
1	1,0036	1,0022	1,0038	1,0051	1,0050	1,0060	1,0054	1,0072	1,0069	1,0048
2	1,0091	1,0068	1,0092	1,0116	1,0136	1,0161	1,0127	1,0163	1,0089	1,0114
4	1,0201	1,0131	1,0200	1,0250	1,0291	1,0324	1,0276	1,0345	1,0191	1,0246
6	1,0312	1,0204	1,0309	1,0395	1,0447	1,0491	1,0426	1,0529	1,0293	1,0383
8	1,0427	1,0277	1,0420	1,0522	1,0605	1,0661	1,0581	1,0715	1,0395	1,0519
10	1,0543	1,0351	1,0532	1,0661	1,0766	1,0834	1,0740	1,0904	1,0497	1,0657
12	1,0661	1,0425	1,0647	1,0802	1,0931	1,1011	1,0903	1,1056	1,0600	1,0798
14	1,0781	1,0499	1,0764	1,0947	1,1101	1,1190	1,1070	1,1201	1,0703	1,0941
16	1,0903	1,0574	1,0884	1,1094	1,1276	1,1373	1,1242	1,1450	1,0808	1,1087
18	1,1026	1,0649	1,1006	1,1243	1,1466	1,1559	1,1419	1,1692	1,0914	1,1236
20	1,1150	1,0726	1,1134	1,1394	1,1659	1,1748	1,1591	1,1856	1,1022	1,1387
22	1,1276	1,0802	1,1263	1,1546	1,1829	1,1941	1,1768	1,2107	1,1131	1,1540
24	1,1404	1,0880	1,1395	1,1704	1,2025	1,2136	1,1950	1,2320	1,1241	1,1696
26	1,1534	1,0959	1,1520	1,1862	1,2229	1,2335	1,2178	1,2536	1,1353	1,1855
28	1,1667	1,1040	1,1645	1,2023	1,2438	1,2537	1,2383	1,2756	1,1466	1,2017
30	1,1800	1,1122	1,1805	1,2185	1,2653	1,2742	1,2593	1,2979	1,1579	1,2181
35	1,2140	1,1327	1,216	1,2599	—	—	1,3147	1,3546	1,1869	1,2605
40	1,2463	1,1536	1,254	1,3026	1,3519	—	1,3746	1,4141	1,2102	1,3051
45	1,2763	1,1749	1,293	1,3476	—	—	—	1,4759	1,2465	1,3510
50	1,3100	1,1966	1,335	1,3951	1,5186	—	—	1,5404	1,2761	1,4001
55	1,3396	1,2188	1,379	1,4453	—	—	—	—	1,3076	—
60	1,3667	1,2416	1,426	1,4983	1,6660	—	—	—	1,3372	—
65	1,3913	1,2652	1,475	1,5533	—	—	—	—	—	—
70	1,4134	1,2897	1,526	1,6106	1,8670	—	—	—	—	—
75	1,4337	1,3140	1,579	1,6692	—	—	—	—	—	—
80	1,4521	1,3406	1,633	1,7272	2,1220	—	—	—	—	—
90	1,4820	—	1,746	1,8144	—	—	—	—	—	—
100	1,5129	—	1,870	1,6305	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 5.8

Концентрация, вес. %	KCl, 20°C	K_2CrO_4, 19,5°C	$K_2Cr_2O_7$, 20°C	$K_2Cr_2(SO_4)_4$, 15°C	KF, 18°C	$K_4Fe(CN)_6$, 20°C	$K_3Fe(CN)_6$, 20°C	$KHSO_4$, 20°C	KI, 20°C	KNO_3, 27°C
1	1,0046	1,0080	1,0062	1,007	1,0072	1,0034	1,0051	1,0054	1,0063	1,0045
2	1,0110	1,0161	1,0122	1,016	1,0150	1,0068	1,0119	1,0120	1,0130	1,0108
4	1,0239	1,0325	1,0264	1,034	1,0334	1,0201	1,0256	1,0260	1,0281	1,0234
6	1,0369	1,0492	1,0408	1,052	1,0612	1,0314	1,0396	1,0403	1,0437	1,0363
8	1,0500	1,0663	1,0564	1,070	1,0893	1,0427	1,0536	1,0549	1,0597	1,0494
10	1,0633	1,0837	1,0703	1,089	1,0977	1,0542	1,0679	1,0698	1,0761	1,0627
12	1,0768	1,1014		1,109	1,1064	1,0656	1,0823	1,0850	1,0930	1,0762
14	1,0905	1,1195	—	1,129	1,1264	1,0774	1,0971	1,1004	1,1104	1,0899
16	1,1043	1,1360		1,150	1,1448	1,0890	1,1120	1,1161	1,1284	1,1038
18	1,1185	1,1570	—	1,171	1,1640	1,1010			1,1469	1,1181
20	1,1328	1,1765		1,193	1,1847	1,1130	—	—	1,1660	1,1326
22	1,1474	1,1964	—	1,216	1,2062				1,1867	1,1473
24	1,1623	1,2169	—	1,239	1,2280	—	—	—	1,2080	1,1623
26	—	1,2379	—	1,263	1,2471				1,2270	—
36	—	1,3366		1,383	—	—	—	—	1,3308	—

Концентрация, моль/кг	NaF_2, 18°C	$NaBrO_3$, 18°C	$NaC_2F_3O_2$, 18°C	Na_2CO_3, 20°C	$NaCl$, 20°C	$NaClO_3$, 18°C	Na_2O_2, 18°C	$NaKC_4H_4O_6$, 27°C	$KaNO_3$, 27°C	$NaOH$, 27°C
1	1,0060	1,0064	1,0083	1,0052	1,0086	1,0051	1,005	1,0049	1,0049	1,0096
2	1,0139	1,0143	1,0184	1,0123	1,0190	1,0116	1,013	1,0116	1,0117	1,0207
4	1,0298	1,0305	1,0180	1,0266	1,0398	1,0247	1,027	1,0252	1,0254	1,0428
6	1,0462	1,0471	1,0269	1,0410	1,0606	1,0381	1,041	1,0390	1,0399	1,0648
8	1,0631	1,0641	1,0392	1,0555	1,0816	1,0517	1,056	1,0530	1,0532	1,0860
10	1,0803	1,0816	1,0495	1,0702	1,1029	1,0656	1,070	1,0673	1,0674	1,1085
12	1,0981	1,0996	1,0598	1,0851	1,1244	1,0798	1,084	1,0818	1,0819	1,1309
14	1,1164	1,1182	1,0702	1,1002	1,1463	1,0943	1,098	1,0965	1,0967	1,1530
16	1,1352	1,1373	1,0807	1,1150	—	1,1090	1,112	1,1114	1,1118	1,1751
18	1,1546	1,1569	1,0913	1,1313	—	1,1241	1,126	1,1265	1,1272	1,1972
20	1,1745	1,1771	1,1021	1,1471	—	1,1395	1,140	1,1419	1,1429	1,2191
22	1,1951	1,1979	1,1130	1,1630	—	1,1564	1,153	1,1576	1,1589	1,2411
24	1,2165	1,2199	1,1240	1,1797	—	1,1737	1,166	1,1735	1,1752	1,2629
26	1,2382	—	1,1351	1,1969	—	1,1883	1,159	1,1896	1,1917	1,2848
28	1,2608	—	1,1462	—	—	1,2055	1,193	1,2060	1,2085	1,3068
30	1,2841	—	—	—	—	1,2297	1,207	1,2225	1,2256	1,3279
35	1,3462	—	—	—	—	1,2685	1,244	1,2664	1,2701	1,3788
40	1,4128	—	—	—	—	—	1,290	—	1,3175	1,4300
45	—	—	—	—	—	—	1,312	—	1,3683	—

Концентрация, моль/кг	$NaNO_2$, 18,5°C	Na_2SO_4, 18°C	Na_2SO_3, 18°C	$Na_2S_2O_3$, 20°C	$NiCl_2$, 27°C	$Ni(NO_3)_2$, 18°C	$NiSO_4$, 18°C	$Ni(C_6H_4O_7)_2$, 18°C	$Pb(NO_3)_2$, 18°C	SO_2, 15,6°C
1	1,0069	1,0078	1,0073	1,0065	1,008	1,007	1,009	1,0068	1,0074	1,0069
2	1,0140	1,0172	1,0164	1,0148	1,018	1,015	1,020	1,0137	1,0163	1,0140
4	1,0284	1,0353	1,0348	1,0315	1,037	1,032	1,042	1,0280	1,0344	1,0284
6	1,0432	1,0536	1,0535	1,0483	1,057	1,050	1,063	1,0446	1,0529	1,0432
8	1,0584	1,0751	1,0724	1,0654	1,078	1,069	1,086	1,0605	1,0720	1,0584
10	1,0741	1,0948	1,0915	1,0827	1,099	1,088	1,109	1,0768	1,0918	1,0741
12	1,0909	1,1146	1,1100	1,1003	1,121	1,107	1,132	1,0936	1,1123	1,0902
14	1,1069	1,1346	1,1305	1,1182	1,143	1,127	1,156	1,1109	1,1336	1,1069
16	1,1240	1,1549	1,1506	1,1365	1,167	1,148	1,183	1,1283	1,1557	1,1240
18	1,1417	1,1755	1,1709	1,1564	1,191	1,169	1,209	1,1473	1,1799	1,1417
20	1,1600	—	1,1915	1,1740	1,215	1,191	—	1,1663	1,2030	1,1600
22	1,1789	—	1,2124	1,1932	—	—	—	1,1850	1,2277	1,1789
24	1,1983	—	1,2336	1,2128	—	—	—	1,2063	1,2529	1,1983
26	1,2185	—	—	1,2326	—	—	—	1,2273	1,2783	1,2185
28	1,2393	—	—	1,2529	—	—	—	1,2489	1,3037	1,2393
30	1,2609	—	—	1,2739	1,353	1,311	—	1,2711	1,3289	1,2609
35	1,3182	—	—	1,3273	—	1,377	—	1,3304	—	1,3182
40	—	—	—	1,3827	—	—	—	1,3904	—	—

Концентрация, вес. %	$SnCl_2$, 15°C	$SnCl_4$, 15°C	$SrBr_2$, 20°C	SrI_2, 20°C	$ZnBr_2$, 20°C	$ZnCl_2$, 20°C	ZnI_2, 20°C	$Zn(NO_3)_2$, 15°C	$ZnSO_4$, 20°C	$Zr(NO_3)_4$, 20°C
1	1,0068	1,007	—	—	—	—	—	—	—	—
2	1,0146	1,015	1,0167	1,0154	1,0167	1,0157	1,016	1,0154	1,0190	1,0150
4	1,0306	1,031	1,0337	1,0331	1,0354	1,0350	1,034	1,0322	1,0403	1,0310
6	1,0470	1,047	1,0522	1,0513	1,0544	1,0552	1,053	1,0496	1,0620	1,0480
8	1,0638	1,064	1,0712	1,0701	1,0738	1,0716	1,072	1,0675	1,0842	1,0650
10	1,0810	1,081	1,0907	1,0890	1,0935	1,0819	1,091	1,0860	1,1071	1,0830
12	1,0986	1,099	1,1109	1,1099	1,1135	1,1085	1,111	1,1048	1,1308	1,1010
14	1,1167	1,117	1,1317	1,1308	1,1338	1,1275	1,131	1,1244	1,1553	1,1190
16	1,1353	1,136	1,1532	1,1526	1,1544	1,1465	1,152	1,1445	1,1806	1,1380
18	1,1545	1,154	1,1757	1,1753	1,1753	1,1665	1,174	1,1652	—	1,1580
20	1,1743	1,173	1,1992	1,1990	1,1965	1,1866	1,197	1,1865	—	1,179
25	—	—	1,2620	1,2608	1,2543	1,2320	1,268	1,2427	—	1,233
30	1,2837	1,278	1,3300	1,3295	1,3170	1,2928	1,325	1,3029	—	1,290
35	1,3461	1,337	1,4050	1,4068	1,3859	1,3529	1,398	1,3678	—	1,352
40	1,4145	1,403	1,4800	1,4904	1,4020	1,4173	1,478	1,4376	—	1,419
45	1,4897	1,476	1,5830	1,6844	1,5470	1,4890	1,666	1,5134	—	—
50	1,5729	1,555	1,6960	—	1,6430	1,5681	1,663	1,5944	—	—
55	1,6656	1,644	—	—	1,7500	1,686	1,770	—	—	—
60	1,7695	1,742	—	—	1,8690	1,749	1,893	—	—	—
65	1,8865	1,874	—	—	2,0020	1,861	2,036	—	—	—
70	—	1,971	—	—	—	1,962	2,202	—	—	—

Концентрация, вес. %	KOH, 15°C	LiBr, 20°C	LiCl, 20°C	LiI, 20°C	$MgBr_2$, 20°C	$MgCl_2$, 20°C	MgI_2, 20°C	$Mg(NO_3)_2$, 20°C	$MgSO_4$, 20°C	$MnBr_2$, 15°C
1	1,0083	1,0055	1,0041	1,0056	—	—	—	—	—	1,0071
2	1,0175	1,0128	1,0099	1,0131	1,0151	1,0140	1,0149	1,0132	1,0166	1,0157
4	1,0369	1,0277	1,0215	1,0284	1,0324	1,0311	1,0321	1,0285	1,0309	1,0332
6	1,0544	1,0420	1,0330	1,0442	1,0501	1,0478	1,0498	1,0441	1,0502	1,0511
8	1,0730	1,0585	1,0443	1,0604	1,0683	1,0646	1,0680	1,0600	1,0616	1,0696
10	1,0918	1,0746	1,0559	1,0771	1,0871	1,0816	1,0889	1,0762	1,1031	1,0886
12	1,1108	1,0910	1,0675	1,0943	1,1065	1,0989	1,1066	1,0928	1,1256	1,1063
14	1,1299	1,1079	1,0792	1,1120	1,1265	1,1164	1,1258	1,1098	1,1484	1,1287
16	1,1493	1,1253	1,0910	1,1303	1,1471	1,1342	1,1478	1,1272	1,1717	1,1498
18	1,1688	1,1432	1,1029	1,1492	1,1689	1,1523	1,1655	1,1449	1,1955	1,1716
20	1,1884	1,1616	1,1150	1,1688	1,1903	1,1706	1,1920	1,1630	1,2196	1,1942
22	1,2080	1,1806	1,1274	1,1890	—	—	—	1,1816	1,2447	1,2176
24	1,2285	1,2002	1,1399	1,2099	—	—	—	1,2004	1,2701	1,2419
26	1,2489	1,2205	1,1527	1,2315	—	—	—	—	1,2964	1,2672
28	1,2705	1,2414	1,1658	1,2549	—	—	—	—	—	1,2934
30	1,2905	1,2629	1,1791	1,2772	1,3110	1,2688	1,3180	—	—	1,3206
35	1,3440	1,3204	—	1,3383	1,3790	—	1,3914	—	—	—
40	1,3991	1,3836	—	1,4078	1,452	—	1,4730	—	—	—
45	1,4558	1,4535	—	1,4840	1,532	—	—	—	—	—

Концентрация, вес. %	$MnCl_2$, 18°C	$Y_2(SO_4)_3$, 18°C	$MgSO_4$, 20°C	SrI_2, 20°C	$NaBr$, 15°C	$NH_4C_2H_3O_2$, 18°C	NH_4Cl, 20°C	NH_4I, 18°C	NH_4NO_3, 17,8°C	$(NH_4)_2SO_4$, 20°C
1	1,0069	1,0063	1,0080	0,9969	1,0009	0,0992	1,0013	1,0050	1,0042	1,0041
2	1,0153	1,0140	1,0178	0,9865	1,0018	1,0013	1,0045	1,0114	1,0085	1,0101
4	1,0324	1,0298	1,0378	0,9811	1,0034	1,0036	1,0107	1,0244	1,0170	1,0220
6	1,0498	1,0459	1,0583	0,9750	1,0056	1,0096	1,0169	1,0377	1,0255	1,0318
8	1,0676	1,0624	1,0791	0,9651	1,0077	1,0136	1,0227	1,0513	1,0340	1,0456
10	1,0859	1,0794	1,1012	0,9575	1,0099	1,0176	1,0286	1,0652	1,0425	1,0571
12	1,1046	1,0969	1,1236	0,9501	1,0121	1,0216	1,0344	1,0795	1,0512	1,0701
14	1,1238	1,1149	1,1467	0,9430	1,0143	1,0255	1,0401	1,0942	1,0600	1,0808
16	1,1435	1,1333	1,1705	0,9362	1,0164	1,0294	1,0457	1,1093	1,0686	1,0924
18	1,1639	1,1522	1,1960	0,9296	1,0186	1,0331	1,0512	1,1246	1,0773	1,1039
20	1,1846	1,1717	—	0,9229	1,0207	1,0368	1,0567	1,1407	1,0860	1,1164
22	1,2061	1,1918	—	0,9164	1,0228	1,0401	1,0621	1,1570	1,0950	1,1269
24	1,2283	1,2125	—	0,9101	1,0248	1,0439	1,0674	1,1737	1,1040	1,1383
26	1,2511	1,2336	—	0,9040	1,0267	1,0473	—	1,1908	1,1130	1,1496
28	1,2746	1,2557	—	0,8981	1,0286	1,0507	—	1,2084	1,1220	1,1609
30	1,2988	1,2781	—	0,8920	1,0306	1,0540	—	1,2265	1,1310	1,1721
35	—	—	—	—	1,0350	1,0618	—	1,2745	1,1550	1,2000
40	—	—	—	—	1,0400	1,0692	—	1,3254	1,1790	1,2277
45	—	—	—	0,849*	1,0420	1,0760	—	1,3823	1,2045	1,2562
50	—	—	—	0,832*	1,044	—	—	—	1,2300	1,2825
55	—	—	—	0,815*	1,046	—	—	—	1,2567	—
60		—	—	0,796*	1,047	—	—	—	1,2835	—

* При $t = 15°C$.

5.6. СПЛАВЫ

Таблица 5.9

Плотность сплавов, 10^3 кг/м³ [1,2]

Сплав (состав, вес. %)	ρ
Бронза:	
оловянистая (Cu; Sn)	8,6—9,3
фосфористая (92,5% Cu; 7% Sn; 0,5% P)	8,7—8,9
Дюралюминий (Cu; Mg; Si; Mn)	2,79
Инвар (63,8% Fe; 36% Ni; 0,2% C)	8,00
Константан (60% Cu; 40% Ni)	8,88
Латунь (66% Cu; 34% Zn)	8,4—8,7
Магналиум (90% Al; 10% Mg)	2,60
Манганин (84% Cu; 12% Mn; 4% Ni)	8,5
Монель-металл (71% Ni; 27% Cu; 2% Fe)	8,9
Платино-родиевый сплав (90% Pt; 10% Ir)	21,62
Сплав Вуда (50% Bi; 19,5% Cd; 25% Pb; 12,5% Sn)	9,70
Сталь:	
кованая	7,85—8,0
литая	7,6—7,92

Таблица 5.10

Плотность веществ при 20 °С, 10^3 кг/м³ [2]

Вещество	ρ	Вещество	ρ
Дерево (сухое)		Газовый уголь	1,88
Алмазное	0,95	Галенит	7,3—7,6
Бальза (пробковое)	0,11—0,14	Гематит	4,9—5,3
Бамбук	0,31—0,40	Гипс	2,31—2,33
Бук	0,70—0,90	Глина	1,8—2,6
Береза	0,51—0,77	Гранат	3,15—4,3
Вишня	0,70—0,91	Гранит	2,44—2,76
Гикори	0,60—0,93	Доломит	2,84
Груша	0,61—0,73	Изумруд	2,68—2,76
Дуб	0,60—0,90	Известняк таванский	1,3—1,4
Ель канадская	0,48—0,70	Каолинит	2,6—2,8
Железное (бакаут)	1,17—1,33	Кварц:	
Ивы	0,40—0,60	прозрачный	2,65
Кипарис	1,00	прозрачный	2,21
Кедр	0,49—0,57	непрозрачный	2,07
Каштан	0,76		
Клен	0,62—0,75	Кокс	1,0—1,7
Красное (Гондурас)	0,66	Копал	1,04—1,14
Красное (Индонезия)	0,85	Корунд	3,9—4,0
Липа	0,32—0,60	Кремень	2,62
Можжевельник	0,56	Магнетит	4,9—5,2
Ольха	0,42—0,68	Малахит	3,7—4,1
Ореховое	0,64—0,70	Мел	1,9—2,6
Остролист	0,76	Мрамор	2,6—2,81
Платан	0,40—0,60	Нахдак	4,0
Розовое	0,67—0,71	Опал	2,2
Самшит	0,95—1,16	Песчаник	2,14—2,35
Сандаловое	0,91	Пирит	4,95—5,1
Слива	0,66—0,78	Полевой шпат	2,55—2,75
Сосна:		Порфир	2,6—2,9
белая	0,35—0,50	Розовая обманка	2,9—3,2
обыкновенная	0,37—0,60		
Тик:		Серпентин	2,5—2,65
индийский	0,66—0,95	Сланец	2,6—3,3
африканский	0,96	Слюда:	
Тополь	0,35—0,5	белая	2,76—3,00
Эбеновое (гондурас)	1,11—1,33	обычная	2,6—3,2
Ясень	0,54—0,60	черная	2,7—3,1
Яблоня	0,65—0,84	Соль каменная	2,16
Ясень	0,65—0,85	Тальк	2,7—2,8
Минералы		Топаз	3,5—3,6
Агат	2,5—2,7	Торф прессованный	0,84
Алебастр:		Торианит (R)*	9,32—9,33
карбонатный	2,68—2,78	Торит (R)	4,6—6,4
сульфатный	2,26—2,32	Трогерит (R)	3,3
Алмаз	3,01—3,52	Турмалин	3,0—3,2
Альбит	2,62—2,66	Уголь:	
Аметист	2,74—2,76	антрацит	1,4—1,8
Асбест	2,0—2,8	битуминозный	1,2—1,5
Асбестовый планш	1,5		
Базальт	2,4—3,1	Уранит (R)	6,5—9,7
Берилл	2,69—2,70		

* (R) — радиоактивные минералы.

Вещество	ρ	Вещество	ρ
Уранит:		Сахар	1,59
кальцированный (R)	3,05—3,19	Снег (рыхлый)	0,12
мелкий (R)	3,22—3,60	Сталагмит	1,07
Флюорит	3,18	Стекло:	
Другие вещества		обыкновенное	2,4—2,8
Асфальт	1,1—1,5	флинтглас	3,9—5,9
Бумага	0,7—1,15	Сургуч	1,6
Гуммиарабик	1,3—1,4	Уголь древесный:	
Гуммигут	1,2	дубовый	0,57
Деготь, смола	1,02	гостовый	0,28—0,44
Желатин	1,27	Фарфор	2,2—2,5
Каучук мыльный	2,6—2,8	Фибра красная	1,45
Казеин	0,99	Целлюлоид	1,4
Картон	0,69	Цемент затвердевший	2,7—3,0
Киноварь	8,12		
Клей	1,4—2,2	Шлак	2,0—2,9
Кожа сухая	0,86	Эбонит	1,15
Кость	1,7—2,0	Янтарь	1,1
Кость слоновая	1,83—1,92	Каучук:	
Клей	1,27	чистый	0,906
Крахмал	1,53	технический	0,911
Лед	0,917	мягкий вулканизированный с 20% серы	0,929
Линолеум	1,18		
Отруб	3,5	Пластмассы	1,18
Парафин	0,87—0,91	Шелк	1,56
Пена морская	0,99—1,28	Шерсть	1,68
Пирог	2,25	Глина	0,4
Пробка	0,22—0,26		
Резина:			
мягкая	1,1		
твердая	1,19		
чистая	0,91—0,93		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Handbook** of Chemistry and Physics. 33rd edition, Cleveland, Ohio s. a.
2. **Кэй Д., Лэби Т.** Справочник физика-экспериментатора. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1949.
3. **Кэй Д., Лэби Т.** Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. Под ред. К.П. Яковлева. М., Физматгиз, 1962.
4. **Handbook** of Chemistry and Physics, 36th edition.
5. **Фастовский В. Г.** Разделение газовых смесей. М., Гостехиздат, 1947.

ГЛАВА 6

СЖИМАЕМОСТЬ ВЕЩЕСТВ

Коэффициент сжимаемости есть доля уменьшения объема тела при увеличении давления на 1 *атм* (760 *мм рт. ст.*):

$$\chi = (1/V)\,(\delta V/\delta P),$$

где δV — изменение объема V при изменении давления на δP; температура при этом предполагается постоянной. Коэффициент сжимаемости изменяется с уменьшением температуры тела, а также в зависимости давления, под которым оно находится:

$$\chi = \frac{A}{V\,(P + P_V)},$$

где A — функция, возрастающая с температурой; P — внешнее давление; P_V — давление Ван-дер-Ваальса при температуре T. Для твердых тел $\chi = 1/M$, где $M = E/[p\,(1 - 2\mu)]$ — модуль объемной деформации; E — модуль Юнга; p — плотность; μ — коэффициент Пуассона.

6.1. ГАЗЫ

В табл. 6.1 приведен относительный объем воздуха при различных давлениях и температурах. Объем при 0°С и 760 *мм рт. ст.* принят за 10⁶ [1].

В табл. 6.2—6.15 приведены значения произведений PV, отнесенные к P_0V_0 при нормальных условиях [2].

Таблица 6.1

Упругие свойства воздуха

P, *атм*	0°С	99,4°С	200,4°С	P, *атм*	0°С	99,4°С	200,4°С
100	9730		—	600	2450	3180	3883
200	5050	7300	9430	700	2288	2904	3470
300	3558	5170	6622	800	2168	2769	3219
400	2836	4170	5240	900	2070	2544	3000
500	2380	3565	4422	1000	1992	2416	2828

Таблица 6.2

Отношение PV/P_0V_0 для азота N_2

P, *атм*	Температура, °С									
	−150	−100	−50	0	50	100	150	200	250	400
0	0,5342	0,6342	0,8173	1,0005	1,1836	1,3667	1,5499	1,7330	2,0993	2,4655
1	0,5269	0,6319	0,8162	1,0006	1,1836	1,3670	1,5503	1,7336	2,1000	2,4664
10	0,4873	0,6109	0,8059	0,9961	1,1837	1,3698	1,5551	1,7398	2,1084	2,4760
20	0,4466	0,5879	0,7961	0,9924	1,1842	1,3732	1,6606	1,7470	2,1177	2,4865
40	0,3467	0,5406	0,7757	0,9840	1,1806	1,3810	1,5724	1,7618	2,1367	2,5060
60	0,2462	0,4970	0,7556	0,9840	1,1908	1,3901	1,5851	1,7773	2,1560	2,5300
80	—	0,4631	0,7476	0,9838	1,1967	1,4095	1,5989	1,7936	2,1756	2,5525
100	—	0,4471	0,7407	0,9860	1,2044	1,4123	1,6196	1,8106	2,1956	2,5748
200	—	—	0,765	1,036	1,2692	1,500	1,700	1,912	2,313	2,697
400	—	—	1,033	1,257	1,483	1,704	1,920	2,140	2,551	2,946
600	—	—	1,310	1,525	1,741	1,957	2,171	2,395	2,804	3,198
800	—	—	1,593	1,799	2,019	2,221	2,432	2,656	3,062	3,459
1000	—	—	1,857	2,068	2,276	2,488	2,696	2,921	3,317	3,722

Таблица 6.3

Отношение PV/P_0V_0 для аммиака NH_3

P, *атм*	Температура, °С					P, *атм*	Температура, °С				
	100	150	200	250	300		100	150	200	250	300
0	1,3896	1,6747	1,7009	1,5468	2,1326	60	0,997	1,329	1,587	1,819	2,034
1	1,3805	1,6675	1,7546	1,9420	2,1276	60	—	1,274	1,551	1,793	2,016
10	1,393	1,527	1,795	1,919	2,110	70	—	1,215	1,514	1,768	1,967
20	1,251	1,481	1,691	1,892	2,091	80	—	—	1,477	1,742	1,976
30	1,179	1,433	1,657	1,860	2,071	90	—	—	1,439	1,716	1,980
40	1,005	1,383	1,622	1,643	2,053	100	—	—	—	1,690	1,942

Таблица 64

Отношение PV/P_0V_0 для аргона Ar

P, атм	Температура, °C							
	−100	−50	0	50	100	200	300	400
0	0,6346	0,8178	1,0010	1,1842	1,3674	1,7339	2,1003	2,4668
1	0,6316	0,8116	1,0000	1,1837	1,3673	1,7341	2,1008	2,4675
10	0,6049	0,7610	0,9914	1,1795	1,3668	1,7364	2,1064	2,4736
20	0,5730	0,7843	0,9923	1,1651	1,3644	1,7387	2,1105	2,4801
40	0,5029	0,7516	0,9653	1,1634	1,3625	1,7440	2,1211	2,4944
60	0,4237	0,7206	0,9506	1,1611	1,3619	1,7504	2,1321	2,5078
80	0,3340	0,6919	0,9327	1,1503	1,3625	1,7517	2,1434	2,5214
100	—	0,6669	0,9262	1,1529	1,3646	1,7669	2,1550	2,5351
150	—	—	—	—	1,3741	—	—	—
200	—	—	—	—	1,3915			

Таблица 6.5

Отношение PV/P_0V_0 для водорода H_2

P, атм	Температура, °C										
	−207,0	−150	−100	−50	−30	0	50	100	200	300	400
0	0,2369	0,3299	0,4506	0,6335	0,6162	0,9994	1,1623	1,3652	1,7311	2,097	2,463
1	0,2373	0,3296	0,4507	0,6330	0,8176	1,0000	1,1630	1,3650	1,7316	2,097	2,463
10	0,2366	0,3278	0,4521	0,6377	0,8219	1,0056	1,1691	1,3721	1,7361	2,104	2,468
20	0,2358	0,3264	0,4540	0,6420	0,8274	1,0119	1,1769	1,3791	1,7451	2,111	2,475
40	0,2134	0,3261	0,4591	0,6513	0,8388	1,0247	1,2094	1,3930	1,7591	2,126	2,494
60	0,2126	0,3299	0,4657	0,6612	0,8506	1,0376	1,2229	1,4069	1,7731	2,141	2,495
80	0,2186	0,3345	0,4730	0,6719	0,8626	1,0508	1,2364	1,4210	1,7872	2,156	2,505
100	—	0,3433	0,4808	0,6833	0,8754	1,0641	1,2500	1,4352	1,8019	2,171	2,516
200	—	—	—	—	0,941	1,133	1,320	1,507	1,685	2,251	2,606
400	—	—	—	—	1,083	1,276	1,464	1,651	2,034	2,398	2,765
600	—	—	—	—	1,230	1,422	1,606	1,795	2,177	2,540	—
800	—	—	—	—	1,376	1,567	1,751	1,938	2,320	2,677	—
1000	—			—	1,519	1,709	1,892	2,078	2,461	2,813	—

Таблица 6.6

Отношение PV/P_0V_0 для гелия He

P, атм	Температура, °C								
	200,2	104	−150	−100	−50	0	50	100	200
0	0,0745	0,2384	0,3299	0,4506	0,6336	0,8165	0,9996	1,1824	1,3654
1	0,0745	0,2380	0,3305	0,4512	0,6342	0,8171	1,0000	1,1829	1,3658
10	0,0744	0,2426	0,3348	0,4558	0,6390	0,8219	1,0047	1,1876	1,3704
50	0,0801	0,2621	0,3547	0,4769	0,6606	0,8434	1,0257	1,2086	1,3907
100	0,1200	0,2880	0,3816	0,5042	0,6894	0,8707	1,0519	1,2348	1,4161

Продолжение табл. 6.6

P, атм	Температура, °C			P, атм	Температура, °C					
	300	300	400		−60	−25	0	50	100	200
0	1,7313	2,0972	2,4631	200	0,8490	0,9759	1,1036	1,2659	1,4000	1,8265
1	1,7317	2,0975	2,4633	400	0,9491	1,0769	1,2026	1,3648	1,5655	1,9179
10	1,7361	2,1017	2,4674	600	1,0481	1,1744	1,3009	1,4765	1,6653	2,0152
50	1,7569	2,1204	2,4855	800	1,1417	1,2692	1,3924	1,5706	1,7481	2,0963
100	1,7805	2,1439	2,5081	1000	—	—	1,4878	1,6602	1,8359	2,1880

Таблица 6.7

Отношение PV/P_0V_0 для двуокиси углерода CO_2

P, атм	Температура, °С											
	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	155	200
0	1,0058	1,0437	1,0805	1,1174	1,1543	1,1911	1,2280	1,3017	1,3754	1,5116	1,7306	1,9769
50	0,105	0,115	0,680	0,775	0,850	0,920	0,964	1,096	1,207	1,380	1,633	1,893
75	0,153	0,164	0,180	0,919	0,620	0,747	0,841	0,986	1,118	1,318	1,615	1,867
100	0,202	0,213	0,229	0,255	0,309	0,461	0,561	0,873	1,030	1,259	1,582	1,847
150	0,296	0,309	0,326	0,346	0,377	0,419	0,485	0,681	0,876	1,158	1,530	1,818
200	0,385	0,401	0,419	0,440	0,468	0,500	0,543	0,660	0,815	1,056	1,496	1,804
300	0,560	0,578	0,599	0,623	0,649	0,677	0,710	0,790	0,890	1,106	1,494	1,820
400	0,728	0,748	0,771	0,795	0,823	0,852	0,884	0,956	1,036	1,218	1,583	1,883
500	0,891	0,913	0,938	0,963	0,990	1,021	1,054	1,124	1,200	1,362	1,678	—
600	1,050	1,073	1,100	1,126	1,157	1,187	1,219	1,290	1,366	1,518	1,812	—
700	1,206	1,239	1,259	1,289	1,319	1,350	1,383	1,454	1,526	1,676	1,956	—
800	1,358	1,387	1,417	1,448	1,479	1,510	1,544	1,614	1,689	1,830	2,108	—
900	1,509	1,539	1,569	1,639	1,633	1,665	1,700	1,771	1,846	1,994	2,260	—
1000	1,660	1,685	1,716	1,760	1,760	1,814	1,848	1,921	1,999	—	—	—

Таблица 6.8

Отношение PV/P_cV_c для кислорода O_2

P, атм	Температура, °К						P, атм	Температура, °С					
	0	15,6	50	100	150,2	200		0	15,6	50	100	150,6	200
0	1,0010	—	1,1942	1,3674	—	—	700	1,39	1,4515	—	1,85	2,2415	2,24
1	1,0000	—	1,1837	1,3672	—	—	800	1,50	1,560	—	1,93	2,343	2,34
10	0,991	—	1,180	1,366	—	—	1000	1,74	1,798	—	2,15	—	—
20	0,982	—	1,175	1,365	—	—	1200	1,9699	2,0266	—	—	—	—
40	0,965	—	1,167	1,363	—	—	1400	2,1798	2,247	—	—	—	—
60	0,949	—	1,161	1,363	—	—	1600	2,396	2,464	—	—	—	—
80	0,936	—	1,156	1,360	—		1800	2,6073	2,6793	—	—	—	—
100	0,923	1,0045	1,152	1,365	—	—	2000	2,816	2,888	—	—	—	—
200	0,91	0,9945	—	1,40	1,199	1,32	2200	3,0217	3,0969		—	—	—
300	0,96	1,042	—	1,45	1,885	1,89	2400	3,2244	3,2976	—	—	—	—
400	1,05	1,125	—	1,53	1,961	1,96	2600	3,4229	3,4995	—	—	—	—
500	1,16	1,227	—	1,62	2,05	2,05	2800	3,6176	3,6946	—	—	—	—
600	1,27	1,337	—	1,72	2,142	2,14	3000	—	3,868	—	—	—	—

Таблица 6.9

Отношение PV/P_cV_c для криптона Kr

P, атм	При температуре 11,2°С	P, атм	При температуре 11,2°С	P, атм	При температуре 275,3°С
25,86	1,012	53,77	0,957	50,53	1,892
27,91	1,009	57,81	0,918	54,82	1,880
30,31	1,000	63,07	0,901	59,38	1,874
33,15	0,993	69,46	0,854	65,12	1,868
36,60	0,980	72,10	0,803	71,20	1,862
40,89	0,968	87,39	0,841	79,25	1,859
46,29	0,953	101,74	0,851	89,53	1,856
49,58	0,940	—	—	104,09	1,877

Таблица 6.10

Отношение PV/P_cV_c для ксенона Xe

P, атм	При температуре 11,2°С	P, атм	При температуре 11,2°С	P, атм	При температуре 207,9°С
25,65	0,697	36,39	0,628	53,53	1,397
26,62	0,691	38,42	0,612	57,97	1,389
27,68	0,685	40,89	0,588	63,21	1,377
28,79	0,677	43,24	0,570	69,62	1,375
30,07	0,670	46,22	0,552	77,64	1,359
31,40	0,659	49,39	0,522	88,15	1,364
32,92	0,650	53,20	0,507	102,55	1,357
34,57	0,640	—	—	—	—

Таблица 6.11

Отношение PV/P_0V_0 для азота N₂

P, атм	Температура, °С										
	−237,9	−168,5	−150	−100	−50	0	50	100	200	300	400
0	0,2388	0,3317	0,4506	0,6336	0,8166	0,9995	1,1825	1,3654	1,7313	2,0973	2,4632
1	0,2380	0,3315	0,4507	0,6340	0,8170	1,0000	1,1830	1,3659	1,7318	2,0977	2,4626
10	0,2300	0,325	0,451	0,637	0,821	1,0044	1,1870	1,3710	1,7371	2,1033	2,4691
50	0,196	0,319	0,454	0,649	0,838	1,024	1,209	1,394	1,761	2,128	2,494
100	0,165	0,318	0,465	0,667	0,861	1,050	1,238	1,422	1,791	2,156	2,524
150	—	—	—	—	—	1,077	1,264	1,452	—	—	—
200	—	—	—	—	—	1,105	1,293	1,481	—	—	—

Таблица 6.12

Отношение PV/P_0V_0 для окиси азота NO

P, атм	Температура, °С								
	−20	−10	−25	0	25	50	100	150	200
0	0,744	0,817	0,900	1,0000	1,092	1,184	1,367	1,550	1,733
1	0,743	0,816	0,902	1,000	1,092	1,184	1,367	1,550	1,734
25	0,703	0,790	0,894	0,989	1,087	1,182	1,375	1,570	1,758
50	0,664	0,762	0,877	0,979	1,082	1,185	1,384	1,582	1,776
75	0,632	0,739	0,863	0,973	1,083	1,186	1,395	1,598	1,795
100	0,615	0,726	0,859	0,972	1,084	1,155	1,406	1,615	1,815
150	0,619	0,730	0,866	0,987	1,108	1,219	1,439	1,664	1,860
200	0,663	0,766	0,902	1,015	1,136	1,256	1,479	1,699	1,905
300	0,796	0,877	1,009	1,113	1,232	1,352	1,580	1,805	2,016
400	0,943	1,028	1,140	1,242	1,356	1,472	1,696	1,918	2,138
600	1,239	1,392	1,428	1,524	1,625	1,739	1,956	2,176	2,392
800	1,524	1,610	1,715	1,806	1,990	2,014	2,224	2,441	2,660
1000	1,790	1,687	1,994	2,083	2,166	2,283	2,404	2,714	2,926

Таблица 6.13

Отношение PV/P_0V_0 для метана CH_4

P, атм	Температура, °С								
	−70	−50	−25	0	25	50	100	150	200
0	0,7255	0,8169	0,9105	1,0024	1,0949	1,1869	1,3694	1,5529	1,7363
1	0,7410	0,8150	0,9075	1,0000	1,0922	1,1845	1,3686	1,5526	1,7363
20	0,647	0,740	0,849	0,954	1,056	1,156	1,351	1,543	—
40	0,524	0,655	0,787	0,907	1,020	1,128	1,335	1,536	—
60	0,337	0,565	0,724	0,861	0,960	1,102	1,321	1,530	—
80	0,258	0,460	0,665	0,819	0,955	1,080	1,310	1,526	—
100	0,281	0,409	0,417	0,784	0,900	1,062	1,302	1,524	—
120	0,318	0,410	0,589	0,758	0,910	1,048	1,296	1,525	—
140	0,354	0,430	0,580	0,743	0,898	1,039	1,294	1,527	—
160	0,392	0,460	0,589	0,740	0,893	1,035	1,295	1,532	—
180	0,429	0,429	0,609	0,746	0,894	1,036	1,298	1,540	—
200	0,466	0,527	0,632	0,761	0,903	1,043	1,305	1,548	—
300	0,646	0,703	0,789	0,889	1,006	1,129	1,370	1,693	—
400	0,819	0,875	0,956	1,049	1,150	1,261	1,493	1,727	—
500	0,987	1,043	1,122	1,209	1,306	1,411	1,628	1,854	—
600	1,149	1,207	1,285	1,371	1,466	1,565	1,773	1,994	—
800	1,467	1,525	1,606	1,689	1,780	1,876	2,074	2,283	—
1000	1,766	1,820	1,911	2,000	2,089	2,185	2,376	2,580	—

Таблица 6.14

Отношение PV/P_0V_0 для этана C_2H_6

P, атм	Температура, °С					
	25	50	100	150	200	250
0	1,1004	1,1970	1,3822	1,5674	1,7526	1,9378
10	1,012	1,118	1,325	1,524	1,713	1,911
20	0,909	1,040	1,209	1,462	1,652	1,865
30	0,784	0,950	1,214	1,444	1,656	1,864
40	0,586	0,848	1,158	1,400	1,635	1,843
60		0,557	1,040	1,334	1,593	1,809
80	—	—	0,926	1,267	1,541	1,789
100				1,209	1,505	1,760

Таблица 6.15

Отношение PV/P_0V_0 для этилена C_2H_4

P, атм	Температура, °С							
	0	20	40	60	80	100	130,4	190,7
0	1,0073	1,061	1,156	1,220	1,302	1,376	1,514	1,739
50	0,176	0,620	0,814	0,954	1,077	1,192	1,334	1,652
100	0,310	0,360	0,470	0,669	0,846	1,005	1,247	1,590
150	0,441	0,496	0,550	0,649	0,776	0,924	1,178	1,540
200	0,565	0,610	0,660	0,744	0,838	0,946	1,174	1,537
300	0,806	0,852	0,908	0,972	1,046	1,133	1,310	1,628
400	1,036	1,084	1,140	1,202	1,277	1,356	1,510	1,790
500	1,255	1,307	1,367	1,431	1,500	1,577	1,721	1,985
600	1,472	1,525	1,586	1,652	1,721	1,795	1,936	2,191
700	1,683	1,737	1,799	1,867	1,936	2,011	2,153	2,399
800	1,888	1,946	2,010	2,077	2,179	2,294	2,368	2,606
900	2,090	2,155	2,217	2,286	2,359	2,434	2,585	2,810
1000	2,289	2,356	2,421	2,492	2,566	2,642	2,798	—

6.2. ЖИДКОСТИ

Таблица 6.16

Средний коэффициент сжимаемости воды χ, 10^{-4} *атм*$^{-1}$ [2]

Интервал давлений P_1—P_2, атм	Температура, °С												
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60	80	100
1—25	52,5	—	50,0	—	49,1	—	—	—	—	—	—	—	—
25—50	51,0	—	49,2	—	47,0	—	—	—	—	—	—	—	—
1—100	51,1	49,3	48,3	47,3	46,8	46,0	44,9	44,9	45,5	46,2	—	47,8	—
100—200	49,2	47,5	46,1	45,1	44,2	43,6	42,9	42,5	42,7	43,0	—	46,8	50,7
200—300	48,0	46,2	45,3	44,3	43,4	42,9	41,4	41,3	41,5	42,5	43,6	45,9	70,9
300—400	46,6	44,9	44,1	43,5	42,4	41,4	40,7	40,2	40,6	41,1	42,2	44,6	75,1
400—500	45,5	44,4	43,0	42,2	41,5	40,7	40,4	39,9	39,4	39,8	40,8	43,4	68,2
500—600	43,6	43,0	41,6	41,1	40,4	39,2	39,0	39,0	38,8	39,1	39,9	41,6	66,0
600—700	42,9	40,9	40,5	39,8	39,4	38,7	38,2	37,7	38,3	38,0	38,7	40,7	62,7
700—800	41,6	40,7	39,8	39,0	38,8	37,5	37,4	37,1	36,9	37,4	37,6	38,9	61,3
800—900	40,6	39,3	38,9	38,0	37,3	36,8	36,2	36,2	36,3	36,6	36,8	38,2	58,9
900—1000	—	—	—	36,8	36,5	36,0	35,3	35,3	36,0	36,1	36,2	37,1	56,5

Таблица 6.17

Средний коэффициент сжимаемости жидкостей [1—4]

Название	Формула	Давление, атм	Температура, °С	γ, $(10^{-4}$ атм$^{-1})$
Анилин	$C_6H_5NH_2$	65,5	25	43,2
		181,5	25	40,5
		281,5	25	38,3
		390	25	36,1
Ацетон	$(CH_3)_2CO$	1—500	0	82
		500—1000	0	59
		1000—1500	0	47
		1500—2000	0	40
Бензол	C_6H_6	8,9—36,5	14,2	111
		8,9—36,5	99,5	276
		0,14—18	12,9	67
		1—4	15,4	67
		2—8	34,9	100
		4,5—19	99,9	190
		98,7—296	20	78,7
		296—494	20	67,5
Бромоформ	$CHBr_3$	8	17,9	91,9
		0—98,7	20	51,0
		98,7—197,4	20	47,5
		197,4—296	20	44,0
		296—395	20	42,0
		395—494	20	41,0
Гексан	$CH_3(CH_2)_4CH_3$	0—1	23	159
Гептан	$CH_3(CH_2)_5CH_3$	0—1	23	134
Глицерин	$CHOH(CH_2OH)_2$	1—10	14,6	22,1
			20,5	25,1
Декан	$CH_3(CH_2)_8CH_3$	0—1	23	105
Дифениламин	$(C_6H_5)_2NH$	0—500	65	57
		0—900	100	64
		0—100	185	110
Керосин		—	10,5	69,6
Кислота:				
капроновая	$C_5H_{11}COOH$	20—400	30	68
		20—100	65	90
		20—200	100	109
пальмитиновая	$C_{15}H_{31}COOH$	20—100	65	90
		20—300	185	134
		20—400	310	220
серная	H_2SO_4	1—16	0	302,5
уксусная	CH_3COOH	92,5	25	81,4
		216,5	25	72,6
		494	25	57,1
Кумол (изопропилбензол)	$C_6H_5CH(CH_3)_2$	98,7—296	20	71,3
		296—494	20	61,2
Масло:				
арсенальное	—	—	20,5	63,26
парафиновое	—	—	14,6	62,67
оливковое	—	—	20	63
Мезитилен (1,3,5-триметилбензол)	$C_6H_3(CH_3)_3$	98,7—296	20	69,4
		296—494	20	59,1
Нитробензол	$C_6H_5NO_2$	86,5	25	46,1
		192	25	43,0
		300	25	40,1
		419	25	38,1
Октан	$CH_3(CH_2)_6CH_3$	0—1	23	121
		20—100	64	83
		20—400	100	24
		20—600	185	137
		20—400	310	236
Пентан	$CH_3(CH_2)_3CH_3$	1—29	0	174
		1—29	20	242
		0	0	175,9
		484	0	94,0
		967	0	68,9
Пропилбензол	$C_6H_5C_3H_7$	98,7—296	20	70,7
		296—494	20	61,0

Название	Формула	Давление, атм	Температура, °С	10^{-3} Па·с
Псевдокумол (1,2,4-триметилбензол)	$C_6H_3(CH_3)_3$	98,7—296	20	65,2
		296—494	20	56,9
Сероуглерод	CS_2	1—2	20	80,95
		1—500	0	60
		500—1000	0	53
		1000—1500	0	43
		1500—2000	0	37
		2000—2500	0	33
Спирт:				
аллиловый	$CH_2{=}CHCH_2OH$	1—500	9,6	69
		500—1000	9,6	51
		1000—1500	9,6	43
		1500—2000	9,6	36
бензиловый	$C_6H_5CH_2OH$	8	17,7	90,5
бутиловый	$CH_3(CH_2)_2CH_2OH$	8	17,95	96
изопропиловый	$(CH_3)_2CHOH$	8	5,6	89,6
		8	17,85	105
метиловый	CH_3OH	1—500	0	79,4
		500—1000	0	58,3
		1000—1500	0	47
		1500—2000	0	40
		2000—2500	0	29
		6,5—37,1	14,7	104
		6,7—37,3	100	221
пропиловый	C_3H_7OH	1—500	0	69
		500—1000	0	52
		1000—1500	0	42
		2000—3000	0	27
этиловый	CH_3CH_2OH	1—50	0	96
		100—200	0	65
		300—400	0	73
		500—600	0	64
		600—700	0	60
		900—1000	0	52
		1—50	20	112
		50—100	20	102
		100—200	20	95
		200—300	20	86
		300—400	20	80
		400—500	20	73
		500—600	20	69
		150—400	28	81
		1—50	40	126
		150—400	65	100
		150—400	100	132
		150—400	185	245
		150—400	310	1530
Тимол (5-метил-2-изопропилфенол)	$C_6H_3(CH_3)(C_3H_7)OH$	200—400	61	69
		20—400	84	66
		20—400	100	80
		20—400	310	269
п-Толуидин	$CH_3C_6H_4NH_2$	1—150	45	51,2
		20—400	28	56
		20—400	100	77
		20—400	185	142
		20—400	310	243
Углерод четыреххлористый	CCl_4	1—5,25	10	70
		0—98,7	20	91,6
		98,7—197,4	20	69,9
		197,4—296	20	63,5
		296—395	20	75,5
		395—494	20	60,9
		542,5	20	62,5
		691	20	55,0

Название	Формула	Давление, атм	Температура, °С	$\lambda \cdot 10^{-4}$, дж/м·с·°К
Углерода двуокись	CO_2	60	13	1740
		70	13	900
		80	13	660
		90	13	440
Фторбензол	C_6H_5F	1—16,5	13,9	87,7
Хлорбензол	C_6H_5Cl	0,4—18	15,3	67
		0,4—18	35	77
		1—2	80	108,4
		0,4—18	100	127
Хлороформ	$CHCl_3$	1—2	0	87,27
		0—98,7	20	94,9
		98,7—197,4	20	89,8
		197,4—295,1	20	80,1
		295,1—395	20	72,9
		395—494	20	67,6
		1—2	60	130,13
		8—9	100	211
		19—34	100	206
Этил:				
бромистый	C_2H_5Br	1—500	10,1	90
		500—1000	10,1	63
		1000—1500	10,1	50
		2000—2500	10,1	36
		1—16,5	13,7	113,4
иодистый	C_2H_5I	1—500	10,6	74
		500—1000	10,6	55
		1000—1500	10,6	46
		1500—2000	10,6	38
		2000—2500	10,6	34
хлористый	C_2H_5Cl	1—500	0	103
		500—1000	0	69
		1000—1500	0	55
		2000—2500	0	39
		8,7—57,22	15,2	153
		12,77—34,47	99	165
Этилен:				
бромистый	$C_2H_4Br_2$	1—5,25	10	55,6
		1—5,25	64	76,6
хлористый	$C_2H_4Cl_2$	1—5,25	10	67,7
		1—5,25	75	111,1
Эфирбензол:				
пробутиловый (бутилбензоат)	$C_6H_5COOC_4H_9$	1—5,25	10	59
валериановобутиловый (бутилвалерат)	$C_4H_9COOC_4H_9$	1—5,25	10	92
валериановометиловый (метилвалерат)	$C_4H_9COOCH_3$	1—5,25	10	91
диэтиловый (этиловый)	$(C_2H_5)_2O$	1000	—100,6	34,5
		100	0	125,7
		200	0	112,2
		500	0	84,5
		1000	0	63,5
		1—8	8,1	163,8
		0,4—17,5	12,2	163
		8,43—25,4	13,5	169
		2—19	34,8	207
		1—2000	35	42,5
		8,6—34,3	63	293
		8,6—34,3	76,5	363
		8,6—36,5	90	523
		100—200	185	741
		100—400	185	478
масляноэтиловый (бутилбутират)	$C_3H_7COOC_4H_9$	1—5,25	10	90

Название	Формула	Давление, атм	Температура, °C	$n \cdot 10^{-4}$, см$^{-3}$
масляноэтиловый (этилбутират)	$C_3H_7COOC_2H_5$	1—5,25	10	80
уксусноэтиловый (этилацетат)	$CH_3COOC_2H_5$	5,1—37,53	14,3	97
уксусноэтиловый (этилацетат)	$CH_3COOC_2H_5$	5,12—37,45 5,13—37,15	13,3 60,6	104 250

6.3. ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

Таблица 6.18

Коэффициент сжимаемости твердых тел при температуре 20°C [3]

Элемент	$\frac{1}{\beta}$, см^2/кг	Элемент	$\frac{1}{\beta}$, см^2/кг	Элемент	$\frac{1}{\beta}$, см^2/кг	Элемент	$\frac{1}{\beta}$, см^2/кг	Элемент	$\frac{1}{\beta}$, см^2/кг	Элемент	$\frac{1}{\beta}$, см^2/кг
Алюминий	1,38	Калий	32,4	Молибден	0,47	Ртуть	4,05	Тантал	2,33		
		Кальций	5,87	Молибдн	4,56	Рубидий	40,5	Углерод:			
Бром	52,45	Кремний	0,324	Натрий	16,99	Свинец	2,23	алмаз	0,23	Хром	0,91
Вольфрам	3,04	Литий	9,1	Никель	0,63	Селен	12,15	графит	3,04		
Железо	0,597	Магний	2,89	Олово	1,82	Сера	13,16	Фосфор:		Цезий	62,77
Золото	0,617	Марганец	0,86	Палладий	0,56	Серебро	1,01	белый	20,75		
Иод	13,6	Медь	0,74	Платина	0,386	Сурьма	2,43	красный	9,31	Цинк	1,72
Кадмий	2,13										

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Handbook of Chemistry and Physics. 33rd ed., Cleveland, Ohio s. a.
2. Справочник химика. Т. 1. М., 1962, с. 572—579.
3. Кэй Д., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз, 1962, с. 40—41.
4. Бачинский А. И., Путилов В. В., Суворов Н. П. Справочник по физике. М., Учпедгиз, 1951.

ГЛАВА 7

АКУСТИКА

Скорость звука в газе можно рассчитать по формуле

$$v = \sqrt{(C_p/C_V)(P/\rho)},$$

где C_p/C_V — отношение удельных теплоемкостей при постоянных давлении и объеме; P — давление; ρ — плотность газа;

в жидкости

$$v = 1/\sqrt{\beta \cdot \rho},$$

где β — коэффициент адиабатического сжатия.

В твердом теле скорость продольных волн

$$v_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{1-\sigma}{1+\sigma} \cdot \frac{1}{1-2\sigma}},$$

где E — модуль Юнга; σ — коэффициент Пуассона; скорость поперечных волн

$$v_\perp = \sqrt{E/\rho} \cdot \sqrt{1/[2(1+\sigma)]};$$

скорость звука в тонком стержне

$$v = \sqrt{E/\rho}.$$

Поглощение звуковых волн в веществе характеризуется коэффициентом

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{A_0}{A_d},$$

где A_0 — первоначальная амплитуда плоской волны; A_d — амплитуда волны на расстоянии d. Коэффициент поглощения звука в газе и жидкости связан с вязкостью и коэффициентом теплопроводности среды выражением

$$\alpha = \frac{2\pi^2 f^2}{v^3 \rho} \left(\frac{4}{3}\eta + \frac{\gamma - 1}{C_p} \varkappa \right),$$

где f — частота; v — скорость звука; η — динамический коэффициент вязкости; $\varkappa$ — коэффициент теплопроводности.

Коэффициент поглощения α измеряется в *нп/см* (см$^{-1}$); для перечета в *дб/м* значение α в *нп/см* нужно умножить на 868,6. В качестве характеристики поглощения часто пользуются не зависящим от частоты отношением α/f^2. Мерой поглощения на расстоянии одной длины волны является произведение $\alpha\lambda$.

В твердых телах мерой затухания звука является коэффициент потерь δ, при этом $\alpha = \delta\pi/\lambda$. Затухание звука в твердых телах характеризуют также добротностью Q. В случае продольных колебаний в стержнях $\alpha = \pi f/(Qv)$.

Таблица 7.1

Скорость звука в газах и парах

Вещество	Температура, °С	Давление, атм	Скорость звука, м/сек	Литература
Азот	0	—	334,0	[1]
	19,1	—	349,0	[2]
Аргон (рис. 7.1, 7.2)	0	—	319,0	[1]
	20	—	321	[2]
	30,20	63,780	325,23	[3]
Аммиак	0	—	415	[1]
	18		426,2	[2]
Амиловый спирт	136	—	216,8	[2]
Ацетилен	30	59,6	257	[2]
Ацетон	18	—	327	[2]
	97	—	270	[4]
	136	—	252,2	[4]
Бензол	97,1	—	202	[5]
	134	96	212,6	[2]
Бромистый водород	0	—	200	[6]
Бром	0	—	135	[2]
Бутиловый спирт:				
вторичный	134	95	276	[2]
третичный	134	95	180	[2]
Воздух (рис. 7.3)	0		331,45	[6]
	30,40	63,780	350,70	[3]
Водород (рис. 7.4, 7.5)	0		1284	[1]
	18	—	1301	[2]
	100		1400	[2]
Водяной пар	134	—	494	[5]
Винилацетат	134	—	203	[2]
Гелий	0	—	965	[1]
	25,99	63,780	1000,43	[3]
Гептан	134	94	190,6	[2]
Дейтерий	0	—	290	[6]
Двуокись серы	0	—	213	[2]
	18	—	216,2	[2]
Диметиловый эфир	97,1	—	274	[5]
Дипропиловый эфир	97,1	—	194	[6]
Дихлорэтан	97,1	—	181	[5]
	134		190	[5]
Диэтиловый эфир	97,1	—	206	[6]
	134	—	217	[5]
Закись азота	0	—	263	[5]
Иодистый водород	0	—	157	[2]
Иодистый этил	76	465	162	[2]
Иодистый метил	43	465	154	[2]
Иод	0	—	108	[2]
Изопропиловый спирт	97,1	95	255	[2]
	134	95	270,2	[2]
Кислород	0	42,3	314	[1]
Криптон	30,26	63,790	224,36	[3]
Метан	0	—	430	[5]
Метиловый спирт	97,1	95	335	[2]
	134	—	352,2	[2]
Метилциклогексан	134	—	185	[2]
Метиловый эфир	97,1	95	275,9	[2]
Неон	0	—	435,4	[1]
	30,16	80,780	461,29	[3]
Окись азота	0	—	324	[2]
	16		332,4	[2]
Окись углерода	0	—	337	[2]
Пентан	134	—	220	[2]

Продолжение табл. 7.1

Вещество	Температура, °С	Давление, атм	Скорость звука, м/сек	Литература
Пропиловый спирт	134	95	244,6	[2]
Пропионовая кислота	146		232	[2]
Пропиловый эфир	97,1	50	194	[2]
Сероуглерод	97,1	50	220,1	[5]
	86	59,5	205	[2]
Сероводород	0		289,3	[5]
Специальный газ	0	—	253	[6]
Углекислый газ (рис. 7.6)	0	43,2	260,7	[2]
	20	58,5	274,6	[2]
Фтористый кремний	0		167	[5]
Хлор	0	—	206	[2]
Хлористый водород	0	—	206	[2]
Хлористый метилен	97,1	95	201	[5]
	134	95	210	[5]
Хлористый этил	18	—	426,2	[2]
Хлороформ	97,1	95	171	[6]
	134	96	179,7	[2]
Циклогексан	97,1		191	[5]
	134	96	201,9	[2]
Четыреххлористый углерод	97,1	95	145	[5]
	134	—	163,6	[2]
Четырехфтористый углерод	22	—	178,2	[2]
Этан (рис. 7.7)	10	—	306	[5]
Этилацетат	97,1		189	[5]
	134	96	196,6	[5]
Этилен	0		317	[5]
	20	59,6	329	[2]
Этилметилкетон	134	—	223	[5]
Этиловый спирт	97,1	95	270	[2]
	134	96	284	[2]
Этиловый эфир	97,1	—	206	[2]
	134	—	217	[2]

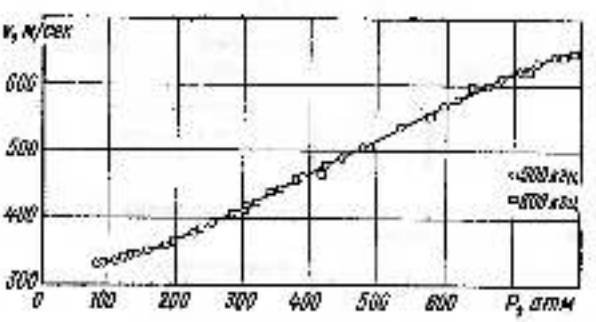


Рис. 7.1. Зависимость скорости звука в аргоне от давления [9].

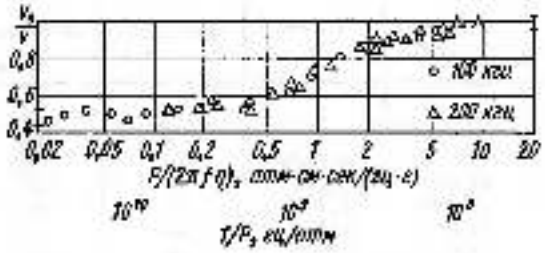


Рис. 7.2. Дисперсия звука в аргоне [c_0 — скорость звука при низких (звуковых) частотах] [10].

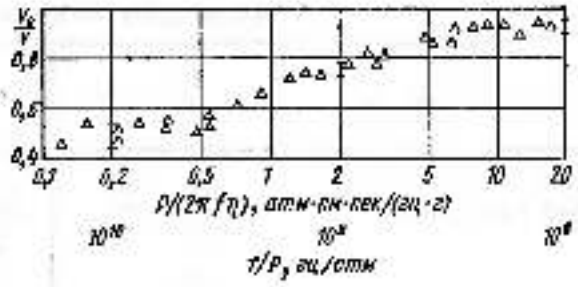


Рис. 7.5. Дисперсия звука в водороде при $f = 200$ кгц [10].

Рис. 7.3. Дисперсия звука в воздухе [10].

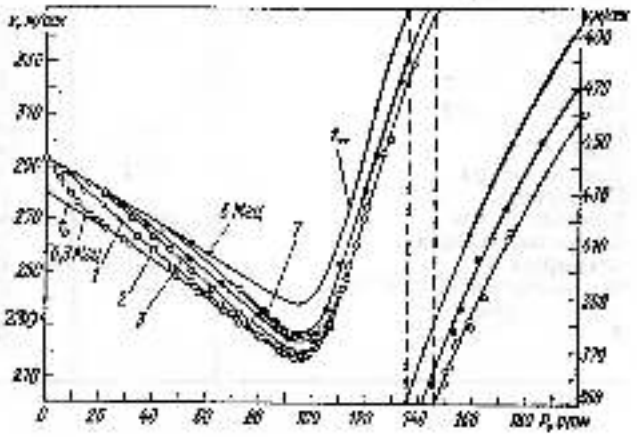


Рис. 7.6. Зависимость скорости звука в углекислом газе ($t = 50,8°$ C) от давления (f_0 — низкие и f_∞ — высокие частоты) [12].

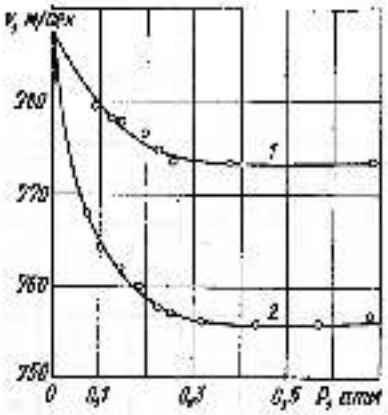


Рис. 7.4. Зависимость скорости звука в водороде ($T = 90,8°$ K) от давления [11]:

1 — в нормальном водороде; 2 — в водороде с примесью 20% парамагнетика.

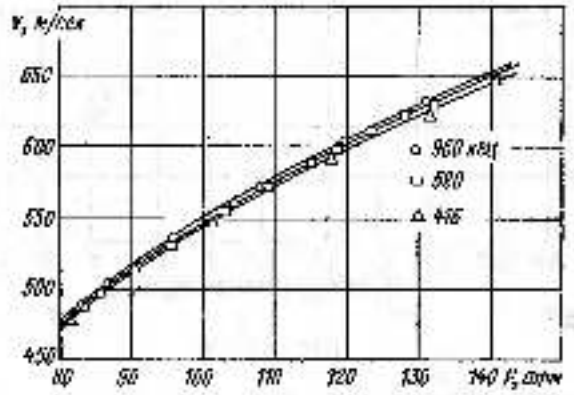


Рис. 7.7. Зависимость скорости звука в этане от давления при различных частотах [9].

Таблица 7.2

Коэффициент поглощения звука в газах и парах

Вещество	t, °C	f, кгц	P, атм	α, см⁻¹	$\alpha\lambda/2\pi$, см·см²/см	Литература
Азот	19,9	598,9	0,97	—	1,35	[4]
Аргон (рис. 7.8, 7.9)	20	1260	1	—	1,9	[4]
	—	500	0,514	0,0834	—	[8]
		500	0,477	0,0590	—	[8]
		500	0,329	0,138	—	[8]
		500	0,221	0,212	—	[8]
		500	0,182	0,295	—	[8]
Ацетон	—	97,8	—	0,5	—	[2]
Бензол	—	97,8	—	1,0	—	[2]
Водород (рис. 7.10)	19,9	598,9	1	—	3,09	[4]
Воздух (рис. 7.11, 7.12)	—	—	—	0,697	1,85	[7]
Гелий (см. рис. 7.9)	17,5	598,9	0,99	—	2,95	[4]
Иодистый метил	—	97,8	—	0,15	—	[2]
Иодистый этил		97,8		0,46	—	[2]
Кислород	19,6	598,9	0,99	—	1,66	[4]
Ксенон		500	0,544	—	0,15	[8]
		500	0,243	—	0,345	[8]
		500	0,090	—	0,900	[8]
Метиловый спирт	—	97,6	—	0,06	—	[2]
Неон	19	304,4	0,65	—	5,82	[4]
Окись азота	16,3	598,9	0,16	—	1,83	[4]
Окись углерода	18,7	304,4	0,85	—	5,78	[4]
Сероуглерод	—	97,8	—	1,2		[2]
Углекислый газ	16,6	304,4	0,98	—	27,1	[4]
Хлористый метилен	—	97,8	—	0,7		[2]
Хлороформ	—	97,8		0,7	—	[2]
Четыреххлористый углерод	—	97,8	—	0,55	—	[2]
Этиловый спирт	—	97,8	—	0,7	—	[2]
Этиловый эфир	—	97,8	—	0,2	—	[2]

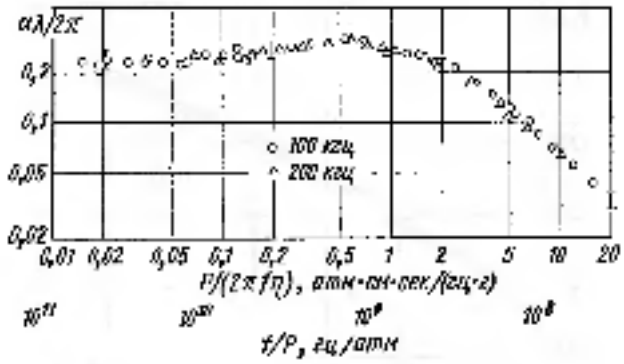


Рис. 7.8. Зависимость коэффициента поглощения звука в аргоне от давления [10].

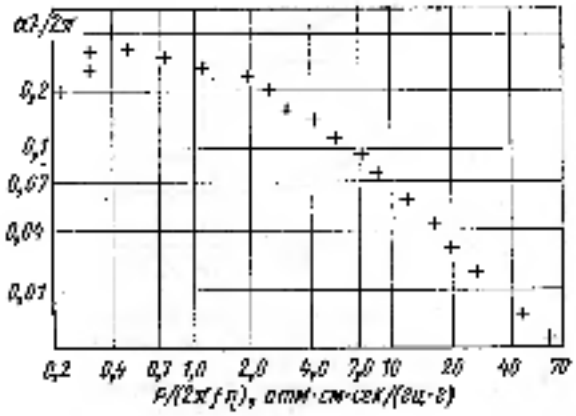


Рис. 7.9. Зависимость коэффициента поглощения звука в инертных газах (He, Ar, Ne, Kr, Xe) от давления при $f = 11$ Мгц [13].

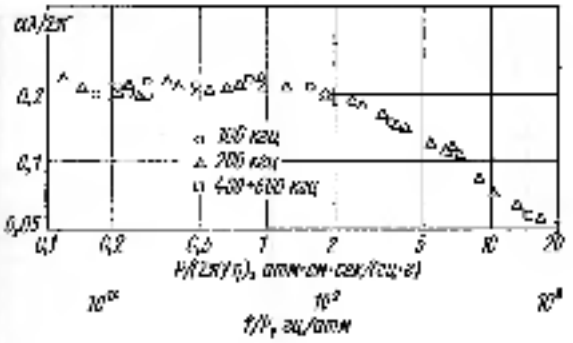


Рис. 7.10. Зависимость коэффициента поглощения звука в водороде от давления [10].

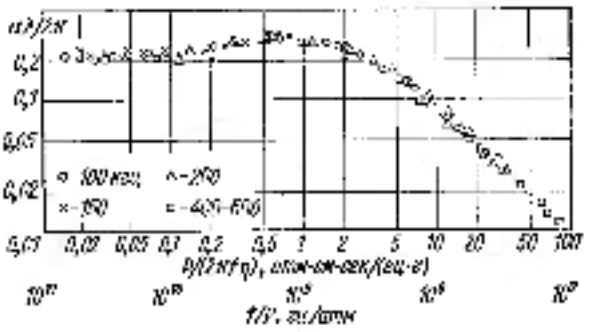


Рис. 7. 11. Зависимость коэффициента поглощения звука в воздухе от давления [10].

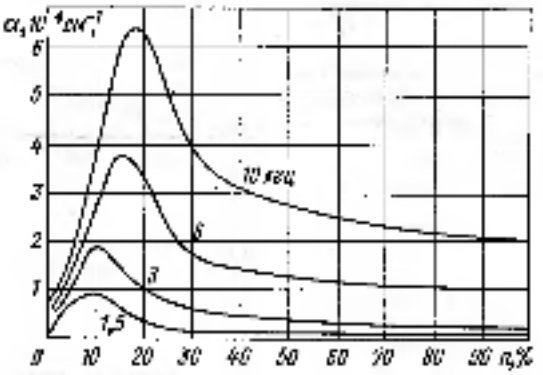


Рис. 7.12. Зависимость коэффициента поглощения звука в воздухе от содержания водяных паров при различных частотах [2].

7.2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ЖИДКОСТЯХ

Таблица 7.3

Скорость звука в сжиженных газах

Вещество	T, °K	p, Мпа	c_0, м/сек	$\frac{\Delta c_0/\Delta t}{c_0 t}$, 10⁻⁴ град⁻¹	Литература	Вещество	T, °K	p, Мпа	c_0, м/сек	$\frac{\Delta c_0/\Delta t}{c_0 t}$, 10⁻⁴ град⁻¹	Литература
Азот	65	—	1007		[1]	Гелий (рис. 7.13)	0,985		237,66	—	[18]
	70	1,6—7,5	969	—	[4]		1,08	—	247,67	—	[18]
	71	—	937		[1]		1,76	—	251,4	—	[17]
	73,9	44,4	962	—10	[14]		2,18	—	221,7	—	[17]
	76	1,6—7,5	879	—	[4]		2,5	—	223,3	—	[17]
	77		867	—	[1]		3,0	15	220	—	[19]
Аргон	64	1,5	1322	—	[15]		4,22	10	179,8	—21,5	[17]
	78	1,5	1255	—	[15]		4,223	0,220	180,63	—	[18]
	84	1,5—7,5	803	—	[4]	Гелий II	1,63		20		[20]
	84,0	—	780	—	[1]		2,18	—	3,4	—	[20]
	85,2	44,4	853	—	[1]	Кислород	53	—	1130	—	[21]
	87	1,5—7,5	887	—	[4]		61	44,8	1119	—	[14]
Водород	14,8	0,527	1340	—	[16]		70	44,4	1094	—	[14]
	16,0	0,523	1265	—	[16]		75	—	1029	—	[1]
	17	44,4	1187	—	[1]		80	—	969		[1]
	17,4	0,523	1278	—	[16]		85	—	948	—	[1]
	18,0	0,523	1260	—	[16]		87	44,4	962	—	[16]
	20,3	—	1127	—	[4]		90,1	44,4	912	6,9	[8]
	20,4	0,523	1229		[16]	Метан (рис. 7.14)	84,9	—	1545	—	[22]
	21,0	0,523	1150	—	[16]		111,4	—	1418		[22]

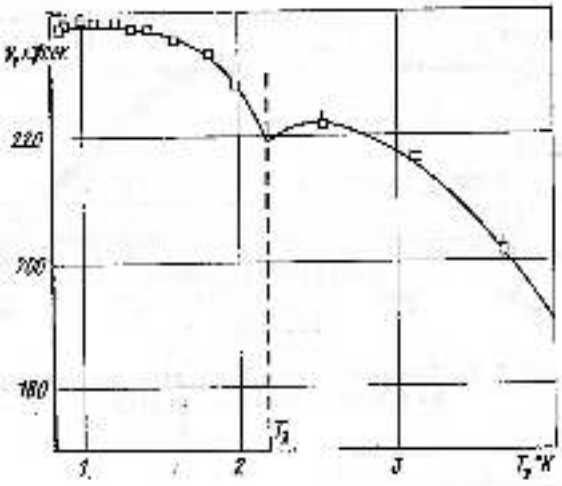


Рис. 7.13. Зависимость скорости звука в жидком гелии от температуры; при температуре T_λ происходит переход обыкновенного гелия He I в сверхтекучее состояние He II [23].

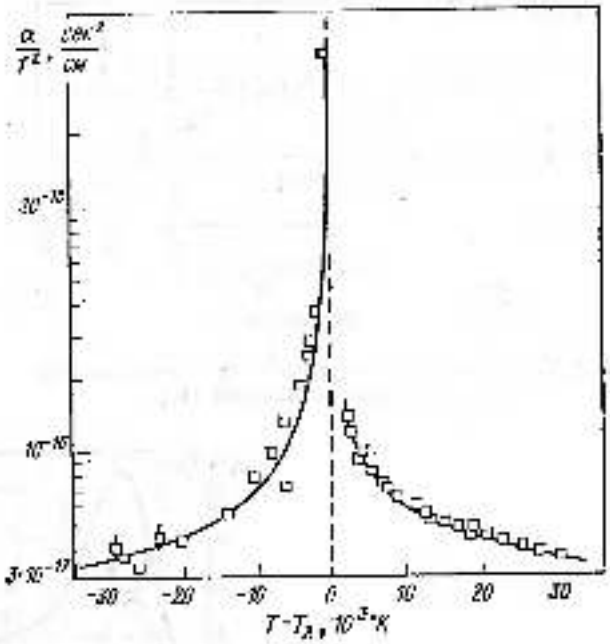


Рис. 7.15. Зависимость коэффициента поглощения звука в жидком гелии от температуры [23].

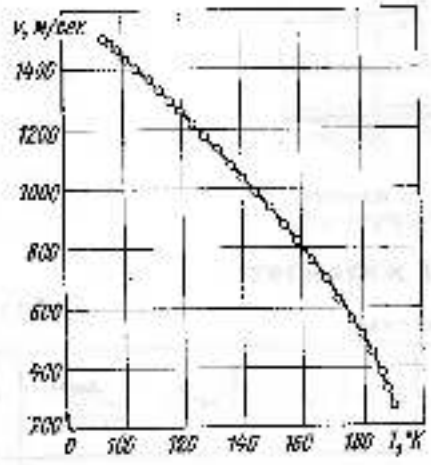


Рис. 7.14. Зависимость скорости звука в жидком жатане от температуры [24].

Таблица 7.4

Коэффициент поглощения звука в сжиженных газах

Вещество	T, °K	f, Мгц	$\frac{\alpha}{f^2}\cdot10^{17}$ $\frac{сек^2}{см}$	Литература
Азот	73,9	44,4	10,5	[9]
Аргон	86,2	44,4	10,1	[9]
Водород	17	44,4	5,6	[9]
Гелий (рис. 7.15)	3	15	110	[19]
Кислород	60	44,4	8,6	[9]
	70	44,4	8,6	[9]
	88	44,4	8,6	[9]

Таблица 7.5

Скорость звука в жидких и газообразных веществах, м/сек [25]

Вещество	T, °K	В жидкости	В газе
Азот	71,9	940	171
	78,0	859	176
	78,4	860	177
	79,2	848	177
Аргон	84,0	875	167,5
	85,8	857	169
Водород	17,2	1210	320
	18,6	1174	320
	19,9	1140	355
	20,4	1129	362
Гелий	3,5	198	102
	4,2	181	104
Кислород	78,4	1007,6	166,8
	82,8	966,8	171,3
	86,5	936,3	173,5
	90,3	917,7	177,7

Таблица 7.6

Скорость звука в жидкостях

Вещество	t, °C	u, $\frac{м}{сек}$	$\Delta u/\Delta t$, $\frac{м}{сек \cdot град}$	Литература
Акролеин	20	1207	—	[26]
Аллил хлористый	26	1088	—	[27]
Аллиламин	26	1168	—	[27]
Аллил бромистый	20	981	—3,6	[26]
Аллиловый спирт	20	1294	—	[26]
Аллиловый спирт третичный	28	1204	—	[27]
Аллофаниин	26	1201	—	[27]
Анилин	20	1656	—4,6	[26]
Ацетал	24	1378	—	[27]
Ацетилацетон	20	1383	—5,2	[26]
Ацетил хлористый	20	1060	—	[26]
Ацетон	20	1192	—5,5	[26]
	22,5	1178	—	[28]
	24,0	1168	—	[28]
Ацетонилацетон	20	1416	—4,8	[26]
Ацетонитрил	20	1304	—5,0	[26]
Ацетоуксусный эфир	25,5	1417	—	[27]
Ацетофенон	20	1496	—3,7	[27]
Бензальдегид	20	1479	—4,0	[26]
Бензилацетон	20	1514	—	[26]
Бензиловый спирт	20	1540	—	[26]
Бензил хлористый	20	1420	—4,0	[26]
Бензоил хлористый	28	1318	—	[27]
Бензол	20	1321	—4,55	[29]
	40	1227	—	[29]
Бензол тяжелый	20	1228	—4,25	[29]
	40	1101		[29]
Бромаль	20	966	—3,4	[26]
α-Бромнафталин	20	1372	—3,1	[30]
Бромоформ	20	926	—2,1	[27]
Бутилацетат	26	1271	—	[27]
Бутил: бромистый	20	990	—4,0	[26]
иодистый	20	977	—3,6	[26]
хлористый	20	1133	—4,6	[26]
2,3-Бутилгликоль	25	1484	—	[31]
Бутиловый спирт	20	1268	—4,0	[26]
Бутиловый спирт третичный	20	1165	—5,0	[26]
Бутилформиат	24	1199	—	[27]
Валериановая кислота	20	1244	—4,8	[26]
Вода обычная (рис. 7.16, 7.17)	25	1497	+2,5	[32]
	74	1555	—	[33]
Вода тяжелая	25	1399	+2,8	[32]
Гептан	20	1083	—	[26]
Гексан: нормальный	20	1081	—5,2	[26]
хлористый	20	1221	—4,2	[26]
Гексиловый спирт	20	1322	—3,9	[26]
Гексадиен	20	1372	—	[26]
Гептан	20	1162	—4,5	[26]
Гептанол	20	1207	—	[26]
1-Гептен	20	1128	—	[34]
Гептиловый спирт	20	1341	—4,2	[26]
Гептилацетат	28	1328	—	[27]
Гидразин	20	1403	—	[26]
Глицерин	20	1923	—1,8	[30]
	22	1927	—	[28]
1-Диен	20	1250	—	[34]
Диизобутиловый спирт	20	1413	—	[35]
Дихлорэтилен хлористый	20	1318	—4,2	[26]
Диаллиловый эфир	26	1153	—	[27]

Продолжение табл. 7.6

Вещество	t, °C	u, $\frac{м}{сек}$	$\Delta u/\Delta t$, $\frac{м}{сек \cdot град}$	Литература
Дибромэтилен	20	1009	—	[26]
Диацетин	25	1296	—4,5	[31]
цис-Дибромэтилен	20	957	—2,4	[36]
транс-Дибромэтилен	20	936	—2,2	[36]
Диметилацетон	20	1509	—3,6	[26]
Диметиловый эфир:				
адипиновой кислоты	21,8	1469	—	[27]
диметилглутаровой кислоты	24	1371	—	[27]
резорцина	26	1460	—	[27]
Диоксан	20	1399	—6,2	[26]
Диоксин	24,6	1528	—	[27]
Дипропиловый эфир	20	1112	—	[26]
Дифенилметан	28	1501	—	[27]
Дифениловый эфир	24	1480	—	[27]
м-Дихлорбензол	28	1232	—	[27]
о-Дихлорбензол	20	1290	—	[27]
Дихлоргидрин	20	1034	—4,6	[26]
	23	1240	—	[27]
цис-Дихлорэтилен	20	1090	—3,7	[36]
транс-Дихлорэтилен	20	1061	—3,7	[36]
Диэтиламин	20	1482	—4,0	[26]
Диэтилгликоль	25	1580	—2,4	[31]
Диэтилкарбонат	28	1173	—	[27]
Диэтилметан	24	1314	—	[27]
Диэтиловый эфир	20	1008	—5,4	[26]
Диэтиловый эфир:				
адипиновой кислоты	22	1376	—	[27]
ацетодикарбоновой кислоты	22,5	1348	—	[27]
диэтилмалевой кислоты	22	1435	—	[27]
малоновой кислоты	22	1386	—	[27]
тиодигликолевой кислоты	22,5	1449	—	[27]
щавелевой кислоты	22	1392	—	[27]
янтарной кислоты	22	1376	—	[27]
Диэтилфталат	23	1471	—	[27]
Додециловый спирт	22,3	1435	—	[35]
Изобутиловый спирт	20	1276	—	[35]
Изопропилбензол	20	1342	—	[26]
Изопропиловый спирт	20	1247	—	[35]
Иодэл	20	1475	—	[26]
Иодистый бензол	20	1113	—	[26]
α-Йодэл	20	1432	—	[26]
Капроновая кислота	20	1331	—5,6	[26]
Каприновая кислота	20	1291	—	[35]
Карвакрол	20	1475	—6,0	[26]
Коричный альдегид	25	1554	—3,1	[31]
о-Крезол	25	1506	—3,5	[31]
Кротоновый альдегид	20	1344	—4,0	[26]
м-Крезол	20	1340	—4,1	[26]
о-Крезол	20	1360	—4,1	[26]
п-Крезол	20	1330	—4,6	[26]
Линалоол	20	1341	—	[26]
Малеиновая кислота	20	1352	—3,8	[26]
Масляная кислота	20	1231	—	[35]
Мезитилен	20	1302	—4,8	[26]
N-Метиланилин	20	1586	—	[26]
Метилацетат	25	1154	—3,8	[32]
2-Метилбутанол	30	1225	—	[37]
Метилгексилгликоль	22,6	1528	—	[27]
Метилгексилкетон	24	1324	—	[27]
Мезитилен бромистый	24	971	—	[27]

Вещество	t, °C	ρ, $\frac{кг}{м^3}$	$\frac{d\rho/dt}{\frac{кг}{м^3 \cdot град}}$	Литература
Метилен:				
иодистый	24	977	—1,8	[27]
хлористый	20	1092	—4,4	[26]
м-Метилнитробензол	28	1908	—	[27]
Метил иодистый	20	834	—	[26]
Метиловый спирт	20	1150	—	[35]
Метиловый эфир				
м-крезола	26	1385	—	[27]
фенола	26	1353	—	[27]
хлоруксусной кислоты	26	1331	—	[27]
Метилпропиолат	24,5	1215	—	[27]
Метилсалицилат	28	1408	—	[27]
Метилциклогексан	20	1247	—5,8	[26]
2-Метилциклогексанол	25,5	1421	—	[27]
3-Метилциклогексанол	25,5	1406	—	[27]
4-Метилциклогексанол	25,5	1387	—	[27]
2-Метилциклогексанон	25,5	1353	—	[27]
4-Метилциклогексанон	25,5	1348	—	[27]
Метилэтилкетон	20	1207	—5,0	[26]
Монометиловый эфир резорцина	26	1629	—	[27]
Монохлорнафталин	27	1462	—	[27]
Морфолин	25	1442	—3,7	[31]
Муравьиная кислота	20	1401	—	[35]
Нитролак	20	1491	—5,0	[26]
Нитробензол	20	1473	—3,8	[26]
Нитрометан	20	1346	—4,8	[26]
м-Нитротолуол	20	1489	—	[26]
о-Нитротолуол	20	1432	—	[26]
Нитроэтиловый спирт	20	1578	—	[26]
Нонан	20	1248	—4,4	[26]
1-Нонен	20	1218	—	[34]
Нониловый спирт	20	1391	—4,3	[26]
Окись мезитила	20	1310	—	[31]
Октан	20	1197	—4,4	[26]
Октиленовый спирт	59,1	1396	—	[35]
1-Октен	20	1184	—	[34]
Октил бромистый	20	1182	—4,8	[26]
хлористый	20	1260	—4,2	[26]
Октиловый спирт	20	1361	—	[35]
цис-Олеиновая кислота	45	1333	—3,3	[36]
Пальмитиновая кислота	62,1	1329	—	[35]
Парадиоксан	20	1204	—5,0	[26]
1-Пентадецен	20	1361	—	[34]
Пентан	20	1008	—4,2	[26]
Пентахлорэтан	20	1113	—	[26]
Перхлорэтилен	20	1066	—	[26]
α-Пиколин	28	1453	—	[27]
β-Пиколин	28	1419	—	[27]
Пинен	24	1247	—	[27]
Пиперидин	20	1400	—	[26]
Пиридин	20	1446	—4,4	[26]
Пировиноградная кислота	20	1471	—	[26]
Пропилацетат	26	1182	—	[27]
Пропил иодистый	20	929	—4,0	[26]
хлористый	20	1091	—4,4	[26]
Пропилгликоль	20	1223	—4,0	[26]
Пропионитрил	20	1271	—	[26]
Пропионовая кислота	20	1270	—	[35]
Пиперобутил-м-ксилол	20	1354	—	[26]
Псевдокумол	20	1368	—	[26]
Салициловый альдегид	27	1474	—	[30]
Сероуглерод	20	1158	—3,2	[27]

Вещество	t, °C	ρ, $\frac{кг}{м^3}$	$\frac{d\rho/dt}{\frac{кг}{м^3 \cdot град}}$	Литература
Тетрабромэтан	20	1041	—	[30]
Тетрадециловый спирт	38,4	1404	—	[35]
Тетралин	20	1092	—4,5	[26]
Тетранитрометан	20	1030	—4,0	[26]
Тетрахлорэтан	20	1171	—	[26]
	28	1165	—	[27]
	28	1027	—	[27]
Тетрахлорэтилен	25	1586	—3,0	[31]
Тетраэтиленгликоль	20	1168	—	[26]
Тиоуксусная кислота	20	1300	—4,2	[26]
Тиофен	20	1620	—	[26]
м-Толуидин	20	1034	—	[26]
о-Толуидин	20	1328	—	[26]
Толуол	20	1313	—	[34]
1-Тридецен	23,5	1144	—	[27]
Трибутилборная	20	1482	—	[26]
Трихлорэтилен	20	1301	—	[26]
1, 2, 4-Трихлорбензол	20	1049	—4,4	[26]
Триэтиленгликоль	25	1608	—3,8	[31]
Уксусный ангидрид	24	1394	—	[27]
Уксусная кислота	20	1253	—	[35]
1-Ундецен	20	1275	—	[34]
Фенилгидразин	20	1736	—	[26]
γ-Фенилпропиловый спирт	30	1523	—	[37]
β-Фенилэтиловый спирт	30	1512	—	[37]
Формамид	20	1560	—	[26]
Фуллеровая кислота	20	1303	—3,5	[36]
Фурфуловый спирт	25	1450	—3,5	[31]
Хинальдин	20	1575	—	[26]
Хинолин	20	1600	—4,8	[26]
Хлорбензол	20	1291	—4,4	[26]
α-Хлорнафталин	20	1481	—	[26]
Хлороформ	20	1005	—3,6	[26]
м-Хлортолуол	20	1326	—	[26]
о-Хлортолуол	20	1344	—	[26]
п-Хлортолуол	20	1316	—	[26]
Циклогексан	20	1281	—4,0	[26]
Циклогексанон	20	1466	—4,3	[26]
Циклогексанол	20	1449	—5,4	[26]
Циклогексен	20	1306	—5,4	[26]
Циклогексиламин	20	1435	—	[26]
Циклогексил хлористый	20	1319	—4,8	[26]
Циклопентанон	20	1421	—	[26]
Циклопентанол	24	1474	—	[27]
Цитраль	20	1442	—3,8	[26]
Четыреххлористый углерод	20	908	—3,0	[26]
	23,5	924	—	[28]
	58	815	—	[28]
Этаргоновая кислота	20	1304	—	[35]
Этилгидриновая кислота	45	1346	—3,5	[36]
Этилпропиновая кислота	20	1312	—5,0	[26]
Этилацетат	20	1176	—	[26]
Этилбензилгидрин	20	1580	—	[26]
Этилбензол	20	1338	—4,4	[26]
Этил бромистый	28	892	—	[27]
иодистый	20	869	—	[26]
Этилбутират	23,5	1171	—	[27]
Этиленгликоль	20	1616	—	[26]
Этилкаприлат	28	1263	—	[27]
Этиловый спирт	20	1165	—	[35]
	23	1155	—	[28]

Продолжение табл. 7.6

Вещество	t, °C	c, м/сек	Δc/Δt, м/(сек·град)	Литература
Этиловый эфир:				
диэтиленгликоля	25	1458	—	[31]
о-крезола	25	1315	—	[27]
фенола	26	1153	—	[27]
хлоруксусной кислоты	25,5	1234	—	[27]
Этилпропионат	23,5	1165	—	[27]
Этилфенилкетон	20	1496	—	[26]
Этилформиат	24	1721	—	[27]
Масла, нефтепродукты				
Абулия зернён	32,5	1275	—	[38]
Анисовое	28	1451	—	[38]
Арахисовое	31,5	1562	—	[38]
Бензин	25	1295	—	[28]
Вербеновое	29	1323	—	[38]
Вересковое	32	1342	—	[38]
Гвоздичное	34	1250	—	[38]
Горяшное	27	1192	—	[39]
Горчичное	31,5	1825	—	[38]
Иоковое	34	1331	—	[38]
Касиевое	28,5	1460	—	[38]
Кедровое	29	1406	—	[38]
Керосин	34	1295	—	[38]
Кокосового ореха	31,5	1490	—	[38]
Кориандровое	29	1394	—	[39]
Кунжутное	32,5	1432	—	[39]
Куркума ароматическая	32,5	1349	—	[38]
Курсуля зелёная	32	1290	—	[38]
Лавандовое	28,5	1310	—	[38]
Лимонное	29	1076	—	[38]
Линалоолевое	32	1297	—	[38]
Льняное	31,5	1772	—	[38]
Оливковое	32,5	1381	—	[38]
Парафиновое	33,5	1420	—	[38]
Пачули	27,5	1265	—	[38]
Сосновое	31	1466	—	[38]
Спермацетовое	33	1210	—	[39]
Суретное	30,8	1450	—	[38]
Терпентинное	27	1280	—	[38]
Травофарматорное	32,5	1425	—	[39]
Фенилторчичное	27	1412	—	[27]
Эвкалиптовое	29,5	1276	—	[38]
Эфирное масло:				
померанцевой корки	29	1300	—	[39]
сандалового дерева	34	1454	—	[39]

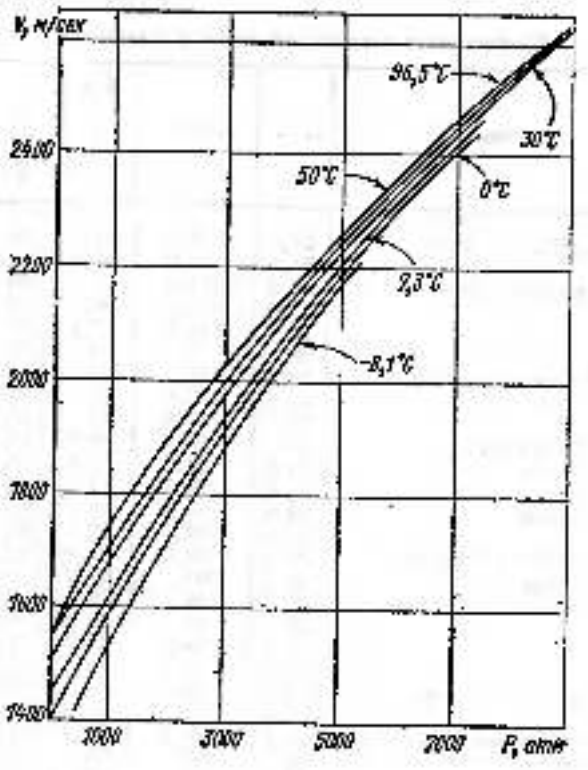


Рис. 7.16. Зависимость скорости звука в воде от давления при различной температуре ($f = 12$ Мгц) [33а].

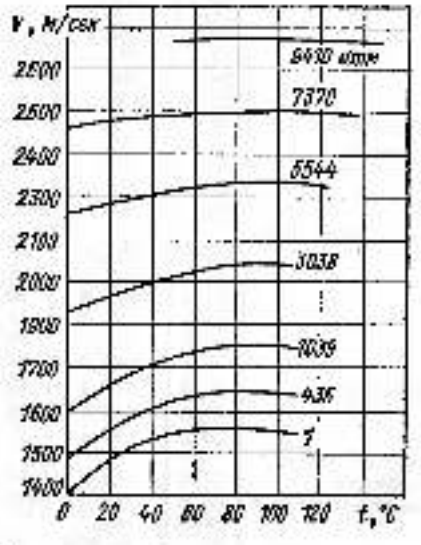


Рис. 7.17. Зависимость скорости звука в воде от температуры при различных давлениях ($f = 12$ Мгц) [33а].

Таблица 7.7

Коэффициент поглощения звука в жидкостях

Вещество	t, °C	f, Гц	$\alpha_{\text{пр}}$, дБ/м	Литература
Аллиловый спирт	24,8	104,1	44,1	[39]
	24,8	192,0	45,4	[39]
Амиловый спирт	24,5	104,9	97,0	[39]
	24,8	192,0	96,0	[39]
	24,9	146,0	97,2	[39]
	29	15	106	[39]
Изоамиловый спирт	24,5	146,1	133	[39]
	24,8	192,0	131	[39]
	25,2	107,4	151	[39]
о-Анизидин	24,6	104,3	58,8	[39]
Анилин	24,8	104,0	43,8	[39]
Анисальдегид	24,6	104,1	63,6	[39]
Ацеталь	24,6	104,1	56,7	[39]
	24,6	192,1	42,5	[39]
Ацетил хлористый	24,6	104,0	82,8	[39]
Ацетон	20	307	27,2	[44]
	20	452	24,1	[44]
	20	843	23,6	[44]
	24,4	104,3	25,7	[39]
	25	1—4	70	[31]
Бензил хлористый	24,6	104,1	75,6	[39]
	25,3	192,3	74,3	[39]
Бензиловый спирт	24,6	104,0	79,2	[39]
Бензол	20	307	755	[44]
	20	452	495	[44]
	24,4	104,0	849	[39]
	24,9	146,1	800	[39]
	25,0	192,6	775	[39]
Бензол: бромистый	24,8	104,0	144	[39]
иодистый	25	30	210	[40]
Бензотрихлорид	24,4	104,0	110	[39]
	24,8	192,3	105	[39]
о-Броманиол	24,3	104,0	63,6	[39]
	24,6	192,1	61,1	[39]
о-Бромиодбензол	24,4	104,0	71,3	[39]
	24,6	192,1	68,6	[39]
Бромоформ	25,1	106,9	202	[39]
	25,2	192,2	248	[39]
	25,3	146,1	256	[39]
Бутил: бромистый	2	15	40	[43]
жидкий	2	15	48	[43]
хлористый	2	15	108	[43]
Изобутилацетат	25,0	104,8	60,8	[39]
	25,0	192,1	50,2	[39]
Бутиловый бензол третичный	24,6	104,0	70,5	[39]
	24,8	192,3	65,5	[39]
	24,6	192,5	79,3	[39]
Бутиловый спирт	24,8	105,0	81,1	[39]
	25,0	148,0	79,1	[39]
	25,1	192,0	81,4	[39]
Изобутиловый спирт	25,0	107,4	153	[39]
	25,0	146,1	140	[39]
	25,1	192,1	140	[39]
Монобутиловый эфир этиленгликоля	24,6	104,1	80,7	[39]
Изовалериановая кислота	25,0	104,8	160	[39]
	25,0	192,6	107	[39]
Вода	20	7—250	25	[46]
	20	307	24,7	[44]
	20	452	23,6	[44]

Продолжение табл. 7.7

Вещество	t, °C	f, Гц	$\alpha_{\text{пр}}$, дБ/м	Литература
Вода	20	843	24,2	[44]
	24,3	192,8	21,2	[39]
Гексан	21	15	77	[43]
	24,9	191,5	56,7	[39]
	25,0	107,3	60,4	[39]
	25,0	148,0	58,5	[39]
Гептан	21	15	60	[43]
Декагидрофенантрен	24,6	104,0	124	[39]
	24,8	192,6	118	[39]
1,2 Дибромэтан	25	30	311	[41]
Дибутиловый эфир о-фталевой кислоты	24,8	192,7	257	[39]
	25,0	148,1	244	[39]
	25,0	107,0	230	[39]
Диметиловый эфир о-фталевой кислоты	24,8	192,5	189	[39]
	24,9	148,1	185	[39]
	25,0	107,4	186	[39]
транс-1,2-Диметилциклогексан	23,9	104,1	78,2	[39]
цис-1,3-Диметилциклогексан	24,6	104,0	102	[39]
транс-1,3-Диметилциклогексан	24,6	104,1	84,6	[39]
цис-1,4-Диметилциклогексан	23,9	104,0	87,6	[39]
транс-1,4-Диметилциклогексан	22,9	104,1	112	[39]
1,1-Диметилциклогексан	24,1	104,1	127	[39]
Диоксан	24,6	104,1	117	[38]
	24,8	192,7	112	[39]
о-Дихлорбензол	24,4	104,1	132	[39]
	25	30	121	[40]
	25,0	192,3	131	[39]
	25,1	148,1	129	[39]
м-Дихлорбензол	25	30	123	[40]
п-Дихлорбензол	60	30	300	[40]
Дихлоруксусная кислота	24,8	192,0	201	[39]
	25,0	104,8	214	[39]
1,1 Дихлорэтан	30,6	30	103	[41]
1,2-Дихлорэтан	26,5	30	136	[41]
транс-Дихлорэтилен	19,8	31	356	[41]
цис-Дихлорэтилен	18,8	31	537	[41]
Дициклогексиламин	24,4	104,0	157	[39]
	24,6	192,7	146	[39]
Диэтиламин	24,4	104,1	35,5	[39]
	24,6	192,7	35,3	[39]
Диэтиловый эфир	24,4	104,1	44,5	[39]
Индан	24,6	104,2	133	[39]
	24,7	192,4	132	[39]
Коричный альдегид	24,8	104,2	96,0	[39]
Кротоновый альдегид	24,6	104,2	82,7	[39]
о-Крезол	24,4	104,1	63,0	[39]
	24,6	192,6	63,0	[39]
м-Крезол	25	1—15	78	[42]
Метилгексанол	24,4	104,1	36,7	[39]
Метиэталь	24,4	104,1	39,2	[39]
Метилацетат	24,4	104,2	36,4	[39]
	25	1	469	[42]
Метилбутират	24,5	104,1	35,3	[39]
Метилдисульфид	24,9	104,0	68,7	[39]
Метил иодистый	2	15	247	[43]

Вещество	t, °C	p, Мпа	γ/ρ, 10^{-3} Н/м	Литература
Метил иодистый	24,4	101,0	305	[39]
	24,8	192,8	306	[39]
	25	1—4	820	[42]
	25,2	148,1	307	[39]
Метилен: бромистый	25	30	667	[41]
иодистый	25	30	250	[41]
хлористый	20	307	349	[44]
	20	482	177	[44]
	20	843	78,2	[44]
	24,8	192,8	500	[45]
	25,0	148,1	670	[39]
	25	30	1114	[41]
	25,2	7,64	1220	[45]
	25,4	107,4	779	[46]
Метиловый спирт	24,1	104,1	30,1	[39]
	24,9	192,4	30,6	[39]
Метиловый эфир трихлоруксусной кислоты	24,4	104,0	42,7	[39]
Метилсалицилат	24,5	104,0	57,5	[39]
Метилформиат	24,6	104,1	32,6	[39]
Метилформиат	24,1	104,0	49,3	[39]
Метилциклогексан	24,8	148,0	93,8	[39]
	24,8	192,2	92,9	[39]
	25,0	107,0	96,3	[39]
2-Метилциклогексанол	24,6	104,1	106	[39]
	25,0	192,1	100	[47]
Муравьиная кислота	17,5	4,0	2270	[48]
	20,5	9,8	1170	[48]
о-Нитрофенол	24,6	104,0	69,8	[39]
	24,8	192,1	69,0	[39]
Нитробензол	24,4	104,0	74,2	[39]
	24,8	192,3	74,1	[39]
	25,0	148,1	72,2	[39]
	25	1—15	60	[42]
Пропиловый	24,4	104,1	42,9	[39]
	25,0	192,1	40,4	[39]
Изопропилацетат	24,6	104,1	62,0	[39]
	25,0	192,1	64,0	[39]
Изопропилбензол	—	0,55—2,0	87	[49]
	24,6	192,2	63,3	[39]
	25,1	106,8	65,3	[39]
Пропил: бромистый	2	15	39	[43]
иодистый	2	15	64	[43]
хлористый	2	15	42	[43]
Пропиловый спирт	22—28	15—280	70	[50]
Изопропиловый эфир	24,4	104,1	52,5	[39]
β-Пиколин	24,4	104,1	66,1	[39]
	24,8	192,6	64,0	[39]
Пиридин	0	0,25—1,0	334	[49]
Пропионовая кислота	24,4	104,1	131	[39]
Сероуглерод	20	0,10—0,15	6130	[49]
	20	1—10	6000	[51]
	24,8	104,0	2068	[39]
	25,6	189,2	776	[39]
	25,6	148,1	1210	[39]
3,6,6-Триметил-1-гексанол	25,2	107,4	294	[39]
	25,6	192,2	663	[39]
	25,7	148,1	269	[39]
1,1,1-Трихлорэтан	25,1	106,8	416	[39]
	25,0	148,1	434	[39]
	24,8	192,6	431	[39]

Вещество	t, °C	p, Мпа	γ/ρ, 10^{-3} Н/м	Литература
Тиофен	20	307	775	[44]
	20	482	669	[44]
	20	843	180,0	[44]
Толуол	20	307	77,8	[44]
	20	482	78,3	[44]
	20	843	81,0	[44]
	20—25	1—70	80	[48]
	24,6	192,7	85,5	[39]
	25,2	106,8	86,6	[39]
	27	0,15	205	[52]
Уксусный ангидрид	24,6	104,0	57,7	[39]
Уксусная кислота	18	0,5	90 000	[53]
	18	67,5	158	[53]
	24,7	104,0	153	[39]
	24,6	192,0	120	[39]
Формамид	24,4	104,0	39,2	[35]
Фторбензол	25	30	276	[40]
Фурфуриловый спирт	24,4	104,0	90,5	[39]
	25,0	192,0	91,6	[39]
о-Хлоранилин	24,4	104,0	68,2	[39]
	24,8	192,1	53,7	[39]
Хлорбензол	24,4	104,0	147	[39]
	24,6	192,3	146	[39]
	25	1—4	124	[42]
	25	30	146	[40]
о-Хлорбензальдегид	24,4	104,0	106	[39]
Хлороформ	20	307	305	[44]
	20	482	310	[44]
	20	843	240,0	[44]
	24,4	103,5	363	[39]
	25,2	192,2	365	[39]
	20—20	1—10	400	[31]
о-Хлортолуол	24,4	104,0	72,1	[39]
	24,8	192,6	69,6	[39]
о-Хлорфенол	24,4	104,0	97,6	[39]
	25,0	192,2	93,3	[39]
2-Хлорэтанол	24,4	104,1	58,8	[39]
Циклогексан	24,8	192,3	182	[39]
	25,0	107,5	192	[39]
	25,0	148,0	190	[39]
Циклогексанол	24,6	104,0	72,6	[39]
	24,8	192,0	70,7	[39]
Циклогексен	25,0	107,0	103	[39]
	25,0	148,1	102	[39]
	25,5	191,8	101	[35]
Циклогексиламин	24,6	104,0	67,8	[39]
п-Цимол	24,4	104,1	52	[39]
	24,7	192,7	64,0	[39]
Четыреххлористый углерод	20	307	522	[44]
	20	482	480	[44]
	20	843	460,0	[44]
	20	1—100	600	[51]
	20	0,25—0,95	530	[49]
	24,6	148,1	500	[39]
	25,1	106,9	546	[39]
	25,1	192,6	545	[39]
Этилхлорэтилен	24,4	104,0	65,1	[39]
Этилацетат	24,6	104,0	166	[39]
	24,8	192,7	159	[39]
Этилацетат	22	69	37	[54]
	25	1	516	[42]

Продолжение табл. 7.7

Вещество	t, °C	f, Мгц	c, м/сек	Литература
Этилбензол	24,4	101,1	50,0	[39]
	24,8	192,3	54,3	[39]
Этилбутират	24,4	101,0	38,6	[39]
Этилформиат	24,1	104,0	49,9	[39]
	25—28	3	138	[56]
	25—28	16	70	[55]
Этил: бромистый	2	15	61	[43]
	24,6	192,7	75,5	[39]
	24,8	148,1	78,4	[39]
	25,0	106,9	78,7	[39]
иодистый	2	15	40	[43]
Этилен бромистый	25,0	192,4	297	[39]
	25,1	106,9	303	[39]
	25,3	148,1	295	[39]
Этиловый спирт	20—25	1—220	54	[70]
Бензин	—	0,15—1,0	958	[49]
Глицерин	—18,6	30	12700	[58]
	20—27	0,15—4	2500	[56]
	21—23	6—21	1700	[57]
	38,8	30	1410	[58]
Льняное масло	20,5	3,1	1470	[58]
Оливковое масло	24—26	1—4	1250	[42]
Касторовое масло	18,6	3,16	10900	[58]
	21,4	15,7	2100	[57]
	21,5	4,3	4500	[57]
	21,6	3,95	8400	[58]

Таблица 7.8

Коэффициент поглощения звука в растворах электролитов (0,1 моль/л) при 20°С и различных частотах [59]

Вещество	α, 10^{-4} дб/м		α, дб/м	α, 10^{-4} дб/м	
	10^4 гц	10^6 гц	10^9 гц	10^7 гц	10^7 гц
H_2O	0,0217	2,17	0,217	0,217	21,7
$Al_2(SO_4)_3$	>0,1	10,0	1,0	1,0	57
$BeSO_4$	1,75	4,8	0,29	0,29	28
$CaCrO_4$	—	>3,1	0,31	0,31	20
$CaSO_4$	1,77	162	2,3	0,39	31
$Ca(CH_3COO)_2$	>0,036	3,6	0,36	0,36	36
$CuSO_4$	0,282	23	0,43	0,39	39
$MgCrO_4$	>0,72	54,7	0,48	0,29	29
$MgSO_4$	3,92	247	0,9	0,3	29
$Mg_2S_2O_3$	1,42	90	0,67	0,28	23,8
$MnSO_4$	0,56	51	5,2	0,74	29
$NiSO_4$	31,0	65	0,46	0,39	20
$ZnSO_4$	>0,05	6	0,5	0,5	36
H_2SO_4	—	—	0,24	0,24	24
$AlCl_3$	—	—	0,223	0,223	22,3
K_2SO_4	—	—	0,227	0,227	22,7
K_2CrO_4	—	—	0,226	0,226	22,6
$La(NO_3)_3$	—	—	—	0,5	34
Li_2CO_3	—	—	0,238	0,238	23,8
Li_2SO_4	—	—	0,229	0,229	22,9
Na_2CO_3	—	—	0,24	0,24	0,24
Na_3PO_4	—	>7,9	0,39	0,35	30,7
Na_2SO_4	—	—	0,25	0,25	25
$(NH_4)_2SO_4$	—	—	0,227	0,227	22,7

7.8 РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ И РАСПЛАВАХ

Таблица 7.9

Скорость звука в твердых телах, м/сек

Вещество	t, °C	В стержне	Продольная	Поперечная	Литература
Алюминий	20	5080	6260	3080	[4]
	372	4342	—	—	[60]
Бериллий	—250	—	12860	8900	[61]
	27	—	12550	8800	[61]
Висмут	20	1790	2180	1100	[4]
Вольфрам	20	4310	5400	2620	[4]
Железо	20	5170	5850	3230	[4]
Золото	20	2030	3240	1500	[4]
Иридий	20	4790	—	—	[4]
Кадмий	20	2400	2780	1500	[4]
Константан	20	4300	5240	2640	[4]
Кремний	31,5	—	—	3770	[65]
Латунь	20	3490	4430	2123	[4]
Латунь (70% Cu — 30% Zn)	50	3760	—	—	[62]
Магний	—	4900	—	—	[63]
Марганец	20	3830	4660	2350	[4]
Марганец	—	3830	4660	—	[63]
Медь	20	3710	4700	2260	[4]
	385	3650	—	—	[60]
Нейзильбер	20	3580	4760	2160	[4]
Никель	20	4785	5630	2900	[4]
Олово	20	2730	3320	1670	[4]
Платина	20	2800	3960	1670	[4]
Свинец	20	1200	2160	700	[4]
Серебро	—	2640	3600	1590	[4]
Сталь	—	5050	6100	—	[63]
Сурьма	20	3400	—	—	[63]
Тантал	20	3350	—	—	[63]
Цинк	20	3810	4170	2410	[4]
Чугун	—	3850	4500	2400	[64]
Сплав Mg (90,6% Cd)	—	—	3660	1830	[66]
Германий, кристалл [110], ρ=5,35 г/см³	—	—	5390	3540	[65]
Висмут, кристалл, l-срез	4,2°K	—	2140	900	[67]
Свинец, кристалл [100]	1,5°K	—	2350	1266	[68]
Олово, кристалл [100]	1,5°K	—	3480	1900	[68]
Кварц, x-срез	—	5440	5730	—	[64]
АДР ($NH_4H_2PO_4$), z-срез под углом 45°	—	3260	4920	—	[63]
Сегнетова соль: y-срез под углом 45°	—	2470	—	—	[63]
x-срез под углом 45°	—	—	5360	—	[63]
Турмалин, z-срез	—	—	7540	—	[63]
CaF_2 (флюорит), x-срез	—	6740	—	—	[63]
NaCl (каменная соль), x-срез	—	4510	4780	—	[63]
NaBr, x-срез	—	2790	3200	—	[63]
KCl (сильвин), x-срез	—	4140	4380	—	[63]
KBr, x-срез	—	3380	3480	—	[63]
Стекло:					
кварцевое	—	5370	5670	3515	[4]
кронглас	—	5300	5660	3420	[4]
тяжелый кронглас	—	4710	5260	2960	[4]
легкий флинтглас	—	4550	4800	2950	[4]
тяжелый флинтглас	—	3490	3700	2220	[4]
Плексиглас	—	—	2670	1121	[4]
Полистирол	—	—	2330	1120	[4]

Продолжение табл. 7.9

Вещество	t, °C	В жидкости	Продольная	Поперечная	Литература
Каучук	—	—	1479	—	
Эбонит	—	1670	2405	—	[4]
Пробка	—	500	—	—	[4]
Лед	—	3280	3980	1990	[4]
Фарфор	—	4884	5940	3120	[4]
Парафин	—	1460	—	—	[64]
Гранит	—	3950	—	—	[63]
Мрамор	—	3910	—	—	[63]
Сланец	—	4510	—	—	[63]
Слоновая кость	—	2280	—	—	[4]
Дерево (дуб)	—	4050	—	—	[64]

Таблица 7.10

Коэффициент поглощения звука в твердых телах (продольные волны, частота $f = 2 \div 100$ *кгц*)

Вещество	ρ, г/см³	$10^{-6}\frac{v_p}{\alpha}$, м	$10^{-6}\frac{\alpha/f^2}{см}$	Литература
Алюминий	2,68	—	0,61	[1]
Магний	1,705	—	1,08	[1]
Сталь:				
вольфрамкуглеродистая	8,62	—	0,38	[1]
молибденовая	8,59	—	1,42	[1]
Кварц плавленый	2,2	—	1,23	[1]
Стекло:				
пирекс	2,32	—	4,89	[1]
оконное	2,42	—	6,35	[1]
свинцовое	2,48	—	3,21	[1]
зеркальное	—	3,3	—	[69]
Плексиглас	3,34	—	2,03	[1]
Дерево (дуб)	—	2,4	—	[69]
Гипс	—	2,3	—	[69]
Штукатурка	—	3,3	—	[69]
Глина	—	1,5	—	[69]

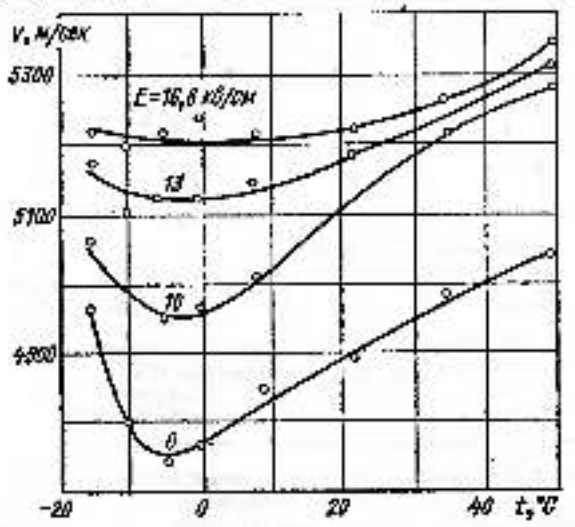


Рис. 7.18. Зависимость скорости звука в тиглите бария от температуры в электрических полях с напряженностью E [70].

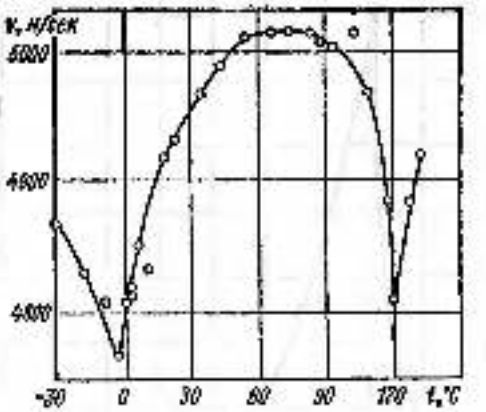


Рис. 7.19. Зависимость скорости звука в тиглите бария от температуры [70].

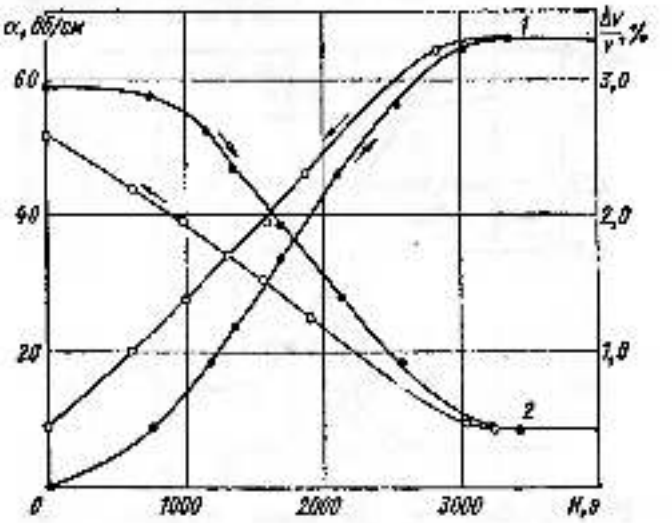


Рис. 7.20. Зависимость изменения скорости (1) и коэффициента поглощения (2) звука ($f = 3$ *Мгц*) в монокристалле никеля от напряженности магнитного поля (знак изменения поля указан стрелками) [71].

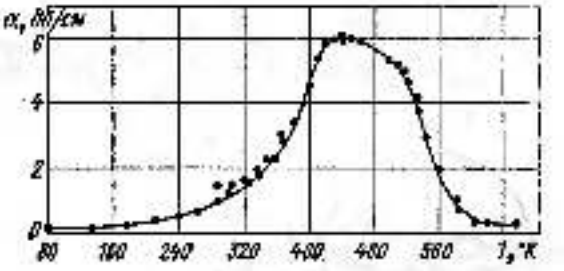


Рис. 7.21. Зависимость коэффициента поглощения звука (продольные волны, $f = 10$ *Мгц*) в монокристалле никеля от температуры [72].

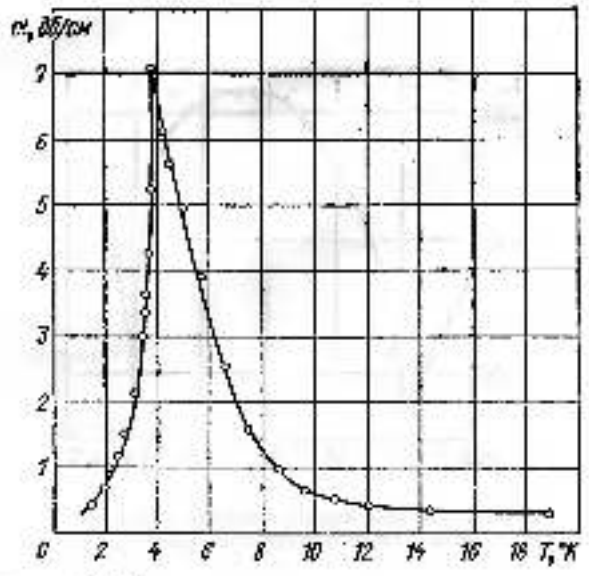


Рис. 7.22. Зависимость коэффициента поглощения звука в кварце от температуры (f — 10,3 Мгц) [73].

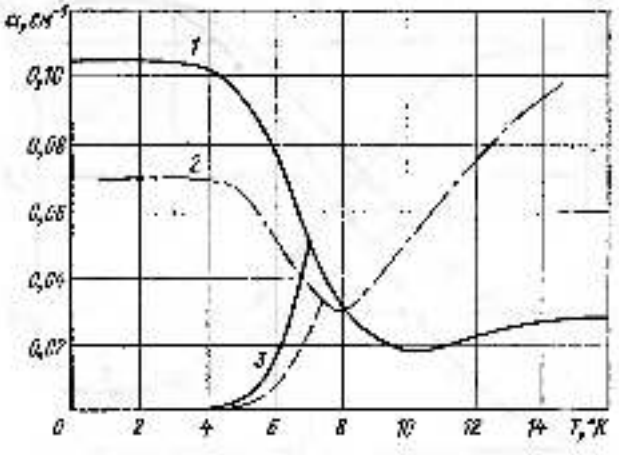
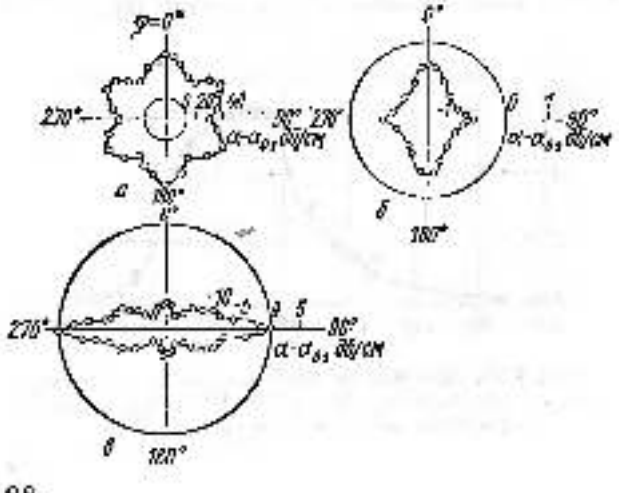


Рис. 7.23. Зависимость коэффициента поглощения звука в кварце от температуры [73]:

1 — продольные волны, f = 29,3 Мгц; 2 — поперечные волны, f = 10,1 Мгц; 3 — сверхпроводящее состояние.



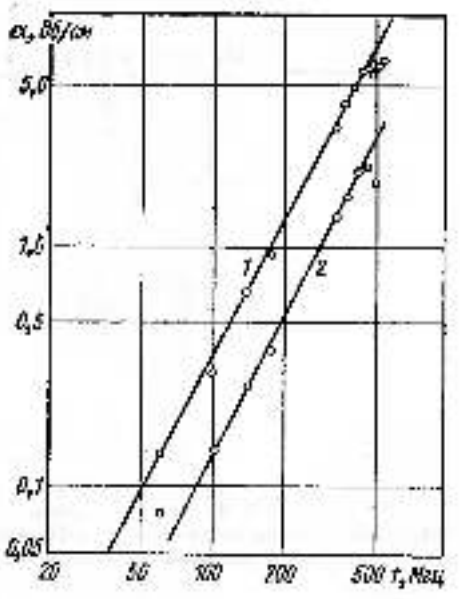


Рис. 7.25. Зависимость коэффициента поглощения звука в керамике от частоты для продольной (1) и поперечной (2) волн [75].

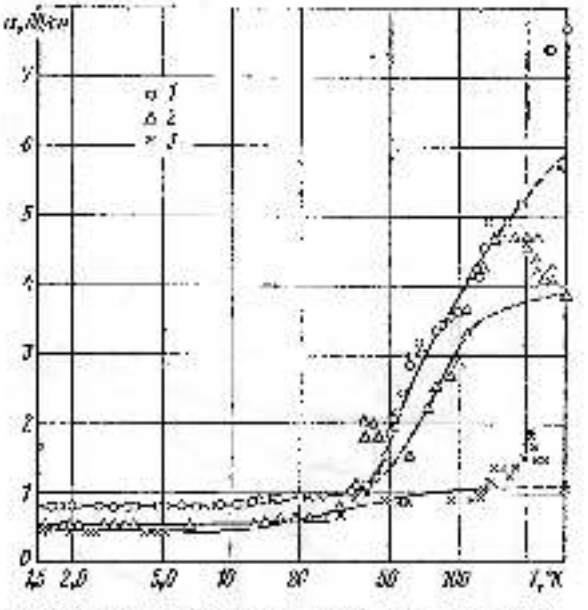
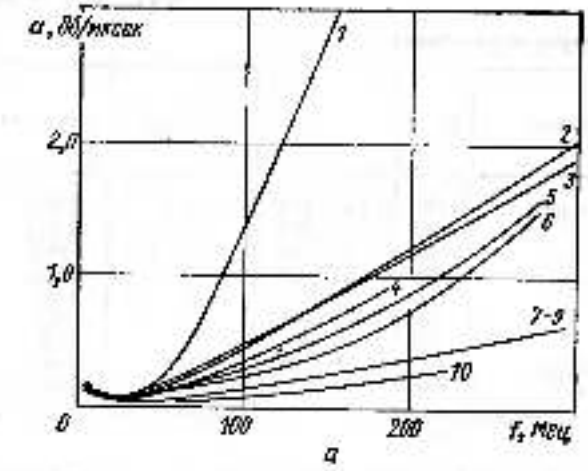


Рис. 7.26. Зависимость коэффициента поглощения звука в керамике от температуры [75]:

1 — продольные волны (f = 50 Мгц); 2 — продольные волны (f = 40 Мгц); 3 — поперечные волны (f = 32 Мгц).

Рис. 7.24. Зависимость разности коэффициентов поглощения звука $\alpha_{\parallel} - \alpha_{\perp}$ в монокристалле ниобия ($T = 4,2°$ K), помещенном в магнитное поле ($H = 7000$ э), от угла между вектором $\mathbf{q}$ вектора $\mathbf{H}$ в плоскости, перпендикулярной к волновому вектору $\mathbf{k}$ звука ($f = 60$ Мгц) [74]:

а — вектор $\mathbf{k}$ направлен по кристаллографической оси [001]; б — по [110]; в — по [$\bar{1}$10] (α_0 — коэффициент поглощения без магнитного поля).



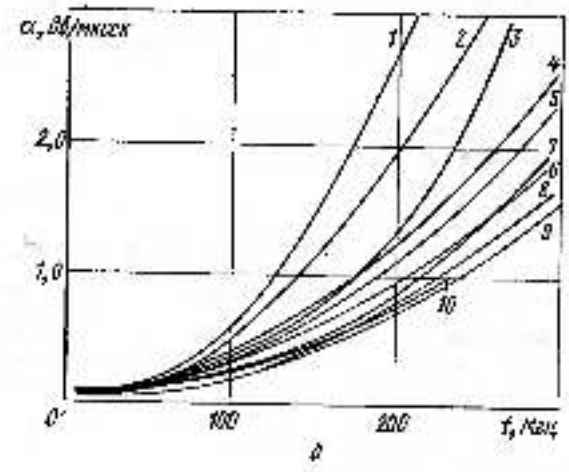


Рис. 7.27. Скорость изменения коэффициента поглощения звука в монокристалле германия от частоты для различных образцов (поперечные (а) и продольные (б) волны в направлении [100]) [76]:

Номер образца	Тип проводимости	Толщины образца, см	Электропроводность, (ом·см)⁻¹
1	n	0,4819	4,55
2	·	1,408	0,2
3	n	0,8070	40
4	n	1,272	46
5	n	0,015	10
6	—	0,965	0,25
7	p	0,812	6,0
8	n	1,288	0,004
9	p	1,370	0,04
10	n	1,032	16,7

Таблица 7.11

Скорость звука в расплавах

Вещество	t, °C	$\frac{v}{м/сек}$	Δt, °C	$\frac{\Delta v/dt}{м/сек\cdot град}$	Литература
Висмут	271	1635	271—365	—0,5	[77]
	271	1620	271—1000	—0,209	[79]
	271	1674	271—580	—0,18	[82]
			580—950	—0,22	
	280	1663	289—356	0	[78]
	280	1650	—	—	[80]
	287	1663	—	—	[83]
	300	1661	—	—	[83]
	305	1650	305—442	—0,8	[81]
Галлий	29,5	2740	30—50	—	[77]
	30	2873	30—80	—	[84]
	30	2872	30—275	—0,225	[85]
			275—850	—0,275	
Индий	156	2215	156—200	—0,5	[77]
	156	2315	156—950	—0,27	[86]
Кадмий	321	2220	321—360	—0,64	[77]
	321	2220	321—750	—0,618	[79]
	321	2256	321—700	—0,29	[85]
	335	2215	—	—	[87]
Калий	64	1880	64—160	—0,52	[81]
	100	1899	—	—0,53	[88]
Медь	1083	3270	1083—1400	—0,978	[89]
	1100	3450	1083—1500	—0,46	[82]
Натрий	98	2395	98—235	—0,3	[77]
	100	2526	—	—0,524	[85]
	100	2526	976—972	—0,524	[90]
	100	2652	100—700	—0,577	[91]
	100	2533	100—180	—0,66	[81]
Олово	232	2270	232—381	0,7	[77]
	232	2420	232—1000	—0,211	[79]
	232	2464	232—335	—0,236	[92]
	232	2473	232—500	—0,247	[93]
	232	2480	232—560	—0,3	[82]
	240	2470	—	—	[83]
	247	2454	230—335	—0,2	[87]
	247	2454	—	—	[83]
	300	2456	—	—	[83]
Ртуть	20	1461	20—150	—0,7	[94]
	20	1462	20—100	—0,312	[95]
	20	1452	20—100	—0,37	[96]
	25	1450	25—200	—0,44	[97]
Рубидий	—	1260	33—160	—0,4	[98]
Свинец	317	1804	—	—0,3	[78]
	327	1790	327—380	—0,5	[77]
	327	1810	327—1000	—0,381	[79]
	328	1776	328—370	—0,277	[92]
	330	1820	327—800	—0,3	[82]
	340	1760	—	—	[80]
Сера	115	1350	—	—	[77]
Серебро	961	2770	961—1540	—0,466	[85]
Сурьма	970	2710	961—1400	—0,41	[82]
	630	1980	630—890	0	[99]
	640	1901	640—950	Изменяет знак	[85]
Таллий	302	1615	302—310	—	[77]
Теллур	365	1600	362—850	—0,231	[85]
	460	920	460—950	Изменяет знак	[85]
Цезий	—	967	29—130	—0,3	[98]
Цинк	419	2790	—	—	[98]
	419	2840	419—850	—0,268	[99]
	420	2850	419—850	—0,305	[85]
	450	2700		—	[80]

Таблица 7.12

Коэффициент поглощения звука в расплавах

Вещество	t, °C	Δt, °C	α/f^2, $10^{-17}\frac{сек^2}{см}$	Литература	Вещество	t, °C	Δt, °C	α/f^2, $10^{-17}\frac{сек^2}{см}$	Литература
Висмут	280	271—400	8,05	[80]	Натрий	100	100—150	12,1	[100]
	305	305—442	9,3	[97]		100	104—154	11,7	[101]
Галлий	30	30—80	1,68	[84]	Олово	240	232—400	5,63	[80]
	30	—	2,5	[103]	Ртуть	20	—13,5—72	5,4	[103]
	56	56—438	2,9	[103]		24	—	5,5	[102]
Калий	360	—	14,5	[80]		25	25—204	6,2	[97]
Литий	74	84—150	29,9	[101]		25	25—130	6,7	[100]
	75	75—150	34,0	[100]	Свинец	340	327—400	9,4	[80]
					Цинк	419	—	3,7	[80]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Eder F. X.** Moderne Messmethoden der Physik. Bd 1, Berlin, 1960.
2. **Petrallia S.** Nuovo cimento, Suppl., 1952, v. 9, N. 1, p. 1.
3. **Blyth A. R.** Acustica, 1965—1966, v. 16, p. 118.
4. **Бергман Л.** Ультразвук и его применение в науке и технике. Пер. с нем. М., Изд-во иностр. лит., 1956.
5. **Kneser H. O.** Ergeb. exakt. Naturwiss., 1940, Bd 22, S. 121. **Nomoto O.** Ultrasonic Waves, Velocity and Absorption of Sound. Tokyo, 1940; **Petrallia S.** Nuovo cimento, 1951, v. 9, p. 1.
6. **Hardy H. C., Telfair D., Pielemeier W. H.** J. Acoust. Soc. America, 1942, v. 13, p. 226; **Pielemeier W. H., Hardy H. C.** J. Acoust. Soc. Amer., 1941, v. 13, p. 80.
7. **Краснушкин П. Е.** «Докл. АН СССР», 1940, т. 27, с. 214; Phys. Rev., 1944, v. 65, p. 190.
8. **Вайтонис В. В., Яковлев В. Ф.** «Акуст. журн.», 1966, т. 12, с. 296.
9. **Lucas A., Noury J.** J. phys. et radium, 1953, v. 14, p. 272.
10. **Buchel W., Hilsch R.** Z. Phys., 1957, Bd 149, S. 15.
11. **Van Itterbeek A.** J. Acoust. Soc. Amer., 1957, v. 29, p. 564.
12. **Henderson M. C., Peselnick L.** J. Acoust. Soc. Amer., 1957, v. 29, p. 1074.
13. **Greenspan M.** J. Acoust. Soc. Amer., 1956, v. 28, p. 644; **Перепечко И. И., Яковлев В. Ф.** «Применение ультразвуковых к исследованию веществ», 1958, т. 6, с. 223.
14. **Galt J. K.** J. Chem. Phys., 1948, v. 16, p. 505.
15. **Gripill E. W., Hoyt C. K., Robinson D. K.** Canad. J. Phys., 1955, v. 33, p. 307.
16. **Beyer R. T.** J. Chem. Phys., 1951, v. 19, p. 788.
17. **Chase C. E.** Proc. Roy. Soc., 1953 (A), v. 220, p. 116; **Findlay J. C.** e.a. Phys. Rev., 1939, v. 56, p. 122.
18. **Van Itterbeek A., Forrez G., Teirlinck M.** Physica, 1957, v. 23, p. 905.
19. **Pellam J. R., Squire C. F.** Phys. Rev., 1947, v. 72, p. 1245; 1947, v. 71, p. 477.
20. **Пешков В. Н.** «Докл. АН СССР», 1944, т. 45, с. 386; **Лифшиц Е. М., Пешков В. Н.** «Журн. АН СССР», 1945, т. 9, с. 117.
21. **Михайлов И. Г.** Распространение ультразвуковых волн в жидкостях. М., Гостехиздат, 1949.
22. **Noury J., Lucas A.** J. phys. et radium, 1954, v. 15, p. 301.
23. **Chase C. E.** Proc. Roy. Soc., 1953 (A), v. 220, p. 116.
24. **Van Dael W.** e.a. Physica, 1965, v. 31, p. 1643.
25. **Van Itterbeek A.** Nuovo cimento, Suppl., 1960, v. 7, N 2, p. 218.
26. **Schaaffs W.** Z. Phys., 1939, Bd 114, S. 110; Z. phys. Chem., 1944, Bd 194, S. 28; Z. Naturforsch., 1948, Bd 3, S. 396.
27. **Parthasarathy S.** Proc. Indian Acad. Sci., 1935, v. A2, p. 497; 1936, v. A3, p. 285, 482, 519, 614; 1936, v. A4, p. 59, 213; Current Sci., 1937, v. 6, p. 213.
28. **Richards N. E., Brauner E. J., Bockris J. O. M.** Brit. J. Appl. Phys., 1955, v. 6, p. 387.
29. **Schaaffs W., Nutsch-Kuhnkies R.** Acustica, 1965—1966, v. 16, p. 66.
30. **Freyer E. B., Hubbard J. C., Andrews D. W.** J. Chem. Soc. Amer., 1929, v. 51, p. 759.
31. **Willard G. W.** J. Acoust. Soc. Amer., 1941, v. 12, p. 438.
32. **Zeiten N.** Z. Phys., 1938, Bd 108, S. 681.
33. **Barlow A. J., Yazgan E.** Brit. J. Appl. Phys., 1966, v. 17, p. 807.
33a. **Smith A. H., Lawson A. W.** J. Chem. Phys., 1954, v. 22, p. 351.
34. **Lagemann R. T., McMillan D. R., Woosley M.** J. Chem. Phys., 1948, v. 16, p. 247.
35. **Цветков В., Марфунин В.** «Докл. АН СССР», 1949, т. 68, с. 49.
36. **Baccaredda M., Giacomini A.** Ricerca Scient., 1964, v. 16, p. 611; Atti Acad. Naz. Lincei, 1946, v. 1, p. 401.
37. **Weissler A.** J. Chem. Soc. Amer., 1948, v. 70, p. 1634.
38. **Panchoty M., Pande A., Parthasarathy S.** J. Scient. and Indust. Res., 1944, v. 3, p. 5; 1944, v. 3, p. 111; 1944, v. 3, p. 159, 263, 354.
39. **Bensell E. L., Lamb J.** Proc. Phys. Soc., 1956, v. 1369, p. 669.
40. **Sette D.** Colloquium over Ultrasonore Trillinger, Bruxelles, 1951, Kon. VI.
41. **Sette D.** J. Chem. Phys., 1951, v. 19, p. 1337.
42. **Pinkerton I. M. M.** Proc. Phys. Soc., 1949, v. 62, p. 129; **Verma G. S.** J. Chem. Phys., 1950, v. 18, p. 1352; **Willard G. W.** J. Acoust. Soc. Amer., 1941, v. 12, p. 438.
43. **Pellam J. R., Galt J. K.** J. Chem. Phys., 1946, v. 14, p. 608.
44. **Бергман А. А., Лежнев Н. Б.** «Акуст. журн.», 1966, т. 22, с. 247.
45. **Andreal J. H.** Proc. Phys. Soc., 1957, v. B70, p. 71; 1956, v. 69, p. 869.
46. **Pinkerton I. M. M.** Nature, 1948, v. 162, p. 106; **Stolz A.** Strahlentherapie, 1949, Bd 79, S. 641.
47. **McSkimin H. J.** — J. Acoust. Soc. Amer., 1950, v. 22, p. 413.

45. Базулин П. А. «Ж. эксперим. и теор. физ.», 1938, т. 8, с. 457.
49. Lawley L. E., Reed R. D. Acustica, 1955, v. 5, p. 316.
50. Rapanno R. A. Phys. Rev., 1947, v. 72, p. 78.
51. Kishimoto T., Nomoto O. Bull. Kobayashi Inst. Phys. Res., 1952, v. 2, p. 63.
52. Matthias B. T. Nature, 1945, v. 161, p. 325.
53. Lamb J., Pinkerton I. M. M. Proc. Roy. Soc., 1949, v. 199, p. 114.
54. Bär R. Helv. phys. acta, 1937, v. 10, p. 332.
55. Parthasarathy S. Current Sci., 1938, v. 6, p. 501.
56. Michel P. Chem.-Ing. Techn., 1952, v. 24, p. 153.
57. Базулин П. А. «Докл. АН СССР», 1941, т. 31, с. 113.
58. Hunter J. L. J. Acoust. Soc. Amer., 1941, v. 13, p. 36.
59. Tamm K., Kurtze G. Kaiser. Acustica, 1954, v. 4, p. 360.
60. Sakelanu C. Compt. rend. Acad. Sci., 1961, v. 202, p. 3021.
61. Overton W. C. J. Chem. Phys., 1950, v. 18, p. 113.
62. Bell J. F. W. Philos. Mag., 1957, v. 2, p. 1113.
63. Беранек Л. Акустические измерения. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1952.
64. Красильников В. А. Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах. М., Физматгиз, 1960.
65. McSkimin H. J. J. Acoust. Soc. Amer., 1950, v. 22, p. 413.
66. Smith C. S., Wallace W. E. J. Chem. Phys., 1953, v. 21, p. 1126.
67. Walther K. Phys. Rev. Lett., 1966, v. 16, p. 642.
68. Mason W. P., Bömmel H. E. J. Acoust. Soc. Amer., 1956, v. 28, p. 930.
69. Техническая энциклопедия. Справочник. Т. 10. М., ОГИЗ, 1933.
70. Федотов И. И., Кузнецов В. П. «Применение ультразвуковых к исследованию веществ», 1961, т. 14, с. 269.
71. De Klerk J. Proc. Phys. Soc., 1959, v. 73, p. 337.
72. West F. G. J. Appl. Phys., 1959, v. 29, p. 460.
73. Mason W. P., Bömmel H. E. J. Acoust. Soc. Amer., 1956, v. 28, p. 930.
74. Галкин А. А., Корнилов А. И. «Ж. эксперим. и теор. физ.», 1960, т. 38, с. 1688.
75. Dobbs E. R., Chick B. B., Truell R. Phys. Rev. Lett., 1959, v. 3, p. 339.
76. Graneto A., Truell R. J. Appl. Phys., 1956, v. 27, p. 1219.
77. Klepper O. J. J. Chem. Phys., 1950, v. 18, p. 1331.
78. Хохлов З. Л. «Физика металлов и металловедение», 1960, т. 10, с. 772.
79. Пронин Л. А., Филиппов С. И. «Изв. вузов. Черная металлургия», 1963, т. 5, с. 10.
80. Plass K. G. Akust Beih., 1963, Bd 13, S. 240.
81. Ягунас В. Н., Яронис Э. П. «Акуст. журн.», 1966, т. 12, с. 145.
82. Гитис М. Б., Михайлов И. Г. «Акуст. журн.», 1965, т. 11, с. 434.
83. Полощкий Н. Г., Хохлов З. Л. «Акуст. журн.», 1958, т. 4, с. 184.
84. Hunter J. L., Hovan K. S. J. Chem. Phys., 1964, v. 41, p. 4013.
85. Гитис М. Б., Михайлов И. Г. «Акуст. журн.», 1966, т. 12, с. 17.
86. Wehler G. M. B. V Congr. Int. D'Acoust, D-37, Liege, 1965.
87. Полощкий Н. Г., Таборов В. Ф., Хохлов З. Л. «Акуст. журн.», 1956, т. 5, с. 202.
88. Abowitz G., Gordon R. B. J. Chem. Phys., 1962, v. 37, p. 125.
89. Пронин Л. А., Филиппов С. И. «Изв. вузов. Черная металлургия», 1963, т. 11, с. 11.
90. Pochapsky T. E., Quimby S. L. Phys. Rev., 1950, v. 79, p. 892; 1951, v. 84, p. 553.
91. Трелин Ю. С., Васильев И. В. «Применение ультразвуковых к исследованию веществ», 1961, т. 13, с. 3.
92. Gordon R. B. Acta metallurgica, 1959, v. 7, p. 1; Phys. Chem. Proc. Metall, 1958, v. 1, p. 461.
93. McSkimin H. J. J. Acoust. Soc. Amer., 1959, v. 31, p. 283.
94. Klepper O. J. J. Chem. Phys., 1949, v. 17, p. 668.
95. Полощкий Н. Г., Хохлов З. Л. «Вопр. физики металлов», 1955, т. 6, с. 70.
96. Голяк А. З., Классен И. Ф., Кучак Т. М. «Акуст. журн.», 1961, т. 7, с. 258.
97. Jarzynski J. Proc. Phys. Soc., 1963, v. 81, p. 745.
98. Schaafs W. Acustica, 1956, v. 6, p. 382.
99. Калашов Н. Б., Пронин Л. А., Филиппов С. И. «Изв. вузов. Черная металлургия», 1964, т. 12, с. 11.
100. Leicher S. V., Beyer R. T. J. Acoust. Soc. Amer., 1963, v. 35, p. 1571.
101. Jarzynski J., Litovitz T. A. J. Chem. Phys., 1964, v. 41, p. 1290.
102. Ringo C. R., Fitzgerald J. W., Hardle B. G. Phys. Rev., 1947, v. 72, p. 87.
103. Stephens R. W. B. Ist. Rend. Scuole Int. Fisica, 1963, v. 27, p. 393.

ГЛАВА 8

ТЕРМОМЕТРИЯ

8.1. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

Измерение температуры предполагает построение шкалы температур на основе воспроизведения ряда характерных явлений — реперных или основных точек, приписывания этим точкам численных значений и создания интерполяционных приборов, реализующих шкалу между ними.

XI Генеральная конференция по мерам и весам (1960 г.) приняла (см. приложение в работе [1]) в качестве основной «Международную термодинамическую температурную шкалу (Кельвина)» с обозначением температуры T и единицы измерения °K (градус Кельвина). Эта шкала базируется на законах термодинамики идеального газа и использует в качестве основной температуру тройной точки воды, которой присвоено значение 273,16°K. Термин «основная шкала» означает, согласно положению XI Генеральной конференции мер, что должна существовать возможность в конечном счете отнести к этой шкале результат любого измерения температуры.

Помимо шкалы Кельвина в ряде случаев применяют производные от нее шкалы с единым обозначением температуры t: 1) шкала Цельсия (единица измерения °C): $t = T - 273{,}15$; 2) шкала Реомюра (°R): $t = 0{,}8T - 218{,}52$; 3) шкала Фаренгейта (°F): $t = 1{,}8T - 459{,}67$.

Экспериментальные трудности реализации международной термодинамической шкалы привели к созданию ряда практических шкал, реперные точки которых приведены в табл. 8.1. В области низких температур иногда используют в качестве дополнительных точки перехода в сверхпроводящее состояние. Некоторые из них даны в табл. 8.2.

Таблица 8.1

Значения некоторых температурных реперных точек [2—5]
Все точки, кроме тройных, при давлении $P = 101325$ н/м².

Номер точки	Вещество: формула	Вещество: название	Точка	Температура °K	Температура °C	Номер точки	Вещество: формула	Вещество: название	Точка	Температура °K	Температура °C
1	^4He	Гелий-4	λ-точка	2,18	—270,97	24	H_2O	Вода	Тройная	273,16	0,0100
2	^4He	»	Кипения	4,21	—268,94						
3	л—H_2	Параводород	Тройная	13,81	—259,34	25	$C_{12}H_{10}O$	Эфир дифенильный	»	300,03	26,88
4	н—H_2	Водород (нормальный)	»	13,97	—259,18	26	$Na_2SO_4 \times 10H_2O$	Натрий сернокислый десятиводный	Фазового перехода	305,43	32,38
5	л—H_2	Параводород	Кипения	20,27	—252,88	27	H_2O	Вода	Кипения	373,15	100,0
6	н—H_2	Водород (нормальный)	»	20,39	—252,76	28	$C_7H_6O_2$	Бензойная кислота	Тройная	395,51	122,36
						29	In	Индий	Затвердевания	429,76	156,61
7	Ne	Неон	Тройная	24,56	—248,59	30	$C_{10}H_8$	Нафталин	Кипения	491,15	218,0
8	Ne	»	Кипения	27,07	—246,08	31	Sn	Олово	Затвердевания	505,06	231,9
9	N_2	Азот	Фазового перехода	35,5	—237,60						
						32	$C_{12}H_{10}O$	Бензофенон	Кипения	579,05	306,9
10	O_2	Кислород	То же	43,7	—229,46	33	Cd	Кадмий	Затвердевания	594,18	321,03
11	O_2	Кислород	Тройная	54,36	—218,79						
12	N_2	Азот	»	63,14	—210,01	34	Pb	Свинец	»	600,53	327,3
13	N_2	»	Кипения	77,36	195,80	35	Hg	Ртуть	Кипения	629,73	356,59
14	O_2	Кислород	»	90,18	—182,97	36	Zn	Цинк	Затвердевания	692,65	419,505
15	C_5H_{12}	Изопентан	Затвердевания	113,5	—159,65						
						37	S	Сера	Кипения	717,75	444,60
16	C_7H_{16}	Метилциклогексан	»	146,86	—126,30	38	Sb	Сурьма	Затвердевания	903,65	630,5
17	$C_4H_{10}O$	Эфир диэтиловый	»	156,85	—116,30	39	Al	Алюминий	»	934	660,1
						40	Ag	Серебро	»	1234	960,8
18	CS_2	Сероуглерод	»	161,58	—111,60	41	Au	Золото	Затвердевания	1336	1063
19	C_7H_8	Толуол	»	178,45	—95,10	42	Cu	Медь	»	1356	1083
20	CO_2	Углекислый газ	Вторичная	194,65	—78,50	43	Ni	Никель	»	1726	1453
						44	Co	Кобальт	»	1765	1492
21	$CHCl_3$	Хлороформ	Затвердевания	209,65	—63,50	45	Pd	Палладий	»	1825	1552
						46	Pt	Платина	»	2042	1769
22	Hg	Ртуть	Затвердевания	234,28	—38,87	47	Rh	Родий	»	2233	1960
						48	Ir	Иридий	»	2716	2443
23	H_2O	Вода	»	273,15	0,00	49	W	Вольфрам	»	3663	3390

Таблица 8.2

Температура перехода некоторых веществ в сверхпроводящее состояние [3]

Формула	Название	Температура перехода, °K	Напряженность критического магнитного поля, э	Формула	Название	Температура перехода, °K	Напряженность критического магнитного поля, э
Hf	Гафний	0,37	—	Tl	Таллий	2,382	171
Ti	Титан	0,39	100	In	Индий	3,37—3,42	270
Ru	Рутений	0,47	48	Sn	Олово	3,74	304
Zr	Цирконий	0,55	46,6	Hg	Ртуть	4,160	410
Cd	Кадмий	0,56—0,65	27	Ta	Тантал	4,38	360
Os	Осмий	0,71	66	V	Ванадий	4,89	1340
Rh	Родий	0,9		MoC	Карбид молибдена	5,76	—
Zn	Цинк	0,93	50				
Ga	Галлий	1,103	48	NbC	Карбид ниобия	6	—
U	Уран	1,1	—	Pb	Свинец	7,22	800
Al	Алюминий	1,175	105	Nb	Ниобий	8,7—8,9	1960
Re	Рений	1,70	168	$MoGa_2$	—	9,5	—

Зависимость некоторых основных точек от давления P выражается следующими образом (P_0=760 *мм рт. ст.*) [5]:

1. Точка кипения кислорода ($660 \leq P \leq 860$ *мм рт. ст.*)

$$t = -182{,}970 + 9{,}530\,(P/P_0 - 1) - 3{,}70\,(P/P_0 - 1)^2 + 9{,}2\,(P/P_0 - 1)^3, \ ^\circ C.$$

2. Точка затвердевания воды (h — глубина под поверхностью слоя льда с водой, *мм*):

$$t = 0{,}0099\,(1 - P/P_0) - 0{,}7 \cdot 10^{-6} \cdot h, \ ^\circ C.$$

3. Точка кипения воды ($660 \leq P \leq 860$ *мм рт. ст.*):

$$t = 100{,}0 + 28{,}012\,(P/P_0 - 1) - 11{,}64\,(P/P_0 - 1)^2 + 7{,}1\,(P/P_0 - 1)^3, \ ^\circ C.$$

Практические шкалы, в отличие от термодинамической, зависят от свойств термометрического тела, что приводит к появлению таких характеристик шкалы, как воспроизводимость и точность. Кроме того, в некоторых случаях практические шкалы основаны на приближениях, выполняющихся лишь приблизительно; включают понятие инструментальной температуры (магнитной, световой и т. п.), отличной от истинных значений шкалы.

Международная практическая температурная шкала (Цельсия) 1948 г. (МПТШ—48, символ t, °C) принята IX Генеральной конференцией по мерам и весам [2] и определена для температур выше точки кипения кислорода (t = —182,97° С). Шкала Кельвина (T, °К) определена в МПТШ—48 соотношением $T = t + 273{,}15$. МПТШ—48 принята взамен аналогичной шкалы 1927 г.; различие между ними представлено в табл. 8.3.

МПТШ—48 реализуется в интервале от —182,97 до +630,5° С платиновым термометром сопротивления (см. табл. 8.7) по реперным точкам 14, 23, 27 и 37 в табл. 8.1; в интервале от 630,5 до 1063°С термопарой Pt — Pt + 10% Rh (табл. 8.17) по реперным точкам 38; 40 и 41 в табл. 8.1; для температур выше 1063°С спектральным пирометром с реперной точкой 41 в табл. 8.1.

Низкотемпературная практическая шкала принята в СССР для измерения температур от 10 до 90,19 К и реализуется платиновым термометром сопротивления (см. табл. 8.8) [7].

Гелиевая шкала T_{65} рекомендована в 1958 г. Консультативным комитетом по термометрии для измерения температур от 0,5 до 6°К; реализуется с помощью ^{4}He-газового постоянного термометра (см. табл. 8.26) [8].

Гелиевая шкала T_{62} рекомендована в 1962 г. Консультативным комитетом по термометрии для измерений от 0,2 до 3,380°К; реализуется жидкостным ^{3}He-термометром (см. табл. 8.25) [9].

Таблица 8.3

Отклонение $\Delta t = t - t'$ практических шкал МПТШ—27 (t') и МПТШ—48 (t) [6]

t, °С	630,5	650	700	750	800	850	900	950	960,8	1000	1050	1063
Δt, °С	0,00	0,08	0,24	0,35	0,42	0,43	0,40	0,32	0,30	0,20	0,05	0,00

Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ—68 рекомендована в 1968 г. XIII Генеральной конференцией по мерам и весам для внедрения во всех странах взамен МПТШ—48 и низкотемпературных шкал (взамен 13,8°К) [10]. В настоящее время (1975 г.) в СССР продолжает действовать МПТШ—48, а низкотемпературная практическая шкала расширена (в отличие от МПТШ—48) на область низких температур, вплоть до тройной точки водорода (T = 13,8°К) [11].

В этой области температур шкала реализуется платиновым термометром сопротивления по пяти реперным точкам с помощью таблицы стандартных значений относительного сопротивлений, подобной табл. 8.8. Отклонения МПТШ—68 от значений табл. 8.8 незначительны в пределах от —0,02 до +0,04°К. В области МПТШ—48 отклонения более значительны (1,8°С при 1000°С) и достигают нескольких градусов, что вызвано новыми, уточненными значениями температур реперных точек. В области температур выше 1063°С МПТШ—68 реализуется аналогично МПТШ—48, то установлено новое значение постоянной C_2 = 0,014388 в формуле Планка для распределения энергии в спектре излучения черного тела [12].

МПТШ—68 устанавливает написание «кельвин» вместо «градус Кельвина» и обозначение К вместо °К.

8.2 ЖИДКОСТНО-СТЕКЛЯННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Жидкостно-стеклянная термометрия основана на законах теплового расширения; область применения ограничена снизу температурой затвердевания, а сверху — температурой кипения термометрической жидкости или температурой размягчения стекла. Жидкостные термометры позволяют измерять температуру в интервале от —200 до +1200°С. В табл. 8.4 и 8.5 приведены сведения о свойствах важнейших термометрических жидкостей и стекол, используемых при изготовлении термометров.

Если термометр не полностью погружен в среду, температура которой измеряется, необходимо показания термометра увеличить на $\Delta t = k\alpha(t_1 - t_2)$, где α — температурный коэффициент объемного расширения термометрической жидкости в стекле (см. табл. 8.4); l — длина выступающего столбика в градусах шкалы; t_1 — показания термометра; t_2 — положение середины выступающего столбика на шкале термометра.

Таблица 8.4

Свойства термометрических жидкостей [13—15]

Жидкость	Рабочая температура, °С от	Рабочая температура, °С до	Температурный коэффициент объемного расширения при 18 °С, град⁻¹	Марка стекла	Жидкость	Рабочая температура, °С от	Рабочая температура, °С до	Температурный коэффициент объемного расширения при 18 °С, град⁻¹	Марка стекла
Пентан	—130	36	0,00145	Иена 16ᴵᴵᴵ	Анилин	—66	—	0,000179	—
Петролейный эфир	—130	—	0,00115	Иена 16ᴵᴵᴵ	Таллин			0,000155	Иена 16ᴵᴵᴵ
Сероуглерод	—113	46	0,00121	—	п-Кеадол	—53	120	0,00101	—
Спирт этиловый	—100	77	0,00104	Иена 16ᴵᴵᴵ	Ртуть	—35	350	0,000179	Кварц
Спирт метиловый	—90	60	0,00122	—				0,000181	—
Спирт амиловый	—80	137	0,00098	—				0,000158	ГОСТ 1224—41
Толуол	—90	100	0,00103	Иена 16ᴵᴵᴵ				0,000157	Иена 16ᴵᴵᴵ
Ацетон	—88	56	0,00131	—	Галлий	29,8	1900	0,000159	Иена 59ᴵᴵᴵ
								—	Кварц

Таблица 8.5

Свойства термометрических стекол [16]

Стекло	Температура размягчения, °С	Температурный коэффициент объемного расширения, град⁻¹
Боросиликатное, типа Иена 16ᴵᴵᴵ	300	0,000166
Боросиликатное, типа Иена 59ᴵᴵᴵ	500	0,000165
Термометрическое, ГОСТ 1224—41	300	0,000180
Кварцевое	900	0,000180

Таблица 8.6

Воспроизводимость МПТШ—46 ртутными термометрами [16]

Стекло	Температура, °С 0	50	100	150	200	250	300	600
Иена 16ᴵᴵᴵ	0	0,12	0	—0,01	0,29	1,1	2,7	—
Иена 59ᴵᴵᴵ	0	0,03	0	0,23	0,84	2,2	4,4	26,0

8.3. ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Измерение температуры по электрическому сопротивлению зависит от электрической проводимости полупроводника и стабильной зависимости удельного сопротивления от температуры. Нижний предел температур, измеряемых термометрами сопротивления, определяется чувствительностью, которая, вообще говоря, уменьшается с понижением температуры. Верхний предел обусловлен повышенной нестабильностью сопротивления по мере приближения к температуре плавления или рекристаллизации проводника. В табл. 8.7—8.10 приведены градуировочные значения платинового, медного и титанового термометров сопротивления в относительных единицах.

Таблица 8.7

Стандартная градуировочная таблица платинового термометра сопротивления [13, 17]

Приведены значения электрического сопротивления платины ГОСТ 6588—57 в относительных единицах. Погрешность расчета $\pm(0,3+6\cdot10^{-4}t)$ для $t\leq0$ °С и $\pm(0,3+4,5\cdot10^{-4}t)$ для $t\geq0$ °С.

t, °С	0	2	4	6	8
—200	0,1728	—	—	—	—
—190	0,2166	0,2078	0,1991	0,1903	0,1816
—180	0,2598	0,2512	0,2425	0,2339	0,2252
—170	0,3029	0,2943	0,2876	0,2771	0,2685
—160	0,3456	0,3371	0,3285	0,3200	0,3114
—150	0,3880	0,3795	0,3711	0,3626	0,3541
—140	0,4302	0,4218	0,4133	0,4049	0,3965
—130	0,4721	0,4637	0,4553	0,4470	0,4386
—120	0,5138	0,5054	0,4971	0,4888	0,4804
—110	0,5552	0,5469	0,5387	0,5304	0,5221
—100	0,5965	0,5882	0,5800	0,5717	0,5635
—90	0,6375	0,6293	0,6211	0,6129	0,6047
—80	0,6784	0,6702	0,6621	0,6539	0,6457
—70	0,7191	0,7110	0,7028	0,6947	0,6865
—60	0,7596	0,7515	0,7434	0,7353	0,7272
—50	0,8000	0,7920	0,7839	0,7758	0,7677
—40	0,8403	0,8322	0,8242	0,8162	0,8081
—30	0,8804	0,8724	0,8644	0,8564	0,8483
—20	0,9204	0,9124	0,9044	0,8964	0,8884
—10	0,9603	0,9523	0,9443	0,9363	0,9284
—0	1,0000	0,9921	0,9841	0,9762	0,9682
+0	1,0000	1,0079	1,0159	1,0238	1,0317
10	1,0396	1,0475	1,0554	1,0633	1,0712
20	1,0791	1,0870	1,0949	1,1028	1,1107
30	1,1185	1,1264	1,1343	1,1421	1,1500
40	1,1578	1,1657	1,1735	1,1813	1,1891
50	1,1970	1,2048	1,2126	1,2204	1,2282

t, °C	0	2	4	6	8
60	1,2350	1,2438	1,2516	1,2594	1,2672
70	1,2749	1,2827	1,2905	1,2982	1,3060
80	1,3137	1,3215	1,3292	1,3370	1,3447
90	1,3524	1,3602	1,3679	1,3756	1,3833
100	1,3910	1,3987	1,4064	1,4141	1,4218
110	1,4295	1,4371	1,4448	1,4525	1,4601
120	1,4678	1,4755	1,4831	1,4907	1,4984
130	1,5060	1,5137	1,5213	1,5289	1,5365
140	1,5441	1,5517	1,5593	1,5669	1,5745
150	1,5821	1,5897	1,5973	1,6049	1,6124
160	1,6200	1,6276	1,6351	1,6427	1,6502
170	1,6578	1,6653	1,6728	1,6803	1,6879
180	1,6954	1,7029	1,7104	1,7179	1,7254
190	1,7329	1,7404	1,7479	1,7554	1,7628
200	1,7703	1,7778	1,7852	1,7927	1,8002
210	1,8076	1,8151	1,8225	1,8299	1,8374
220	1,8448	1,8522	1,8596	1,8670	1,8744
230	1,8818	1,8892	1,8966	1,9040	1,9114
240	1,9188	1,9261	1,9335	1,9409	1,9482
250	1,9556	1,9629	1,9703	1,9776	1,9850
260	1,9923	1,9996	2,0069	2,0142	2,0216
270	2,0289	2,0362	2,0435	2,0508	2,0580
280	2,0653	2,0726	2,0799	2,0872	2,0944
290	2,1017	2,1089	2,1162	2,1234	2,1307
300	2,1379	2,1451	2,1524	2,1596	2,1668
310	2,1740	2,1812	2,1885	2,1957	2,2029
320	2,2100	2,2172	2,2244	2,2316	2,2388
330	2,2459	2,2531	2,2602	2,2674	2,2745
340	2,2817	2,2888	2,2960	2,3031	2,3102
350	2,3173	2,3245	2,3316	2,3387	2,3458
360	2,3529	2,3600	2,3671	2,3741	2,3812
370	2,3883	2,3954	2,4024	2,4095	2,4165
380	2,4236	2,4306	2,4377	2,4447	2,4517
390	2,4588	2,4658	2,4728	2,4798	2,4868
400	2,4938	2,5008	2,5078	2,5148	2,5218
410	2,5288	2,5358	2,5427	2,5497	2,5567
420	2,5636	2,5706	2,5775	2,5845	2,5914
430	2,5983	2,6053	2,6122	2,6191	2,6260
440	2,6329	2,6398	2,6467	2,6536	2,6605
450	2,6674	2,6743	2,6812	2,6880	2,6949
460	2,7018	2,7086	2,7155	2,7223	2,7292
470	2,7360	2,7429	2,7497	2,7565	2,7633
480	2,7701	2,7770	2,7838	2,7906	2,7974
490	2,8041	2,8108	2,8176	2,8244	2,8312
500	2,8380	2,8448	2,8516	2,8583	2,8651
510	2,8718	2,8786	2,8853	2,8920	2,8988
520	2,9055	2,9122	2,9189	2,9256	2,9323
530	2,9391	2,9457	2,9525	2,9591	2,9658
540	2,9725	2,9792	2,9858	2,9925	2,9991
550	3,0058	3,0124	3,0191	3,0257	3,0323
560	3,0390	3,0456	3,0522	3,0589	3,0655
570	3,0721	3,0787	3,0853	3,0918	3,0984
580	3,1050	3,1116	3,1182	3,1247	3,1313
590	3,1378	3,1444	3,1510	3,1575	3,1641
600	3,1706	3,1771	3,1837	3,1901	3,1967
610	3,2032	3,2097	3,2162	3,2227	3,2292
620	3,2357	3,2422	3,2487	3,2551	3,2616
630	3,2680	3,2745	3,2810	3,2874	3,2939
640	3,3003	3,3066	3,3132	3,3196	3,3260
650	3,3325	—	—	—	—

Стандартная градуировочная таблица платинового термометра сопротивления при низких температурах [1, 13, 18]

Приведены значения электрического сопротивления платины ГОСТ 8589—57 в относительных единицах; R_0 — сопротивление при 0°С.

$\frac{R(T)}{R_0}$	T, °K	$\frac{R(T)}{R_0}$	T, °K	$\frac{R(T)}{R_0}$	T, °K
0,0008	10,2175	0,0054	21,4067	0,032	36,5242
0,0009	11,0876	0,0056	21,6323	0,034	37,2723
0,0010	11,8013	0,0058	21,8520	0,036	38,0003
0,0011	12,4086	0,0060	22,0662	0,038	38,7015
0,0012	12,9382	0,0062	22,2751	0,040	39,4033
0,0013	13,4091	0,0064	22,4791	0,042	40,0912
0,0014	13,8338	0,0066	22,6784	0,044	40,7453
0,0015	14,2208	0,0068	22,8733	0,046	41,3968
0,0016	14,5774	0,0070	23,0641	0,048	42,0370
0,0017	14,9099	0,0072	23,2510	0,050	42,6663
0,0018	15,2193	0,0074	23,4343	0,052	43,2859
0,0019	15,5118	0,0076	23,6143	0,054	43,8962
0,0020	15,7887	0,0078	23,7911	0,056	44,4987
0,0021	16,0519	0,0080	23,9647	0,058	45,0927
0,0022	16,3032	0,0082	24,1354	0,060	45,6791
0,0023	16,5434	0,0084	24,3033	0,062	46,2586
0,0024	16,7737	0,0086	24,4684	0,064	46,8316
0,0025	16,9950	0,0088	24,6307	0,066	47,3985
0,0026	17,2085	0,0090	24,7905	0,068	47,9597
0,0027	17,4141	0,0092	24,9479	0,070	48,5156
0,0028	17,6131	0,0094	25,1032	0,072	49,0664
0,0029	17,8061	0,0096	25,2563	0,074	49,6124
0,0030	17,9935	0,0098	25,4074	0,076	50,1539
0,0031	18,1754	0,0100	25,5565	0,078	50,6913
0,0032	18,3521	0,0110	26,2737	0,080	51,2247
0,0033	18,5239	0,0120	26,9503	0,082	51,7544
0,0034	18,6912	0,0130	27,5924	0,084	52,2805
0,0035	18,8544	0,0140	28,2046	0,086	52,8013
0,0036	19,0199	0,0150	28,7911	0,088	53,3225
0,0037	19,1608	0,0160	29,3537	0,090	53,8397
0,0038	19,3221	0,0170	29,8969	0,092	54,3520
0,0039	19,4711	0,0180	30,4213	0,094	54,8626
0,0040	19,6270	0,0190	30,9294	0,096	55,3708
0,0041	19,7601	0,0200	31,4224	0,098	55,8766
0,0042	19,9004	0,0210	31,9014	0,100	56,3807
0,0043	20,0328	0,0220	32,3679	0,110	58,8687
0,0044	20,1736	0,0230	32,8234	0,120	61,3143
0,0045	20,3006	0,0240	33,2685	0,130	63,7247
0,0046	20,4372	0,0250	33,7035	0,140	66,1073
0,0047	20,5654	0,0260	34,1288	0,150	68,4607
0,0048	20,6912	0,0270	34,5471	0,160	71,2486
0,0049	20,8149	0,0280	34,9555	0,170	73,1417
0,0050	20,9366	0,0290	35,3577	0,174	74,0700
0,0052	21,1751	0,0300	35,7528	0,182	75,9266

Таблица 8.9

Стандартная градуировочная таблица медного термометра сопротивления [13, 17]

Приведены значения электрического сопротивления в относительных единицах. Погрешность ± (0,3+6·10⁻⁴ t)

t, °C	0	2	4	6	8	t, °C	0	2	4	6	8
—50	0,7870	—	—	—	—	70	1,2982	1,3067	1,3152	1,3238	1,3323
—40	0,8296	0,8411	0,8126	0,8040	0,7955	80	1,3409	1,3493	1,3578	1,3664	1,3749
—30	0,8722	0,8637	0,8552	0,8466	0,8381	90	1,3834	1,3919	1,4004	1,4090	1,4175
—20	0,9148	0,9063	0,8978	0,8892	0,8807	100	1,4260	1,4345	1,4430	1,4516	1,4601
—10	0,9574	0,9489	0,9404	0,9318	0,9233	110	1,4685	1,4771	1,4856	1,4942	1,5027
—0	1,0000	0,9915	0,9830	0,9744	0,9659	120	1,5112	1,5197	1,5282	1,5368	1,5453
+0	1,0000	1,0085	1,0170	1,0256	1,0341	130	1,5538	1,5623	1,5708	1,5794	1,5879
10	1,0426	1,0511	1,0596	1,0682	1,0767	140	1,5964	1,6049	1,6134	1,6220	1,6305
20	1,0852	1,0937	1,1022	1,1108	1,1193	150	1,6390	1,6475	1,6560	1,6646	1,6731
30	1,1278	1,1363	1,1448	1,1534	1,1619	160	1,6816	1,6901	1,6986	1,7072	1,7157
40	1,1704	1,1789	1,1874	1,1960	1,2045	170	1,7242	1,7327	1,7412	1,7498	1,7583
50	1,2130	1,2215	1,2300	1,2385	1,2471	180	1,7668	—	—	—	—
60	1,2556	1,2641	1,2726	1,2812	1,2897						

Таблица 8.10

Градуировочная таблица платинового термометра сопротивления [1]

Приведены значения относительного сопротивления.

t, °C	0	10	20	30	40
—200	0,15763	—	—	—	—
—100	0,55264	0,50900	0,46516	0,42194	0,37902
—0	1,00000	0,95430	0,90859	0,86396	0,81917
+0	1,00000	1,04601	1,09234	1,13869	1,18583
100	1,40004	—	—	—	—

t, °C	50	60	70	80	90
—100	0,33761	0,29721	0,25833	0,22150	0,18780
—0	0,77456	0,73003	0,68506	0,64135	0,59707
+0	1,23286	1,27973	1,32643	1,37235	0,41741

8.4. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ

Термоэлектрическая термометрия основана на измерении термо-э. д. с. E, возникающей под действием температуры в термопаре — проводнике, состоящем из двух разнородных электродов. Термо-э.д.с. термопары определяется объемной термо-э.д.с., вызванной термодиффузией носителей тока; контактной термо-э. д. с., возникающей в стыке электродов в результате различия температурных зависимостей контактной разности потенциалов, и термо-э.д.с., вызванной эффектом увлечения электронов фононами. В зависимости от температуры и материала термопары любая из этих составляющих может дать наибольший вклад, поэтому зависимость E от температуры, вообще говоря, является нелинейной.

На практике обычно используют участки монотонной зависимости, поэтому один из пределов пригодности определяется чувствительностью термопары dE/dT. Как правило, другой предел обусловлен появлением нестабильности в температурной зависимости термо-э.д.с. либо под действием температур, близких к температуре плавления, рекристаллизации или интенсивного химического взаимодействия со средой, либо в результате недостаточной для измерения данной температуры очистки материалов термопары. Эксплуатационные характеристики термопар, градуировочные таблицы которых приведены в настоящей главе, даны в табл. 8.11.

Таблица 8.11

Эксплуатационные характеристики термопар [14, 19—21]

Термопара	Рабочий интервал, °К	Максимальная термо-э.д.с., мв	Погрешность измерений, град	Рабочая среда
Медь — константан	2—700	21	± (0,1—1)	Окислительная или воздух
Cu — Au + 2,11 ат. % Co	2—300	10	± (0,03—0,7)	Воздух
Cu — Ag + 0,37 ат. % Au	25—300	0,2	± 0,05	»
Железо — константан	70—1300	58	± 1	Окислительная
Хромель — алюмель	220—1600	52	± (5—10)	Окислительная или нейтральная
Хромель — копель	220—1100	66	± (3—5)	То же
Pt — Pt + 10% Rh	250—2100	17	± (1—3,5)	Воздух
Platinel — platinel	250—1500	49	± 1	Окислительная
W + 5% Re — W + 20% Re	400—2500	30	± (0,1—4)	Вакуум или нейтральная
HR — CA	570—1300	13	± 2	Воздух
Pt — Pt + 30% Rh	570—2100	14	± (3,1—6)	»
Вольфрам — молибден	1300—2800	8	± 5	Вакуум или нейтральная

Ниже приведены градуировочные таблицы различных термопар. При использовании этих таблиц следует учесть, что большинство из них (исключая стандартные) отличаются от реальных ввиду некоторого непостоянства состава электродов; приведены средние значения, и их отклонения от реальных должны быть получены экспериментальной привязкой в нескольких реперных точках (см. табл. 8.1). Градуировочные таблицы стандартных термопар соответствуют реальным в пределах указанной рабочей погрешности.

Таблица 8.12

Градуировочные значения термо-э.д.с. низкотемпературных термопар, мкв, при температуре свободных концов 0°С [3]

T, °K	Cu — константан	Cu—Au + 2,11 ат. % Co	Cu — Ag + 0,37 ат. % Au	T, °K	Cu — константан	Cu — Au + 2,11 ат. % Co	Cu — Ag + 0,37 ат. % Au
2	0,70	2,64	—	110	1351,5	2930,5	61,2
4	2,76	8,04	—	120	1566,5	3312,6	71,1
6	6,14	17,76	—	130	1790,1	3700,0	77,9
8	10,79	37,01	—	140	2031,8	4093,2	84,3
10	15,69	47,57	—	150	2289,4	4489,0	90,7
12	23,06	67,23	—	160	2545,0	4888,7	96,9
14	31,78	89,78	—	170	2819,8	5290,1	103,1
16	40,97	115,0	—	180	3106,7	5693,3	109,1
18	51,22	142,9	—	190	3405,2	6098,1	115,9
20	62,48	173,1	—	200	3714,1	6504,0	123,4
25	95,18	259,5	0,65	210	4033,2	6910,6	128,9
30	134,1	360,1	2,06	220	4362,7	7317,0	135,3
35	178,6	472,6	4,25	230	4702,2	7724,8	142,2
40	228,5	596,8	7,40	240	5051,9	8131,9	148,8
45	283,3	728,3	11,15	250	5411,7	8538,8	155,5
50	342,6	869,0	15,25	260	5781,5	8945,3	162,3
60	474,7	1171,1	24,10	270	6161,5	9351,1	169,7
70	622,4	1495,4	33,20	280	6551,7	9756,3	177,1
80	784,4	1836,3	41,70	290	6952,1	10160	184,6
90	960,5	2190,3	49,5	300	7362,9	10564	192,9
100	1149,8	2555,8	54,7				

Таблица 8.13

Градуировочная таблица термо-э.д.с. термопары железо — константан, мв [22]

Температура свободных концов 0°С; состав константана: 60% Cu—40%Ni.

t, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
—200	—8,27	—	—	—	—	—	—	—	—	—9,02
—100	—4,82	—5,25	—5,66	—6,06	—6,44	—6,80	—7,14	—7,46	—7,75	—4,39
—0	0,00	—0,52	—1,03	—1,53	—2,03	—2,52	—3,00	—3,47	—3,93	4,85
+0	0,00	0,52	1,05	1,58	2,12	2,66	3,20	3,75	4,30	10,43
100	5,40	5,95	6,51	7,07	7,63	8,19	8,75	9,31	9,87	16,02
200	10,99	11,56	12,12	12,68	13,23	13,79	14,36	14,91	15,47	21,53
300	16,57	17,13	17,68	18,23	18,78	19,33	19,88	20,43	20,98	27,01
400	22,08	22,63	23,18	23,73	24,28	24,83	25,38	25,93	26,48	32,70
500	27,69	28,15	28,71	29,27	29,83	30,40	30,97	31,54	32,12	38,68
600	32,28	33,87	34,46	35,05	35,65	36,25	36,85	37,45	38,06	44,41
700	39,30	39,93	40,56	41,19	41,83	42,47	43,11	43,76	44,41	50,96
800	45,71	46,36	47,02	47,68	48,33	48,99	49,65	50,31	50,96	57,64
900	52,28	52,87	53,47	54,06	54,65	55,25	55,84	56,43	57,03	—
1000	58,33	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 8.14

Стандартная градуировочная таблица термо-э.д.с. термопары хромель — алюмель, мв [13, 19]

Допустимая погрешность ±0,16 мв при t<300°С и ±[0,16+2·10⁻⁴ (t—300)] при t>300°С. Электроды: хромель НХ 9,5, алюмель ПМц АК 2-2-1. Температура свободных концов 0°С.

t, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
—0	—0,00	—0,39	—0,77	—1,14	—1,50	—1,86	—	—	—	—
+0	0,00	0,40	0,80	1,20	1,61	2,02	2,43	2,85	3,26	3,68
100	4,10	4,51	4,92	5,33	5,73	6,13	6,53	6,93	7,33	7,73
200	8,13	8,53	8,93	9,34	9,74	10,15	10,56	10,97	11,38	11,80
300	12,21	12,62	13,04	13,45	13,87	14,29	14,71	15,13	15,55	15,97
400	16,39	16,82	17,24	17,66	18,09	18,50	18,93	19,36	19,78	20,21
500	20,64	21,07	21,49	21,92	22,34	22,77	23,20	23,62	24,05	24,48
600	24,90	25,33	25,75	26,18	26,60	27,03	27,45	27,87	28,29	28,72
700	29,14	29,56	29,99	30,40	30,82	31,23	31,65	32,07	32,48	32,90
800	33,31	33,71	34,12	34,54	43,94	35,35	35,75	36,16	36,56	36,96
900	37,36	37,76	38,16	38,56	38,96	39,35	39,75	40,14	40,53	40,92
1000	41,31	41,70	42,08	42,47	42,86	43,24	43,62	44,00	44,39	44,76
1100	45,14	45,52	45,89	46,27	46,64	47,01	47,38	47,75	48,12	48,49
1200	48,85	49,21	49,57	49,95	50,29	50,65	51,00	51,36	51,71	52,06
1300	52,41	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 8.15

Стандартная градуировочная таблица термо-э.д.с. термопары хромель — копель, мв [13, 19]

Допустимая погрешность ±0,2 мв при t<300°С и ±[0,2+0,6·10⁻⁴ (t—300)] мв при t>300°С. Электроды: хромель НХ 9,5, копель МНМц 43-0,5. Температура свободных концов 0°С.

t, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
—0	0,00	—0,64	—1,27	—1,89	—2,50	—3,11	—	—	—	—
+0	0,00	0,65	1,31	1,98	2,66	3,35	4,05	4,76	5,46	6,21
100	6,95	7,69	8,43	9,18	9,93	10,69	11,45	12,24	13,03	13,84
200	14,65	15,47	16,30	17,12	17,95	18,77	19,60	20,43	21,25	22,08
300	22,91	23,75	24,60	25,45	26,31	27,16	28,20	28,89	29,70	30,62
400	31,49	32,55	33,22	34,06	34,95	35,82	36,69	37,65	38,42	39,29
500	40,16	41,03	41,91	42,79	43,68	44,58	45,45	46,34	47,23	48,12
600	49,02	49,90	50,78	51,66	52,55	53,41	54,28	55,16	56,03	56,90
700	57,77	58,64	59,51	60,37	61,24	62,11	62,97	63,83	64,70	65,56
800	66,42	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 8.16

Градуировочная таблица термо-э.д.с. термопары медь — константан*, мв [22]

Константан — сплав 60% Cu—40% Ni. Температура свободных концов 0°С.

t, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0,000	0,389	0,787	1,194	1,610	2,035	2,467	2,908	3,357	3,813
100	4,277	4,749	5,227	5,712	6,204	6,703	7,208	7,719	8,236	8,759
200	9,288	9,823	10,363	10,909	11,459	12,015	12,576	13,140	13,710	14,285
300	14,864	15,447	16,035	16,626	17,222	17,821	18,425	19,032	19,642	20,256
400	20,874	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Низкотемпературная часть градуировки см. в табл. 5.12.

Таблица 8.17

Стандартная градуировочная таблица термо-э. д. с. термопары Pt—Pt + 10% Rh, мв [19]

Допустимая погрешность ±0,01 мв при $t \leq 300°C$ и $\pm[0,01 + 2,5 \cdot 10^{-5}(t - 300)]$ мв при $t > 300°C$.

Температура свободных концов 0°С.

t, °С	0	2	4	6	8
−20	−0,109	—	—	—	—
−10	−0,055	−0,066	−0,077	−0,087	−0,098
−0	0,000	−0,011	−0,022	−0,033	−0,044
+0	0,000	0,011	0,022	0,034	0,045
10	0,057	0,069	0,080	0,092	0,103
20	0,115	0,127	0,139	0,151	0,164
30	0,176	0,188	0,200	0,212	0,225
40	0,237	0,250	0,263	0,275	0,288
50	0,301	0,314	0,327	0,340	0,353
60	0,366	0,379	0,392	0,406	0,419
70	0,432	0,446	0,459	0,473	0,486
80	0,500	0,514	0,527	0,541	0,555
90	0,569	0,583	0,597	0,611	0,626
100	0,640	0,654	0,669	0,683	0,698
110	0,712	0,727	0,742	0,756	0,771
120	0,786	0,801	0,816	0,831	0,846
130	0,861	0,876	0,891	0,907	0,922
140	0,937	0,952	0,968	0,983	0,999
150	1,014	1,030	1,046	1,061	1,077
160	1,093	1,109	1,125	1,141	1,157
170	1,173	1,189	1,205	1,222	1,238
180	1,254	1,271	1,287	1,304	1,320
190	1,337	1,354	1,370	1,387	1,404
200	1,421	1,438	1,455	1,472	1,490
210	1,507	1,525	1,542	1,560	1,577
220	1,595	1,613	1,630	1,648	1,665
230	1,683	1,701	1,718	1,736	1,754
240	1,771	1,789	1,807	1,824	1,842
250	1,860	1,878	1,896	1,913	1,931
260	1,949	1,967	1,985	2,003	2,021
270	2,039	2,057	2,075	2,093	2,111
280	2,129	2,147	2,165	2,183	2,201
290	2,219	2,237	2,255	2,274	2,292
300	2,310	2,328	2,346	2,365	2,383
310	2,401	2,419	2,438	2,456	2,475
320	2,493	2,511	2,530	2,548	2,567
330	2,585	2,603	2,622	2,640	2,659
340	2,677	2,696	2,715	2,734	2,753
350	2,772	2,791	2,809	2,828	2,846
360	2,865	2,884	2,903	2,921	2,940
370	2,959	2,978	2,997	3,016	3,035

Продолжение табл. 8.17

t, °С	0	2	4	6	8
380	3,053	3,072	3,091	3,110	3,129
390	3,148	3,167	3,186	3,205	3,224
400	3,243	3,262	3,281	3,300	3,319
410	3,338	3,357	3,376	3,395	3,414
420	3,434	3,453	3,472	3,491	3,510
430	3,530	3,549	3,568	3,587	3,606
440	3,626	3,645	3,664	3,683	3,702
450	3,722	3,741	3,760	3,779	3,798
460	3,818	3,837	3,856	3,875	3,895
470	3,915	3,935	3,954	3,974	3,993
480	4,013	4,033	4,052	4,071	4,091
490	4,111	4,131	4,151	4,170	4,190
500	4,210	4,230	4,249	4,268	4,289
510	4,309	4,329	4,349	4,369	4,388
520	4,408	4,428	4,448	4,467	4,487
530	4,507	4,527	4,547	4,567	4,587
540	4,607	4,627	4,647	4,667	4,687
550	4,707	4,727	4,747	4,768	4,788
560	4,808	4,828	4,848	4,869	4,889
570	4,909	4,929	4,949	4,970	4,990
580	5,010	5,030	5,050	5,071	5,091
590	5,111	5,131	5,151	5,172	5,192
600	5,212	5,233	5,253	5,274	5,294
610	5,314	5,335	5,356	5,376	5,397
620	5,417	5,438	5,458	5,479	5,500
630	5,520	5,541	5,561	5,582	5,603
640	5,623	5,644	5,664	5,685	5,706
650	5,726	5,747	5,768	5,789	5,809
660	5,830	5,850	5,871	5,892	5,913
670	5,934	5,955	5,976	5,997	6,018
680	6,039	6,060	6,081	6,102	6,123
690	6,144	6,165	6,186	6,207	6,228
700	6,249	6,270	6,292	6,313	6,334
710	6,354	6,375	6,397	6,418	6,439
720	6,460	6,481	6,503	6,524	6,545
730	6,566	6,588	6,609	6,630	6,652
740	6,673	6,694	6,716	6,737	6,759
750	6,780	6,802	6,823	6,845	6,866
760	6,887	6,909	6,930	6,952	6,973
770	6,995	7,016	7,037	7,059	7,080
780	7,102	7,124	7,146	7,167	7,189
790	7,211	7,232	7,254	7,276	7,298
800	7,320	7,342	7,364	7,385	7,407
810	7,429	7,451	7,473	7,494	7,516
820	7,538	7,560	7,582	7,604	7,626
830	7,648	7,670	7,692	7,714	7,736
840	7,758	7,780	7,802	7,824	7,846

Продолжение табл. 8.17

t, °C	0	2	4	6	8
850	7,858	7,890	7,192	7,970	7,967
860	7,979	8,001	8,023	8,046	8,068
870	8,090	8,112	8,135	8,158	8,180
880	8,202	8,224	8,247	8,270	8,292
890	8,314	8,336	8,359	8,381	8,404
900	8,426	8,449	8,472	8,494	8,516
910	8,538	8,560	8,583	8,606	8,629
920	8,651	8,673	8,696	8,718	8,741
930	8,764	8,787	8,809	8,832	8,855
940	8,878	8,900	8,923	8,946	8,969
950	8,992	9,015	9,037	9,060	9,083
960	9,106	9,129	9,152	9,175	9,197
970	9,220	9,243	9,266	9,289	9,312
980	9,335	9,358	9,381	9,404	9,427
990	9,450	9,473	9,496	9,520	9,543
1000	9,566	9,589	9,612	9,636	9,658
1010	9,682	9,705	9,728	9,752	9,775
1020	9,798	9,821	9,844	9,868	9,891
1030	9,915	9,938	9,961	9,985	10,008
1040	10,032	10,055	10,078	10,102	10,125
1050	10,149	10,173	10,196	10,220	10,243
1060	10,267	10,291	10,314	10,338	10,361
1070	10,385	10,409	10,432	10,456	10,479
1080	10,503	10,527	10,551	10,574	10,598
1090	10,622	10,646	10,670	10,693	10,717
1100	10,741	10,765	10,789	10,812	10,836
1110	10,860	10,884	10,908	10,932	10,956
1120	10,980	11,004	11,028	11,052	11,076
1130	11,100	11,124	11,148	11,172	11,196
1140	11,220	11,244	11,268	11,293	11,317
1150	11,341	11,365	11,390	11,414	11,438
1160	11,462	11,486	11,510	11,535	11,559
1170	11,583	11,607	11,632	11,656	11,681
1180	11,705	11,729	11,754	11,778	11,803
1190	11,827	11,852	11,876	11,901	11,926
1200	11,950	11,974	11,998	12,022	12,046
1210	12,070	12,094	12,118	12,142	12,166
1220	12,190	12,214	12,238	12,262	12,286

Продолжение табл. 8.17

t, °C	0	2	4	6	8
1230	12,311	12,335	12,359	12,383	12,407
1240	12,431	12,455	12,479	12,503	12,527
1250	12,551	12,575	12,599	12,623	12,647
1260	12,671	12,695	12,719	12,743	12,767
1270	12,791	12,815	12,839	12,863	12,887
1280	12,911	12,935	12,959	12,984	13,008
1290	13,032	13,056	13,080	13,105	13,129
1300	13,153	13,177	13,201	13,225	13,250
1310	13,274	13,298	13,322	13,346	13,370
1320	13,394	13,418	13,442	13,467	13,491
1330	13,515	13,539	13,563	13,587	13,611
1340	13,635	13,659	13,683	13,707	13,731
1350	13,755	13,779	13,803	13,827	13,851
1360	13,875	13,899	13,923	13,947	13,971
1370	13,995	14,019	14,043	14,068	14,092
1380	14,116	14,140	14,164	14,188	14,212
1390	14,236	14,260	14,284	14,308	14,332
1400	14,356	14,380	14,404	14,428	14,452
1410	14,476	14,500	14,524	14,548	14,572
1420	14,596	14,620	14,644	14,669	14,693
1430	14,717	14,741	14,765	14,789	14,813
1440	14,837	14,861	14,885	14,909	14,933
1450	14,957	14,981	15,005	15,029	15,053
1460	15,077	15,101	15,125	15,149	15,173
1470	15,197	15,221	15,245	15,270	15,294
1480	15,318	15,342	15,366	15,390	15,414
1490	15,438	15,462	15,486	15,510	15,534
1500	15,558	15,582	15,606	15,630	15,654
1510	15,678	15,702	15,726	15,750	15,774
1520	15,798	15,822	15,846	15,871	15,895
1530	15,919	15,943	15,967	15,991	16,015
1540	16,039	16,063	16,087	16,111	16,135
1550	16,159	16,183	16,207	16,231	16,255
1560	16,279	16,303	16,327	16,351	16,375
1570	16,399	16,423	16,447	16,472	16,496
1580	16,520	16,544	16,568	16,592	16,616
1590	16,640	16,664	16,688	16,712	16,736
1600	16,760	—	—	—	—

Таблица 8.18

Стандартная градуировочная таблица термо-э. д. с. термопары ПК — СА*, мв [13]

Допустимая погрешность ±0,15 мв. Температура свободных концов 0 °С

t, °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
300	0,39	0,48	0,58	0,68	0,80	0,92	1,04	1,17	1,31	1,45
400	1,60	1,75	1,92	2,08	2,25	2,43	2,62	2,81	3,00	3,20
500	3,41	3,60	3,79	3,98	4,17	4,37	4,56	4,76	4,96	5,16
600	5,36	5,56	5,77	5,97	6,17	6,38	6,58	6,78	6,98	7,19
700	7,39	7,59	7,79	8,00	8,20	8,40	8,60	8,60	9,01	9,21
800	9,41	9,61	9,82	10,02	10,22	10,42	10,62	10,82	11,02	11,22
900	11,42	11,62	11,82	12,02	12,21	12,41	12,61	12,80	13,00	13,20
1000	13,39	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* В интервале 0—40°С термо-э. д. с. практически равна 0.

Таблица 8.19

Градуировочная таблица термо-э. д. с. термопары W + 5% Re — W + 20% Re, мв [13, 21, 28]

Температура свободных концов 0°С.

t, °С	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275
0	0,00	0,25	0,6	0,9	1,3	1,6	1,9	2,3	2,6	3,0	3,4	3,8
300	4,2	4,6	5,0	5,4	5,8	6,2	6,6	7,0	7,5	7,9	8,4	8,8
600	9,3	9,7	10,1	10,5	11,0	11,4	11,8	12,2	12,6	13,0	13,4	13,8
900	14,2	14,6	15,0	15,4	15,9	16,3	16,7	17,1	17,5	17,9	18,3	18,7
1200	19,0	19,4	19,8	20,1	20,5	20,8	21,1	21,4	21,7	22,0	22,3	22,6
1500	22,9	23,2	23,5	23,8	24,0	24,3	24,6	24,8	25,1	25,4	25,6	25,9
1800	26,2	26,4	26,6	26,9	27,1	27,3	27,6	27,8	28,0	28,3	28,5	28,8
2100	29,0	29,2	29,4	29,6	29,9	30,1	30,3	30,5	30,7	30,9	31,2	—
2400	31,5	—	32,0	—	32,3	—	32,7	—	33	—	—	—

Таблица 8.20

Стандартная градуировочная таблица термо-э. д. с. термопары Pt — 6% Rh — Pt + 30% Rh, мв [13, 19]

Допустимая погрешность градуировки ± [0,01 + 3,3 · 10⁻⁵ (t — 300)], мв. Температура свободных концов 0°С.

t, °С	0	5	t, °С	0	5
300	0,456	0,471	680	2,330	2,364
310	0,487	0,503	690	2,398	2,432
320	0,520	0,536	700	2,467	2,501
330	0,553	0,570	710	2,536	2,571
340	0,587	0,604	720	2,607	2,642
350	0,622	0,640	730	2,678	2,714
360	0,658	0,676	740	2,750	2,786
370	0,695	0,714	750	2,823	2,860
380	0,733	0,752	760	2,897	2,934
390	0,772	0,792	770	2,972	3,010
400	0,812	0,832	780	3,048	3,086
410	0,853	0,874	790	3,142	3,162
420	0,896	0,916	800	3,201	3,240
430	0,938	0,960	810	3,279	3,318
440	0,983	1,005	820	3,358	3,398
450	1,028	1,051	830	3,438	3,478
460	1,074	1,097	840	3,519	3,559
470	1,121	1,145	850	3,600	3,641
480	1,169	1,193	860	3,682	3,723
490	1,218	1,243	870	3,765	3,807
500	1,268	1,293	880	3,849	3,891
510	1,319	1,345	890	3,934	3,976
520	1,371	1,397	900	4,019	4,062
530	1,424	1,451	910	4,105	4,148
540	1,478	1,506	920	4,192	4,235
550	1,532	1,560	930	4,279	4,323
560	1,588	1,616	940	4,368	4,412
570	1,645	1,673	950	4,457	4,502
580	1,702	1,731	960	4,547	4,592
590	1,761	1,791	970	4,637	4,682
600	1,821	1,851	980	4,728	4,774
610	1,881	1,912	990	4,820	4,866
620	1,943	1,974	1000	4,913	4,959
630	2,005	2,036	1010	5,006	5,053
640	2,068	2,100	1020	5,100	5,147
650	2,132	2,165	1030	5,195	5,242
660	2,198	2,231	1040	5,290	5,338
670	2,264	2,297	1050	5,386	5,434

Продолжение табл. 8.20

t, °С	0	5	t, °С	0	5
1060	5,483	5,532	1500	10,274	10,333
1070	5,581	5,630	1510	10,392	10,451
1080	5,679	5,728	1520	10,511	10,570
1090	5,777	5,826	1530	10,630	10,689
1100	5,876	5,926	1540	10,749	10,809
1110	5,976	6,026	1550	10,869	10,929
1120	6,077	6,127	1560	10,989	11,049
1130	6,178	6,229	1570	11,109	11,169
1140	6,280	6,331	1580	11,229	11,289
1150	6,382	6,433	1590	11,350	11,410
1160	6,485	6,536	1600	11,471	11,531
1170	6,588	6,640	1610	11,592	11,652
1180	6,692	6,744	1620	11,713	11,773
1190	6,797	6,849	1630	11,834	11,895
1200	6,902	6,955	1640	11,956	12,017
1210	7,008	7,061	1650	12,078	12,139
1220	7,114	7,167	1660	12,200	12,261
1230	7,221	7,274	1670	12,323	12,384
1240	7,328	7,382	1680	12,445	12,506
1250	7,436	7,490	1690	12,568	12,629
1260	7,544	7,598	1700	12,691	12,752
1270	7,653	7,707	1710	12,814	12,875
1280	7,765	7,817	1720	12,937	12,998
1290	7,872	7,927	1730	13,060	13,122
1300	7,982	8,037	1740	13,184	13,245
1310	8,093	8,148	1750	13,307	13,369
1320	8,204	8,259	1760	13,431	13,493
1330	8,316	8,371	1770	13,555	13,617
1340	8,427	8,483	1780	13,679	13,741
1350	8,540	8,596	1790	13,803	13,866
1360	8,653	8,709	1800	13,927	—
1370	8,767	8,823			
1380	8,880	8,937			
1390	8,994	9,051			
1400	9,109	9,166			
1410	9,224	9,281			
1420	9,339	9,397			
1430	9,455	9,513			
1440	9,571	9,629			
1450	9,687	9,746			
1460	9,804	9,862			
1470	9,921	9,979			
1480	10,038	10,097			
1490	10,156	10,215			

Таблица 8.21

Градуировочные значения термо-э. д. с. некоторых высокотемпературных термопар, мв [4, 24]

Температура свободных концов термопары платина — никель — никель 20°С, остальных термопар — 0°С.

t, °С	Платина — никель	Платина — платинородий	Ir+10%Ru — Ir+ +10%Rh	Ir — Ir+ +10%Ru	Ir — Ir+ +10%Rh	W—Mo	t, °С	Платина — никель	Платина — платинородий	Ir+10%Ru — Ir+ +10%Rh	Ir—Ir+ +10%Rh	Ir—Ir+ +10%Ru	W—Mo
100	3,25	5,62	—	—	—	—	1100	44,80	—	6,83	6,06	2,73	—0,9
200	7,30	11,08	—	1,10	—	—	1200	48,05	—	7,38	6,60	3,00	—0,5
300	11,40	19,09	1,60	1,65	—	—	1300	—	—	7,94	7,11	3,24	+0,5
400	15,50	26,48	—	2,20	—	—	1400	—	—	8,41	7,65	3,47	0,6
500	19,80	34,18	—	2,75	—	—	1500	—	—	8,89	8,20	3,68	1,3
600	24,05	41,95	3,64	3,30	—	—	1600	—	—	9,35	8,76	3,87	2,0
700	28,30	50,02	—	3,85	—	—	1700	—	—	9,81	9,25	4,09	2,9
800	32,30	57,94	—	4,40	—	—	1800	—	—	10,26	9,80	4,19	—
900	36,45	65,76	—	4,95	—	—	2000	—	—	—	10,26	—	9,6*
1000	40,63	—	6,24	5,50	2,45	—1,3							

* Термо-э. д. с. при 2100°С.

8.5. КОНДЕНСАЦИОННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Конденсационная термометрия основана на зависимости от температуры давления насыщенного пара термометрической жидкости, заключенной в постоянный объем. Область применения конденсационного термометра ограничена снизу температурой затвердевания, а сверху — критической температурой термометрической жидкости.

Таблица 8.22

Рабочие интервалы некоторых конденсационных термометров [25]

Термометрическая жидкость	Температура, °К	Термометрическая жидкость	Температура, °К	Термометрическая жидкость	Температура, °К	Термометрическая жидкость	Температура, °К
^3He	0,3—3,3	Ar	84—149	H_2 (равновесный)	14—20	N_2	63—73
^4He	0,5—5,2	O_2	55—90	Ne	24—44,4	C_6H_6	90—191

Таблица 8.23

Давление насыщенного пара пропана [26]

t, °С	P, кг/см²	t, °С	P, кг/см²	t, °С	P, кг/см²
—130	0,00012	—50	0,721	15	7,442
—120	0,0041	—45	0,905	20	8,498
—110	0,0118	—40	1,137	25	9,676
—100	0,030	—35	1,406	30	11,02
—95	0,045	—30	1,705	35	12,46
—90	0,066	—25	2,067	40	14,01
—85	0,095	—20	2,471	45	15,70
—80	0,133	—15	2,946	50	17,61
—75	0,184	—10	3,472		
—70	0,249	—5	4,094		
—65	0,332	0	4,776		
—60	0,435	5	5,561		
—55	0,563	10	6,464		

Таблица 8.24

Температура конденсации некоторых термометрических жидкостей, °К [26, 27]

P — давление насыщенного пара.

P, мм рт. ст.	H_2, равновесный	H_2, нормальный	N_2	O_2	*P*, мм рт. ст.	H_2, равновесный	H_2, нормальный	N_2	O_2
2,0	10,02	10,02	—	55,28	200	16,49	16,60	67,57	79,14
2,0	10,25	10,32	—	57,07	210	16,61	16,715	67,88	79,49
3,0	10,38	10,50	—	57,73	220	16,715	16,835	68,18	79,82
3,5	10,53	10,64	—	58,29	230	16,825	16,94	68,46	80,16
4,0	10,65	10,76	—	58,80	240	16,93	17,05	68,75	80,48
5,0	10,88	10,98	—	59,68	250	17,03	17,15	69,02	80,78
6,0	11,09	11,17	—	60,39	260	17,13	17,25	69,28	81,07
7,0	11,23	11,34	—	61,01	270	17,22	17,34	69,53	81,36
8,0	11,36	11,47	—	61,58	280	17,325	17,435	69,77	81,65
9,0	11,50	11,55	—	62,07	290	17,415	17,53	70,01	81,92
10	11,62	11,72	—	62,50	300	17,50	17,62	70,25	82,18
12	11,83	11,92	—	63,32	320	17,67	17,79	70,70	82,68
14	12,02	12,115	—	64,00	340	17,835	17,96	71,13	83,16
16	12,175	12,29	55,55	64,59	360	18,00	18,11	71,54	83,62
18	12,32	12,43	—	65,17	380	18,15	18,26	71,92	84,06
20	12,46	12,57	56,48	65,67	400	18,29	18,405	72,30	84,48
25	12,74	12,85	—	66,74	420	18,425	18,55	72,66	84,89
30	12,99	13,09	58,08	67,67	440	18,57	18,69	73,00	85,29
35	13,21	13,36	—	68,46	460	18,69	18,22	73,34	85,65
40	13,40	13,51	59,28	69,15	480	18,82	18,945	73,66	86,01
45	13,575	13,67	—	69,81	500	18,94	19,06	73,97	86,37
50	13,73	13,83	60,24	70,39	520	19,065	19,185	74,27	86,72
60	14,04	14,15	61,06	71,39	540	19,185	19,30	74,56	87,06
70	14,30	14,42	61,77	72,29	560	19,30	19,41	74,85	87,38
80	14,56	14,68	62,39	73,09	580	19,40	19,52	75,13	87,69
90	14,77	14,89	62,94	73,80	600	19,50	19,62	75,41	87,99
100	15,00	15,10	63,50	74,47	620	19,60	19,72	75,68	88,29
110	15,18	15,29	64,03	75,08	640	19,70	19,825	75,93	88,58
120	15,35	15,47	64,52	75,64	660	19,80	19,92	76,18	88,85
130	15,52	15,64	64,96	76,16	680	19,90	20,02	76,43	89,14
140	15,68	15,80	65,42	76,65	700	20,00	20,11	76,67	89,41
150	15,83	15,95	65,81	77,13	720	20,09	20,21	76,91	89,67
160	15,97	16,10	66,20	77,57	740	20,18	20,30	77,14	89,93
170	16,10	16,23	66,66	77,98	760	20,273	20,39	77,364	90,18
180	16,235	16,365	66,91	78,30	780	20,37	20,48	77,58	90,43
190	16,36	16,485	67,25	78,77	800	20,44	20,56	—	90,69

Таблица 8.25

Градуировочная таблица конденсационного ^3He-термометра (низкотемпературная шкала $T_{гз}$) [9]

Приводится давление насыщенного пара ^3He, мм рт. ст., при ускорении земного притяжения $g = 980{,}665$ см/сек^2.

T, °K	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,2	0,0000121	0,0000244	0,0000463	0,0000835	0,0001441	0,0002388	0,0003819	0,0005917	0,0008911	0,0013062
0,3	0,001877	0,002630	0,003533	0,004291	0,005016	0,008619	0,011173	0,014304	0,018105	0,022673
0,4	0,028115	0,034540	0,042086	0,050864	0,061017	0,072686	0,086022	0,101179	0,118319	0,137510
0,5	0,159294	0,183309	0,210139	0,239811	0,272542	0,308540	0,347992	0,391106	0,436067	0,489145
0,6	0,544490	0,601337	0,666002	0,736402	0,813059	0,893094	0,978729	1,070189	1,167698	1,271483
0,7	1,381771	1,498789	1,622766	1,753428	1,892506	2,038728	2,192821	2,355017	2,525542	2,704626
0,8	2,892296	3,089381	3,295908	3,511105	3,736398	3,971013	4,216976	4,472711	4,739044	5,016198
0,9	5,304397	5,603602	5,916279	6,237476	6,572071	6,918813	7,277923	7,649620	8,034121	8,431641
1,0	8,642	9,267	9,704	10,156	10,622	11,102	11,597	12,106	12,631	13,170
1,1	13,725	14,295	14,881	15,484	16,102	16,737	17,388	18,056	18,741	19,443
1,2	20,163	20,900	21,665	22,428	23,220	24,009	24,857	25,704	26,571	27,456
1,3	28,360	29,286	30,229	31,193	32,177	33,181	34,206	35,252	36,319	37,407
1,4	38,516	39,646	40,799	41,973	43,169	44,388	45,629	46,896	48,179	49,489
1,5	50,822	52,176	53,558	54,961	56,389	57,840	59,316	60,817	62,342	63,897
1,6	65,467	67,068	68,694	70,346	72,022	73,726	75,455	77,211	78,993	80,802
1,7	82,638	84,501	86,391	88,309	90,254	92,228	94,229	96,258	98,315	100,402
1,8	102,516	104,660	106,833	109,035	111,266	113,527	115,818	118,138	120,489	122,870
1,9	125,282	127,724	130,197	132,701	135,236	137,803	140,401	143,031	145,692	148,386
2,0	151,112	153,870	156,661	159,485	162,342	165,232	168,155	171,112	174,102	177,126
2,1	180,184	183,276	186,403	189,564	192,760	195,990	199,256	202,557	205,894	209,266
2,2	212,673	216,117	219,597	223,113	226,665	230,255	233,881	237,544	241,244	244,982
2,3	248,757	252,570	256,420	260,309	264,236	268,202	272,206	276,249	280,331	284,452
2,4	288,613	292,813	297,053	301,332	305,653	310,013	314,414	318,855	323,337	327,861
2,5	332,425	337,031	341,679	346,368	351,100	355,874	360,690	365,549	370,450	375,395
2,6	380,383	385,414	390,489	395,608	400,771	405,979	411,230	416,526	421,868	427,252
2,7	432,686	438,164	443,687	449,256	454,872	460,534	466,242	471,998	477,801	483,651
2,8	489,549	495,495	501,488	507,531	513,622	519,762	525,951	532,189	538,477	544,815
2,9	551,203	557,692	564,131	570,672	577,264	583,907	590,602	597,349	604,140	611,002
3,0	617,907	624,866	631,879	638,945	646,066	653,241	660,472	667,757	675,098	682,496
3,1	689,949	697,459	705,026	712,650	720,332	728,072	735,871	743,726	751,644	759,620
3,2	767,656	775,753	783,910	792,139	800,408	808,750	817,155	825,622	834,153	842,747
3,3	851,406	860,130	868,916	—	—	—	—	—		

Таблица 8.26

Градуировочная таблица конденсационного ^{4}He-термометра (низкотемпературная шкала T_{64}) [27]

Приводятся давление насыщенного пара ^{4}He, *мм рт. ст.*, при ускорении земного притяжения $g = 981.56$ *см/сек*^{2}.

T, °K	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,5	0,0000163	0,0000229	0,0000314	0,0000427	0,0000574	0,0000766	0,000101	0,000132	0,000172	0,000221
0,6	0,000282	0,000357	0,000450	0,000563	0,000699	0,000863	0,00106	0,00130	0,00158	0,00190
0,7	0,00228	0,00273	0,00326	0,00387	0,00457	0,00537	0,00630	0,00736	0,00856	0,00993
0,8	0,0115	0,0132	0,0152	0,0174	0,0199	0,0226	0,0257	0,0291	0,0329	0,0371
0,9	0,0417	0,0466	0,0524	0,0585	0,0652	0,0726	0,0806	0,0893	0,0988	0,1091
1,0	0,1203	0,1324	0,1455	0,1596	0,1748	0,1912	0,2088	0,2277	0,2480	0,2697
1,1	0,2930	0,3178	0,3443	0,3727	0,4030	0,4346	0,4686	0,5046	0,5431	0,5837
1,2	0,6267	0,6722	0,7203	0,7711	0,8248	0,8813	0,9409	1,0036	1,0696	1,1390
1,3	1,2118	1,2883	1,3685	1,4527	1,5408	1,6330	1,7296	1,8305	1,9360	2,0462
1,4	2,1612	2,2812	2,4057	2,5356	2,6723	2,8136	2,9606	3,1135	3,2724	3,4374
1,5	3,6088	3,7866	3,9711	4,1624	4,3606	4,5660	4,7786	4,9967	5,2264	5,4619
1,6	5,7064	5,9569	6,2168	6,4850	6,7619	7,0476	7,3422	7,6460	7,0590	8,2815
1,7	8,6156	8,9555	9,3073	9,6692	10,041	10,424	10,817	11,222	11,637	12,063
1,8	12,500	12,949	13,409	13,881	14,365	14,861	15,370	15,889	16,422	16,966
1,9	17,526	18,097	18,681	19,278	19,888	20,511	21,148	21,799	22,463	23,141
2,0	23,832	24,537	25,257	25,990	26,737	27,498	28,273	29,062	29,865	30,682
2,1	31,514	32,350	33,218	34,091	34,978	35,878	36,791	37,717	38,655	39,609
2,2	40,576	41,559	42,559	43,575	44,607	45,655	46,720	47,802	48,901	50,017
2,3	51,151	52,302	53,471	54,657	55,862	57,085	58,326	59,585	60,864	62,161
2,4	63,476	64,811	66,165	67,538	68,930	70,343	71,775	73,227	74,699	76,191
2,5	77,704	79,237	80,791	82,366	83,962	85,579	87,218	88,878	90,559	92,263
2,6	93,988	95,736	97,505	99,297	101,11	102,95	104,81	106,69	108,60	110,53
2,7	112,48	114,45	116,45	118,46	120,52	122,59	124,69	126,81	128,95	131,12
2,8	133,31	135,53	137,77	140,04	142,33	144,65	147,00	149,37	151,76	154,18
2,9	156,63	159,10	161,60	164,13	166,68	169,26	171,87	174,50	177,16	179,85
3,0	182,57	185,31	188,08	190,88	193,71	196,57	199,45	202,37	205,31	208,28
3,1	211,28	214,31	217,37	220,46	223,58	226,73	229,91	233,12	236,35	239,62
3,2	242,92	246,25	249,62	253,01	256,43	259,89	263,37	266,89	270,44	274,02
3,3	277,63	281,28	284,96	288,67	292,41	296,18	299,99	303,83	307,71	311,61
3,4	315,55	319,53	323,53	327,57	331,65	335,76	339,90	344,07	348,29	352,53
3,5	356,81	361,13	365,48	369,86	374,28	378,74	383,23	387,76	392,33	396,93
3,6	401,56	406,23	410,94	415,68	420,46	425,28	430,13	435,00	439,95	444,92
3,7	449,92	454,96	460,04	465,16	470,31	475,51	480,74	486,01	491,32	496,66
3,8	502,05	507,47	512,94	518,44	523,98	529,57	535,19	540,86	546,56	552,30
3,9	558,09	563,91	569,78	575,69	581,64	587,63	593,66	599,74	605,85	612,01
4,0	618,21	624,46	630,74	637,07	643,44	649,86	656,32	662,82	669,37	675,96
4,1	682,59	689,27	695,99	702,76	709,57	716,42	723,32	730,27	737,25	744,29
4,2	751,37	758,49	765,66	772,87	780,13	787,43	794,78	802,17	809,62	817,11
4,3	824,65	832,23	839,87	847,55	855,29	863,07	870,89	878,77	886,70	894,68
4,4	902,71	910,79	918,91	927,09	935,31	943,59	951,92	960,30	968,73	977,21
4,5	985,74	994,32	1003,0	1011,6	1020,4	1029,2	1038,0	1046,9	1055,9	1064,9
4,6	1073,9	1083,1	1092,2	1101,4	1110,7	1120,0	1129,4	1138,9	1148,4	1157,9
4,7	1167,5	1177,2	1186,9	1196,7	1206,5	1216,4	1226,3	1236,3	1246,4	1256,5
4,8	1266,6	1276,9	1287,2	1297,5	1307,9	1318,4	1328,9	1339,5	1350,1	1360,8
4,9	1371,6	1382,4	1393,3	1404,2	1415,2	1426,3	1437,4	1448,6	1459,9	1471,2
5,0	1482,6	1494,0	1505,5	1517,1	1528,7	1540,4	1552,1	1563,9	1575,8	1587,8
5,1	1599,8	1611,9	1624,0	1636,2	1648,5	1660,8	1673,2	1685,7	1698,2	1710,8
5,2	1723,5	1736,2	1749,0	—	—	—	—	—	—	—

8.6. ОПТИЧЕСКАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ (ПИРОМЕТРИЯ) И ТЕРМОИНДИКАТОРЫ

Оптическая пирометрия основана на измерении интенсивности излучения нагретого тела, которая связана с его температурой законами теплового излучения или термического равновесия. Различают спектральную (яркостную), радиационную и цветовую пирометрию. Область применимости оптической пирометрии ограничена чувствительностью приемников излучения, поскольку с повышением температуры интенсивность излучения уменьшается.

Спектральная (яркостная) пирометрия основана на измерении интенсивности излучения при фиксированной длине волны. При этом спектральный пирометр калибруется по излучению (на той же длине волны) абсолютно черного тела в градусах *яркостной температуры* T_λ, связанной с термодинамической температурой T соотношением

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\lambda} = \frac{\lambda}{1{,}4380} \ln \varepsilon(\lambda, T),$$

где λ — длина волны; $\varepsilon(\lambda, T)$ — излучательная способность тела на длине волны λ при температуре T (табл. 8.27 и 8.28).

Таблица 8.27

Спектральная излучательная способность ε(λ, T) вещества [6, 13, 28]

Дробные значения в соответствуют температуре плавления: числитель для твердой фазы, знаменатель для жидкой фазы.

Вещество	λ, мкм	T, °K	ε(λ, T)
Алюмель	0,65	—	0,37
Алюминий*	0,66	1000	0,12
	0,66	1300	0,13
Бериллий	0,55	—	0,61/0,61
	0,65	—	0,61/0,61
Ванадий	0,55	—	0,29/—
	0,65	—	0,35/0,32
Вольфрам*	0,65	—	0,43/—
Железо*	0,65	—	0,35/0,39
	0,65	1500	0,37
	0,66	1000	0,27
	0,66	1300	0,39
	0,66	1500	0,37
	0,66	1600	0,37
	0,66	1800	0,35
Золото	0,65	—	0,14/0,22
Иридий	0,65	—	0,30/—
Кобальт	0,55	—	0,36/0,37
Константан	0,66	—	0,35
Магний	0,65	—	0,59/0,59
Медь	0,55	—	0,38/0,36
	0,65	—	0,10/0,15
	0,66	1000	0,11
	0,66	1275	0,105
	0,66	1350	0,12
	0,66	1375	0,15
	0,66	1450	0,14
	0,66	1500	0,13
Молибден	0,65	—	0,43/0,50
	0,66	900	0,08
	0,66	1600	0,37
	0,66	2500	0,35
	0,665	300	0,420
	0,665	1300	0,375
	0,665	2000	0,353
	0,665	2750	0,332
Монель	0,66	—	0,37
Никель	0,46	1200—1600	0,450
	0,555	1200—1600	0,425
	0,65	—	0,36/0,37
	0,65	1000	0,36
	0,66	1600	0,38
	0,66	1800	0,39
	0,665	1200—1650	0,375
	0,55	—	0,61/—
	0,65	—	0,49/0,40
	0,66	1300—2200	0,374
Оксиды:			
алюминия	0,66	1300	0,14
	0,66	1600	0,17
	0,66	2000	0,21
бериллия	—	—	0,35
ванадия	—	—	0,70
железа	—	—	0,70
иттрия	—	—	0,60
кобальта	—	—	0,75

Продолжение табл. 8.27

Вещество	λ, мкм	T, °K	ε(λ, T)
Оксиды:			
магния	0,66	1300	0,18
	0,66	1400	0,23
	0,66	1700	0,35
	0,66	2000	0,47
меди	—	—	0,70
никеля	—	—	0,90
ниобия	—	—	0,70
титана	—	—	0,60
тория	—	—	0,60
урана	—	—	0,90
хрома	—	—	0,70
циркония	—	—	0,40
Палладий	0,65	—	0,33/—
Платина*	0,65	—	0,32/0,38
	0,66	1000	0,29
	0,66	2000	0,31
Платинородий (10% Rh)	0,66	—	0,27
Родий	0,65	—	0,29/0,30
Свинец	0,65	—	0,30/0,38
Серебро*	0,65	—	0,04/0,07
	0,66	1000	0,05
	0,66	1300	0,07
Смесь Нернста (85% ZrO_2 + 15% Y_2O_3)	0,66	1300	0,16
	0,66	1400	0,23
	0,66	1600	0,35
	0,66	1800	0,50
	0,66	2000	0,70
Сталь* Х25Ю5 (окисленная)	—	—	0,26
Сталь Х18Н9 (окисленная)	—	—	0,85
Тантал	0,467	300	0,565
	0,467	1400	0,505
	0,467	2100	0,460
	0,66	1200—2900	0,40
	0,665	300	0,459
	0,665	1400	0,442
	0,665	2100	0,415
	0,665	2800	0,399
Торий	0,55	—	0,65/—
	0,65	—	0,36/0,40
Уголь	0,54—0,66	1000	0,92
	0,54—0,66	1600	0,90
	0,54—0,66	2000	0,87
	0,54—0,66	2500	0,84
Хром	0,55	—	0,55/—
	0,65	—	0,39/0,39
	0,66	1100—1600	0,334
Хромель	—	—	0,35
Цирконий	0,65	—	0,32/0,30

* См. также табл. 8.28.

Таблица 8.28

Спектральная излучательная способность веществ при разных длинах волн [29]

Вещество	T, °K	Длина волны λ, мк								
		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0	2,0	4,0
Алюминий	300	0,70	0,37	0,21	0,18	0,17	0,17	0,17	0,16	0,08
Вольфрам	300	—	—	—	0,50	0,47	0,46	0,42	0,13	0,07
	1000	—	0,50	0,49	0,47	0,45	0,44	0,40	—	—
	2000	—	0,47	0,47	0,46	0,45	0,43	0,38	0,23	0,13
	3000	—	0,45	0,46	0,44	0,43	0,42	0,36	0,26	0,20
	3400	—	0,46	0,46	0,44	0,40	—	0,36	0,26	0,186
Графит	300	—	—	—	—	0,96	0,91	0,85	0,82	0,77
Железо	300	0,73	0,57	0,47	0,44	0,42	0,41	0,35	0,22	0,11
Платина	300	0,63	0,58	0,48	0,41	0,36	0,31	0,27	0,13	0,10
Серебро	300	0,83	0,87	0,15	0,05	0,06	0,05	0,04	0,02	0,01
Сталь	300	—	0,63	0,50	0,45	0,44	0,42	0,37	0,23	0,13
Уголь	300	—	—	0,88	0,86	0,85	0,84	0,81	0,81	0,75

Цветовая пирометрия основана на сравнении интенсивностей излучения двух различных длин волн λ_1, λ_2. Пирометр калибруется в шкале *цветовой температуры* $T_ц$, связанной с термодинамической шкалой соотношением

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_ц} = \frac{1}{1,4380}\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \lg \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)}.$$

Цветовая температура так называемых серых тел, характеризующихся условием $\varepsilon(\lambda_1, T) = \varepsilon(\lambda_2, T)$, совпадает с истинной.

Таблица 8.29

Полная излучательная способность веществ $\varepsilon(T)$ в направлении, перпендикулярном к излучающей поверхности [3, 6, 13, 29]

Вещество	T, °K	ε(T)
Алюминий	300	0,022
	375	0,028
	500	0,039
	775	0,060
	900	0,060
Алюминий окисленный	475	0,11
	875	0,19
	311	0,26*
	311	0,3**
	311	0,75***
Алюминия окись	1500	0,23
	2000	0,34
Висмут	300	0,048
	375	0,061
Вода (лед)	270	0,76
Вольфрам	300	0,024
	375	0,032
	775	0,071
	1200	0,138

* Толщина окисной пленки 0,25 мк.
** Толщина окисной пленки 1 мк.
*** Толщина окисной пленки 7 мк.

Радиационная пирометрия основана на измерении полного излучения; пирометр градуируется по полному излучению абсолютно черного тела в градусах *радиационной температуры* T_r, которая связана с термодинамической температурой соотношением

$$T_r = T\sqrt[4]{\varepsilon(T)},$$

где $\varepsilon(T)$ — полная излучательная способность вещества. Применение радиационных пирометров наиболее эффективно при низких температурах, когда спектральная излучательная способность мала.

Продолжение табл. 8.29

Вещество	T, °K	ε(T)
Вольфрам	1500	0,192
	1800	0,236
	2000	0,259
	2200	0,278
	2500	0,301
	2700	0,315
	2900	0,329
	3000	0,341
	3100	0,348
Железо	375	0,05
	450	0,05
Железо: литое	—	0,21
шлифованное	365	0,07
окисленное	375	0,74
	775	0,84
	1475	0,89
Железа окись	1800	0,80
Золото	375	0,02
	775	0,03
Золото окисленное	375	0,37
Кальция окись	1300	0,27
Кирпич обожженный	1275	0,75
огнеупорный	800	0,75
	1300	0,82
силикатный	1375	0,85
Латунь полированная	300	0,035
листовая	300	0,06

Продолжение табл. 8.29

Вещество	T, °K	ε (47)
Лагунь окисленная	475	0,61
	875	0,59
Магний	295	0,07
Магния окись	1300	0,16
	1500	0,17
	2000	0,200
Медь	300	0,04
	1000	0,15
Медь: хромированная	300	0,08
чернения	300	0,78
полированная	300	0,03
окисленная	475	0,60
	1275	0,60
Медь-ер	372	0,059
Молибден	1275	0,13
	1775	0,19
	2275	0,24
Монель	366	0,16
Монель окисленный	300	0,41
Никель	300	0,04
	375	0,05
	500	0,07
	775	0,12
	1275	0,19
Никель окисленный	475	0,37
	1475	0,85
Ниобий	1775	0,19
	2275	0,24
Олово	300	0,043
	375	0,05
Платина	300	0,037
	375	0,047
	500	0,054
	775	0,096
	900	0,098
	1300	0,168
	1800	0,176
Ртуть	300	0,10
	375	0,12
Свинец	375	0,05
Свинец окисленный	900	0,28
	475	0,63
Серебро	375	0,020
	500	0,020
	775	0,035
	900	0,032
Смесь Нернста (85% ZrO_2 — 15% V_2O_3)	1300	0,025
	1500	0,027
	1800	0,042
	2000	0,055
Сталь	300	0,85
Сталь жидкая	—	0,28
Стекло	300	0,94
Уголь	375	0,81
Фарфор глазурованный	300	0,92
Хром	375	0,08
Цинк	300	0,05
Чугун: полированный	311	0,21
окисленный	311	0,63

Термоиндикаторы — вещества, изменяющие свой внешний вид (цвет, блеск, прозрачность, свечение и т. п.) при определенной температуре — *критической температуре термоиндикатора* $t_{кр}$ и используемые для регистрации этой температуры. По природе тер-

Таблица 8.30

Характеристики термокрасок [29]

Краски 1а, 17 и 31 основаны на плавлении и обратимы; остальные — химическое взаимодействие и необратимы. Изохронный режим: длительность теплового воздействия при $t_{кр}$ равна 2,5 *мин*.

Номер краски	Цвет при $t < t_{кр}$	$t_{кр}$, °C	Цвет при $t > t_{кр}$
1а	Светло-розовый	45	Голубой
17	»	50	»
31	Розовый	70	Зеленый
46	Светло-зеленый	74	Голубой
32	Светло-розовый	85—90	Ярко-голубой
13	Светло-зеленый	90	Светло-коричневый
1л	Белый	98	Зеленый
2д	»	105	Черный
50	Розовый	110	Фиолетовый
3д	Светло-зеленый	120	Темно-зеленый
4	Зеленый	125—130	Фиолетовый
30	Желтый	130	Оранжевый
8л	Желтый	140	Зеленый
4д	Оранжевый	140	Красный
19	Бирюзовый	145	Коричневый
5	Фиолетовый	150	Черный
5л	Бледно-сиреневый	150	»
6д	Белый	155	Желтый
7б	»	160	Черный
11л	»	160	Желтый
8*л	Желтый	165	Черный
29	Светло-розовый	175	Светло-коричневый
10л	Бирюзовый	175	Черный
2а	Сиреневый	180	Синий
14л	Розовый	185	Коричневый
6	Светло-зеленый	190	Черный
11*л	Белый	193	Темно-зеленый
12д	Малиновый	195	Черный
13л	Белый	200	Темно-коричневый
18	Бирюзовый	205	Розовый
230	Зеленый	220	Бежевый
240	Бирюзовый	225	Белый
8	Зеленый	240	Коричневый
320	Лиловый	250	Бежевый
35	Светло-розовый	280	Темно-бежевый
10	Сиреневый	280	Черно-синий
33	Бледно-сиреневый	320	»
26	Сиреневый	350	»
12	Синий	370	Бежевый
86	Белый	380	»
230*	Бежевый	400	Белый
470	Сине-зеленый	440—450	Серо-белый
47	Горчичный	470	Желтый
15	Оранжевый	470	Серый
480	Голубой	480	Серо-белый
490	Сине-зеленый	515	Бежевый
14	Ярко-розовый	550	Белый
52а	Черный	555	Темно-зеленый
30*	Оранжевый	570	Белый
7	Бледно-зеленый	690	Ярко-зеленый
100	Сиреневый	830	Светло-фиолетовый

ствия различают термоиндикаторы, меняющие структуру или агрегатное состояние; термоиндикаторы с химическим взаимодействием между компонентами; люминесцентные термоиндикаторы.

Термоиндикаторы, действие которых основано на изменении структуры (поверхностно-градиентные, термокрасящие индикаторы) или агрегатного состояния (индикаторы плавления) обладают стабильной практической температурой, не зависящей от теплового режима, и являются обратимыми. Критическая температура термоиндикаторов с химическим взаимодействием между компонентами стабильна, но зависит (иногда существенно) от теплового режима и давления. Поэтому при использовании в условиях, отличающихся от паспортных, эти термоиндикаторы нуждаются в предварительной градуировке. Большинство термоиндикаторов с химическим взаимодействием необратимы либо квазиобратимы. Последние регенерируют в результате взаимодействия с окружающей атмосферой. Люминесцентные термоиндикаторы обратимы, но нуждаются в градуировке, так как их свойства зависят от теплового режима и характеристик возбуждающего излучения.

Не обладая большой точностью, метод термоиндикаторов иногда полезен, а иногда и трудносменен (при исследовании тепловых полей, в аэродинамических измерениях, при измерении температур токонесущих элементов и т. п.). Термоиндикаторы применяют в виде термокрасок (термостатов), термокарандашей и термоопределителей (таблеток, пленок). В табл. 8.30 и 8.31 приведены характеристики наборов термокрасок и термопокрытий плавления, разработанных в СССР.

Таблица 8.31

Характеристики набора термопокрытий плавления [29]

Марка термопокрытия	Цвет при $t < t_{кр}$	$t_{кр}$, °С	Цвет при $t > t_{кр}$	Марка термопокрытия	Цвет при $t < t_{кр}$	$t_{кр}$, °С	Цвет при $t > t_{кр}$
ТП-36	Светло-розовый	36	Оранжевый	ТП-122	Розовый	122	Красный
ТП-44	Светло-зеленый	44	Зеленый	ТП-123	Голубой	123	Синий
ТП-52	Светло-голубой	52	Синий	ТП-126	»	126	»
ТП-60	Светло-розовый	60	Красный	ТП-130	Светло-зеленый	130	Зеленый
ТП-67	Розовый	67	»	ТП-134	Светло-оранжевый	134	Красный
ТП-70	Светло-зеленый	70	Зеленый	ТП-144	Розовый	144	»
ТП-79	Светло-голубой	79	Синий	ТП-148	»	248	Светло-коричневый
ТП-86	Светло-коричневый	86	Красный	ТП-155	Желтый	155	Оранжевый
ТП-90	Светло-голубой	90	Синий	ТП-167	Белый	167	Зеленый
ТП-95	Светло-зеленый	95	Зеленый	ТП-172	Розовый	172	Красный
ТП-97	Розовый	97	Красный	ТП-179	»	179	»
ТП-98	Белый	98	Зеленый	ТП-182	Светло-зеленый	182	Зеленый
ТП-107	»	107	Черный	ТП-193	Светло-розовый	193	Оранжевый
ТП-107	Светло-зеленый	107	Зеленый	ТП-213	Белый	213	Желтый
ТП-109	Белый	109	Бесцветный	ТП-223	Розовый	223	Красный
ТП-116	Светло-голубой	116	Зеленый	ТП-254	Белый	254	Бесцветный

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Брицкий А. Д.** Новые методы измерения низких температур. М., Стандартгиз, 1962.
2. **Положение** о международной практической температурной шкале. Труды ВНИИМ. М., Стандартгиз, 1962, вып. 63 (123), с. 151.
3. **Скотт Р. Б.** Техника низких температур. Пер. с англ. Под ред. М. П. Малкова. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
4. Методы измерения температур. Сб. статей. Под ред. В. А. Соколова. Ч. I, 2. М., Изд-во иностр. лит., 1954.
5. **Гордов А. Н.** Температурные шкалы. М., Стандартгиз, 1966.
6. Smithsonian physical tables. 9-th ed., Washington, 1954.
7. **Боровик-Романов А. С., Орлова М. П., Стрелков П. Г.** Установление шкалы низких температур между 90, 192 К и 10 К. М., Изд-во Главной палаты мер и измерительных приборов, 1954.
8. **Температура** и ее измерение. Сб. докладов. Под ред. А. Арсенаа и К. Вулфсона. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
9. **Sherman R. H., Sydriink S. G., Roberts T. R.** J. Res. Nat. Bur. Stand., 1964, v. 68A, p. 579.
10. Comite International des Poids et Mesures. — Metrologia, 1969, v. 5, p. 35.
11. **Тепловые** измерения. ГОСТ 12442—66. М., Стандартгиз, 1966.
12. **Kostovski H. J.** Metrologia, 1967, v. 3, p. 29.
13. **Геращенко О. А., Федоров В. Г.** Тепловые и температурные измерения. Справочное руководство. Киев, «Наукова думка», 1965.
14. **Методы** измерения температур в промышленности. М., Металлургиздат, 1952. (Авт.: Гордов А. Н., Аржанов А. С., Гинзбург В. Я. и др.)

15. Попов М. М. Термометрия и калориметрия. Изд. 2-е. М., Изд-во МГУ, 1954.
16. Справочник химика. Под ред. Б. П. Никольского. Изд. 2-е. Т. 1. М.—Л., Госхимиздат, 1962.
17. Термометры сопротивления. ГОСТ 6651—59. М., Стандартгиз, 1963.
18. Стрелков П. Г., Шаровская Д. Н. «Измерительная техника», 1957, № 6, с. 53.
19. Термопары. ГОСТ 3044—61. М., Стандартгиз, 1961.
20. Сапсонов Г. В., Кисляй П. С. Высокотемпературные неметаллические термопары и нагреватели. Киев, «Наукова думка», 1965.
21. Лах В. И., Сталмы Б. И. «Приборы и средства автоматизации», 1961, № 8, с. 18.
22. Кей Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз, 1962.
23. Даниленский С. К., Ипатова С. И., Павлова Е. И., Смирнова Н. Н. «Заводская лаборатория», 1963, т. 29, № 9, с. 1139.
24. Гуревич А. М., Каганов В. Ю., Полунин С. Ф., Ширяев В. В. «Заводская лаборатория», 1964, т. 30, № 1, с. 51.
25. Мендельсон К. Физика низких температур. Пер. с англ. Под ред. П. Е. Алексеевского. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
26. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963. (Авт.: Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б.).
27. Уайт Г. К. Экспериментальная техника в физике низких температур. Справочное руководство. Пер. с англ. Под ред. А. И. Шальникова. М., Физматгиз, 1961.
28. Эберт Г. Краткий справочник по физике. Пер. с нем. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз, 1963.
29. Абрамович Б. Г. Термоиндикаторы и их применение. М., «Энергия», 1972.

ГЛАВА 2

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСШИРЕНИЯ И ЭФФЕКТ ДЖОУЛЯ—ТОМСОНА

Тепловым расширением называется эффект изменения размеров тела с изменением температуры при постоянном давлении. Тепловое расширение обусловлено асимметрией кривой потенциальной энергии межатомного взаимодействия относительно равновесного положения, вследствие чего при изменении температуры происходит изменение среднего межатомного расстояния. Оно определяется химическим составом, структурой тела, а также давлением, температурой и другими термодинамическими параметрами.

В качестве количественной характеристики теплового расширения обычно используют:

истинный температурный коэффициент линейного расширения

$$\alpha = \frac{1}{L}\left(\frac{\partial L}{\partial T}\right)_P;$$

средний температурный коэффициент линейного расширения

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{L}\cdot\frac{\Delta L}{\Delta T};$$

истинный температурный коэффициент объемного расширения

$$\beta = \frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P;$$

средний температурный коэффициент объемного расширения

$$\bar{\beta} = \frac{1}{V}\cdot\frac{\Delta V}{\Delta T},$$

где L — длина; V — объем; T — температура тела. Размерность всех температурных коэффициентов *град*$^{-1}$.

9.1. ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ АНИЗОТРОПНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Тепловое расширение анизотропного твердого тела (кристалла) может быть описано симметричным тензором второго порядка (тензором теплового расширения), компонентами которого являются температурные коэффициенты линейного расширения в определенных направлениях. Если структура тела известна, то для задания тензора достаточно указать три главных температурных коэффициента расширения α_1, α_2, α_3 соответственно вдоль главной оси симметрии кристалла, перпендикулярно к главной оси в плоскости всей симметрии и в направлении, перпендикулярном к двум первым. В кристаллах одноосной симметрии $\alpha_1 = \alpha_2$, а направление, определяющее α_3, перпендикулярно к главной оси симметрии и лежит в произвольной плоскости, проходящей через нее. Температурный коэффициент линейного расширения в произвольном направлении α_γ выражается через главные коэффициенты

$$\alpha_\gamma = \alpha_1 \cos^2\gamma_1 + \alpha_2 \cos^2\gamma_2 + \alpha_3 \cos^2\gamma_3,$$

где γ_1, γ_2, γ_3 — углы между направлениями, соответствующими главным коэффициентам, и заданным направлением γ.

Температурный коэффициент объемного расширения

$$\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3.$$

Таблица 9-1

Главные температурные коэффициенты линейного расширения анизотропных твердых тел (кристаллов). Элементы и неорганические соединения

Приведены значения среднего температурного коэффициента линейного расширения в указанном интервале температур или значения истинного температурного коэффициента линейного расширения при данной температуре. Значения в скобках — первые два (b — 0) или три коэффициента интерполяционной формулы

$$\alpha = a \cdot 10^{-6} + b \cdot 10^{-8} t + c \cdot 10^{-11} t^2.$$

Вещество	t, °C	α_1 или $\bar{\alpha}_1$, 10^{-6} град$^{-1}$	α_2 или $\bar{\alpha}_2$, 10^{-6} град$^{-1}$	α_3 или $\bar{\alpha}_3$, 10^{-6} град$^{-1}$	Литература
AgI	40	—3,97	0,65	0,65	[1]
	20÷70	{—3,97 —4,27}	{0,65 1,38}	{0,65 1,38}	[2]
$3Ag_2S \cdot Sb_2S_3$	20÷70	{0,91 10,5}	{20,1 —2,31}	{20,1 —2,31}	[2]
Al_2O_3	20÷50	6,66	5,0	5,0	[3]
	52÷677	{6,58 0,50 0,26}	{5,42 0,55 0,29}	{5,42 0,55 0,29}	[2]
	20÷1000	9,03	—	—	[3]
As	30÷75	3,2—6,8	—	—	[4]
$BaSO_4$	44÷300	{13,62 1,30 1,19}	{23,95 1,90 1,37}	{14,07 1,52 1,10}	[2]
Be	—150	1,6	2,8	2,8	[4, 6]
	10	6,6	11,7	11,7	[5]
	18÷220	10,4	15,0	15,0	[4, 5]
	18÷455	13,1	15,7	15,7	[4, 5]
	20÷600	16,0	—	—	[4]
Bi	—140	15,9	10,5	10,5	[1, 4, 6]
	30	16,2	11,6	11,6	[1, 4]
	10÷90	—	10,84	10,84	[6]
	20÷240	16,5	12,0	12,0	[4]
Bi_2Te_3	20	22,2	12,9	12,9	[3]
C (графит)	0÷400	—	—1,5	—1,5	[2]
	0÷500	17,2	1,3	1,3	[2]
	0÷800	29,3	—	—	[2]
	500÷1000	20,4	2,2	2,2	[2]
	1000÷1500	24,4	2,6	2,6	[2]
	1600÷2300	27,7	3,2	3,2	[2]
$Ca(OH)_2$	20÷100	33,4	9,8	9,8	[2]
$CaWO_4$	—196÷25	7,9	12,7	12,7	[3]
	25÷500	11,2	18,7	18,7	[3]
	500÷850	13,8	22,0	22,0	[3]
	850÷1026	16,8	27,2	27,2	[3]
Cd	—200	48,2	18,5	18,5	[3]
	—160	59,0	19,2	19,2	[4]
	0	52,0	20	20	[1]
	60	52,25	21,8	21,8	[7]
	100	50,4	16,9	16,9	[7]
CdS	50÷500	3,5	5,0	5,0	[3]
Co	33÷100	16,1	12,6	12,6	[4]
CuS	20	29,27	41,58	4,55	[2]
$FeCO_3$	20÷70	{19,2 2,55}	{6,05 91,7}	{6,05 91,7}	[2]
Fe_2O_3	46÷400	{7,9 0,53 7,32}	{7,83 1,05 1,17}	{7,83 1,05 1,17}	[2]
Fe_2S_3	20÷70	{2,35 8,64}	{31,2 —1,65}	{31,2 —1,65}	[2]
H_3BO_3	30÷80	—3,68	10,63	255,9	[2]
Hg	—120	49,6	37,5	37,5	[4]
	—188÷—79	47,0	37,5	37,5	[4]
	—190÷—160	42,6	37,4	37,4	[4]
HgS	20÷70	{21,5 1,50}	{17,9 0,63}	{17,9 0,63}	[2]

Вещество	t, °C	λ_1 или $\bar{\lambda}_1$, 10^{-4} эрг/(см·с·К)	λ_2 или $\bar{\lambda}_2$, 10^{-4} эрг/(см·с·К)	λ_3 или $\bar{\lambda}_3$, 10^{-4} эрг/(см·с·К)	Литература
I	18	133,4	55,0	35,1	[2]
In	—17÷5	56	13	13	[4]
	21÷87	45	17	17	[4]
	100	28,4	18,6	18,6	[8]
	200	38,0	5,6	5,6	[8]
	300	54,0	—10,1	—16,1	[8]
KCl	30÷90	134,2	39	29,7	[2]
	90÷150	126,6	33,9	29,2	[2]
	150÷200	118,8	36,8	20,6	[2]
KNO_3	30÷90	22,0	23,5	182,6	[2]
K_2SO_4	0÷96	{36,14; 1,44}	{32,25; 1,41}	{36,34; 4,13}	[2]
KH_2PO_4	150÷20	31,3	21,6	21,6	[3]
Mg	20÷100	26,4	27,6	26,6	[4]
	20÷200	27,7	26,6	26,6	[4]
$MgCO_3$	20÷70	{21,3; 3,39}	{6,99; 12,43}	{5,99; 12,43}	[2]
MgF_2	0÷500	8,8	13,1	13,1	[3]
$Mg(OH)_2$	20÷100	44,7	11,0	11,0	[2]
$NaNO_3$	18÷200	{75,3; 61,0}	{8,8; 5,4}	{8,8; 5,4}	[2]
	50	12,0	11,0	11,0	[3]
	100	13,2	12,0	12,0	[3]
	150	14,2	11,0	11,0	[2]
	200	19,4	10,5	10,5	[2]
	250	36,8	10,0	10,0	[2]
	295	66,0	10,0	10,0	[2]
$(NH_4)H_2PO_4$	24÷134	1,9	39,3	39,3	[3]
Os	50	5,8	4,0	4,0	[4]
	250	6,6	4,6	4,6	[4]
	500	8,3	5,8	5,8	[4]
$RbSO_4$	0÷96	{33,85; 2,14}	{31,90; 1,82}	{35,90; 9,14}	[2]
Re	20÷1917	12,1	4,7	4,7	[9]
Ru	50	8,8	5,9	5,9	[4]
	250	9,9	6,4	6,4	[4]
	500	11,7	7,6	7,6	[4]
SiO_2 (кварц)	160÷37	{7,07; 2,11}	—	—	[2]
	0÷100	8,0	14,4	14,4	[2]
	0÷300	9,6	16,9	16,9	[4]
	10÷334	—	{13,25; 5,52}	{11,23; 5,52}	[3]
	0÷360	{7,07; 1,67}	—	—	[3]
	300÷450	{26,9; 10,81; 20,16}	—	—	[3]
	0÷500	12,2	20,9	20,9	[4]
SiC	200	3,26	—	—	[3]
	400	4,05	—	—	[3]
	600	4,29	—	—	[3]
	800	4,52	—	—	[3]
	1000	4,78	—	—	[3]
	1200	5,0	—	—	[3]
	1400	5,20	—	—	[3]
	1500	5,28	—	—	[3]
Sb	—215÷20	16	7,0	7,0	[4, 10]
	20	15,56	7,96	7,96	[1, 10]
	0÷100	16,8	8,28	8,28	[1, 10]
	20÷400	—	8,1	8,1	[1]
	100÷300	—	10,0	10,0	[10]
Se	20÷55	—17,9	74,1	74,1	[4]

Вещество	t, °C	α_l или $\bar{\alpha}_l$, 10^{-6} град$^{-1}$	α_V или $\bar{\alpha}_V$, 10^{-6} град$^{-1}$	α_V или $\bar{\alpha}_V$, 10^{-6} град$^{-1}$	Литература
Sn	−195÷20	20,9	14,1	14,1	[1]
	20	30,5	15,45	15,45	[4]
	34÷194	45,8	25,7	25,7	[1]
SnO_2	20÷70	{3,19; 1,20}	{3,2; 0,76}	{3,2; 0,76}	[2]
Ta	20÷63	−1,7	27,0	27,0	[3, 4]
TiO_2	20÷70	{9,19; 2,25}	{7,14; 1,10}	{7,14; 1,10}	[2, 3]
$(TiO)_2$ / Ti	18	14,5	19,3	22,05	[2]
	32÷91	72	9,0	9,0	[4]
U	0÷100	21,7	−1,5	21,2	[1]
	190÷18	49,5	11,3	11,3	[1, 4]
	0	60	12,6	12,6	[4]
	0÷260	56	15,6	15,6	[1, 4]
	20÷100	64,0	14,1	14,1	[1, 4]
	20÷400	59	16	16	[1, 4]
ZnO	20÷70	{3,9; 1,20}	{3,2; 0,76}	{3,2; 0,76}	[2, 3]
Zr	0÷100	4,0	13,0	13,0	[4]

Таблица 9.2

Главные температурные коэффициенты линейного расширения анизотропных твердых тел (кристаллов). Минералы и органические соединения

Пояснения те же, что и к табл. 9.1.

Решетка	t, °C	α_l или $\bar{\alpha}_l$, 10^{-6} град$^{-1}$	α_V или $\bar{\alpha}_V$, 10^{-6} град$^{-1}$	α_V или $\bar{\alpha}_V$, 10^{-6} град$^{-1}$	Литература
Аетрацит	−190÷20	0,05	25,0	0,73	[2]
Арагонит	−150÷0	{9,87; −0,84; 11,3}	{15,68; 0,82; −23,06}	{32,4; 0,75; −40,7}	[2]
	20÷70	{10,16; 0,84}	{17,19; 3,66}	{34,00; 3,37}	[2]
Аурит	40	7,01	13,66	2,72	[2]
Берилл	20÷70	{−1,36; 0,41}	{1,00; 0,46}	{1,00; 0,46}	[2]
Брукит	17,5	14,0	19,2	22,05	[1]
Вульфенит	20÷70	{7,40; 1,74}	{8,39; 1,67}	{8,39; 1,67}	[2]
Гидроцинкит	20÷100	38,4	10,9	−5,6	[2]
Тенс	40	20,81	41,63	1,57	[2]
Доломит	20÷70	{20,6; 3,68}	{4,15; 1,93}	{4,15; 1,93}	[2]

Вещество	t, °C	α_1 или $\bar{\alpha}_1$, 10^{-6} град$^{-1}$	α_2 или $\bar{\alpha}_2$, 10^{-6} град$^{-1}$	α_3 или $\bar{\alpha}_3$, 10^{-6} град$^{-1}$	Литература
Изумруд	0,85	—1,35	1,9	1,0	[10]
Исландский шпат	3÷80	26,31	5,44	5,44	[12]
Кальцит	—150÷0	24,20 0,53 —30,7	—5,68 0,03 —4,58	—5,68 0,03 —4,58	[3]
	50	36,6	—5,2	—5,2	[10]
	75÷400	24,71 3,76 —3,13	—	—	[2]
	365	—	—3,8	—3,8	[10]
Криолит	25÷75	5,10 1,22	6,31 1,01	6,32 2,20	[2]
Нафталин	—195÷20	212,8	20,3	6,16	[2]
Нитробензол	—183÷20	150,3	7,6	24	[3]
Баррерит	40	0,31	20,1	20,1	[1]
Пирротин	40	2,96	31,2	31,2	[1]
Рутил (анатаз)	40	8,15	4,69	4,69	[1]
Слюда (мусковит)	50	8,1	7,5	7,5	[2]
	0÷100	8,6	—	—	[2]
	20÷300	—	8,25	8,25	[4]
Слюда (флогопит)	0÷100	—	13,5	13,5	[2]
Топаз	40	4,94	4,86	5,92	[1]
	20÷70	4,14 1,68	4,84 1,53	5,92 1,83	[2]
Турмалин	20÷70	9,05 3,20	3,79 1,63	3,79 1,63	[2]
	6÷350	6,62 0,56	3,58 0,54	3,58 0,54	[2]
	0÷100	9,37	3,73	3,73	[10]
Оливин	20÷70	3,79 2,13	2,96 2,30	2,99 2,36	[2]
Шпинель	100÷700	5,9	5,9	5,9	[13]
Цирконит	20÷70	44,3 1,41	23,3 1,91	23,3 1,91	[2]

9.2. ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ИЗОТРОПНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Тепловое расширение изотропного твердого тела характеризуется температурным коэффициентом линейного расширения α (истинным или средним). Температурный коэффициент объемного расширения $\beta \approx 3\alpha$. С погрешностью ±10% температурный коэффициент линейного расширения можно вычислить по формуле Грюнайзена:

$$\alpha = k\,\frac{\gamma C_V}{V},$$

где C_V — теплоемкость при постоянном объеме; $\gamma = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T$ — коэффициент изотермического сжатия; k — постоянная Грюнайзена.

Если известны параметры потенциала взаимодействия (пр. n) Леннарда-Джонса, то $k = (m + n + 3)/6$.

При температурах, близких к температуре плавления, часто выполняется эмпирическое соотношение $\alpha \cdot T = 69{,}6$ (T, °K).

Таблица 9.3

Температурные коэффициенты линейного расширения изотропных твердых тел (кристаллов)

Продолжение табл. 9.1.

Вещество	t, °C	$\bar{\alpha}$, 10^{-6} град$^{-1}$	Литература
Ag	250÷0	14,9	[4]
	−151÷16	17,0	[4]
	−183	13,27	[8]
	−103	16,59	[8]
	20	19,0	[7]
	100	19,45	[8]
	300	20,50	[8]
	500	21,68	[8]
	700	23,99	[8]
	900	26,30	[8]
	1000	27,85	[8]
AgBr	20	34,5	[2]
AgCl	−110÷+10	29,62 1,86 −98,9	[2]
	25	30,01	[3]
	200	34,50	[1]
	400	63,19	[3]
	425	69,59	[3]
Al	250÷−160	9,1	[8]
	−190÷0	18,0	[4]
	−100÷20	19,5	[6]
	0	22,58	[1]
	100	23,57	[1]
	200	24,65	[1]
	300	25,54	[1]
	400	26,43	[1]
	500	27,52	[1]
	600	28,50	[1]
	−200÷0	29,65 13,5 −10,9	[1]
	−100÷100	22,6 17,0	[2]
AlN	25÷200	4,03	[15]
Al_2O_3	20÷1000	8,4	[1]
As	0	5,4	[6]
As_2O_3	20÷1000	8,4	[1]
Au	−183	10,94	[8]
	−103	12,93	[8]
	−100÷500	14,15 5,7 −0,27	[2]
	20	14,0	[8]
	100	14,43	[8]
	300	15,30	[8]
	500	15,88	[8]
	700	17,16	[8]
	900	19,24	[8]
	1100	26,15	[8]
B	20	2,0	[9]
	0÷160	8,0	[9]
	220÷750	8,3	[9]
B_4C	0÷100	4,5	[75]
	24÷500	4,68	[26]
BN	25÷1000	7,51	[15]
Be	0	19,0	[8]
	0÷300	19,26	[4]
BaB_6	20÷900	6,8	[15]
BaF_2	0÷300	18,4	[3]
$Ba(NO_3)_2$	−273÷−196	3,3	[3]
	−196÷−78	6,7	[3]
	78÷15	17,0	[3]
	75÷250	10,8 5,7	[3]
$BaTiO_3$	50÷190	9,1	[3]
	120	8,6	[3]
	200	9,4	[3]
	400	11,3	[3]
	600	13,2	[3]
	800	15,1	[3]
	1000	17,5	[3]
$BaSi_2$	20÷1100	6,4	[16]
Be	−120÷−100	5,0	[9]
	−100÷−50	7,0	[9]
	−120÷0	8,1	[4]
	−50÷0	9,2	[9]
	0	10,5	[6]
	20÷900	12,6	[6]
	20÷300	13,7	[6]
	20÷400	14,3	[6]
	20÷500	15,2	[6]
	0÷600	16,0 25,2	[17]
	20÷600	16,7	[6]
	20÷700	16,8	[4]
	25÷1000	18,77	[9]
	1200	23,7	[4]
Be_2C	25÷50	5,6	[5]
	0÷200	7,7	[5]
	0÷400	9,5	[5]
	0÷600	10,5	[5]
BeO	25÷1700	10,6	[1]
Bi	−183÷15	12,98	[1]
	0	13,37	[6]
	0÷270	14,6	[1]
	20÷100	13,45	[1]
C (алмаз)	−220÷40	0,6	[8]
	−184÷−79	0,18	[3]
	−79÷3	0,58	[2]
	0÷78	1,9	[4]
	0÷400	2,8	[4]
	0÷555	0,87 0,92 0,67	[2]
	15÷750	4,5	[4]
	40÷280	2,2	[8]
	280÷830	3,73	[8]
	830÷1030	5,67	[8]
Графит, $\rho = 1{,}81$ г/см³	0	7,0	[5]
	250	8,1	[5]
	500	8,8	[5]
	750	9,4	[5]
	1000	10,0	[5]
	1250	10,8	[5]
	400÷1700	11,0	[1]
Ca	−220÷40	18,5	[8]
	−150	15,0	[4]
	−30	20,9	[4]
	30	22,5	[4]
	20÷100	25,2	[4]
	0÷300	22,0	[4]

Вещество	t, °C	λ, Вт/(м·К)	Литература
$CaCl_2$	20÷190	92,3	[2]
CaF_2	—179	7,1	[1]
	—117	14,6	[1]
	—10	18,5	[1]
	—192÷17	18,36 2,511 —21,1	[3]
	43÷637	18,02 1,48 91,02	[2]
CaO	0÷1400	13,8	[1]
Cd	—220	30,6	[4]
	—100	27,4	[4]
	—50	29,3	[8]
	0	25,0	[8]
	100	30,4	[8]
	200	31,6	[8]
	300	32,5	[8]
	0÷900	129,0 (53,6)	[18]
$CdBr_2$	20÷600	8,7	[15]
CdF_2	20÷120	27,0	[3]
CdI_2	40	20,1	[1]
CdTe	50	4,5	[3]
Ce	27 ; 775	7,1	[8]
$CeBr_3$	20÷800	7,3	[15]
Co	0	12,0	[6]
	100	13,1	[5]
	200	14,2	[7]
	300	14,5	[5]
	400	15,7	[5]
	500	16,0	[5]
	0÷500	12,0 11,94 0,53	[17]
	600	16,0	[5]
	700	16,4	[5]
	900	16,9	[5]
CoSi	20÷800	10,6	[15]
Cr	200 ; 0	4,7	[4]
	—100÷0	5,1	[4]
	0	5,88	[6]
	0÷700	5,9 15,48 —1,09	[6]
	0÷900	7,78	[6]
	0 ; 400	8,4	[6]
	0÷600	9,22	[6]
	0 ; 900	11,0	[6]
	730÷1100	14,9	[8]
	1100 ; 1490	19,4	[8]
Cr_2B	20÷1100	8,2	[15]
CrB	20÷1100	9,5	[15]
CrB_2	20÷1100	11,1	[15]
Cr_3C_2	20÷1100	9,4	[15]
Cr_7C_3	20 ; 1100	11,7	[15]
CrN	20÷800	2,5	[15]
	650 ; 1010	7,5	[15]
Cr_2N	20÷1100	0,46	[15]
Cs	0	97,0	[6]
CsBr	0	46,6	[3]
	—139÷300	46,6 4,67 —1,78	[3]

Вещество	t, °C	λ, Вт/(м·К)	Литература
CsCl	20÷400	445 4,84	[3]
CsI	30	48,6	[2]
Cu	—272÷—190	1,4	[8]
	—183	9,36	[8]
	—117	14,06	[8]
	—100 ; 400	16,2 19,0 6,0	[1]
	0 ; 1000	16,71 7,2	[18]
	20	16,61	[8]
	100	17,18	[8]
	300	18,45	[8]
	400	19,15	[8]
	700	20,72	[8]
	900	22,50	[8]
	1100	24,10	[8]
$CuBr_2$	20÷800	6,5	[15]
CuBr	20÷150	19	[19]
CuCl	40÷140	10	[3]
CuI	20÷150	22	[2]
Cu_2O	20 ; 70	0,93 2,10	[2]
Dy	—200 ; 1000	11,8	[8]
Er	100 ; 850	12,0	[8]
Eu	—200÷780	96	[8]
Fe	—203 ; 20	9,18	[1]
	—100÷0	10,4	[4]
	0	11,3	[5]
	0÷100	12,1	[1]
	0÷300	13,2	[1]
	0÷500	14,2	[1]
	0÷700	15,0	[1]
	0 ; 800	11,3 17,6 —1,68	[6]
Fe_3N	25	7,9	[15]
FeS_2	—10	8,43	[1]
	—100÷0	8,50 1,46 —12,0	[2]
	45÷350	8,40 1,42 0,92	[9]
Ga	20	18,1	[2]
GaAs	—233	—0,50	[3]
	—218	0,00	[3]
	—155÷17	3,64	[3]
	18÷287	5,74	[3]
	287÷407	7,44	[3]
GaP	·	5,3	[13]
GaSb	—	6,9	[13]
Gd	30 ; 550	9,7	[8]
Ge	—243	—0,4	[3]
	—225	0,00	[3]
	205	0,67	[3]
	—173	2,20	[3]
	—113	4,90	[3]
	—53	5,03	[3]
	3	0,50	[3]
	27	5,75	[3]
	0÷250	5,8	[8]

Вещество	t, °C	λ, Вт/(м·°C)	Литература
Ge	250	6,0	[9]
	450	7,3	[9]
	850	7,5	[9]
GeO_2	100÷500	8,6	[1]
H_2O (лед)	−250	−6,1	[4]
	−210	−1,3	[6]
	−200	0,8	[6]
	−190	3,3	[6]
	−150	16,8	[6]
	−100	33,9	[6]
	−80	38,2	[6]
	−50	40,6	[6]
	−20	50,5	[6]
	0	52,7	[6]
HI	−200÷0	−1,14	[20]
	−200÷0	−0,53	[20]
	0÷200	1,15	[20]
	0÷400	2,40	[20]
	0÷650	3,62	[20]
	0÷650	5,02	[20]
	0÷975	6,74	[20]
HNO_3	90÷1000	5,73	[15]
HSC	20÷600	6,90	[15]
HDN	90÷1100	6,9	[15]
Hg	−183÷−39	30	[10]
	−78÷−39	41	[10]
Ho	300	9,5	[8]
In	180÷20	96,7	[4]
	10÷90	{24,75; 123,8}	[1]
	20÷100	30,5	[4]
InAs	−155÷17	3,10	[3]
	17÷300	5,20	[13]
	300÷300	7,04	[3]
InSb	−269	−0,06	[3]
	−243	−1,72	[3]
	−223	−0,37	[3]
	205	−0,85	[3]
	−173	2,76	[3]
	−83	4,35	[3]
	−23	4,78	[3]
	7	4,90	[3]
	27	5,04	[3]
Ir	−153÷20	5,71	[10]
	−150÷−50	5,64	[1]
	−150÷800	{6,41; 0,39; −1,30}	[1]
	0	6,5	[6]
	200	6,8	[8]
	400	7,15	[8]
	600	7,42	[8]
	800	7,72	[8]
	1000	8,02	[1]
	1250	9,60	[1]
	1500	10,18	[1]
	1700	10,76	[1]
I	−190÷−17	83,7	[10]
	0	93,0	[6]
K	0	84	[7]
	0÷96	{79,7; 139,4}	[1]
KBr	−160÷200	{37,6; 4,1}	[2]

Вещество	t, °C	λ, Вт/(м·°C)	Литература
KBr	0÷79	37	[19]
	45÷680	{37,99; 4,1}	[2]
KCl	−100÷300	{36,0; 3,9}	[2]
	0	36	[2]
	0÷600	{34,6; 3,6}	[2]
	50	37,4	[3]
	200	41,2	[3]
	400	48,0	[3]
	600	54,7	[3]
	745	59,7	[3]
KF	−79÷0	45,0	[2]
	0÷79	33,3	[19]
KI	20÷100	40,6	[2]
La	−173÷310	5,2	[8]
	310÷775	9,6	[8]
La_2Si_n	20÷1100	8,7	[15]
Li	−178	17,0	[4]
	−98	36,3	[4]
	−3	45,7	[4]
	20	46,0	[9]
	0÷100	60	[8]
LiBr	184÷−79	30,1	[2]
	−75÷0	30,6	[2]
	0÷79	46,6	[19]
LiCl	0÷79	40,6	[19]
LiF	−150÷0	{31,95; 5,06; −4,07}	[19]
	0÷79	70,6	[79]
	47÷794	{33,17; 3,08; 9,30}	[2]
LiI	−184÷−79	47	[2]
	−75÷0	55,7	[2]
	0÷79	56	[19]
Lu	100	12,5	[8]
Mg	−190÷−80	21,3	[4]
	−100÷0	23,4	[11]
	0	25,07	[6]
	20÷100	25,9	[4]
	20÷300	26,0	[4]
	0÷400	31,71	[6]
	−150÷500	{25,0; 30,0; −3,48}	[1]
MgF_2 (ортрам-I)	25÷100	10,7	[3]
	25÷200	11,0	[3]
	25÷300	11,5	[3]
	25÷400	11,9	[3]
(ортрам-51)	20÷700	11,5	[3]
MgO	20÷1700	15,6	[3]
	27	41,2	[3]
	50÷715	{10,89; 0,50; 0,10}	[2]
Mn	−200÷0	20,4	[6]
	0	22,6	[6]

Продолжение таблицы 9.3

Вещество	t, °C	α или $\bar{\alpha}$, 10^{-6} град$^{-1}$	Литература
Mn	0÷200	22,2	[6]
	0÷400	23	[6]
	0÷600	24	[6]
	0÷800	26	[6]
α-Mn	—190÷0	15,9	[4]
	10	22,3	[4]
	0÷300	25,2	[4]
β-Mn	—180÷0	19,8÷20,4	[4]
γ-Mn	—70÷0	13,6	[2]
	10	14,8	[4]
MnS	20÷70	15,2	[2]
MnS_2	20÷70	11,1	[2]
Mo	—190÷0	4,2	[4]
	—100÷0	4,6	[4]
	0÷100	5,19	[6]
	0÷300	5,30	[6]
	0÷500	5,59	[6]
	0÷800	5,87	[6]
	0÷1600	6,65	[6]
	30÷2030	7,9	[1]
	0÷2100	{5,1; 1,93}	[17]
Mo_2C	12÷190	7,8	[15]
Mo_2N	30÷1100	6,2	[15]
MoSi	20÷800	16,3	[15]
$MoSi_2$	20÷1400	6,1	[16]
Na	193÷0	50,8	[4]
	0÷17	68,2	[4]
	0÷95	79	[8]
NaBr	—181÷—79	31,0	[2]
	—79÷0	36,7	[2]
	15÷60	42,52	[2]
	30÷285	{38,65; 2,94; 6,20}	[2]
NaCl	—153÷27	{38,56; 2,98; —26,5}	[2]
	0	39	[3]
	0÷300	{36,2; 8,9}	[2]
NaF	—181÷—79	23	[2]
	—79÷0	33	[2]
	30	32,3	[3]
	195	35,9	[3]
	400	40,0	[3]
	625	46,5	[3]
	30÷250	{33,13; 2,95}	[3]
Na_2WO_4	20÷600	{17,06; 2,77}	[2]
Nb	—212÷0	6,8	[4]
	100÷0	6,9	[4]
	—100÷400	{7,05; 2,88}	[17]
	0	7,09	[6]
	0÷100	7,2	[4]
	0÷400	7,64	[6]
	20÷1500	10,0	[4]
NbB_2	20÷1180	7,9	[16]
Nb_3N	20÷1100	3,26	[15]
NbN	0÷270	10,1	[16]

Продолжение таблицы 9.3

Вещество	t, °C	α или $\bar{\alpha}$, 10^{-6} град$^{-1}$	Литература
Nb_2C	32÷190	7,0	[15]
	20÷1100	6,5	[15]
Nd	—173÷850	8,6	[4]
	100÷262	6,4	[4]
NdB_6	20÷800	7,3	[15]
NH_4Br	31÷122	{16,59; 12,16; 186,2}	[2]
NH_4Cl	40	62,55	[3]
	31÷128	{40,16; 21,29; 137,2}	[2]
Ni	—273÷—190	5,6	[8]
	—253÷10	8,1	[4]
	200÷350	{12,54; 17,5; —2,25}	[1]
	—190÷16	10,0	[4]
	—100÷0	11,6	[1]
	0	12,54	[1]
	0÷200	14,0	[6]
	0÷400	14,98	[6]
	25÷100	15,36	[4]
	0÷800	16,3	[6]
	30÷1000	18,0	[7]
Os	0	6,1	[6]
	50	6,79	[6]
	16÷50	{6,56; 17,0}	[1]
P	0	125	[6]
Pa	17÷1115	11,2	[8]
Pb	—200÷150	{28,3; 24,0; 3,90}	[1]
	—200	26,6	[8]
	—100	27,3	[8]
	—100÷300	{28,3; 20}	[14]
	0	28,3	[6]
	100	29,2	[8]
	300	31,3	[8]
$PbCl_2$	20÷120	31	[3]
$Pb(NO_3)_2$	75÷180	31,6	[2]
PbO_2	25÷93	7,9	[1]
Pd	—210÷—100	9,75	[1]
	—200÷100	{11,60; 8,3; —2,69}	[1]
	—191÷10	10,3	[4]
	—100÷0	11,1	[1]
	16÷100	12,4	[4]
	16÷500	12,6	[4]
	16÷1000	13,8	[4]
Po	—53÷30	20,8	[8]
Pr	—173÷800	6,5	[8]
PrB_6	20÷800	7,5	[15]
Pt	—191÷16	8,0	[4]
	150÷—10	7,97	[1]
	—90÷0	8,7	[4]
	0	8,95	[6]
	0÷100	9,0	[4]
	0÷200	9,36	[4]
	0÷500	9,6	[4]
	0÷800	9,9	[6]

Вещество	t, °C	λ, Вт/(м·К)	Литература
Pt	0÷1070	10,35	[1]
	—150÷600	8,79 6,23 —7,56	[1]
	0÷1100	8,56 2,44	[6]
Pu	—180÷100	48,39 191,8	[1]
	—150÷400	42,4	[6]
	122÷206	26,04 148,0	[5]
	130÷200	90,0	[1]
	200÷300	60,0	[8]
	320÷500	—16,4	[8]
	500÷540	—27,5	[8]
	540÷600	36,4	[8]
Rb	0÷30	90	[8]
RbBr	—184÷—79	32,3	[8]
	—79÷0	34,7	[2]
RbCl	—184÷—79	30,3	[2]
	—79÷0	32,8	[2]
RbF	—184÷—79	37,3	[2]
	—79÷0	39,7	[2]
Re	0÷1000	6,7	[8]
Rh	—273÷—90	4,4	[8]
	174	5,0	[4]
	—93	7,4	[4]
	—28	7,9	[4]
	—180÷100	8,19 8,44 —2,1	[1]
	0÷1500	7,87 8,9 —0,33	[18]
	40	8,5	[1]
	0÷200	8,71	[6]
	0÷500	9,7	[4]
	0÷1000	10,8	[4]
	0÷1500	12,1	[4]
Ru	50	9,91	[8]
S (ромбическая)	0	74,0	[6]
S (моноклинная)	0	80	[6]
Sb	—190÷17	10,22	[1]
	0	9,2	[6]
	200	9,6	[6]
	400	10,0	[6]
	600	10,3	[6]
	0÷600	9,2 5,8	[14]
Sb_2O_3	40	19,63	[1]
Sc	400	11,4	[6]
ScB_2	20÷800	6,9÷7,6	[15]
Se (аморфная)	—78÷0	42,7	[4]
	0	40,0	[4]
Se (поликристаллическая)	—160÷0	37,3	[4]
	—78÷19	20,3	[4]
	20	37,0	[9]
	20÷100	29,9	[4]
	205	45,2	[4]

Вещество	t, °C	λ, Вт/(м·К)	Литература
Si	—233	—0,05	[3]
	—203	—0,59	[3]
	—191÷15	2,5 15,4	[1]
	—173	—0,31	[3]
	—113	—0,66	[3]
	—83	1,28	[3]
	—3	2,27	[3]
	27	2,33	[3]
	20÷500	2,4	[4]
	25÷900	3,002 0,154 0,203	[3]
	500	1,0	[4]
	1000	3,3	[4]
SiC	41÷605	4,3	[5]
	20÷1000	5,2	[5]
	41÷1205	4,7	[5]
	0÷1500	5,4	[6]
SmB_6	20÷800	6,8	[15]
Sn	0	91	[6]
	0÷100	26,9	[6]
	0÷200	31,8	[6]
SnO_2	40	3,2÷3,0	[1]
Sr	0÷200	20,6	[8]
	230÷500	22,2	[8]
	546÷630	20,0	[8]
$Sr(NO_3)_2$	75÷125	31,6 0,8 4,0	[2]
Ta	190÷20	6,2	[4]
	0÷400	6,46 1,8	[4]
	20÷100	6,6	[4]
	20÷300	6,6	[4]
	20÷500	6,6	[4]
	20÷1400	7,3	[4]
	27÷2400	7,8	[4]
	1670÷2880	11,2	[4]
TaB_2	20÷1100	8,3	[15]
TaC	20÷1100	4,29	[15]
TaN	20÷700	3,0	[15]
Ta_2N	20÷1000	5,2	[15]
$TaSi_2$	20÷1000	8,85	[15]
Tb	20	11,8	[9]
Te	0÷100	17,0	[2]
	20	15,8	[4]
Th	—216÷20	9,8	[4]
	20÷100	11,3	[4]
	20÷300	13,1	[4]
	20÷400	13,7	[4]
	20÷1000	12,6	[5]
ThB_6	20÷800	7,8	[15]
ThO_2	25÷1700	10,2	[1]
Ti	—273÷—190	2,5	[8]
	—196÷20	6,8	[4]
	0	7,7	[6]
	0÷700	7,7 7,2	[14]
	20÷900	8,49	[9]
	20÷400	9,45	[4]
	20÷600	9,9	[4]
	20÷800	10,1	[4]

Вещество	t, °C	λ, Вт/(м·К)	Литература
Ti	100÷600	11,28	[9]
	700÷800	10,05	[9]
	860÷960	10,5	[1]
TiB_2	17÷400	5,5	[15]
TiO_2	−26÷30	94,6	[2]
TiC	12÷270	7,74	[15]
	24÷805	7,54	[15]
TiH_2	−30÷195	74	[2]
Tl	216÷195	26,17	[9]
	−195÷−183	27,04	[9]
	183÷160	28,58	[9]
	−160÷−140	29,19	[9]
	120÷100	30,13	[9]
	−80÷−60	31,09	[9]
	−40÷−20	32,37	[9]
	20	28	[9]
	0÷200	29,4	[4]
	0÷294	33	[1]
$TlBr_2$	25÷1300	8,1	[15]
TlBr	15÷60	54,26	[3]
TlCl	15÷60	54,57	[3]
TlI	30	45,6	[2]
Tu	200	11,6	[8]
U	−260÷110	10,7	[8]
	150÷650	19,2	[8]
	660÷770	19,9	[8]
	780÷1110	19,4	[8]
UB_2	20÷1100	16,4	[16]
UC	20÷1100	7,5	[15]
UO_2	25÷1000	10,52	[1]
V	210÷50	6,15	[8]
	−183÷0	6,6	[4]
	20	7,8	[4]
	0÷100	8,3	[4]
	0÷500	9,6	[7]
	0÷1000	16,9	[5]
VB_2	0÷1100	7,5	[15]
VC	17÷130	7,2	[15]
VN	20÷1100	8,11	[15]
W	−100÷0	3,8	[10]
	−100÷0	4,2	[4]
	150÷769	(4,28; 0,58)	[1]
	0	4,3	[6]
	0÷2100	(4,3; 1,42)	[17]
	400	4,45	[1]
	1027	5,19	[10]

Вещество	t, °C	λ, Вт/(м·К)	Литература
W	1300	5,12	[1]
	1700	6,22	[1]
	2027	7,26	[10]
	2600	7,7	[8]
WC	22÷400	3,84	[15]
W_2C	17÷270	5,8	[15]
	0÷2400	7,3	[16]
Y	400	10,8	[8]
YB_4	20÷800	6,2	[15]
YC	20÷1100	7,36	[15]
Yb	27÷700	25,9	[8]
YbB_6	20÷800	5,8	[15]
Zn	−200÷0	22	[6]
	−100÷0	28	[6]
	−170÷60	(26,5; 43,2; −12,0)	[2]
	−100÷300	(30; 40)	[1]
	0	30	[6]
	0÷100	32	[6]
	0÷200	34	[6]
	0÷300	36	[6]
	0÷400	38	[6]
ZnCl	20÷700	29	[2]
ZnS (сфалерит)	−150÷0	(6,16; 0,517; 11,8)	[2]
	25÷100	6,1	[3]
	25÷200	6,9	[3]
	25÷300	7,9	[3]
	25÷400	7,5	[3]
Zr	273÷320	5,5	[8]
	−183÷0	4÷5,1	[4]
	20	6,3	[9]
	20÷200	5,4	[4]
	20÷400	6,1	[4]
	20÷700	7,1	[4]
	900÷1300	9,5	[4]
ZrB_2	20÷1100	0,88	[15]
ZrC	0÷100	6,3	[16]
	0÷400	8,2	[16]
	0÷700	9,0	[16]
	0÷1000	10,2	[16]
ZrN	20÷1100	7,24	[15]
ZrO_2	0÷79	4,5	[18]

Таблица 9.4

Средний температурный коэффициент линейного расширения специальных сплавов [4, 6, 8, 11]

Сплав (состав, вес. %)	Интервал температур, °С	$\bar{\alpha}$, 10^{-6} $град^{-1}$	Сплав (состав, вес. %)	Интервал температур, °С	$\bar{\alpha}$, 10^{-6} $град^{-1}$
Дельта-металл (60% Cu; 36% Zn; 2% Sn; 2% Fe)	20 ; 100	20	96,6% Al; 3,4% Ni	20÷100	21,8
Инвар (64% Fe; 36% Ni)	0÷100	0,01÷2,0	60% Al; 40% Si	20÷300	21,7
Каппа (68,5% Fe; 23,4% Cr; 6,2% Al; 1,5% Co; 0,06% C)	20÷100	11,6		20 ; 100	14,7
Ковар (Фернико) (54% Fe; 31% Ni; 15% Co)	20÷900	13,6÷15,1	60,5 % Al; 39,5% Ti	20÷300	17,1
Манганин (84÷86% Cu; 12% Mn; 2—4% Ni)	20 ; 300	5,0		20 ; 100	19,4
	0÷100	16,1		20÷300	21,3
	0÷400	16,9		20 ; 600	22,1
	0÷800	21,7	57% Be; 3,0% Cu	20÷100	15,0÷17,3
Монель (65÷70% Ni; 25÷30% Cu; 2% Fe; 1,5% Mn)	25÷100	14,0	56% Co; 35% Fe; 9% Cr	20 ; 300	16,4 ; 17,4
	25÷600	16,3	52% Co; 37,5% Fe; 10,5% Cr	20÷60	—1,1
Стеллит (80% Co; 20% Cr)	20 ; 300	14,1	80,5% Cu; 19,5% Ni	20÷80	1,7
	20÷300	15,2		—182÷0	13,0
	20 ; 600	16,1	97% Pb; 3% Sb	0÷40	14,7
95,6% Al; 4,2% Be	20÷100	22,4	80% Pt; 20% Ir	20 ; 100	28,3
	20÷500	26,6		—190÷0	7,5
66,8% Al; 33,2% Cu	20÷100	19,7		0 ; 100	8,3
	20÷300	20,8	80% Pt; 20% Rh	0÷1000	9,6
				0÷500	9,6
				0 ; 1000	10,4
				0 ; 1400	11,0

Таблица 9.5

Средний температурный коэффициент линейного расширения $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $град^{-1}$, сталей в интервале от 20°С до указанной температуры

Марка	Температура, °С							Литература
	100	200	300	400	500	600	700	
Углеродистые стали:								
Ст08 кп	11,66	12,32	13,02	13,16	14,22	14,60	15,01	[21]
Ст15	12,16	12,64	13,12	13,46	14,27	14,30	—	[21]
Ст20	11,56	12,12	12,78	13,36	13,93	14,38	12,91	[21]
Ст25	12,18	12,66	13,08	13,47	13,92	14,41	14,55	[21]
Ст30	11,00	11,89	12,72	13,19	14,02	14,43	14,76	[21]
Ст40	11,21	12,14	13,0	13,58	14,06	14,56	14,85	[21]
Ст45	11,10	12,32	13,09	13,71	14,18	14,67	15,08	[22]
Ст50	12,0	12,4	12,9	13,3	13,9	14,1	14,3	[24]
Легированные стали:								
15Х, 20Х	11,3	11,6	12,5	13,2	13,7	—		[21]
30Х	12,2	12,6	13,3	13,7	14,1	14,5	14,8	[6, 21]
15ХФ, 20ХФ	12,0	12,5	13,2	13,6	14,1	14,5	14,8	[6, 21]
20ХФ	11,9	12,4	13,1	13,7	14,2	14,5	14,9	[21]
15М	12,0	12,6	13,2	13,7	14,2	14,7	—	[6, 21]
20М	11,2	12,6	13,0	13,7	14,2	14,7	14,8	[6, 22]
15ХМ	11,9	12,6	13,3	13,7	14,0	14,5	—	[5, 6, 21]
20ХМ, 20ХМА	12,1	12,8	13,0	13,6	14,6	14,3		[6, 22]
30ХМ, 30ХМА	12,3	12,5	12,9	13,9	14,4	14,6	—	[6, 21]
35ХМ, 35ХМА	12,3	12,6	—	14,5	14,6	—		[21]
15ХС	11,9	12,6	13,2	13,7	14,6	14,3	—	[5, 6, 21]
38ХС, 40ХС	11,7	12,7	—	14,0	—	14,8		[21]
Х6С2	11,3	12,1	12,8	14,1	14,3	14,3	14,2	[6]
Х6М	12,6	13,2	13,7	14,0	14,3	—	—	[6]
Х12М	11,9	12,5	12,3	13,7	14,0	14,3	—	[5, 6, 21]

Марка	Температура, °С							Литература
	100	200	300	400	500	600	700	
27СГ, 35СГ	11,5	12,6	—	14,0	—	14,8	-	[21]
30С2Г	10,6	11,2	12,2	12,0	13,0	13,7	14,1	[6]
25Н	12,2	12,2	—	13,5	—	14,4	—	[21]
Н28	13,7	15,3	16,3	17,0	17,5	17,8	16,1	[6]
12Х2Н2	12,6	13,6	—	14,8	—	14,3	—	[21]
19ХН3А, 20ХН3А	11,8	13,0	—	14,2	—	15,6	—	[21]
Х20Н12	17,3	17,5	17,8	18,0	18,3	18,5	18,8	[6]
2Х25Н20	14,4	15,2	16,1	16,5	16,8	17,2	17,6	[6]
30ХН3, 35ХН3А	11,4	12,3	12,8	13,9	13,1	13,7	13,7	[6]
Х18Н11Б	16,7	16,9	17,1	17,7	18,3	18,8	19,3	[6]
Х18Н9М	17,3	17,5	17,8	18,0	18,3	18,5	18,8	[6]
30ХГСМА	10,8	11,6	-	13,3	13,7	—	—	[21]
4Х14Н2М(ЭИ-69)	—	-	17,5	—	18,0	-	—	[22]
1Х14Н14В2М (ЭИ-257)	16,6	16,7	17,3	17,2	18,2	19,1	19,1	[6, 99]
10Х2Ф	12,2	12,7	13,0	13,5	13,8	14,2	14,8	[6]
40ХФА	11,0	-	12,0	—	—	14,5	—	[21]
10Х2ФВ	10,5	11,3	12,6	12,9	13,4	13,6	13,9	[6]
12ХМФ	13,6	13,7	14,0	14,2	14,5	14,7	14,8	[6]
12Х1МФ	10,8	11,8	12,35	12,8	13,0	13,65	13,8	[21]
38ХМЮА	13,0	14,0	—	14,8	—	16,0	—	[21]
18Х2Н4ВА	14,5	14,5	—	14,3	—	14,2	—	[21]
25ХНВА	10,7	13,1	—	14,6	—	13,2	—	[21]
Х20Н80	14,9	16,5	17,1	17,6	18,0	18,4	18,8	[6]
Х18Н9С2	16,2	17,1	17,9	18,6	19,2	19,9	20,5	[6]
Х23Н13(ЭИ-319)	14,9	15,7	16,6	17,1	17,5	17,8	18,2	[6, 22]
25Х2МФА	11,3	11,4	-	13,9	—	14,4	—	[6, 22]
Жаропрочные стали:								
ЭК-1 (1Х13)	10,3	11,6	10,7	12,1	12,4	12,6	12,9	[6, 22]
ЭК-2 (2Х13)	9,6	10,4	10,6	10,9	11,4	11,8	12,1	[6, 22]
ЭК-3 (3Х13)	10,2	11,1	11,6	11,9	12,3	12,5	12,8	[6, 22]
ЭК-4 (4Х13)	5,8*	11,0	11,6	12,0	12,4	12,5	12,9	[6, 22]
ЭК-18	10,0	—	—	—	11,1	11,3	11,5	[21]
Нержавеющие стали:								
Х18Н12С2	14,2	17,5	-	-	—	19,8	-	[22]
Х18Н9 (ЭИ-1)	17,3	17,5	17,8	18,0	18,3	18,5	18,8	[6]
1Х18Н9Т (ЭИ-1Т)	16,6	17,0	17,2	17,5	17,9	18,2	19,1	[6, 22]
2Х18Н9 (ЭИ-2)	17,5	18,2	18,6	19,2	20,1	20,5	20,8	[6, 21]
Специальные стали:								
Г-13	18,61	19,37	20,71	21,71	20,76	19,86	20,49	[6]
Г30Х12Н	15,4	17,6	18,3	21,9	21,6	23,1	25,0	[6]
Г21Х13Т	15,3	17,6	19,8	21,8	22,7	23,0	24,1	[6]
Р18	12,23	11,71	11,98	12,30	12,41	12,62	12,57	[6]

Таблица 9.6

Температурный коэффициент линейного расширения цветных металлов и сплавов при 20°С

Марка	α, 10^{-6} град$^{-1}$	Литература	Марка	α, 10^{-6} град$^{-1}$	Литература
Алюминиевые сплавы					
Л1, Л16, Д18	12,9	[5]	АЛ 8	24,5	[5]
Авиаль АВ	23,6	[23]	АЛ 9	21,6	[5]
Магналий АМГ-6	23,9	[23]	АЛ 10	20,5	[5]
АЛ 1	22,3	[5]	А, АМц	24,0	[24]
АЛ 2, АЛ 4, АЛ 6, АЛ 13	20,0	[5, 23]	АМц	23,4	[23]
АЛ 3, АЛ 12	22,0	[5, 23]	АМг-5	23,5	[24]
АЛ 5	21,0	[5]	АК-4, АК-6	22,0	[23]
АЛ 7	22,7	[5]			
Бронзы					
Бр. ОФ 4-0,25	17,6	[23]	Бр. С30	19,4	[23]
Бр. ОФ 6,5-0,4	17,1	[23]	Бр. ОНС 11-4-3	17,0	[16]
Бр. ОФ 7-02	17,1	[23]	Бр. А 7	15,0	[23]
Бр. ОФ 10-1	17,0	[5, 23]	Бр. А 9	17,6	[23]
Бр. ОЦ 4-3	18,0	[7, 16]	Бр. АЖ 9-4	18,1	[23]
Бр. ОЦ 8-4	16,6	[5, 23]	Бр. АЖН 10-4-4	17,1	[23]
Бр. ОЦ 10-2	18,3	[5, 23]	Бр. АЖМц 11-6-6	21,9	[23]
Бр. ОЦС 6-6-3	17,1	[5, 23]	Бр. АМц 9-2	17,6	[23]
Бр. ОС 4-99	18,4	[23]	Бр. АЖМц 10-3-1,5	16,6	[23]
Бр. ОС 5-25	17,6	[5]	Бр. Мц 5	20,4	[23]
Бр. ОС 7-17	17,3	[5]	Бр. КМц 3-1	15,8	[23]
Бр. ОС 8-12	17,1	[5]	Бр. Б-2	17,4	[23]
Латуни					
Л 62	20	[5, 23]	ЛМц 58-2	21,2	[5, 23]
Л 68, Л 70	19	[23]	ЛЖМц 59-1-1	22	[5, 23]
Л 80	18,8	[5, 23]	ЛЖМц 72-4-1	22,7	[23]
Л 85	18,7	[5, 23]	ЛО 62-1	19,3	[5]
Л 90, Л 96	17	[5, 23]	ЛО 70-1	19,7	[5, 23]
ЛА 85-0,5	18,6	[23]	ЛО 90-1	18,4	[5]
ЛАН 59-3-2	19	[23]	ЛС 59-1	19	[23]
ЛК 80-3	17	[23]	ЛС 64-2	18	[5]
ЛКС 80-3-3	17	[23]	ЛС 74-3	17,5	[23]
			ЛН-65 5	18,2	[23]
Сплавы магния и никеля					
МА1 — МА3	26	[5]	Монель	14,5	[5, 23]
МА2 — МА6	26,4	[5]	Монель К	12,9	[23]
ТБ	15,3	[23]	Манганин	16	[23]
ТП	12,0	[5]	Нейзильбер	18,4	[5]
Колмоной	11,4	[5, 23]	Ферроникроль	13	[23]
Алюмель	13,7	[5]	Мельхиор	16	[5]
Хромель	12,8	[23]	Пьезоэлектрические сплавы	14	[23]
Копель	14	[5]			

Таблица 9.7

Температурный коэффициент линейного расширения строительных материалов

Наименование	t, °C	α, 10^{-6} град$^{-1}$	Литература
Асфальт	18÷25	200	[1]
Бетон	22÷60	22	[10]
Вата	20	10÷14	[7]
Гумага (твердая)	0÷70	10	[10]
Гранит	20	8,8	[10]
Глина	25÷100	8,1	[10]
Дерево: бук	20	2,57	[10]
ясень	0÷100	9,51	[10]
каштан	20	6,46	[10]
ель	20	5,65	[10]
красное	20	3,61	[10]
клен	20	5,38	[10]
дуб	20	4,02	[10]
сосна	20	5,41	[10]
Известняк	20	4÷9	[7]
Кирпич	20	3÷9	[7]
Мрамор	70÷100	16	[10]
Цемент	20	10÷14	[10]
Фибра	18÷25	9	[1]
Шифер	20	6÷10	[16]

Таблица 9.8

Температурный коэффициент линейного расширения пластмасс и каучуков

Наименование	t, °C	α, 10^{-6} град$^{-1}$	Литература
Аминопласты	20	25÷33	[21]
Бакелит	20	33÷40	[21]
Бакелитовая	20	25÷28	[21]
Винипласт	20	40	[21]
Волокнит	20	30	[21]
Воск	0÷100	240	[1, 12]
Гетинакс	20	20	[22]
Каучук	—	100	[21]
Клей	20	66	[10]
Органическое вулканизированное	—	36	[21]
Органическое стеклообразное	—	34,3	[21]
Парафин	20	150	[10]
Полиакрилаты	—	6÷15	[10]
Полистирол	20	70	[21]
Полиэтилен	20	250	[21]
Резина обыкновенная	20	220	[21]
Резина твердая	20÷60	80	[10]
Стеклотекстолит	20÷100	0,8	[21]
Текстолит	20	33÷40	[21]
Тефлон (фторопласт-3)	20	6÷230	[21]
Целлулоид	20	130	[21]
Эбонит	25÷35	84,2	[10]
Эпоксидные смолы (твердые)	—	115	[21]
Этролы целлюлозные	—	7÷100	[21]

Таблица 9.9

Температурный коэффициент линейного расширения стекол

Наименование	t, °C	α, 10^{-6} град$^{-1}$	Литература
Белое	0÷500	6	[12]
Кварцевое*	100÷16	0,256	[10]
	0÷30	0,42	[10]
	0÷100	0,50	[10]
	0÷800	0,646	[10]
	0÷1200	0,585	[10]
Кремний 790	0÷350	0,8	[12]
Кремний 771	0÷350	3,2	[12]
Кремний 8800	0÷350	6,1	[12]
B—S-крон	18÷100	9,12	[1]
	200÷600	9,6	[1]
	540÷666	39,3	[1]
Si-крон	37	9,20	[1]
	93	10,4	[1]
	151	10,61	[1]
	212	11,11	[1]
Крон сложный	2÷400	10,2	[1]
	500÷580	55,5	[1]
Крон	16÷94	9,03	[1]
Крон О 106б	15÷95	9,6	[6]
Ba-крон	23÷500	9,00	[1]
	570÷640	64,9	[1]
Нейтральное		8	[6]
Оптическое KRS-5 (42% TlBr; 58% TlI)	—40÷20	61	[3]
	20÷100	58	[3]
Оптическое KRS-6 (40% TlBr; 60% TlI)	—50÷20	55	[3]
Оптическое KRS-15 (65% AgBr; 35% AgCl)	20	30	[3]
Пирекс	0÷100	3	[6, 7]
	20÷200	3,1	[6]
Стекло для рентгеновских трубок	25÷500	3,8	[12]
Термометрическое Иена 16^III^**	0÷100	8,1	[10]
Термометрическое Иена 59^III^	190÷16	4,24	[10]
	0÷100	5,8	[10]
Термометрическое 2884	0÷100	6,28	[12]
Термометрическое тюрингское зеленое	0÷100	9,2	[12]
Ba—Si-флинт легкий	7÷30	6,23	[1]
Ba-флинт	22÷500	8,8	[1]
Ba-флинт легкий	10÷100	9,0	[1]
Флинт легкий	22÷450	8,8	[1]
	480÷510	34,7	[1]
Si-флинт	20÷100	8,03	[1]
Флинт О 118	0÷100	7,3	[6]
Химическое стеклянное № 23; 826	0÷100	9	[12]

* Приближенно интерполяционные формулы:
$\alpha \cdot 10^6 = 0,386 + 1,213 \cdot 10^{-2} t - 3,4 \cdot 10^{-5} t^2$ ($-253 \le t \le 100$ °C);
$\alpha \cdot 10^6 = 0,382 - 1,258 \cdot 10^{-3} t - 1,64 \cdot 10^{-5} t^2$ ($0 \le t \le 30$ °C).

** Приближенно интерполяционные формулы:
$\alpha \cdot 10^6 = 7,973 + 6,16 \cdot 10^{-2} t + 7,24 \cdot 10^{-5} t^2$ ($-101,5 \cdot 10^{-10}$ $-253 \le t \le 10$ °C);
$\alpha \cdot 10^6 = 7,98 + 2,86 \cdot 10^{-2} t$ ($25 \le t \le 30$ °C).

Таблица 9.10

Средний температурный коэффициент линейного расширения керамических материалов [1]

Наименование	Интервал температур, °С	$\bar{\alpha}$, 10^{-6} град$^{-1}$
Алюминия окись (крупнозернистая, плавленая)	20÷300	6,7
	20÷600	7,6
	20÷900	8,1
	20÷1200	9,0
	20÷1500	10,2
Алюминия окись (крупнозернистая, спекшаяся)	20÷300	5,9
	20÷600	7,2
	20÷900	8,2
	20÷1200	9,0
	20÷1500	9,6
Бериллия окись (спекшаяся)	25÷300	8,0
	25÷600	9,0
	25÷900	10,5
Магния окись (крупнозернистая, плавленая)	20÷300	13,3
	20÷600	13,5
	20÷900	13,9
	20÷1200	15,0
	20÷1500	16,0
Кальция окись (крупнозернистая, плавленая)	20÷300	10,2
	20÷600	11,6
	20÷900	12,6
	20÷1200	13,7
	20÷1500	14,7
Титана окись (крупнозернистая, плавленая)	20÷300	7,1
	20÷600	7,7
	20÷900	8,2
	20÷1200	8,7
	20÷1450	9,1
Тория окись (мелкозернистая, плавленая)	20÷300	7,1
	20÷600	8,5
	20÷900	9,0
	20÷1200	10,3
	20÷1500	10,4
Циркония окись (зернистая, кубической структуры, плавленая)	20÷300	7,6
	20÷600	9,2
	20÷900	10,0
	20÷1200	10,8
	20÷1500	11,6
Циркония окись (крупнозернистая, плавленая)	20÷300	6,9
	20÷600	8,4
	20÷900	8,8
	20÷1200	9,5
	20÷1500	9,4
Смесь $ZrO_2 \cdot SiO_2$ (мелкозернистая)	20÷300	3,7
	20÷600	4,2
	20÷900	4,7
	20÷1200	5,6
	20÷1300	5,8
Смесь $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ (шпинель Нернста)	18÷2000	10,5
Смесь $Al_2O_3 \cdot TiO_2$ (мелкозернистая)	20÷300	0
	20÷600	0,2
	20÷900	1,7
	20÷1200	3,4
	20÷1450	4,4
Смесь $MgO \cdot Al_2O_3$ (крупнозернистая, плавленая)	20÷300	5,2
	20÷600	7,5
	20÷900	8,4
	20÷1200	9,1
	20÷1500	9,6
Карбид кремния SiC (перекристаллизованный)	20÷300	3,8
	20÷600	4,3

Продолжение табл. 9.10

Наименование	Интервал температур, °С	$\bar{\alpha}$, 10^{-6} град$^{-1}$
Карбид кремния SiC (перекристаллизованный)	20÷900	4,5
	20÷1200	4,8
	20÷1500	5,2
Карбид бора B_4C (горячая формовка)	20÷300	5,2
	20÷600	5,3
	20÷900	5,8
Фторид кальция CaF_2 (спекшийся)	20÷300	22,3
	20÷600	24,8
MgF_2 (мелкозернистый)	20÷300	20,1
	20÷500	10,7
	20÷700	13,0
	20÷900	14,5
	20÷1000	14,8
Кирпич карборундовый	20÷600	5,2
	20÷900	5,8
	20÷1200	6,0
Кирпич шамотный	20÷600	7,5
	20÷900	6,7
	20÷1500	5,0
Кирпич динасовый	20÷600	22
	20÷900	12
Фарфор берлинский [12]	20÷100	3,0
карлсбадский	—	5,2
технический [6]	0	2,5
	20÷500	4,13
	100÷1400	5,53
изоляционный [7]	20	3,5
огнеупорный [7]	20	3÷6
лабораторный [7]	—	2÷5
технокольцевый [10]	—	3,70
Фаянс глиняный [5]	20÷700	5,4
технический [5]	20÷750	5,0
Янтарь (прессованный) [6]	0÷75	57

Таблица 9.11

Температурный коэффициент линейного расширения квасцов [2, 3]

Наименование	t, °С	$\alpha \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$	Наименование	t, °С	$\alpha \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$
Аммиачные квасцы	—160	0,80	Калиевые квасцы	—170	1,54
	—140	1,13		—135	1,74
	—120	1,10		—103	3,10
	—100	2,13		—72	4,30
	—80	2,84		—43	5,34
	—60	3,75		18	7,94
	—40	5,00		5	9,10
	—20	6,13			
	0	6,65			

9.3. ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Тепловое расширение жидкостей и газов подробно и характеризуется температурными коэффициентами объемного расширения (истинным и средним). Температурный коэффициент объемного расширения газов при увеличении температуры приближается к значению температурного коэффициента объемного расширения идеального газа, зависящего только от абсолютной температуры газа, T, °К: $\beta = 1/T$.

Температурный коэффициент объемного расширения жидкостей и газов. Элементы и неорганические соединения

Приведены значения среднего температурного коэффициента объемного расширения в указанном интервале температур или значения истинного температурного коэффициента объемного расширения при данной температуре. Значения в скобках — первые три коэффициента интерполяционной формулы (t, °C):
$\gamma = a \cdot 10^{-3} + b \cdot 10^{-3} \cdot t + c \cdot 10^{-3} \cdot t^2$.

Вещество	Состояние	p, атм	t, °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-3} град$^{-1}$	Литература
Ag	Жидкость	1	961 ÷ 1100	0,111	[1]
Al	»	1	660 ÷ 1100	0,113	[1]
Ar	»	1	—189 ÷ —186	4,34	[25]
	Газ	1	—100	3,636	[12]
		1	100	3,676	[26]
		1	200	3,673	[26]
		1	300	3,672	[26]
		1	400	3,671	[26]
		10	—100	0,3672*	[27]
		10	100	0,3658	[28]
		10	200	0,3680	[28]
		10	300	3,3682*	[27]
		10	400	0,3683	[28]
		100	100	0,3839	[28]
		100	200	0,3822	[28]
		100	300	0,3828*	[27]
		100	400	0,3832	[28]
		1000	100	1,1377	[6]
B_2H_6	Жидкость	1	—45 ÷ 10	1,25*	[25]
Br	»	1	271 ÷ 630	0,122	[1]
		1	360 ÷ 630	0,121	[1]
Br_2	»	1	0	1,11	[1]
		1	90	1,132	[12]
		1	0 ÷ 18	1,06228 1,87714 —0,26354	[12]
C_2N_2	Газ	1	0	3,46	[26]
		1	100	3,83	[26]
		1	200	3,89	[26]
CO	Жидкость	1	—205 ÷ —192	4,91	[25]
	Газ	1	0	3,647	[26]
		1	0 ÷ 110	3,671	[26]
		1	0 ÷ 100	3,669	[10]
		1	200	3,666	[26]
		100	100	0,4003	[29]
		100	200	0,4073	[6]
		1000	100	1,496	[29]
		1000	200	0,9632	[6]
CO_2	Жидкость	1	—50	4,95	[25]
	Газ	1	0	3,750	[10]
		1	0 ÷ 100	3,723	[10]
		1000 *ат* *рт. ст.*	0	3,6956	[4]
		То же	100	3,7246	[4]
		2021 *ат* *рт. ст.*	0	1,107	[10]
		То же	64 ÷ 100	0,574	[10]
CS_2	Газ	1	90	1,218	[12]
		1	34 ÷ 60	1,1386 1,32065 1,91995	[4]
Cl	Жидкость	1	320 ÷ 350	0,170	[1]
		1	320 ÷ 544	0,137	[1]
Cl_2	»	1	—101 ÷ —33,6	1,41	[25]
		1	—90 ÷ —33,6	1,40	[25]
		1	—40	1,53	[1]
	Газ	1	0	3,90	[10, 26]
		1	0 ÷ 100	3,830	[10, 26]

Вещество	Состояние	P, атм	t, °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-4} град$^{-1}$	Литература
Cl_2	Газ	1	100	3,77	[26]
		1	200	3,83	[26]
Cs	Жидкость	1	28,5÷40	0,341	[1]
		1	50÷123	0,318	[1]
		1	100	0,29*	[27]
Cu	»	1	1083÷1295	0,199	[1]
F_2	»	1	—200	4,243*	[27]
		1	—218÷—188	3,0	[1]
Ga	»	1	100	0,121	[6]
		1	200	0,1143	[9]
		1	300	0,110	[9]
		1	400	0,1066	[9]
		1	600	0,1023	[9]
		1	800	0,0982	[9]
		1	900	0,0973	[6]
H_2	»	1	259,2÷252,8	19,0	[1,5]
		1	—255	15,0	[1]
	Газ	1	—100	3,661	[12]
		1	100	3,659	[12]
		1	200	3,658	[12]
		1	300	3,657	[12]
		1	400	3,656	[12]
		200	0÷100	3,37	[10]
		400	0÷100	2,96	[10]
		600	0÷100	2,61	[10]
		800	0÷100	2,42	[10]
HCl	»	1	0	3,709	[26]
HCN	Жидкость	1	—14	1,95	[26]
H_2O	Жидкость, на линии насыщения	1	0	—0,064	[5]
		1	10	0,070	[5]
		1	30	0,182	[5]
		1	50	0,449	[5]
		1	100	0,752	[5]
		1	200	1,33	[5]
		1	300	2,92	[5]
		1	350	6,68	[5]
	Жидкость	1	20	0,207	[12]
	Газ	1	0÷120	4,187	[10]
		1	0÷140	4,189	[10]
		1	0÷100	4,071	[10]
		1	0÷200	5,933	[10]
		1	0÷200	3,799	[10]
		100 *ат*	100	4,187	[4]
		5	200	5,908	[4]
H_2S	»	1	0	3,82	[26]
		1	100	3,75	[26]
H_2SO_4	Жидкость	1	20	0,5759	[12]
		1	0÷20	0,5758 —0,43	[4,12]
He	»	1	—269,65	96,14*	[27]
		5	—269,65	57,10*	[27]
		10	—269,66	38,66*	[27]
	Газ	1	—100	3,656	[26]
		1	100	3,656	[12]
		1	200	3,656	[12]
		1	300	3,656	[12]
		1	400	3,659	[12]
		10	—200	0,3805*	[27]
		10	—100	0,361*	[27]
		10	100	0,3704*	[27]
		10	200	0,3690*	[27]
		10	300	0,3672*	[27]
		10	400	0,3668*	[27]

Вещество	Состояние	p, атм	t, °C	λ, вт/(м·град)	Литература
He	Газ	100	−200	0,3567*	[27]
		100	−100	0,3116*	[27]
		100	100	0,4161*	[27]
		100	200	0,3902*	[27]
		100	300	0,3813*	[27]
		100	400	0,377*	[27]
		1000	100	0,8559*	[27]
		1000	200	0,3941*	[27]
Hg	Жидкость	1	50	0,181	[5]
		1	0÷100	0,18182 0,0078	[4]
		1	100	0,182	[5]
		1	24÷200	0,18163 0,01155 0,0091167	[12]
		1	200	0,183	[5]
		1	300	0,185	[5]
		1	500	0,186	[5]
		1	800	0,188	[5]
I	»	1	107÷150	0,800	[12]
K	»	1	20÷100	0,280	[1]
		1	100÷110	0,285	[1]
		1	100÷300	0,285*	[27]
		1	500÷700	0,377*	[27]
Kr	Газ	1	100	3,311	[26]
		1	200	3,5935	[26]
		1	300	3,6756	[26]
Li	Жидкость	1	185÷235	0,174	[1]
		1	200÷400	0,196*	[27]
		1	500÷700	0,2004*	[27]
Mg	»	1	650÷800	0,380	[1]
N_2	Жидкость в тройной точке	1	−210	21,0	[26]
	Жидкость	1	−205÷−164	5,89	[25]
	Газ	1	−100	3,681	[12]
		1	0	3,673	[10]
		1	0÷100	3,671	[10]
		1	100	3,670	[12]
		1	200	3,668	[12]
		1	300	3,667	[12]
		1	400	3,666	[12]
		10	−100	0,3865	[28]
		10	100	0,3670	[28]
		10	200	0,3698	[28]
		10	300	0,3704	[28]
		10	400	0,3682	[28]
		100	−100	0,5704	[28]
		100	100	0,4103	[28]
		100	200	0,4036	[28]
		100	300	0,3974	[28]
		100	400	0,3928	[28]
		1000	100	1,443	[28]
		1000	200	1,430	[28]
		1000	300	0,708	[28]
		1000	400	0,670	[28]
NH_3	Жидкость	1	−50	1,93	[23]
	Газ	1	0	3,860	[10]
		1	0÷100	3,850	[10]
		1	100	3,808	[4]
		1	200	3,779	[4]
		1	300	3,759	[4]
		10	100	0,325	[28]
		10	200	0,353	[28]
		10	300	0,370	[28]
		00	300	0,316	[28]

Вещество	Состояние	p, атм	t, °C	λ или $\bar{\lambda}$, 10^{-4} кал/см·с·°C	Литература
NO	»	1	0	3,677	[26]
		1	100	3,673	[26]
		1	200	3,669	[26]
N_2O	»	1	0	3,761	[26]
		1	200	3,72	[26]
Na	Жидкость	1	100÷180	0,275	[1]
		1	100÷700	0,300	[1]
		1	100÷210	0,280 0,286	[1]
NaCl	90,6%-ный раствор в H_2O	1	20	0,414	[12]
		1	0 ; 29	0,3640 1,237	[12]
Ne	Газ	1	−100	3,66	[10]
		1	100	3,659	[10]
		1	200	3,650	[10]
		1	300	3,659	[10]
		1	400	3,656	[10]
		1	500	3,91	[10]
		10	−200	0,385	[28]
		10	−100	0,3635	[28]
		10	100	0,3708	[28]
		10	200	0,3684	[28]
		10	400	0,3672	[28]
		100	−200	0,407	[28]
		100	−100	0,384	[28]
		100	100	0,420	[28]
		100	200	0,3945	[28]
		100	400	0,3905	[28]
O_2	Жидкость	1	−210÷−182	4,0	[1]
	Газ	1	0÷100	3,67	[4]
		10	−170÷−160	4,631*	[30]
		10	−205÷−189	3,85	[25]
		10	100	3,66	[28]
		100	−170÷−160	4,196*	[30]
		100	0÷100	4,66	[10]
		1000	0÷100	2,41	[10]
O_3	Жидкость	1	−183	2,0	[25]
P	»	1	50÷60	0,52	[1]
PBr_3	»	1	20	0,266	[12]
		1	0÷100	0,8472 0,13672 0,27276	[12]
PCl_3	»	1	20	1,154	[12]
		1	−30÷75	1,12962 0,87288 1,70236	[12]
PH_3	Газ	1	0	3,79	[26]
		1	100	3,736	[26]
$POCl_3$	Жидкость	1	20	1,116	[12]
		1	0÷107	1,06431 1,12666 0,5299	[12]
Pb	»	1	327÷525	0,120	[1]
Pt	»	1	—	0,05	[5]
Rb	»	1	40÷140	0,339	[1]
		1	100	0,3*	[27]
S	»	1	115	0,430	[1]
		1	134	0,430	[1]
		1	152	0,490	[1]
		1	165	0,170	[1]
		1	176	0,298	[1]
		1	210	0,344	[1]

Вещество	Состояние	P, атм	t, °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-3} град$^{-1}$	Литература
S	Жидкость	1	278	0,366	[1]
		1	357	0,338	[1]
SO_2	Газ*	1	—50	1,70	[25]
		1	0	3,98	[26]
		1	0÷100	3,903	[10]
		1	100	3,87	[26]
		1	200	3,96	[26]
		1000 ат	0÷100	3,960	[10]
SF_6	»	10	100	0,3126	[31]
		10	200	0,3607	[31]
Sb	Жидкость	1	631÷1074	0,041 0,120	[1]
$SiCl_4$	»	1	20	1,430	[12]
		1	—32÷57	1,25612 2,18414 4,08642	[12]
Sn	»	1	232÷400	0,106	[1]
		1	400÷1000	0,106	[1]
		1	232÷1000	0,106	[1]
Tl	»	1	302÷351	0,130	[9]
Xe	Газ	1	101	2,977	[26]
		1	200	3,466	[26]
		1	30	3,552	[26]
Zn	Жидкость	1	419÷543	0,147	[1]
		1	419÷918	0,217 0,198	[1]

* Данные по плотности, приведенные в указанной работе.

Таблица 9.13

Температурный коэффициент объемного расширения жидкостей и газов. Органические соединения

Пояснения те же, что и к табл. 9.12.

Вещество	Состояние	P, атм	t, °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-3} град$^{-1}$	Литература
CH_4, метан	Газ	1	—150÷—50	5,798*	[27]
		1	—100÷0	4,271*	[27]
		1	—50÷50	3,580*	[27]
		100	—50÷50	2,173*	[27]
CH_4O, метиловый спирт	Жидкость	1	20	1,199	[12]
		1	0÷63	1,1342 1,13635 0,8741	[4]
CH_2O_2, муравьиная кислота	»	1	20	1,025	[12]
		1	5÷104	0,99200 0,62514 0,6965	[12]
CH_3Br, метил бромистый	»	1	20	1,684	[12]
		1	—4÷28	1,41521 3,31698 11,3809	[12]
CH_3I, метил иодистый	»	1	20	1,272	[12]
		1	5÷39	1,144 4,0465 —2,7393	[12]

Вещество	Состояние	P, ат	t, °C	ρ или $\bar{\nu}$ в Å³/молек	Литература
$CHCl_3$, хлороформ	Жидкость	1	20	1,273	[12]
		1	0÷63	{1,16715; 4,66473; —1,74326}	[4]
C_2H_6, этан	»	1	—120÷—75	2,4	[23]
	Газ	1	—50÷50	3,78*	[32]
		1	100÷300	2,708*	[32]
C_2H_4, этилен	»	1	—100÷0	4,721*	[32]
		1	—50÷50	3,339*	[32]
		1	0÷100	3,146*	[32]
		100	—50÷50	2,280*	[32]
		100	0÷100	1,675*	[32]
C_2H_2, ацетилен	»	1	0	3,772	[10]
		1	0÷100	3,730	[10]
C_2H_6O, этиловый спирт	Жидкость	1	20	1,12	[12]
		1	27÷46	{1,02; 2,20}	[4]
$C_2H_6O_2$, этиленгликоль	»	1	20	0,6375	[12]
		1	11÷65	{0,0647; 1,7074; 0,200}	[12]
$C_2H_4O_2$, уксусная кислота	»	1	20	1,071	[12]
		1	16÷107	{1,063; 0,12656; 1,6876}	[4]
$C_2H_4O_2$, метилформиат	»	1	20	1,563	[12]
		1	0÷10	{0,35824; 10,598; —1,8285}	[12]
C_2H_3Br, этил бромистый	»	1	20	1,416	[12]
		1	—32÷54	{1,33703; 1,50135; 1,69}	[12]
C_2H_5I, этил иодистый	»	1	20	1,179	[12]
		1	10÷65	{1,152; 0,26032; 1,4181}	[12]
C_2H_5Cl, этил хлористый	»	1	20	1,706	[12]
		1	—32÷26	{1,52458; 2,81306; 1,56987}	[12]

Вещество	Состояние	P, атм	t, °C	$\alpha \cdot 10^{-4}$, град$^{-1}$	Литература
$C_2H_4Cl_2$, этилен хлористый	Жидкость	1	20	1,161	[12]
		1	28÷84	1,1803 1,0469 0,10342	[12]
C_2HCl_3O, хлораль	»	1	20	0,934	[12]
		1	13÷51	0,0685 −2,2139 5,6392	[12]
C_2H_3N, ацетонитрил	»	1	20	1,301	[4]
		1	6÷66	1,2116 1,728 1,0322	[12]
$C_2H_3NO_3$, азотноэтиловый эфир	»	1	20	1,299	[12]
		1	9÷72	1,0290 4,7013 −1,8413	[12]
C_2H_6S, диметилсульфид	»	1	20	1,092	[12]
		1	0÷111	1,01706 1,57066 0,19072	[12]
C_3H_8, пропан	»	1	−66÷−30	1,9	[25]
	Газ	20	20	3,130*	[30]
		20	40	3,640*	[30]
		100	20	2,480	[32]
		100	40	2,650	[32]
		100	60	3,130	[32]
		100	80	4,00	[32]
		100	100	5,100	[32]
		200	20	2,050	[32]
		200	40	2,040	[32]
		200	60	2,180	[32]
		200	80	2,410	[32]
		200	100	2,940	[32]
C_3H_6, пропилен	Жидкость	1	50	1,751*	[27]
C_3H_8O, изопропиловый спирт	»	1	20	1,034	[12]
		1	0÷83	1,04365 0,44303 12,7274	[12]
C_3H_8O, пропиловый спирт	»	1	20	0,806	[12]
		1	0÷94	0,7743 4,9689 −1,4060	[12]
C_3H_8O, аллиловый спирт	»	1	20	1,049	[12]
		1	0÷94	0,07019 1,8725 0,36452	[12]
$C_3H_8O_3$, пропиленовая кислота	»	1	20	1,102	[12]
		1	0÷133	1,0266 1,5487 0,04301	[12]
$C_3H_6O_2$, метилацетат	»	1	20	1,497	[12]
		1	0÷58	1,33862 0,87096 3,5562	[12]
$C_3H_6O_2$, этилформиат	»	1	20	1,417	[12]
		1	0÷63	0,36446 0,13538 3,9248	[12]
$C_3H_8O_3$, глицерин	»	1	20	0,505	[12]
C_3H_7Cl, пропил хлористый	»	1	20	1,427	[12]
		1	0÷42	1,3906 3,8313 −1,3859	[12]

Вещество	Состояние	P, атм	t, °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-3} (град)$^{-1}$	Литература
C_3H_7Cl, изопропил хлористый	Жидкость	1	20	1,591	[12]
		1	0÷34	{1,3996; 5,5287}	[12]
C_3H_7I, пропил иодистый	»	1	20	1,102	[12]
		1	10÷96	{1,0296; 1,8038; −0,0051}	[12]
C_3H_5Br, аллил бромистый	»	1	20	1,241	[12]
		1	0÷69	{1,2275; −0,44365; 2,5813}	[12]
C_3H_5I, аллил иодистый	»	1	20	1,091	[12]
		1	0÷101	{1,0529; 0,63672; 1,0036}	[12]
C_3H_5Cl, аллил хлористый	»	1	20	1,475	[12]
		1	9÷44	{1,3218; 5,078; −4,1915}	[12]
C_4H_{10}, бутан	» Газ	1	−20÷30	2,0	[25]
		20	20	2,26	[32]
		20	40	2,25	[32]
		20	60	2,47	[32]
		20	80	3,21	[32]
		20	100	4,46	[32]
		20	120	5,04	[32]
		100	20	1,65	[32]
		100	40	1,82	[32]
		100	60	1,84	[32]
		100	80	2,23	[32]
		100	100	3,06	[32]
		100	120	3,79	[32]
		200	20	1,46	[32]
		200	40	1,51	[32]
		200	60	1,48	[32]
		200	80	1,83	[32]
		200	100	2,55	[32]
		200	120	3,28	[32]
C_4H_{10}, изобутан (2-метилпропан)	»	20	20	2,40	[32]
		20	40	2,67	[32]
		20	60	3,00	[32]
		20	80	3,91	[32]
		20	100	6,06	[32]
		100	20	2,06	[32]
		100	40	2,08	[32]
		100	60	2,19	[32]
		100	80	2,45	[32]
		100	100	2,93	[32]
		200	20	1,82	[32]
		200	40	1,79	[32]
		200	60	1,82	[32]
		200	80	1,94	[32]
		200	100	2,18	[32]
$C_4H_{10}O$, бутиловый спирт	Жидкость	1	20	0,950	[12]
		1	6÷108	{0,83751; 2,8531; 0,19415}	[12]
$C_4H_{10}O$, этиловый (диэтиловый) эфир	»	1	20	1,656	[12]
		1	−16÷36	{1,513243; 2,35918; 4,0612}	[4]

Вещество	Состояние	P, мм.рт.ст.	t, °C	ρ·10³, кг/м³	Литература
$C_4H_8O_2$, масляная кислота	Жидкость	1	20	1,063	[12]
		1	0÷100	1,02573 0,83780 0,54654	[12]
$C_5H_8O_2$, пропилуксусная кислота	»	1	20	1,052	[12]
		1	16÷118	0,97625 2,3976 0,39145	[12]
C_6H_6O, метилэтилкетон	»	1	20	1,315	[12]
		1	0÷70	1,18654 3,27033 0,13365	[12]
$C_6H_{12}S$, диэтилсульфид	»	1	20	1,278	[12]
		1	0÷90	1,19643 1,90603 0,76821	[12]
C_5H_{12}, пентан	»	1	20	1,600	[12]
		1	0÷33	1,4646 3,00316 1,6084	[4]
		20	20	1,67	[30]
		20	40	1,67	[30]
		20	60	1,65	[30]
		20	80	2,09	[30]
		20	100	2,41	[30]
		20	120	2,96	[30]
		100	20	1,43	[30]
		100	40	1,49	[30]
		100	60	1,60	[30]
		100	80	1,76	[30]
		100	100	1,97	[30]
		100	120	2,25	[30]
		200	20	1,20	[30]
		200	40	1,35	[30]
		200	60	1,42	[30]
		200	80	1,53	[30]
		200	100	1,67	[30]
		200	120	1,83	[30]
C_5H_{10}, изопрен	»	1	—10÷	1,25	[25]
		1	50	1,398	[25]
		1	0	1,533	[25]
		1	20	1,680	[12]
		1	0÷27	1,46854 0,05656 0,0079	[10]
C_6H_{12}, изопентен	»	1	10÷30	1,6	[20]
C_5H_{10}, транс-пентен-2	»	1	0	1,46*	[27]
C_5H_{10}, цис-пентен-2	»	1	20	1,47*	[27]
C_5H_8, изопрен	»	1	20	1,667	[13]
		1	0÷33	1,4003 0,99733 5,00149	[10]
$C_6H_{12}O$, амиловый спирт	»	1	20	0,809	[12]
		1	15÷80	0,8001 0,4573 1,18458	[4]
$C_6H_{12}O$, диэтилкетон	»	1	20	1,233	[12]
		1	0÷95	1,15342 1,85396 0,39091	[12]
				1,487	

Вещество	Состояние	P, атм	t, °C	λ или λ̄, 10⁻⁴ кал/(см·с·°C)	Литература
$C_5H_{11}Br$, амил бромистый	Жидкость	1	20	1,102	[12]
		1	0÷80	$\begin{Bmatrix}1,02321\\1,90085\\0,19706\end{Bmatrix}$	[12]
$C_5H_{11}I$, амил иодистый	»	1	20	0,986	[12]
		1	20÷142	$\begin{Bmatrix}0,92668\\1,4047\\0,10696\end{Bmatrix}$	[12]
$C_5H_{11}Cl$, амил хлористый	»	1	20	1,208	[12]
		1	0÷100	$\begin{Bmatrix}1,17155\\0,50077\\1,30355\end{Bmatrix}$	[12]
C_5H_{14}, изопентан	»	1	20	1,445	[12]
		1	0÷55	$\begin{Bmatrix}1,37022\\0,97042\\2,9810\end{Bmatrix}$	[10]
C_5H_{10}, пиперилен	»	1	20	1,357	[12]
		1	0÷60	$\begin{Bmatrix}1,3423\\-0,34339\\3,8693\end{Bmatrix}$	[12]
C_6H_6, бензол	»	1	20	1,237	[12]
		1	11÷81	$\begin{Bmatrix}1,17626\\1,27776\\0,81648\end{Bmatrix}$	[4]
$C_6H_{12}O_2$, капроновая кислота	»	1	20	0,975	[12]
		1	16÷156	$\begin{Bmatrix}0,94413\\0,68359\\0,28586\end{Bmatrix}$	[12]
$C_6H_{14}O$, дипропиловый эфир	»	1	20	1,419	[12]
		1	0÷67	$\begin{Bmatrix}1,2672\\4,2023\\0,58573\end{Bmatrix}$	[12]
$C_6H_{14}O$, изопропиловый эфир	»	1	20	1,314	[12]
		1	0÷68	$\begin{Bmatrix}1,2132\\3,9318\\1,3644\end{Bmatrix}$	[12]
C_6H_6O, диметиловый эфир	»	1	20	1,346	[12]
		1	0÷88	$\begin{Bmatrix}1,2519\\2,3201\\0,35775\end{Bmatrix}$	[12]
C_6H_6O, фенол	»	1	20	1,090	[12]
		1	30÷157	$\begin{Bmatrix}0,8240\\0,10722\\0,4446\end{Bmatrix}$	[4]
$C_6H_{12}O_2$, этилгликолят	»	1	30	1,136	[12]
		1	0÷141	$\begin{Bmatrix}1,0603\\1,0983\\2,6657\end{Bmatrix}$	[12]
C_6H_7N, анилин	»	1	0	0,850	[4]
		1	20	0,808	[12]
		1	0÷141	$\begin{Bmatrix}0,87349\\0,8406\\0,10741\end{Bmatrix}$	[12]
$C_6H_6NO_2$, нитробензол	»	1	144÷184	$\begin{Bmatrix}0,8262\\0,95949\\0,12779\end{Bmatrix}$	[12]
C_7H_8, толуол	»	1	—90	1,015*	[27]
		1	0	1,050*	[27]
		1	60	1,138	[27]
C_7H_8O, о-крезол	»	1	86÷184	$\begin{Bmatrix}0,71072\\1,1464\\0,2242\end{Bmatrix}$	[12]

Вещество	Состояние	p, атм	t, °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-4} град$^{-1}$	Литература
C_7H_8O, м-крезол	Жидкость	1	76; 194	{0,77526; 0,27100; 0,3868}	[12]
C_7H_8O, п-крезол	»	1	66÷186	{0,86470; 0,53912; 0,64418}	[12]
$C_7H_{12}O_2$, этилацетат	»	1	20	1,162	[12]
		1	0÷194	{1,1501; 0,09036; 1,3015}	[12]
C_7H_7OCl, бензилхлористый	»	1	20	0,880	[12]
		1	12; 46	{0,85893; 0,44219; 0,25130}	[12]
C_8H_{18}, октан	Газ	20	100	1,39	[27]
		20	160	1,74	[27]
		20	200	2,25	[27]
		20	240	3,39	[27]
		20	280	7,00	[27]
		100	100	1,22	[27]
		100	160	1,39	[27]
		100	200	1,57	[27]
		100	240	1,88	[27]
		100	260	2,49	[27]
		200	100	1,11	[27]
		200	160	1,19	[27]
		200	200	1,28	[27]
		200	240	1,39	[27]
		200	280	1,44	[27]
C_8H_{18}, изооктан	Жидкость	1	0	1,158*	[27]
$C_{18}H_{18}$, этилбензол	»	1	0	0,9020*	[27]
		1	20	0,961	[12]
		1	60	1,067*	[27]
		1	24÷131	{0,86172; 2,0344; 0,18319}	[12]
C_8H_{11}, м-ксилол	»	1	0	1,09	[27]
		1	100	1,036*	[27]
C_8H_{12}, м-изоксилол	»	1	0	0,99	[27]
		1	50	1,134*	[27]
C_8H_{10}, о-ксилол	»	1	0	0,97	[27]
		1	50	0,9076*	[27]
C_8H_{20}, октан	»	1	0	1,064*	[27]
$C_8H_{17}O_2$, бензойнокислый этил	»	1	20	0,900	[12]
		1	0÷150	{0,80006; 0,8229; 0,12084}	[12]
$C_{10}H_{22}$, декан	Газ	20	40	1,061	[27]
		20	60	1,116	[27]
		20	80	1,187	[27]
		20	100	1,266	[27]
		20	120	1,361	[27]
		100	40	0,970	[27]
		100	60	1,010	[27]
		100	80	1,051	[27]
		100	100	1,096	[27]
		100	120	1,138	[27]
		200	40	0,925	[27]
		200	60	0,956	[27]
		200	80	0,987	[27]
		200	100	1,016	[27]
		200	120	1,043	[27]
$C_{11}H_{24}$, ундекан	Жидкость	1	50	1,076*	[27]

Вещество	Состояние	p, атм	t, °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-4} град$^{-1}$	Литература
$C_{12}H_{26}$, додекан	Жидкость	1	50	1,020*	[27]
$C_8H_{14}O_2$, бензойнокислый эфир	»	1	0	0,87	[12]
		1	20	0,848	[12]
		1	0÷198	$\begin{Bmatrix} 0,81711 \\ 0,7377 \\ 0,10693 \end{Bmatrix}$	[12]
$C_{13}H_{28}$, тридекан	»	1	50	0,9883*	[27]
$C_{14}H_{30}$, тетрадекан	»	1	100	1,036*	[27]
$C_{15}H_{32}$, пентадекан	»	1	100	1,019*	[27]
$C_{16}H_{34}$, гексадекан	»	1	100	0,995*	[27]
$C_{17}H_{36}$, гептадекан	»	1	200	1,584*	[27]
$C_{18}H_{38}$, октадекан	»	1	200	1,148*	[27]
$C_{18}H_{34}O_2$, олеиновая кислота	»	1	20	0,721	[12]
		1	—	$\begin{Bmatrix} 0,68215 \\ 1,14013 \\ -0,539 \end{Bmatrix}$	[12]
$C_{19}H_{40}$, нонадекан	»	1	200	1,117*	[27]
$C_{20}H_{42}$, эйкозан	»	1	200	1,037*	[27]

* Тангенсы по плоскости, проведенной в указанной работе.

Таблица 9.14

Температурный коэффициент объемного расширения жидкостей и газов. Смеси и сплавы

Пояснения те же, что и к табл. 9.12.

Вещество	Состояние	p, атм	t, °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-4} град$^{-1}$	Литература
Бензин Б-70	Жидкость	1	40	1,496	[5]
		1	150	1,752	[5]
Воздух	Газ	1	0÷100	3,670	[10]
		10	100	0,3693	[28]
		10	200	0,3593	[28]
		100	100	0,3960	[28]
		100	200	0,3879	[28]
		1000	100	1,376	[28]
		1000	200	0,896	[28]
Керосин Т-1	Жидкость	1	20	0,955	[12]
		1	24÷120	$\begin{Bmatrix} 0,8004 \\ 1,396 \end{Bmatrix}$	[12]
		1	20	1,645*	[27]
Масло: машинное МС-20	»	1	— 10	0,694	[5]
		1	30	0,638	[5]
		1	70	0,655	[5]
		1	100	0,669	[5]
		1	150	0,692	[5]
машинное МК-22	»	1	10	0,856	[5]
		1	50	0,886	[5]
		1	100	0,926	[5]
		1	150	0,943	[5]
смазывание	»	1	20	0,721	[12]
трансформаторное	»	1	— 20	0,67	[5]
		1	0	0,680	[5]
		1	50	0,705	[5]
		1	100	0,730	[5]

Вещество	Состояние	P, атм	t, °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-4} град$^{-1}$	Литература
Петролейный эфир	Жидкость	1	20	2,26	[12]
		1	−190÷0	{1,46; 1,60}	[12]
Смеси:					
50% C_2H_5O — 50% H_2O	»	1	0÷39	{0,7450; 1,85; 0,13}	[4]
30% C_2H_5O — 70% H_2O	»	1	18÷39	{0,2960; 10,790; 11,87}	[4]
44,5% Pb — 55,5% Bi	»	1	250	0,117*	[27]
		1	650	0,129*	[27]
25% Na — 75% K	»	1	100	0,209*	[27]
		1	300	0,301*	[27]
		1	500	0,319*	[27]
		1	650	0,349*	[27]
40% $NaNO_3$ — 53% KNO_3 — 7% $NaNO_2$	»	1	100	0,407*	[27]
		1	600	0,389*	[27]
Сплавы:					
50% Bi — 50% Hg	»	1	163÷280	0,134	[1]
67% Bi — 33% Pb	»	1	130	0,138	
57% Bi — 43% Pb	»	1	140	0,122	
70% Bi — 30% Tl	»	1	210÷320	0,131	
90% Cd — 10% Zn	»	1	250	0,153	
80% Hg — 20% Pb	»	1	250÷300	0,114	
25% Hg — 75% Pb	»	1	250÷300	0,135	
95,1% Hg — 4,9% Tl	»	1	20÷320	0,179	
74% Hg — 26% Tl	»	1	20÷300	0,161	
57,1% Hg — 42,9% Tl	»	1	20÷300	0,137	
86% Hg — 14% Zn	»	1	300÷350	0,184	
60,6% Hg — 39,4% Zn	»	1	300÷350	0,146	
50,7% Hg — 49,3% Zn	»	1	330÷360	0,2	
77% K — 23% Na	»	1	10÷100	0,286	
90% Pb — 10% Sb	»	1	260	0,123	
68% Sn — 32% Cd	»	1	176	0,123	
80% Tl — 20% Sb	»	1	200÷225	0,227	

* Вычислено по данным, приведенным в указанной литературе.

9.4. ЭФФЕКТ ДЖОУЛЯ—ТОМСОНА

Эффектом Джоуля—Томсона называется явление, заключающееся в изменении температуры газа при его адиабатическом расширении. Количественной характеристикой эффекта служит коэффициент Джоуля—Томсона:

$$\mu = \Delta T/\Delta P, \text{ град/атм},$$

где ΔT — изменение температуры; ΔP — изменение давления газа. Коэффициент Джоуля—Томсона связан с температурным коэффициентом объемного расширения β и теплоемкостью газа при постоянном давлении C_P соотношением:

$$\mu = V(\beta T - 1)/C_P,$$

где V — объем; T — температура газа. Для реальных газов существует некоторая область температур и давлений, внутри которой $\mu > 0$. Эта область ограничена по отрезкам оси температур и так называемой кривой инверсии, на которой $\mu = 0$; вне этой области $\mu < 0$. Для идеального газа $\mu = 0$.

Таблица 9.15

Коэффициент Джоуля—Томсона для гелия при давлении до 200 атм [4,38]

t, °C	μ, град/атм	t, °C	μ, град/атм	t, °C	μ, град/атм
−190	−0,083	−50	−0,0606	150	−0,0645
−170	−0,045	0	−0,0616	200	−0,0641
−150	−0,052	50	−0,0631	250	−0,0629
−100	−0,0564	100	−0,0638	300	−0,0607

Таблица 9.16

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*, для аргона [33]

t, °C	Давление, атм					
	1	20	40	100	150	200
—150	1,81	—	0,002	0,025	—0,046	—0,066
—125	1,111	1,045	0,166	0,039	0,000	—0,011
—100	0,860	0,800	0,655	0,285	0,094	0,040
—75	0,700	0,678	0,618	0,496	0,213	0,130
—50	0,585	0,574	0,522	0,396	0,265	0,168
—25	0,505	0,479	0,439	0,362	0,267	0,200
0	0,451	0,436	0,370	0,305	0,236	0,192
25	0,371	0,350	0,317	0,264	0,212	0,175
50	0,322	0,304	0,270	0,231	0,189	0,161
100	0,242	0,224	0,203	0,170	0,140	0,127
150	0,183	0,171	0,154	0,130	0,109	0,096
200	0,137	0,126	0,115	0,095	0,079	0,068
300	0,064	0,060	0,055	0,046	0,037	0,028

Таблица 9.17

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*, для азота [33]

t, °C	Давление, атм					
	1	20	40	100	150	200
—150	1,265	1,128	0,083	0,020	—0,008	—0,027
—125	0,855	0,792	0,648	0,133	0,040	0,006
—100	0,649	0,594	0,491	0,274	0,144	0,056
—75	0,501	0,466	0,430	0,269	0,149	0,078
—50	0,397	0,376	0,324	0,237	0,152	0,091
—25	0,322	0,301	0,264	0,209	0,142	0,092
0	0,267	0,250	0,220	0,169	0,124	0,087
25	0,222	0,206	0,181	0,140	0,105	0,078
50	0,186	0,171	0,151	0,117	0,087	0,066
100	0,129	0,119	0,103	0,077	0,059	0,042
150	0,087	0,079	0,069	0,049	0,031	0,022
200	0,056	0,048	0,040	0,026	0,014	0,006
300	0,014	0,009	0,001	—0,007	—0,013	—0,017

Таблица 9.18

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*, для водорода [33]

T, °K	Давление, атм					
	1	20	40	100	140	160
60	0,391	0,287	0,132	0,035	—0,017	—
65	0,313	0,259	0,136	0,052	0,000	—0,054
70	0,267	0,234	0,130	0,050	0,035	—0,030
75	0,250	0,212	0,131	0,062	0,034	—0,036
80	0,220	0,192	0,127	0,061	0,001	—0,037
85	0,195	0,174	0,122	0,059	—0,004	—0,040

Таблица 9.19

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*, для аммиака [33]

P, атм	Температура, °C					
	0	50	75	100	125	150
1	1,87	1,68	1,43	1,38	1,14	1,08
20	1,62	1,50	1,32	1,27	1,01	0,949
60	1,45	1,36	1,21	1,05	0,888	0,789
100	0,965	0,877	0,796	0,705	0,700	0,735
200	0,290	0,260	0,236	0,219	0,320	0,392
300	—0,038	0,015	0,035	0,046	0,120	0,225
400	—0,126	—0,061	0,000	0,025	0,0896	—0,200
1000	—0,540	—0,491	—0,457	—0,040	—0,039	—0,0618
3000	—0,669	—0,668	0,065	0,064	0,0440	—0,1001

Таблица 9.20

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*, для кислорода [33]

t, °C	Давление, атм					
	1	20	40	100	150	200
—170	2,00	—0,007	—	—	—	—
—150	1,65	0,670	0,013	—0,008	—0,020	—0,032
—150	1,265	1,128	0,083	0,020	0,008	—0,027
—137,5	0,996	0,930	0,402	0,065	0,014	—0,010
—125	0,855	0,792	0,648	0,133	0,040	0,006
—112,5	0,742	0,680	0,529	0,227	0,069	0,035
—100	0,649	0,594	0,491	0,274	0,114	0,068
—75	0,501	0,466	0,430	0,269	0,149	0,078
—50	0,397	0,376	0,324	0,237	0,152	0,091
—25	0,322	0,301	0,264	0,209	0,142	0,092
0	0,267	0,250	0,220	0,169	0,124	0,087
25	0,222	0,206	0,181	0,140	0,105	0,078
50	0,186	0,171	0,151	0,117	0,087	0,066
75	0,155	0,144	0,125	0,094	0,069	0,053
100	0,129	0,119	0,103	0,077	0,055	0,042
150	0,087	0,079	0,068	0,049	0,031	0,022
200	0,056	0,048	0,040	0,026	0,014	0,006
250	0,033	0,026	0,018	0,007	0,000	—0,006
300	0,014	0,009	0,001	—0,007	—0,013	—0,017

Таблица 9.21

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*, для окиси углерода [33]

P, атм	Температура, °C					
	0	25	50	75	100	125
1	0,295	0,251	0,213	0,179	0,153	0,104
50	0,240	0,205	0,175	0,147	0,122	0,085
100	0,190	0,162	0,137	0,115	0,095	0,067
200	0,093	0,084	0,072	0,060	0,049	0,032
300	0,034	0,031	0,027	0,022	0,015	0,005
400	0,001	0,001	0,002	—0,004	—0,008	—0,014
600	—0,034	—0,034	—0,034	—0,034	—0,034	—0,030
1000	0,056	—0,056	0,056	—0,057	—0,058	—0,059
3000	—0,065	—0,066	—0,067	—0,068	—0,068	—0,071

Таблица 9.22

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*, для углекислого газа [33]

t, °C	Давление, атм					
	1	25	50	100	140	200
−75	—	−0,020	−0,021	−0,023	−0,024	−0,029
−50	2,413	−0,014	−0,015	−0,016	−0,018	−0,025
−25	1,060	0,000	−0,003	−0,005	0,006	−0,012
0	1,200	1,402	0,037	0,022	0,012	0,005
20	1,105	1,130	0,144	0,070	0,042	0,027
40	0,958	0,966	0,971	0,262	0,108	0,046
60	0,836	0,833	0,866	0,625	0,203	0,126
80	0,735	0,724	0,696	0,597	0,403	0,196
100	0,649	0,638	0,608	0,541	0,432	0,256
125	0,560	0,545	0,516	0,475	0,413	0,292
150	0,469	0,470	0,443	0,416	0,376	0,251
200	0,373	0,358	0,340	0,315	0,289	0,246
250	0,309	0,289	0,263	0,242	0,224	0,198
300	0,253	0,243	0,209	0,187	0,170	0,151

Таблица 9.23

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*, для метана [33]

P, атм	Температура, °C					
	21,1	37,8	61,1	71,1	87,8	104,4
0	0,405	0,359	0,318	0,283	0,253	0,227
17	0,425	0,373	0,333	0,296	0,267	0,239
34	0,426	0,376	0,334	0,299	0,268	0,241
51	0,410	0,365	0,324	0,290	0,260	0,233
68	0,399	0,348	0,308	0,272	0,243	0,219
85,1	0,362	0,322	0,284	0,254	0,223	0,199
102,1	0,332	0,294	0,258	0,229	0,202	0,180

Таблица 9.24

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*, для этана [33]

P, атм	Температура, °C					
	21,1	37,8	54,4	71,1	87,8	104,4
0	0,939	0,833	0,737	0,657	0,586	0,498
17	1,217	1,037	0,882	0,760	0,656	0,572
34	1,55	1,24	1,02	0,849	0,711	0,596
51	—	—	0,998	0,880	0,715	0,586
68	—	—	0,790	0,841	0,669	0,543
85,1	—	—	0,584	0,640	0,579	0,478
102,1	—	—	0,253	0,333	0,429	0,399

Таблица 9.25

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*, для воздуха [4]

t, °C	Давление, атм					
	1	30	60	100	150	180
−160	—		0,0450	0,0185	0,0070	0,0055
−140	1,0755	1,0240	0,1125	0,0440	0,0120	0,0115
−120	0,7370	0,7155	0,5150	0,1535	0,500	0,0200
−100	0,5895	0,5700	0,4820	0,2770	0,1460	0,0655
−75	0,4795	0,4655	0,3830	0,2880	0,1855	0,1136
−50	0,3910	0,3800	0,3195	0,2505	0,1825	0,1270
−25	0,3290	0,3010	0,2610	0,2130	0,1650	0,1240
0	0,2746	0,2577	0,2300	0,1922	0,1445	0,1037
25	0,2320	0,2173	0,1932	0,1550	0,1249	0,0939
50	0,1966	0,1830	0,1671	0,1310	0,1070	0,0829
75	0,1614	0,1506	0,1253	0,1057	0,0880	0,0707
100	0,1355	0,1258	0,1062	0,0884	0,0726	0,0560
150	0,0961	0,0883	0,0732	0,0600	0,0482	0,0370
250	0,0400	0,0355	0,0254	0,0165	0,0092	0,0027

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техническая энциклопедия. Справочник физических, химических и технологических величин. Т. II. М., ОНТИ, 1930.
2. Progress in crystall physics. V. 1. Ed. R. S. Krishnan. Wiswewathan, 1950.
3. Оптические материалы для инфракрасной техники. Справочное издание. М., «Наука», 1965. (Авт.: Воронова Г. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И., Петров И. П.)
4. Smithsonian physical tables. 9-th ed., Washington, 1954.
5. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов. М., Физматгиз, 1959.
6. Теплофизические свойства веществ. Справочник. Под ред. Н. Б. Варгафтика. М., Госэнергоиздат, 1956.
7. Кей Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических констант. Пер. с англ. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз, 1962.
8. Физико-химические свойства элементов. Справочник. Под ред. Г. В. Самсонова. Киев, «Наукова думка», 1965.
9. Филипп М. А., Семенова Е. И. Свойства редких элементов. Справочник. М., Металлургиздат, 1953.
10. Handbook of Chemistry and Physics. 37-th ed., Cleveland, Ohio, 1956.
11. Жданов Г. С. Физика твердого тела. М., Изд-во МГУ, 1961.
12. Справочник химика. Т. I. Под ред. Б. П. Никольского. Изд. 2-е. М.—Л., Госхимиздат, 1962.
13. Физика и техника инфракрасного излучения. Пер. с англ. М., «Советское радио», 1965. (Авт.: Джонсон Э., Мак-Фи Р. Х., Пиккетт Дж. Е. и др.)
14. Славинский М. Н. Физико-химические свойства элементов. М., Металлургиздат, 1952.
15. Самсонов Г. В. Тугоплавкие соединения. М., Металлургиздат, 1963.
16. Geiml K., Murphy H. S. J. Amer. Chem. Soc., 1954, v. 2, p. 343.
17. Свойства металлов и сплавов. М., Металлургиздат, 1949.
18. Энциклопедия металлофизики. Т. I. М., ОНТИ, 1937.
19. Austin L. B. J. Amer. Ceramic Soc., 1959, v. 15, p. 10.
20. Редкие металлы. Справочник. Пер. с англ. М., «Мир», 1961.
21. Справочник по машиностроительным материалам. Т. I—IV. М., Машгиз, 1959—1960.
22. Справочник по авиационным материалам. Изд. 5-е. Т. I—5. Под ред. А. Т. Туманова. М., «Машиностроение», 1959—1964.
23. Славин Л. О., Штейнберг Е. Б. Металлы и сплавы в химическом машиностроении и аппаратостроении. М., Машгиз, 1951.
24. Либерман Л. Я., Пейсикис М. И. Справочник по свойствам сталей, применяемых в котлотурбостроении. М., Машгиз, 1956.
25. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения. М., Госэнергоиздат, 1963. (Авт.: Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б.)
26. Техническая энциклопедия. Справочник физических, химических и технологических величин. Т. V. М., ОНТИ, 1930.
27. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.
28. Henning F. Wärmetechnische Richtwerte, Berlin, 1958.
29. Michels A. Physica, 1952, v. 18, p. 121.
30. Day F., Felsing M. J. Amer. Chem. Soc., 1951, v. 73, p. 4839.
31. Schelder W. J. Chem. Phys., 1951, v. 19, p. 845.
32. Физико-химические свойства индивидуальных углеводородов. Справочник. Под ред. В. М. Татевского. М., Гостоптехиздат, 1960.
33. Landolt-Börnstein. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Geophysik, Technik, Aufl. 6, Bd 2, Teil 4, Berlin, 1961.

ГЛАВА 10

ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Теплоемкость характеризует восприимчивость тела (системы) к нагреванию в конкретных термодинамических условиях и определяется как отношение количества теплоты ΔQ, сообщенной телу, к вызванному при этом повышению температуры ΔT: $C = \lim_{\Delta T \to 0} \Delta Q/\Delta T$.

Теплоемкость всегда положительна и при низких температурах ($T \to 0$ °K) стремится к нулю.

Для количественной характеристики теплоемкости вещества обычно используют удельную, молярную или объемную теплоемкости, которые определяются соответственно как теплоемкость единицы массы, одного моля или единицы объема этого вещества. Единицами теплоемкости служат при этом *дж/(кг·град)*, *дж/(моль·град)*, *дж/(м³·град)*; аналогичные единицы, основанные на калории (1 *кал* = 4,1855 *дж*), рассматриваются в настоящее время как внесистемные.

Теплоемкость тела (системы) зависит от условий нагревания. В простых системах наиболее употребительны теплоемкость C_p, которая характеризует теплоемкость при нагревании в условиях постоянства давления, и C_V, которая характеризует теплоемкость при нагревании с сохранением постоянного объема. Эти величины связаны соотношением

$$C_p - C_V = \beta^2 TV/\chi,$$

где β — температурный коэффициент объемного расширения; χ — изотермическая сжимаемость вещества.

Обобщенным определением теплоемкости, пригодным для любых систем и процессов, в том числе и при наличии внешних полей, служит соотношение $C = T(\partial S/\partial T)$, где S — энтропия системы.

30.1. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ И ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Таблица 30.1

Теплоемкость элементов при температуре 298,15 С и давлении 760 *мм рт. ст.*

Вещество	C_p, Дж/(моль·град)	Литература	Вещество	C_p, Дж/(моль·град)	Литература	Вещество	C_p, Дж/(моль·град)	Литература
Ac	27,2	[1]	α-Fe	25,02	[3]	P_4 (газ)	67,2	[1]
Ag	25,49	[1]	γ-Fe	26,74	[3]	Pb	26,44	[2]
Al	24,35	[2]	Ga	26,07	[1]	Pd	25,52	[2]
Ar (газ)	20,79	[3]	Gd	36,26	[3]	Pt	25,85	[2]
As	24,64	[1]	Ge	23,4	[1]	Rb	30,88	[3]
As (газ)	20,79	[1]	H (газ)	20,79	[3]	Rb (газ)	20,79	[1]
As_2 (газ)	34,98	[1]	H_2 (газ)	28,83	[3]	Rb_2 (газ)	37,98	[1]
As_4 (газ)	77,32	[1]	HD (газ)	29,20	[3]	Re	25,31	[2]
At	38,6	[1]	Hf	25,5	[1]	Rh	25,42	[2]
At_2 (газ)	37,2	[1]	Hg	27,98	[3]	Ru	23,85	[2]
Au	25,23	[2]	Ho	27,15	[3]	S (ромбическая)	22,60	[3]
B (кристалл)	11,06	[3]	In	26,7	[1]	S (моноклинная)	23,64	[3]
B (аморфный)	11,96	[3]	Ir	25,09	[2]	S (газ)	23,65	[3]
B (газ)	20,80	[3]	I	54,44	[3]	S_2 (газ)	32,47	[3]
B_2 (газ)	30,06	[3]	I (газ)	20,79	[3]	S_8 (газ)	146,3	[3]
Ba	26,36	[1]	I_2 (газ)	36,9	[3]	Sb	25,2	[2]
Ba_2 (газ)	20,79	[1]	K	29,96	[3]	Sb (газ)	20,79	[1]
Be	16,44	[1]	K (газ)	20,79	[3]	Sb_2 (газ)	36,4	[1]
Bi	25,52	[3]	K_2 (газ)	37,69	[3]	Sb_4 (газ)	80,98	[1]
Br	75,71	[3]	Kr (газ)	20,79	[3]	Se	25,36	[3]
Br (газ)	20,79	[3]	La	27,8	[3]	Se_2 (газ)	35,24	[3]
Br_2 (газ)	36,1	[3]	Li	24,85	[3]	Si	19,53	[3]
C (графит)	8,53	[3]	Li_2 (газ)	36,07	[3]	Sn (белый)	26,36	[3]
C (алмаз)	6,12	[3]	Mg	24,6	[3]	Sn (серый)	25,77	[3]
C (газ)	20,84	[1]	α-Mn	26,32	[3]	Sr	26,11	[2]
C_2 (газ)	49,3	[1]	γ-Mn	27,57	[3]	T_2 (газ, нормальный)	28,44	[3]
Ca	25,28	[3]	Mo	23,8	[1]	Ta	25,4	[1]
Cd	26,32	[2]	N (газ)	20,79	[3]	Tb	28,95	[3]
Ce	28,6	[1]	N_2 (газ)	29,12	[3]	Te	25,7	[2]
Cl (газ)	21,84	[3]	Na	28,12	[3]	Th	27,32	[1]
Cl_2 (газ)	33,84	[3]	Na (газ)	20,79	[3]	Ti	25,02	[1]
Co	24,6	[1]	Na_2 (газ)	37,50	[3]	Ti (газ)	24,43	[2]
Cr	23,22	[2]	Nb	24,89	[2]	Tl	26,32	[2]
Cs	31,4	[1]	Nd	27,49	[4]	U	27,8	[1]
Cs (газ)	20,79	[3]	Ne (газ)	20,79	[3]	V	24,7	[1]
Cu	24,52	[2]	Ni	25,77	[2]	W	24,8	[1]
D_2 (газ, нормальный)	29,19	[3]	O (газ)	21,90	[3]	Xe (газ)	20,79	[3]
			O_2 (газ)	29,36	[3]	Zn	25,40	[2]
Dy	28,17	[3]	O_3 (газ)	39,20	[3]	Zr	25,15	[2]
Er	28,11	[3]	Os	24,69	[2]	Zr (газ)	26,64	[3]
F (газ)	22,75	[3]	P	24,69	[2]			
F_2 (газ)	31,32	[3]	P_2 (газ)	32,0	[1]			

Таблица 10.2

Теплоемкость неорганических соединений при температуре 298,15°К и давлении 760 *мм рт. ст.*

В скобках приведены расчетные значения.

Вещество	C_p°, кал/(моль·град)	Литература	Вещество	C_p°, кал/(моль·град)	Литература	Вещество	C_p°, кал/(моль·град)	Литература
AgI^*	52,36	[3]	B_2H_6 (газ)	79,5	[4]	$CrSO_4$	31,60	[3]
$AgHg$ (газ)	30,48	[2]	BN	12,10	[7]	$CrSO_4$	90,02	[3]
Ag_2CO_3	112,1	[3]	BN	10,1	[6]	$CuSiO_3$	90,0	[2]
AgCl	40,78	[3]	BN (газ)	20,46	[2]	Cu_2SiO_4	129,0	[3]
AgCl (газ)	35,77	[2]	BO (газ)	29,20	[3]	$CuTiO_3$	97,85	[3]
$AgClO_3$	87,32	[3]	B_2O_3 (газ)	66,34	[3]	$CdCl_2$	73,94	[3]
Ag_2CrO_4	142,3	[3]	B_2O_3	92,05	[3]	$CdCl_2$	76,81	[7]
AgJ	29,25	[4]	$BaCO_3$	85,36	[3]	CdI_2	77,03	[3]
AgI	54,43	[3]	$BaCl_2$	(75,3)	[2]	$CdMg$	51,66	[3]
AgI (газ)	36,78	[2]	$BaCl_2 \cdot 2H_2O$	106,3	[3]	CdO	43,43	[3]
$AgIO_3$	102,9	[3]	BaF_2	71,21	[3]	CdS	55,2	[3]
$AgMg$	49,37	[2]	BaH (газ)	20,3	[4]	$CdSO_4$	99,60	[3]
$AgNO_3$	79,2	[3]	$BaMnO_4$	140,6	[4]	CdSe	45,00	[3]
Ag_2NO_3	93,06	[2]	$Ba(NO_3)_2$	151,4	[3]	$CdSiO_3$	88,56	[3]
Ag_2O	81,27	[5]	BaO	47,23	[3]	CdTe	46,86	[4]
Ag_2O	66,56	[3]	$BaSO_4$	101,8	[3]	CeO_2	65,30	[5]
Ag_2S	75,31	[3]	$BaTiO_3$	102,5	[3]	$Ce(SO_4)_2$	276,1	[2]
Ag_2SO_4	131,4	[3]	BeH (газ)	27,00	[4]	ClF (газ)	32,09	[3]
Ag_3Sb	101,7	[2]	Be_3N_2	09,04	[3]	ClF_3 (газ)	65,08	[3]
Ag_2Se	83,08	[2]	BeO	25,40	[3]	Cl_2O (газ)	45,6	[3]
Ag_2Te	86,65	[2]	$BeSO_4$	87,9	[3]	ClO_2 (газ)	41,84	[3]
$AlAs_2$	75,31	[3]	$BiCl_3$ (газ)	79,56	[2]	$CuCl_2$	78,49	[3]
$AlAs_3$	100,8	[3]	Bi_2O_3	113,5	[3]	CuF_2	68,78	[3]
AlBr (газ)	36,87	[3]	Bi_2Te	75,85	[3]	CuC	52,72	[3]
$AlBr_3$	102,5	[4]	Bi_2Te_3	131,8	[3]	CuO	85,31	[3]
Al_4C_3	146,2	[3]	BrCl (газ)	34,96	[3]	Cu_2O	123,1	[3]
AlCl (газ)	34,66	[3]	BrF (газ)	32,97	[3]	CuS	(47,49)	[2]
AlCr	48,12	[3]	BrF_3	124,4	[3]	$CuSO_4$	(128,3)	[2]
AlF (газ)	31,93	[3]	BrF_5 (газ)	66,71	[3]	Cu_2C_2	96,24	[3]
AlF_3	75,14	[3]	BrF_5 (газ)	100,1	[3]	Cu_4C	108,4	[2]
AlN	32,6	[2]	BrJ (газ)	36,46	[3]	$Cr(CO)_6$ (газ)	213,3	[3]
Al_2O_3	79,01	[3]	CN (газ)	29,16	[2]	$CrCl_2$	78,15	[3]
$Al_2O_3 \cdot H_2O$	121,3	[3]	C_2N_2 (газ)	56,90	[3]	$CrCl_3$	91,80	[3]
$Al_2(SO_4)_3$	259,6	[3]	CO (газ)	29,15	[3]	CrF_2	78,74	[3]
Al_2LiO_3	136,4	[3]	CO_2 (газ)	37,19	[3]	Cr_2O_3	118,7	[3]
$AsCl_3$ (газ)	75,7	[2]	COS (газ)	41,03	[3]	Cr_2O_3	104,6	[3]
AsF_3	126,6	[2]	C_3O_2 (газ)	65,75	[3]	CrSi	91,17	[4]
AsF_5 (газ)	85,6	[2]	CF (газ)	29,84	[4]	CrAr	51,95	[4]
AsH_3	38,02	[3]	CS (газ)	29,82	[2]	CsCl	(52,63)	[2]
AsN (газ)	30,42	[4]	CS_2	75,95	[3]	$CsClO_4$	107,6	[3]
As_2O_3	95,60	[3]	CS_2 (газ)	45,85	[3]	CsF	(50,03)	[2]
As_2O_5	116,5	[3]	CSe_2 (газ)	50,04	[3]	CsH (газ)	29,83	[4]
AuCl (газ)	36,44	[2]	CaC_2	62,31	[3]	CsI	51,68	[4]
$AuSn_2$	77,2	[3]	$CaCO_3$	81,80	[2]	CsLi	36,39	[2]
AuSn	62,3	[4]	$CaCl_2$	72,61	[3]	CsBr	54,74	[3]
BBr (газ)	32,88	[3]	CaF_2	71,13	[2]	CuBr (газ)	36,05	[2]
BBr_3 (газ)	67,97	[3]	CaF_2	67,05	[3]	CuCl (газ)	35,1	[2]
B_4C	52,51	[7]	$CaFe_2O_4$	153,7	[3]	$CuCl_2$	75,60	[3]
BCl (газ)	31,69	[3]	Ca_3N_2	113,0	[3]	Cu_2Cl_2	97,03	[3]
BCl_3 (газ)	62,61	[3]	$Ca(NO_3)_2$	149,2	[3]	CuH (газ)	35,20	[4]
BF (газ)	29,64	[3]	CaO	42,8	[3]	CuJ	56,04	[3]
BF_3 (газ)	50,53	[3]	$Ca(OH)_2$	87,49	[3]	CuI (газ)	36,36	[2]
BH (газ)	29,16	[3]	$Ca(PO_3)_2$	145,1	[3]	Cu_3N	90,79	[3]
B_2H_6 (газ)	56,40	[3]	$Ca_3(PO_4)_2$	231,6	[3]	CuO	44,78	[3]
B_5H_9	210,3	[3]	β-$Ca_3(PO_4)_2$	228,2	[3]	CuO	42,30	[3]
BH_3C_2	81,34	[3]	CaS	47,40	[3]	Cu_2O	65,61	[3]

Вещество	S_{298}° (кал/(моль·град))	Литература
CuS	47,89	[3]
Cu_2S	76,22	[3]
$CuSO_4$	100,6	[2]
CuSb	102,4	[3]
CuSe	88,7	[3]
D_2O	84,35	[3]
D_2O (газ)	34,27	[3]
F_2O	43,30	[3]
Fe_3C	108,0	[3]
Fe_2C	107,1	[3]
$FeCO_3$	82,13	[3]
$Fe(CO)_5$	174	[3]
$FeCl_2$	76,33	[3]
$FeCl_3$	94,90	[3]
$FeCu_2O_2$	123,4	[3]
$FeCr_2O_4$	35,4	[3]
FeF_3	68,12	[3]
Fe_4N	(70,0)	[2]
FeO	52,01	[3]
Fe_2O_3	103,7	[3]
Fe_3O_4	123,4	[3]
Fe_2O_3	151,6	[10]
FeS	54,64	[3]
FeS_2	61,92	[3]
FeSi	50,21	[3]
Fe_2SiO_4	139,8	[3]
$FeTiO_3$	99,10	[3]
Ga_2O_3	91,84	[3]
$GeBr_4$	101,8	[2]
GeF_2	81,88	[3]
GeH_4	44,76	[2]
GeH_3Cl	54,77	[3]
GeI_4	104,2	[3]
H_3BO_3	81,31	[3]
HBr (газ)	59,19	[3]
HCN	71,00	[3]
HCN (газ)	36,01*	[7]
HCl (газ)	20,12	[3]
HF (газ)	29,14	[3]
HI (газ)	49,12	[3]
HN_3 (газ)	45,69	[3]
HNO_2 (газ)	45,81	[3]
HNO_3	109,8	[3]
HNO_3 (газ)	53,56	[3]
$HNO_3 \cdot H_2O$	182,5	[3]
H_2O	75,45	[3]
H_2O (газ)	33,58	[7]
H_2O_2	59,33	[3]
H_2O_2 (газ)	43,14	[3]
HOCl (газ)	57,20	[3]
H_3PO_4	106,1	[3]
HS (газ)	52,32	[3]
H_2S (газ)	34,22	[3]
H_4SiO_4	178,9	[3]
$H_2SO_4 \cdot H_2O$	275,1	[3]
H_2Se (газ)	54,66	[3]
H_2Te (газ)	56,56	[3]
$HClO_4$	120,5	[3]
HIO_3	60,9	[3]

Вещество	S_{298}° (кал/(моль·град))	Литература
HgBr (газ)	56,30	[2]
$HgBr_2$ (газ)	60,25	[2]
HgCl	50,84	[3]
HgCl (газ)	56,15	[2]
$HgCl_2$	(76,90)	[3]
$HgCl_2$ (газ)	68,20	[2]
HgI_2	77,40	[3]
HgI_2 (газ)	61,09	[2]
HgO	44,05	[3]
HgS	(60,17)	[2]
Hg_2SO_4	132,0	[3]
HBr (газ)	36,48	[3]
HCl (газ)	36,50	[3]
HF (газ)	33,47	[3]
HF_2 (газ)	99,10	[3]
InO_3	67,32	[3]
KBH_4	96,57	[3]
KBO_2	(68,45)	[2]
KBr	52,51	[3]
KBr (газ)	56,31	[2]
$KBrO_3$	104,9	[3]
KCl	51,46	[3]
KCl (газ)	55,28	[2]
$KClO_3$	100,9	[3]
$KClO_4$	110,2	[3]
K_2CrO_4	146,0	[3]
KF	50,00	[3]
KH (газ)	30,81	[2]
KH_2AsO_4	126,7	[3]
KHF_2	76,82	[3]
KH_2PO_4	187,0	[3]
KI	(53,22)	[3]
KI (газ)	56,74	[2]
KIO_3	106,4	[3]
KI·I (газ)	76,74	[2]
$KMnO_4$	119,2	[3]
KNO_3	95,72	[3]
KO_2	77,33	[3]
$KReO_4$	122,6	[3]
K_2SO_4	150,9	[3]
La_2O_3	107,9	[3]
$LiAlO_2$	67,78	[3]
LiBr	(51,88)	[3]
LiBr (газ)	33,85	[3]
Li_2CO_3	97,40	[3]
LiCl	(60,23)	[3]
LiCl (газ)	33,0	[3]
LiF	41,90	[3]
LiF (газ)	35,9	[3]
$LiFeO_2$	82,89	[3]
LiH (газ)	20,56	[2]
LiI	54,69	[3]
Li_3N	77,74	[3]
$LiNO_3$	89,12	[3]
Li_2O	54,09	[3]
LiOH	49,58	[3]
LiOH	40,52	[11]
$LiOH \cdot H_2O$	79,50	[3]
Li_2TiO_3	111,0	[3]

Вещество	S_{298}° (кал/(моль·град))	Литература
MgB_2	47,89	[3]
MgH_2	70,33	[3]
$MgCO_3$	75,52	[3]
$MgCl_2$	71,30	[3]
$MgCl_2 \cdot H_2O$	115,0	[3]
$MgCr_2O_4$	126,8	[3]
MgF_2	61,59	[3]
$MgFe_2O_4$	143,7	[3]
Mg_3N_2	104,6	[3]
MgO	37,78	[3]
MgO (газ)	32,97	[2]
$Mg(OH)_2$	76,99	[3]
$Mg(OH)_2$	74,27	[2]
$MgSO_4$	96,48	[3]
$MgSiO_3$	81,84	[3]
Mg_2SiO_4	115,0	[3]
$MgTiO_3$	91,76	[3]
Mn_3C	93,55	[3]
$MnCO_3$	85,50	[3]
$MnCl_2$	72,87	[3]
MnF_2	67,94	[3]
Mn_3N_2	121,2	[3]
MnO	44,10	[3]
MnO_2	54,02	[3]
Mn_2O_3	36,74	[3]
Mn_3O_4	107,7	[12]
Mn_2O_3	130,7	[3]
Mn_3O_4	148,1	[7]
MnS	49,96	[3]
$MnSO_4$	100,5	[3]
MnSe	61,04	[3]
$MnSiO_3$	86,44	[3]
MnTe	72,8	[3]
$Mo(CO)_6$	219,0	[3]
$Mo(CO)_4$	212,3	[13]
Mo_2N	64,02	[3]
MoO_2	55,98	[3]
MoO_3	73,64	[3]
MoS_2	63,27	[7]
$MoSi_2$	64,86	[3]
Mo_5Si	92,97	[7]
NH_3 (газ)	30,62	[3]
N_2H_4 (газ)	52,7	[3]
NH_4Cl	89,29	[3]
NH_4Cl	84,1	[3]
NH_4F	65,27	[3]
$(NH_4)H_2AsO_4$	151,2	[3]
$(NH_4)H_2PO_4$	142,2	[3]
$(NH_4)HSO_4$	142,0	[3]
$(NH_4)NO_3$	139,2	[3]
$(NH_4)_2O$	250,6	[3]
$(NH_4)OH$	154,9	[3]
$(NH_4)_2SO_4$	187,5	[3]
$(NH_4)VO_3$	129,3	[3]
NO (газ)	29,87	[3]
NO_2 (газ)	37,91	[2]
N_2O (газ)	36,71	[3]
N_2O_4	76,99	[3]
N_2O_5	143,1	[7]

* При $T = 300°K$.

Вещество	C_p, кДж/(моль·К)	Литература	Вещество	C_p, кДж/(моль·К)	Литература	Вещество	C_p, кДж/(моль·К)	Литература
NOCl	39,37	[2]	PbO_2	64,43	[3]	$SrSO_4$	101,7*	[3]
NO_2Cl	63,14	[3]	Pb_2O_3	107,7	[3]	$SrTiO_3$	98,97	[3]
NOF	41,34	[3]	Pb_3O_4	147,0	[3]	T_2O (газ)	34,96	[3]
$NaAlO_2$	71,30	[3]	PbS	49,9	[3]	TaC	36,75	[3]
$NaBH_4$	86,48	[3]	PbS (газ)	35,02	[2]	TaN	42,09	[2]
$NaBO_2$	65,94	[3]	$PbSO_4$	104,2	[3]	Ta_2O_5	135,1	[3]
NaBr	52,30	[3]	PbO	(31,51)	[2]	$TeCl_4$	138,5	[3]
NaBr (газ)	35,94	[2]	PbSb	46,16	[2]	TeF_6 (газ)	116,9	[3]
Na_2CO_3	110,6	[3]	PbS	(50,17)	[2]	TeO_2 (газ)	35,84	[2]
NaCl	50,79	[3]	$PbSb_2$	70,2	[3]	TiF_4	110,7	[3]
NaCl (газ)	36,44	[2]	RbBr	(51,71)	[2]	Th_3N_4	155,9	[2]
$NaClO_3$	100,8	[3]	RbCl	(51,24)	[2]	ThO_2	62,84	[2]
NaF	46,82	[3]	$RbClO_3$	109,2	[3]	TiH_2	44,52	[3]
NaH (газ)	30,12	[2]	RbF	(50,07)	[2]	TiC	33,51	[3]
$NaHCO_3$	87,70	[3]	RbJ	36,90	[2]	TiCl (газ)	34,7	[3]
NaI	54,31	[3]	Rb_2O_2	166,2	[3]	$TiCl_2$ (газ)	51,5	[3]
NaI (газ)	36,29	[2]	RbO	47,82	[2]	$TiCl_3$ (газ)	72,4	[3]
$NaNH_2$	66,15	[3]	Rb_2O	73,30	[2]	$TiCl_4$ (газ)	96,47	[3]
$NaNO_3$	93,05	[2]	RbO_2	101,0	[2]	TiN	37,11	[3]
NaO	72,13	[3]	SF_6 (газ)	96,26	[2]	TiO	39,96	[3]
Na_2O	71,47	[3]	SO (газ)	30,26	[3]	Ti_2O_3	97,36	[3]
Na_2O_2	89,33	[3]	SO_2 (газ)	39,87	[3]	Ti_3O_5	180,2	[3]
NaOH	59,45	[3]	SO_3 (газ)	50,63	[3]	Ti_4O_7	154,8	[3]
Na_2SO_3	120,1	[3]	$SOCl_2$ (газ)	66,69	[2]	TiS_2	67,91	[3]
Na_2SO_4	130,8	[3]	SOF_2 (газ)	56,82	[3]	TlBr	52,72	[2]
Na_2SO_3	127,1	[2]	$SiCl_4$ (газ)	77,4	[2]	TlBr (газ)	36,64	[2]
Na_2SiO_3	111,8	[3]	Sb_2O_3	101,4	[3]	TlCl	50,92	[3]
Na_2TiO_3	134,2	[3]	Sb_2O_4	114,6	[3]	TlCl (газ)	39,23	[3]
NbN	43,35	[2]	Sb_2O_5	117,7	[3]	TlF (газ)	34,00	[2]
NbO_2	57,49	[3]	Sb_2S_3	(117,7)	[2]	$TlNO_3$	99,37	[3]
Nb_2O_5	132,1	[3]	Se_2O_5	104,1	[5]	UCl_3	91,50	[3]
Nb_3Al_2	111,3	[3]	SeF_6 (газ)	110,0	[2]	UCl_4	125,4	[3]
$Ni(CO)_4$ (газ)	136,0	[5]	SrO (газ)	31,17	[2]	UF_4	117,6	[3]
$NiCl_2$	71,67	[3]	$SiBr_4$ (газ)	97,07	[2]	UF_6	166,75	[3]
NiF_2	64,06	[3]	SiC	26,65	[2]	UH_3	49,29	[3]
$NiFe_2O_4$	145,6	[3]	$SiCl_2$ (газ)	90,58	[2]	UO_2	63,71	[3]
NiO	44,31	[3]	SiF_4 (газ)	73,47	[2]	UO_3	81,63	[3]
NiS	54,68	[3]	SiH_4 (газ)	42,76	[3]	U_3O_8	237,9	[3]
$NiSO_4$	(138,3)	[2]	Si_3N_4	99,87	[3]	$UOCl_2$	95,06	[3]
NiTe	52,51	[3]	SnAll	49,41	[2]	UO_2F_2	103,2	[3]
NpO_2	66,19	[3]	$SnBr_2$ (газ)	103,4	[2]	VC	33,35	[3]
OsO_4 (газ)	57,57	[5]	$SnCO_3$	76,87	[3]	VCl_2	72,22	[3]
PBr_3 (газ)	76,15	[3]	$SnCl_2$	(79,33)	[2]	VCl_3	93,16	[3]
PCl_3 (газ)	72,05	[3]	$SnCl_4$ (газ)	96,35	[2]	VN	36,03	[3]
PCl_5 (газ)	111,9	[3]	$SnNi_3$	99,06	[3]	VO	45,44	[3]
PF_3 (газ)	56,02	[3]	SnO	44,31	[2]	V_2O_3	103,9	[3]
PH_3 (газ)	37,11	[3]	SnO (газ)	31,71	[2]	V_3O_5	118,0	[3]
PN (газ)	29,66	[3]	SnO_2	52,59	[3]	V_2O_5	137,4	[3]
P_3N_5	149,2	[3]	SnPt	49,87	[2]	WC	36,11	[6]
$POCl_3$ (газ)	84,39	[3]	SnS	49,26	[3]	WO_3	81,50	[3]
P_4O_{10}	204,8	[3]	SnS (газ)	34,42	[2]	Y_2O_3	102,5	[3]
$PbBr_2$	80,12	[3]	SnS_2	74,31	[3]	$ZrCO_3$	80,17	[3]
$PbCl_2$	76,78	[3]	SnS_2	70,13	[14]	$ZrCl_4$	(76,27)	[3]
$PbCO_3$	87,40	[3]	$SnTe_2$	73,92	[3]	ZrF_4	65,65	[3]
PbF_2	(73,7)	[2]	$SrBr_2$	(79,62)	[3]	$ZrFe_2O_5$	139,0	[3]
PbI_2	81,17	[3]	$SrCl_2$	(79,20)	[2]	Zr_3Mg	74,06	[2]
PbO	49,83	[3]	$SrCO_3$	81,42	[3]	ZnO	40,25	[2]
PbO (желтая)	45,81	[3]	SrO	44,50	[3]	ZnO (газ)	31,71	[2]
PbO (газ)	32,43	[3]	SrO (газ)	33,14	[2]	ZnS	46,02	[3]

* При $T = 500$ К.

Вещество	C_p, дж/(моль·град)	Литература	Вещество	C_p, дж/(моль·град)	Литература	Вещество	C_p, дж/(моль·град)	Литература
$ZrSO_4$	97,37	[3]	$ZrCl_4$	119,9	[3]	ZrO_2	55,81	[3]
Zr_2SiO_4	123,3	[3]	ZrN	40,1	[3]	$ZrSiO_4$	95,62	[3]
$Zr_3Al_2O_6$	137,3	[3]	Zr_3N_4	123,0	[3]			

Таблица 10.3

Теплоемкость органических соединений при давлении 760 *мм рт. ст.* и температуре 298,15° К [3,13]

Формула	Название	C_p, дж/(моль·град)	
		Кристаллы	Газ
CH_4	Метан	—	35,79
CH_3F	Фторметан	—	37,40
CH_3Cl	Хлорметан	—	40,71
CH_3Br	Бромметан	—	42,43
CH_3I	Иодметан	—	44,10
CH_2F_2	Дифторметан	—	42,97
CH_2ClF	Фторхлорметан	—	47,07
CH_2Cl_2	Дихлорметан	—	51,13
CH_2Br_2	Дибромметан	—	54,79
CHF_3	Трифторметан (фреон-23)	93,10	51,09
CHF_2Cl	Дифторхлорметан (фреон-22)	101,06	55,86
$CHFCl_2$	Фтордихлорметан (фреон-21)	107,10	60,96
$CHCl_3$	Трихлорметан	—	65,20
$CHBr_3$	Тribромметан	—	71,00
CF_4	Тетрафторметан (фреон-14)	—	61,21
CF_3Cl	Трифторхлорметан (фреон-13)	—	66,82
CF_3Br	Трифторбромметан	—	84,43
CF_2Cl_2	Дифтордихлорметан (фреон-12)	126,0	87,65
CF_2ClBr	Дифторхлорбромметан	—	74,56
CF_2Br_2	Дифтордибромметан (фреон-12В2)	—	76,00
$CFCl_3$	Фоторитрихлорметан (фреон-11)	121,5	77,88
$CFBr_3$	Фоторитрибромметан (фреон-13В1)	254,09	84,43
CCl_4	Углерод четыреххлористый	131,67	83,42
CBr_4	Тетрабромметан	—	91,21
CH_4O	Метанол	81,6	43,89
CH_2O	Формальдегид	—	35,36
CH_2O_2	Муравьиная кислота	99,04	46,69
$COCl_2$	Фосген	—	60,67
CH_4S	Метилтиол	—	50,69
CH_5N	Метиламин	—	51,71
C_2H_4	Этан	—	52,70

Формула	Название	C_p, дж/(моль·град)	
		Кристаллы	Газ
C_2H_4	Этен (этилен)	—	43,67
C_2H_2	Этин (ацетилен)	—	43,93
C_2H_5F	Фторэтан	—	56,99
C_2H_5Cl	Хлорэтан	—	62,80
C_2H_5Br	Бромэтан	—	63,66
$C_2H_4Cl_2$	1,1-Дихлорэтан	126,3	70,23
$C_2H_4Cl_2$	1,2-Дихлорэтан	129,0	79,50
$C_2H_4Br_2$	1,2-Дибромэтан	136,0	—
$C_2H_3Cl_3$	1,1-Дихлорэтан	111,3	67,03
$C_2H_3Cl_3$	1,1,2-Трихлорэтан	144,3	89,06
$C_2F_3Cl_3$	1,2,2-трифтор-1,1,2-трихлорэтан (фреон-113)	178,56	116,1
C_2H_6O	Этанол	111,4	73,60
C_2H_4O	Ацетальдегид	—	55,64
C_2H_4O	Этиленоксид	151	48,28
C_2H_2O	Кетен	—	47,82
$C_2H_4O_2$	Уксусная кислота, мономер	123,4	66,53
	Уксусная кислота, димер	—	146,4
C_2H_6S	Этантиол	117,8	72,68
$C_2H_5O_2N$	Глицин	100,3	—
C_3H_8	Пропан	—	73,51
C_3H_6	Пропен (пропилен)	—	63,89
C_3H_6	Циклопропан	—	55,94
C_3H_4	Пропадиен (аллен)	—	58,99
C_3H_4	Пропин (метилацетилен)	—	60,67
C_3H_7Cl	2-Хлорпропан	—	87,57
C_3H_8O	Пропанол	153,4	—
C_3H_6O	Ацетон	126	74,89
C_4H_{10}	Бутан	—	96,28
C_4H_{10}	2-Метилпропан (изобутан)	—	96,82
C_4H_8	1-Бутен	—	89,33
C_4H_8	цис-2-Бутен	—	78,91
C_4H_8	транс-2-Бутен	—	87,82
C_4H_8	2-Метилпропен (изобутилен)	—	89,11
C_4H_6	Циклобутан	—	72,22
C_4H_6	1,2-Бутадиен	—	80,12
C_4H_6	1,3-Бутадиен (дивинил)	—	79,54
C_4H_6	1-Бутин (бутилен)	—	81,42
C_4H_6	2-Бутин	125,1	77,95

Продолжение табл. 10.3

Формула	Название	Ср, кал/(моль·град) Кристаллы	Ср, кал/(моль·град) Газ
C_4H_6	Циклобутен	—	67,07
$C_4H_{10}O$	Бутанол	179	—
C_4H_8O	2-Бутанон	162	—
$C_4H_8O_2$	Уксуснометиловый эфир	170	—
$C_4H_8O_2$	Диоксан	152,9	—
C_4H_4O	Фуран	114,6	64,44
C_5H_{12}	н-Пентан	171,6	122,6
C_5H_{12}	2-Метилбутан (изопентан)	161,9	120,6
C_5H_{12}	2,2-Диметилпропан (неопентан)	—	121,6
C_5H_{10}	1-Пентен	153,3	114,6
C_5H_{10}	цис-2-Пентен	151,7	101,8
C_5H_{10}	транс-2-Пентен	157,0	112,1
C_5H_{10}	2-Метил-1-бутен	157,2	111,6
C_5H_{10}	3-Метил-1-бутен	156,1	116,6
C_5H_{10}	2-Метил-2-бутен	152,8	106,6
C_5H_{10}	Циклопентан	156,1	82,99
C_5H_8	1,2-Пентадиен	145,0	105,4
C_5H_8	1-цис-3-Пентадиен	—	94,6
C_5H_8	1-транс-3-Пентадиен	—	108,3
C_5H_8	1,4-Пентадиен	—	106,0
C_5H_8	2,3-Пентадиен	—	101,3

Продолжение табл. 10.3

Формула	Название	Ср, кал/(моль·град) Конденсат	Ср, кал/(моль·град) Газ
C_5H_8	2-Метил-1,3-бутадиен (изопрен)	154,6	104,6
C_5H_8	2-Метил-1,2-бутадиен	—	105,4
C_5H_8	1-Пентин	—	106,7
C_5H_8	2-Пентин	—	98,7
C_5H_8	3-Метил-1-бутин	—	104,7
C_5H_8	Циклопентен	122,4	76,10
$C_5H_{12}O$	Пентанол	209	—
C_6H_{14}	Гексан	196,0	146,7
C_6H_{12}	1-Гексен	183,3	138,4
C_6H_{12}	Циклогексан	156,5	106,3
C_6H_{10}	Метилциклопентан	158,7	109,8
C_6H_{10}	1-Гексин	—	130,5
C_6H_{10}	Циклогексен	160,2	105,0
C_6H_6	Бензол	136,1	81,64
C_6H_5F	Фторбензол	146,4	94,43
C_6H_5Cl	Хлорбензол	150,1	97,07
C_6H_5Br	Бромбензол	155,4	—
$C_6H_{12}O$	Гексанол	208	—
C_6H_6O	Фенол	131,7	—
C_6H_7N	Анилин	191	—
$C_6H_5O_2N$	Нитробензол	187,3	—

10.2. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ НОРМАЛЬНОМ ДАВЛЕНИИ

Таблица 10.4

Теплоемкость элементов при температуре ниже 20°К и давлении 760 *мм рт. ст.*

Вещество	T, °K	Ср, кал/(моль·град)
Ag [16]	1	0,0017
	2	0,0057
	4	0,0296
	6	0,099
	10	0,4302
Al [8, 17]	2	0,0265
	4	0,0679
	10	0,3970
Ar [16]	2	0,117
	4	1,042
	6	4,140
	8	10,60
	10	10,8
As [17]	10	0,4
Au [16]	1	0,0014
	2	0,0060
	4	0,0382
	6	0,1290
	10	0,598
Be [16]	1	0,0050
	2	0,0122
	4	0,0261
	6	0,0430
	10	0,0951

Вещество	T, °K	Ср, кал/(моль·град)
Bi [16]	1	0,0014
	2	0,0110
	4	0,1180
	6	0,511
	10	2,49
Br [17]	10	9,3
Ca [17]	10	1,1
Cd [16]	1	0,029
	6	1,30
	10	8,0
Cl_2 [17]	10	4,5
Cr [17]	10	0,2
Cu [17]	10	0,2
Fe [17]	10	0,2
Ga [17]	10	1,1
Ge [17]	10	1,0
H_2 (нормальный) [3]	4	360
	6	237
	8	254
	10	352
	12	520
	13,96	731
H_2 (параводород) [13]	4	19,1
	6	65,7

Вещество	T, °K	C_p, кал/(моль·град)
H_2 (параводород) [13]	8	156
	10	294
	12	490
	13,88	698
D_2 (ортодейтерий) [14]	12	245
	14	346
	16	475
	18,65	693
^4He [3]	0,6	0,723
	1,0	26,6
	1,2	77,7
	1,6	209
	1,8	663
	2,0	1190
	2,1	1540
	2,2	1160
	2,4	595
	2,7	547
	3,4	702
	4,21	1050
^3He [3]	0,1	127
	0,5	255
	1,0	343
	2,0	696
Hf [16]	10	0,14
Hg (сверхпроводящий) [16]	1	0,007
	2	0,115
	4	0,997
Hg [16]	1	0,008
	2	0,515
	4	0,978
	6	2,61
	10	5,62
In [16]	1	0,007
	6	0,658
	10	3,71
Ir [17]	10	3,7
K [17]	10	13
Kr [17]	10	16,9
Li [17]	10	4
Mg [17]	10	0,4

Вещество	T, °K	C_p, кал/(моль·град)
α-Mn [17]	10	0,2
Mo [17]	10	0,1
N_2 [17]	10	37,9
Na [16]	1	0,019
	2	0,069
	4	0,389
	6	1,22
	10	5,69
Nb [16]	1	0,21
	6	0,184
	10	0,526
Ne [17]	10	1,385
Ni [17]	10	0,2
O_2 [17]	10	19
Os [17]	10	3,2
Pt [17]	10	0,3
Rb [16]	1	0,048
	6	0,39
	10	0,65
S (ромбическая) [17]	10	3,1
Sb [17]	10	0,5
Se [17]	10	23
Si [17]	10	0,2
Sn [17]	10	4,7
Sr [16]	1	0,017
	6	1,27
	10	8,1
Ta [16]	1	0,006
	4	0,041
	6	0,079
	10	0,280
Te [17]	10	1,6
Tl [16]	1	0,017
	4	0,076
	6	0,189
	10	0,301
Tl [17]	10	4,0
V [17]	10	0,2
W [17]	10	0,1
Xe [17]	10	14,6
Zr [17]	10	0,8

Таблица 10.5

Теплоемкость C_p, *дж/(моль·град)*, элементов при температуре выше 20°К и давлении 760 *мм рт. ст.*
Часть строки прямое * относится к газовой фазе.

Вещество	Температура, °К									Литература
	20	40	60	100	200	400	600	1000	1500	
Ac	—	—	—	—	—	28,0	29,7	33,1	—	[1]
Ag	1,72	8,39	17,89	22,97	25,06	25,9	27,1	29,6	31,4	[1, 3]
Al	0,23	2,09	9,05	18,52	23,25	25,61	28,12	28,3	—	[3, 2]
Ar	11,76	22,09	32,13	—	—	—	—	—	—	[3]
As	—	—	18,47	20,67	24,10	27,6	27,4	—	—	[1, 3]
As_2	—	—	—	—	—	*35,94	36,74	37,16	37,28	[1]
At	—	—	—	—	—	36,6	36,7	—	—	[1]
At_2	—	—	—	—	—	*37,5	37,7	38,0	38,2	[1]
Au	0,21	11,20	19,03	23,49	24,92	25,77	26,78	28,87	29,3	[2, 3]
B (кристалл)	—	—	0,54	3,23	8,82	—	—	—	—	[3]
B (аморфный)	—	—	0,75	3,60	9,49	13,8	17,5	25,0	—	[2, 3]
Be	—	—	—	—	—	27,78	30,54	31,38	31,38	[1]
Bi	0,014	0,090	0,816	5,73	13,45	19,84	23,43	27,32	32,4	[1, 3]
Br	—	—	21,38	24,39	25,36	27,82	31,4	31,4	—	[3]
Br_2	12,72	29,00	40,54	49,20	59,20	—	—	—	—	[3]
C (графит)	—	—	—	—	—	*36,7	37,3	37,7	38,0	[3]
C (алмаз)	0,1	0,35	1,17	3,299	6,816	11,00	16,85	21,51	24,10	[3]
Ca	0,004	0,01	0,410	1,000	4,135	9,95	15,85	21,04	—	[3]
Cd	1,59	7,78	17,11	20,97	25,65	27,4	30,6	29,7	—	[3]
Ce	5,19	13,21	20,61	24,04	25,51	27,15	29,7	29,7	—	[2, 3]
Cl	12,31	24,52	26,23	26,84	—	31,6	33,9	40,6	—	[1, 3]
Cl_2	7,74	25,97	38,62	50,96	—	—	—	—	—	[3]
Co	—	—	—	—	—	*35,3	36,6	37,5	38,0	[3]
Cr	0,28	2,32	10,84	19,50	23,03	26,6	30,0	37,2	40,2	[1, 3]
Cs	—	—	6,61	16,53	22,05	26,07	29,27	33,50	39,07	[2, 3]
Cs_2	19,75	23,77	25,27	26,82	29,06	31,8	31,8	—	—	[1, 3]
Cu	—	—	—	—	—	*38,39	39,91	39,87	41,13	[3]
Dy	0,46	3,77	12,93	20,52	23,00	25,15	26,40	26,91	31,4	[2, 3]
Er	6,59	16,49	32,66	46,51	28,15	—	—	—	—	[3]
F	21,00	24,00	32,63	25,97	27,69	—	—	—	—	[3]
F_2	12,99	36,73	37,71	—	—	—	—	—	—	[3]
Fe	—	—	—	—	—	*31,01	35,18	37,01	37,94	[3]
α-Fe	0,22	1,54	5,62	16,12	23,56	27,41	31,05	37,74	43,29	[3]
Ga	2,13	7,57	16,57	21,99	24,91	27,8	27,8	27,8	—	[1, 3]
Gd	4,16	15,20	26,54	32,69	41,61	29,13	30,7	33,5	37,0	[1, 3]
Ge	0,939	4,49	11,14	18,64	—	24,9	26,4	28,8	29,3	[1, 3]
H_2	—	—	—	—	—	*29,18	29,39	30,20	32,27	[3]
D_2	—	—	—	—	—	*29,21	29,63	31,66	34,24	[3]
T_2	—	—	—	—	—	*29,32	30,11	32,76	35,25	[3]
Hf	1,09	9,14	19,48	23,72	—	26,0	27,0	29,0	31,5	[1, 3]
Hg	10,3	17,94	33,16	25,92	26,32	27,36	27,15	—	—	[3]
Ho	10,25	26,43	34,02	26,56	26,82	—	—	—	—	[3]
In	7,085	16,13	22,12	23,12	26,32	29,0	29,7	29,7	29,7	[1, 3]
Ir	0,39	4,34	14,43	21,52	24,57	25,65	26,82	29,20	32,17	[2, 3]
I	16,18	31,62	43,32	40,52	38,25	—	—	—	—	[3]
I_2	—	—	—	—	—	*37,2	37,6	37,9	38,2	[3]
K	9,81	16,80	23,79	26,00	28,02	31,01	30,12	30,38	—	[3]
K_2	—	—	—	—	—	*36,16	38,62	39,40	41,7	[3]
Kr	15,36	23,64	28,53	—	—	—	—	—	—	[3]
La	6,19	15,69	22,34	25,25	—	28,5	29,8	—	—	[3]
Li	0,40	2,40	9,71	17,82	22,43	27,61	29,56	28,84	—	[3]
Li_2	—	—	—	—	—	*26,92	37,74	38,56	39,37	[3]
Mg	0,36	3,95	12,47	20,40	23,93	26,3	28,6	—	—	[3]
α-Mn	—	—	11,72	20,00	24,96	28,53	34,92	37,52	—	[3]
γ-Mn	—	—	11,42	20,44	25,69	—	—	—	—	[3]
Mo	0,21	1,95	10,01	18,91	23,10	25,0	26,3	28,0	32,0	[1, 3]
N_2	19,87	37,78	40,61	—	—	*29,25	30,11	32,70	34,85	[3]
Na	—	—	20,71	24,52	26,90	31,46	29,71	29,00	—	[3]
Na_2	—	—	—	—	—	*37,82	38,28	38,99	39,79	[3]
Nb	—	—	—	—	—	25,27	26,11	27,70	29,71	[2]
Nd	7,36	17,24	25,69	28,10	—	—	—	—	—	[3]
Ne	18,03	—	—	—	—	—	—	—	—	[3]

Вещество	Температура, °К									Литература
	20	40	60	100	273	298	600	1000	1500	
Ni	0,34	2,23	10,18	19,30	24,40	28,79	34,64	32,64	36,40	[2, 3]
O_2	13,97	41,51	53,76	—	—	*30,10	32,59	34,87	36,56	[3]
O_3	—	—	—	—	—	*43,68	49,70	54,55	—	[3]
Os	—	—	—	—	—	25,27	26,02	27,49	29,33	[2]
P (кристалл)	—	—	—	—	—	20,96	23,62	—	—	[2]
P_2	—	—	—	—	—	*33,6	35,5	36,8	37,4	[1]
Pb	11,01	19,57	23,69	25,27	26,36	27,45	29,37	29,41	—	[3]
Pd	0,97	5,42	16,01	22,13	25,31	26,57	27,74	30,04	32,98	[2, 3]
Pr	10,25	18,26	25,73	28,33	—	—	—	—	—	[3]
Pt	1,51	7,45	17,16	23,10	25,76	26,28	27,36	29,62	32,43	[2, 3]
Rb	—	22,38	24,98	26,57	28,70	—	—	—	—	[3]
Rh_2	—	—	—	—	—	*36,12	38,49	39,25	40,17	[3]
Re	0,61	4,80	14,93	22,30	25,40	25,86	26,94	26,12	31,84	[1, 3]
Rh	0,28	2,74	11,79	20,17	24,05	25,40	28,16	31,59	35,90	[2, 3]
Ru	0,17	1,83	10,62	18,91	23,93	24,84	25,73	28,24	30,12	[2, 3]
S (ромбическая)	2,57	6,09	10,90	16,62	21,31	—	—	—	—	[3]
S (моноклинная)	2,57	6,09	10,98	16,90	22,14	—	—	—	—	[3]
S_2	—	—	—	—	—	*34,06	35,73	36,99	37,49	[3]
Sb	3,20	10,13	18,54	23,22	24,90	25,9	27,4	—	—	[3]
Sb_2	—	—	—	—	—	*36,8	37,1	37,2	37,4	[1]
Se	3,43	8,70	15,98	21,69	24,28	—	—	—	—	[2, 3]
Se_2	—	—	—	—	—	*36,23	36,86	37,20	37,28	[2]
Si	—	—	6,19	12,01	18,24	22,3	24,4	26,1	—	[3]
Sm	7,29	15,28	32,21	26,99	28,22	—	—	—	—	[3]
Sn (белое)	—	12,80	20,50	24,48	26,11	29,04	30,54	30,54	—	[2, 3]
Sn (серое)	3,85	9,08	17,03	22,76	25,40	29,04	30,54	30,54	—	[2, 3]
Ta	1,36	7,61	17,26	22,68	24,88	26,2	27,0	27,9	28,9	[1, 3]
Tb	4,47	16,94	28,91	37,3	31,39	—	—	—	—	[3]
Te	4,52	11,76	19,79	23,74	25,14	26,3	27,6	—	—	[2, 3]
Th	4,63	14,04	21,47	24,98	26,74	29,29	33,05	40,67	50,17	[1, 3]
Ti	0,33	2,47	10,89	19,54	24,04	26,61	28,62	31,25	—	[1, 3]
Tl	10,29	18,96	23,71	25,27	26,07	27,78	31,38	—	—	[3]
U	3,38	12,39	20,54	24,67	26,83	29,6	34,5	42,5	38,9	[1, 3]
V	—	—	10,17	19,29	23,56	26,1	27,6	30,5	36,6	[1, 3]
W	0,33	3,29	12,60	20,53	23,69	25,1	25,8	27,2	26,9	[1, 3]
Xe	16,86	23,93	26,87	33,07	—	—	—	—	—	[3]
Zn	1,76	8,06	16,87	22,70	24,64	25,40	28,41	31,3	—	[2, 3]
Zr	1,17	6,16	15,86	22,17	24,76	—	—	—	—	[3]

10.3. ТЕПЛОЕМКОСТЬ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ НОРМАЛЬНОМ ДАВЛЕНИИ

Таблица 10.6

Теплоемкость C_p, *дж/(моль·град)*, неорганических соединений при температуре выше 20°К и давлении 760 *мм рт. ст.*

В скобках приведены расчетные значения. Часть строки правее * относится к газовой фазе.

Вещество	Температура, °К									Литература
	20	40	60	100	200	400	600	1000	1500	
AgBr	—	28,29	42,59	45,87	51,88	58,96	71,84	*37,34	37,30	[2, 3]
AgCl	8,71	22,30	37,95	46,94	50,41	56,86	61,63	*37,24	37,28	[2, 3]
AgI	16,31	29,03	42,72	50,12	53,48	54,66	56,5	*37,35	37,38	[2, 3]
$AgNO_3$	11,30	27,82	52,50	71,04	86,48	112,3	128	—	—	[2, 3]
Ag_2SO_4	12,72	38,49	73,81	99,16	123,5	(144)	(167)	205	—	[2, 3]
AlBr	—	—	—	—	—	36,80	37,70	38,60	39,40	[3]
AlF_3	—	—	17,20	42,76	67,40	84,56	97,11	100,1	—	[3]
Al_2O_3 (сапфир)	0,08	0,71	6,95	31,97	66,90	—	—	—	—	[3]
Al_2O_3 (корунд)	0,076	0,691	6,896	31,98	67,01	96,18	112,50	124,74	—	[3]
AsH_3	11,40	29,12	48,24	66,58	80,71	*71,9	77,2	81,9	—	[2, 3]
AsI_3	16,28	44,97	60,28	46,79	—	*45,4	53,1	63,8	76,7	[2, 3]
AuCl	—	—	—	—	—	*36,28	36,90	37,29	37,26	[2]
B_4C	—	—	2,68	14,73	41,13	77,19	97,29	114,3	126,1	[3]
BF_3	12,3	29,29	47,20	103,05	—	*67,57	67,11	75,62	—	[3]
B_2H_6	5,02	21,30	44,16	75,44	—	*71,71	96,91	135,1	156,9	[3]
BN	0,272	1,075	3,853	8,770	16,33	13,68	16,69	22,76	—	[2, 6]
BN	—	—	—	—	—	*30,63	39,61	34,31	36,09	[2]
B_2O_3 (кристалл)	0,38	3,22	15,62	33,15	53,44	76,60	98,76	128	129	[3]
$BaCO_3$	—	—	41,05	64,14	80,21	89,03	113,0	134,6	—	[3]
BaF_2	2,51	12,47	35,19	58,49	69,64	75,56	84,10	101,2	—	[3]
BaO	—	—	26,78	39,66	46,02	49,86	53,60	56,82	—	[3]
$BaSO_4$	5,46	21,76	49,25	72,38	93,97	119,4	131,6	137,9	—	[3]
$BaTiO_3$	—	—	31,51	66,76	95,46	112,9	121,3	128,1	134,6	[3]
BeO	—	—	1,67	7,95	20,46	33,76	41,71	50,75	—	[3]
Bi_2O_3	—	—	65,72	81,50	107,6	116,9	123,6	—	—	[3]
BrF_3	9,46	25,90	46,40	69,87	90,83	*72,72	78,03	81,20	—	[3]
BrF	—	—	—	—	—	*35,52	36,15	37,32	37,95	[15]
CO	14,02	34,14	—	—	—	*29,34	30,44	33,19	35,23	[3]
CO_2	5,13	19,62	36,91	47,72	—	*41,31	47,31	54,29	58,36	[3]
COS	11,00	27,70	40,25	72,33	—	*45,81	51,09	56,44	59,29	[3]
CS_2	11,97	27,62	41,09	55,64	75,27	*49,58	54,39	58,66	60,58	[3]
$CaCO_3$ (кальцит)	—	—	31,60	55,56	75,23	97,11	110,5	123,8	—	[2, 3]
$CaCl_2$	—	—	40,68	61,30	70,71	75,40	76,78	84,35	103,5	[3]
CaF_2	—	—	20,00	46,19	62,93	73,22	78,66	90,49	123,7	[2, 3]
CaO	0,05	1,26	9,71	27,15	41,46	—	51,38	—	—	[3]
$Ca(OH)_2$	0,92	5,69	22,84	53,56	79,37	98,41	107,0	115,3	—	[3]
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	4,27	20,38	63,35	115,5	167,8	110,5	130,3	159,6	—	[3]
$CaTiO_3$	—	—	26,07	59,71	88,16	112,7	123,1	130,1	134,8	[3]
$CdCl_2$	7,49	19,75	43,15	63,43	72,30	77,32	85,35	—	—	[3, 7]
CeO	—	—	—	—	—	66,9	69,0	73,2	78,5	[5]
Cl_2O	—	—	—	—	—	*49,0	53,1	56,1	57,3	[15]
ClO_2	—	—	—	—	—	*45,86	51,13	55,61	57,49	[15]
ClF_3	8,79	26,31	44,89	66,32	114,6	*71,34	71,19	80,83	89,13	[3, 15]
CoF_2	3,28	9,43	25,76	48,03	64,06	—	—	—	—	[3]
Cr_3C_2	0,84	3,43	20,92	56,40	88,37	113,7	127,9	147,3	—	[3]
CrF_3	3,75	15,29	29,79	51,84	72,68	—	—	—	—	[3]
Cr_2O_3	—	—	15,02	51,04	98,90	113,3	120,5	127,0	132,5	[3]
CuBr	5,61	19,50	36,11	46,78	52,79	*36,63	37,04	37,24	37,31	[2, 3]
CuO	0,59	3,51	12,38	26,12	39,11	46,82	50,84	58,67	—	[3, 9]
Cu_2O	5,23	18,95	36,65	47,53	59,40	71,88	76,65	86,19	—	[3, 9]
Cu_2S	—	—	42,93	61,92	73,55	97,28	97,28	86,02	—	[2]
F_2O	—	—	—	—	—	*47,61	52,43	55,86	57,11	[15]
Fe_3C	—	—	32,30	66,61	101,5	115,6	114,7	119,7	126,0	[3]
$FeCl_2$	—	—	42,17	64,10	74,43	79,66	83,09	102,1	—	[3]
FeS	1,10	6,99	20,90	36,12	47,11	55,10	57,02	61,0	71,3	[3]
Fe_2O_3	0,36	3,99	21,30	56,27	92,22	120,1	140,6	150,5	143,7	[3]
Fe_3O_4	—	—	37,45	92,70	131,8	172,2	212,5	200,6	200,8	[3]
Ga_2O_3	0,46	5,56	23,47	53,30	81,92	(91,42)	(112,5)	—	—	[2, 3]

Вещество	Температура, °К									Литература
	20	40	60	100	200	300	500	1000	1500	
GeF_4	—	—	—	—	—	90,17	98,66	104,3	—	[3]
HBr	11,06	20,50	39,33	46,88	—	*29,21	29,67	32,33	34,74	[3]
HCN	3,094	12,46	28,52	42,32	60,64	*38,42	41,19	60,79	66,40	[3]
HCl	5,80	15,00	27,09	—	—	*29,16	29,71	31,76	—	[3]
HF	2,51	9,04	16,95	25,57	—	*29,15	29,23	30,17	32,23	[3]
HI	14,14	23,26	37,40	45,78	—	*29,99	30,12	32,34	35,27	[2, 3]
HN_3	—	—	—	—	—	*49,12	57,36	67,45	73,98	[3]
HNO_3	5,18	18,69	36,09	51,75	111,5	*63,4	—	—	—	[3]
$HNO_3 \cdot H_2O$	5,14	19,70	43,39	66,40	180,7	—	—	—	—	[3]
H_2O	2,00	6,13	12,87	22,06	34,83	*34,24	36,29	41,20	46,98	[3]
D_2O	2,23	6,32	13,53	25,53	41,20	*35,62	38,82	45,41	51,12	[3]
H_2O_2	1,23	6,90	20,46	35,30	51,46	*45,45	66,69	62,84	68,32	[3]
H_2S	6,23	14,90	30,59	56,32	—	*35,60	38,01	45,85	51,66	[3]
H_2SO_4	7,24	21,84	36,37	59,79	68,56	—	—	—	—	[3]
$H_2SO_4 \cdot H_2O$	5,56	24,24	45,15	73,97	113,1	—	—	—	—	[3]
H_2Se	—	—	37,7	64,85	—	*36,28	40,21	47,24	—	[3]
HIO_3	—	—	17,82	36,40	54,39	67,15	73,93	80,00	86,19	[3]
HgCl	8,03	20,40	37,53	44,64	49,45	36,74	37,11	37,28	37,36	[2, 3]
HgO (красная)	5,44	15,02	25,52	31,40	41,45	—	—	—	—	[3]
HBr	—	—	—	—	—	*36,99	37,40	37,78	38,07	[15]
HCl	—	—	—	—	—	*36,40	37,11	37,66	37,99	[15]
KBr	5,94	23,18	30,92	47,94	50,88	53,93	56,69	62,56	—	[3]
KBr	—	—	—	—	—	*36,94	37,20	37,32	37,36	[2]
KCl	2,94	16,61	34,46	45,18	49,80	52,09	53,31	63,47	—	[2, 3]
KCl	—	—	—	—	—	*36,76	37,11	37,32	37,36	[2]
KF	1,16	7,92	25,48	40,71	47,70	51,34	53,93	59,16	—	[2, 3]
KH_2PO_4	1,21	17,67	46,95	75,06	104,0	—	—	—	—	[3]
$KMnO_4$	12,69	35,23	61,92	87,86	110,6	—	—	—	—	[3]
K_2SO_4	—	—	68,24	98,66	120,5	149,1	175,2	196,7	200	[2, 3]
Li_2CO_3	0,96	6,74	26,07	55,56	86,77	—	—	—	—	[3]
LiF	0,08	0,75	7,76	24,65	36,07	46,62	51,61	56,58	—	[3]
Li_2O	0,063	0,54	5,61	24,45	46,93	63,85	73,65	90,53	—	[3]
$MgCO_3$	—	—	15,82	43,86	66,62	90,12	107,7	—	—	[2, 3]
$MgCl_2$	—	—	31,34	56,44	68,13	76,07	80,25	—	—	[3]
MgF_2	—	—	14,77	37,66	56,48	69,31	74,60	80,46	86,24	[3]
MgO	0,088	0,53	4,54	18,73	33,30	41,67	45,23	49,55	53,22	[2, 3]
$Mg(OH)_2$	0,34	2,83	13,74	40,96	66,78	81,60	94,22	—	—	[2, 3]
Mn_3C	—	—	31,36	62,84	86,61	104,4	115,0	127,4	159,0	[3]
$MnCl_2$	—	—	38,50	60,58	70,71	77,16	81,84	94,56	—	[3]
MnF_2	4,97	17,02	29,65	49,06	64,10	—	—	—	—	[3]
MnO	—	—	21,80	33,14	41,61	47,46	50,33	54,14	58,49	[3]
Mn_3O_4	—	—	41,84	61,64	93,72	103,0	120,8	137,2	—	[12]
MnS	—	—	38,14	49,16	48,95	50,71	52,22	55,23	56,99	[3]
MoO_3	1,63	6,99	23,77	47,70	67,98	84,22	94,52	107,1	—	[3]
Mo_3Si	—	—	34,12	69,02	98,57	97,02	102,3	110,7	120,5	[3]
NF_3	21,05	42,34	71,74	—	—	—	—	—	—	[3]
NH_3	1,54	7,61	20,77	36,65	—	*38,53	44,73	56,2	66,2	[3]
N_2H_4	1,46	8,91	24,96	42,03	50,75	*67,2	76,5	93,3	107	[3]
$(NH_4)_3H_2PO_4$	4,18	17,77	46,53	131,8	125,2	—	—	—	—	[3]
NO	7,03	17,28	30,21	—	—	*29,97	31,25	34,00	35,82	[3]
N_2O	6,32	21,46	37,45	51,46	—	*42,87	48,96	56,02	60,45	[3]
N_2O_4	6,49	28,70	52,55	76,82	107,2	*90,50	103,6	122,1	—	[2, 3]
$NaBH_4$	1,59	10,54	31,71	57,86	80,00	94,66	108,6	—	—	[3]
NaCl	1,42	10,04	29,37	44,10	48,86	52,47	55,73	62,26	—	[2, 3]
NaCl	—	—	—	—	—	*36,28	36,90	37,20	37,28	[2]
NaF	—	—	16,15	34,23	44,43	49,12	52,89	59,62	60,62	[3]
$NaNO_3$	3,77	17,32	43,56	66,02	84,22	116,1	150,6	—	—	[1, 3]
NaOH	—	—	20,67	41,39	54,44	65,10	86,06	83,72	—	[3]
Na_2SO_4	2,43	17,06	53,39	89,70	117,6	153,4	170,2	202,5	197,4	[3]
Na_2SiO_3	—	—	36,15	73,26	102,2	130,6	148,0	168,9	179,1	[3]
Na_2TiO_3	—	—	34,64	78,16	114,4	140,0	151,3	179,7	196	[3]
$NiCl_2$	3,29	13,08	35,19	57,60	69,04	75,40	79,79	85,94	100,4	[3]

Вещество	Температура, °К									Литература
	20	40	60	100	200	400	800	1000	1200	
NiO	—	—	9,25	24,89	39,41	52,13	51,64	62,23	59,46	[3, 8]
PH_3	10,29	40,88	50,46	60,51	—	*31,80	50,02	64,31	72,64	[3]
$PbCl_2$	12,65	33,64	55,40	67,95	74,98	80,17	86,86	—	—	[2, 3]
PbO (красная)	-	-	22,94	34,70	43,45	51,04	54,39	-	—	[2, 3]
PbO (желтая)	—	—	22,82	35,20	45,57	53,93	64,64	—	—	[2, 3]
RbI	16,06	34,73	46,02	50,38	52,30	(52,63)	55,15	—	—	[2, 3]
SF_6	22,64	42,93	60,63	75,13	—	*117,9	139,5	147,2	158,1	[2, 3]
SO_2	6,96	24,18	43,18	57,53	86,05	*43,47	48,99	54,52	57,11	[3]
Sb_2O_4	—	—	37,99	72,26	106,9	121,7	136,2	102,3	—	[3]
SeF_4	—	—	—	—	—	*127,5	141,3	150,7	156,6	[2]
SiC	—	—	2,38	10,00	22,07	34,36	41,34	46,62	55,61	[2, 3]
SiH_4	9,41	26,10	51,46	61,30	—	*51,42	65,81	84,47	95,44	[3]
SiO_2 (кварц)	1,00	3,90	11,92	24,94	39,33	53,10	64,39	68,41	72,47	[2, 3]
SiO_2 (кристобалит)	-	-	12,06	25,02	39,23	53,14	65,35	72,97	73,05	[2, 3]
SiO_2 (тридимит)	-	—	12,47	26,52	39,79	51,50	63,68	68,12	73,64	[2, 3]
$SnCl_4$	—	—	—	—	—	102,4	105,2	107,0	—	[3]
SnO_2	—	—	15,46	32,89	45,08	64,42	73,93	81,77	87,99	[3]
SnS	—	—	29,20	41,76	47,82	50,39	55,27	66,52	—	[3, 14]
$SrCO_3$	—	—	34,77	59,62	75,65	95,06	107,2	124,0	—	[3]
SrO	—	-	18,20	34,31	43,26	48,76	52,34	55,56	—	[3]
$SrSO_4$	2,86	10,31	43,94	69,81	92,99	(113,5)	(124,6)	(146,9)	(174,7)	[2, 3]
TaC	—	—	15,65	24,15	34,45	—	—	—	—	[3]
Ta_2O_5	—	—	44,64	66,61	124,3	156,3	167,0	172,7	185,4	[3]
ThO_2	—	—	—	—	—	66,90	71,67	77,66	84,06	[3]
TiC	-	—	4,23	16,73	29,37	41,46	47,72	51,34	53,85	[3]
$TiCl_4$	—	—	—	77,48	91,56	100,6	104,3	106,5	107,6	[2, 3]
TiO	—	—	8,64	22,84	36,07	45,40	51,03	58,94	68,41	[3]
TiO_2 (рутил)	—	—	13,26	31,80	40,75	54,43	70,54	75,02	—	[3]
TiO_2 (анатаз)	—	—	13,26	31,86	49,37	64,18	70,12	74,35	77,19	[3]
Ti_2O_3	—	—	17,06	51,46	87,45	120,2	136,5	146,3	151,3	[3]
TlCl	14,74	28,84	42,38	46,37	50,63	53,56	55,23	*37,29	37,35	[2, 3]
UCl_4	—	—	-	—	—	97,16	105,1	115,2	118,4	[3]
UF_6	17,00	40,31	80,32	110,39	152,40	—	—	—	—	[3]
UO_2	4,19	11,03	23,28	42,13	69,26	72,72	79,79	85,60	89,75	[3]
VC	—	—	6,99	18,37	29,71	38,83	44,43	51,38	58,74	[3]
V_2O_3	-	—	18,20	60,54	91,46	116,6	128,5	140,5	151,7	[3]
WC	—	—	—	—	-	37,06	38,83	42,07	47,00	[5]
WO_3	—	—	24,43	49,92	73,39	83,62	(91,99)	(101,9)	(121,0)	[2, 3]
ZnF_2	0,089	6,05	23,86	46,44	61,76	—	-	—	—	[3]
ZnO	-	—	13,00	25,86	37,05	45,33	49,00	53,18	56,23	[2, 3]
ZnS	1,67	8,20	19,83	34,43	43,26	49,41	52,36	55,46	—	[3]
ZrN	—	—	15,82	24,69	36,78	44,77	48,66	52,76	—	[3]
ZrO_2	—	—	13,05	32,30	50,58	63,81	70,25	75,73	—	[3]

Таблица 10.7

Теплоемкость воды C_p, дж/(моль·град), при давлении 760 мм рт. ст.

t, °C	a	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	4,2174	4,2136	4,2104	4,2074	4,2045	4,2019	4,1996	4,1974	4,1954	4,1936
10	4,1919	4,1904	4,1890	4,1877	4,1866	4,1855	4,1846	4,1837	4,1829	4,1822
20	4,1816	4,1810	4,1805	4,1801	4,1797	4,1793	4,1790	4,1787	4,1785	4,1783
30	4,1782	4,1781	4,1780	4,1780	4,1779	4,1779	4,1780	4,1780	4,1781	4,1782
40	4,1783	4,1784	4,1786	4,1788	4,1789	4,1792	4,1794	4,1796	4,1799	4,1801
50	4,1804	4,1807	4,1811	4,1814	4,1817	4,1821	4,1825	4,1829	4,1833	4,1837
60	4,1841	4,1846	4,1850	4,1855	4,1860	4,1865	4,1871	4,1876	4,1882	4,1887
70	4,1893	4,1899	4,1906	4,1912	4,1918	4,1925	4,1932	4,1939	4,1946	4,1954
80	4,1961	4,1969	4,1977	4,1985	4,1994	4,2002	4,2011	4,2020	4,2029	4,2039
90	4,2048	4,2058	4,2068	4,2078	4,2089	4,2100	4,2111	4,2122	4,2133	4,2145
100	4,2166	—	—	—	—	—	—	—	—	—

10.4. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ НОРМАЛЬНОМ ДАВЛЕНИИ

Таблица 10.8

Теплоемкость C_p, *дж/(моль·град)*, органических соединений при давлении 760 *мм рт. ст.* [3, 18]
Верхняя линия температур относится к конденсированному состоянию, нижняя — к газу.

Формула	Название	Состояние	Температура, °К			
		Конденсат	20	40	60	80
		Газ	400	600	1000	1500
CH_4	Метан	Конденсат	—	28,66	40,58	—
		Газ	40,74	52,49	72,01	86,7
CH_3F	Фторметан	Газ	44,02	57,74	77,11	90,21
CH_3Cl	Хлорметан	Конденсат	6,29	22,51	42,38	62,34
		Газ	46,12	61,25	78,91	91,00
CH_3Br	Бромметан	Конденсат	10,71	26,24	45,15	56,23
		Газ	49,92	62,63	79,50	91,95
CH_2Cl_2	Дихлорметан	Газ	61,46	72,63	87,03	95,98
CHF_3	Трифторметан (фреон-23)	Газ	61,04	75,86	90,92	—
CHF_2Cl	Дифторхлорметан (фреон-22)	Газ	65,46	77,28	92,51	99,62
$CHFCl_2$	Фтордихлорметан (фреон-21)	Газ	70,08	82,47	94,22	100,5
CF_4	Тетрафторметан (фреон-14)	Конденсат	20,99	42,80	67,36	—
		Газ	72,63	87,03	96,95	—
CF_3Cl	Трифторхлорметан (фреон-13)	Газ	77,59	90,37	100,5	104,5
CF_2Cl_2	Дифтордихлорметан (фреон-12)	Газ	98,66	112,0	123,4	128,3
CF_2Br_2	Дифтордибромметан (фреон-12Б2)	Газ	85,60	95,35	102,8	—
$CFCl_3$	Фототрихлорметан (фреон-11)	Конденсат	21,40	40,05	55,35	63,80
		Газ	87,04	96,66	103,4	106,9
CCl_4	Четыреххлористый углерод	Конденсат	21,33	40,92	58,91	64,89
		Газ	91,71	99,66	104,8	—
CH_4O	Метиловый спирт	Конденсат	5,86	16,33	37,66	55,65
		Газ	51,42	67,03	89,46	—
CH_2O	Муравьиная кислота	Конденсат	4,10	14,16	29,43	44,14
		Газ	56,96	69,66	84,68	94,27
CH_2O	Формальдегид	Газ	39,19	46,10	61,90	71,10
C_2H_6	Этан	Конденсат	5,42	24,87	53,22	70,22
		Газ	65,6	89,3	122,7	146,0
$C_2H_4Cl_2$	Дихлорэтан	Конденсат	12,26	32,55	54,02	91,21
		Газ	92,22	112,4	138,3	155,3
C_2H_4	Этен (этилен)	Конденсат	6,36	23,70	49,33	67,23
		Газ	53,97	71,55	94,43	110,29
C_2H_6O	Этиловый спирт	Кристалл	7,155	17,25	40,80	—
		Аморфный	8,290	24,07	46,39	—
		Газ	87,56	112,2	145,0	167,7
C_2H_6O	Диметиловый эфир	Конденсат	8,20	24,89	47,91	98,91
C_2H_4O	Ацетальдегид	Газ	65,81	85,86	112,8	—
C_2H_4O	Этиленоксид	Конденсат	5,98	21,80	42,09	64,39
		Газ	65,90	86,27	114,9	—
$C_2H_4O_2$	Уксусная кислота	Конденсат	—	—	—	59,5
		Газ	81,67	105,2	133,8	152,5
C_2H_3O	Кетен	Газ	56,15	69,58	83,81	93,99
C_2H_2	Этин (ацетилен)	Газ	50,10	57,44	66,62	74,07
C_3H_8	Пропан	Конденсат	6,66	25,08	50,38	88,07
		Газ	94,3	129,2	175,0	206,1
C_3H_6	Пропен	Конденсат	9,58	28,95	53,51	87,11
		Газ	79,91	107,5	144,2	169,0
C_3H_8O	2-Пропиловый спирт	Конденсат	8,41	24,7	46,1	74,1
C_3H_6O	Ацетон	Конденсат	10,3	30,2	56,8	83,2
		Газ	92,05	122,8	163,8	191,3
C_4H_{10}	н-Бутан	Конденсат	4,52	27,45	55,65	115,1
		Газ	124,7	169,1	226,8	265,7
C_4H_8	1-Бутен	Конденсат	8,21	26,48	53,80	105,4
		Газ	112,7	149,9	197,7	229,8
C_5H_{12}	н-Пентан	Конденсат	10,25	31,60	62,64	140,6
		Газ	154,4	208,7	278,5	325,3
C_5H_{10}	1-Пентен	Конденсат	10,54	32,93	61,92	129,2
		Газ	143,1	189,8	249,4	289,4
C_6H_{14}	Гексан	Конденсат	10,84	34,64	70,08	109,0
		Газ	181,3	248,4	330,3	385,0
C_6H_6	Бензол	Конденсат	8,37	26,53	44,93	64,64
		Газ	111,9	157,9	209,9	241,3

Формула	Название	Состояние	Температура, °К			
		Конденсат	20	40	60	80
		Газ	400	500	600	700
C_7H_8	Толуол	Газ	139,1	194,9	260,2	300,3
C_7H_{10}	о-Кеилол	Конденсат	11,60	31,50	60,38	96,06
		Газ	171,7	234,2	341,1	369,5
C_8H_8	Стирол	Конденсат	11,71	32,28	56,19	90,75
		Газ	160,3	218,2	284,2	324,6
$C_{10}H_8$	Нафталин	Конденсат	0,37	30,12	51,99	81,75
		Газ	180,7	250,8	326,8	374,4
$C_{10}H_8$	Азулен	Газ	176,4	246,2	327,4	—

10.6. ТЕПЛОЕМКОСТЬ C_P И ОТНОШЕНИЕ C_P/C_V ДЛЯ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ

Таблица 10.9

Зависимость теплоемкости C_P, *кал/(г·град)*, газов и жидкостей от давления и температуры
Ar, аргон [19, 20]

T, °K	Давление, *атм*					
	1	4	30	40	70	100
110	0,12833	0,14253	—	0,320*	0,313*	0,297
130	0,12578	0,13482	0,1606	0,365	0,334	0,314
150	0,12508	0,13119	0,14625	0,359	—	0,380
170	0,12553	0,12015	0,13731	0,2258	0,330**	0,532
200	0,12514	0,12749	0,13246	0,16467	0,20890	0,25870
220	0,12498	0,12681	0,13089	0,15372	0,18407	0,21890
250	0,12481	0,12614	0,12890	0,14427	0,16218	0,18208
300	0,12466	0,12552	0,12726	0,13631	0,14576	0,15522
350	0,12457	0,12514	0,12637	0,13183	0,13681	0,14527
450	0,12449	0,12452	0,12549	0,12880	0,13209	0,13537
600	0,12443	0,12461	0,12495	0,12666	0,12830	0,12989

* При T = 122°K.
** При T = 185°K.

T, °K	Давление, *атм*					
	200	500	1000	2000	3000	5000
110	—	0,227	0,196	—	—	—
160	0,254	0,2308	0,2094	0,1945	0,1853	—
190	0,273	0,2398	0,2200	0,2064	0,1976	0,1807
220	0,262	0,2451	0,2301	0,2164	0,2076	0,1962
250	0,2848	0,2370	0,2303	0,2246	0,2135	0,2021
280	0,2089	0,2213	0,2306	0,2201	0,2089	0,2010
320	0,1846	0,1988	0,2000	0,1979	0,1812	0,1745
400	0,1614	0,1674	0,1681	—	—	—
500	0,1498	0,1522	0,1513	—	—	—

Ar, Аргон

p, атм	Температура, °K					
	100	1000	1400	1800	2400	3000
1	0,12440	0,12439	0,12438	0,12438	0,12437	0,12437
10	0,12468	0,12456	0,12446	0,12442	0,12440	0,12438
100	0,12726	0,12616	0,12517	0,12482	0,12462	0,12447

H_2, водород [9, 20]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	1	10	100		1	10	100
30	2,590	-	—	100	2,683	2,750	3,248
40	2,527	3,413	—	110	2,751	2,801	3,206
50	2,507	2,905	-	120	2,810	2,865	3,196
60	2,505	2,704	3,900	150	3,012	3,009	3,246
70	2,528	2,698	3,792	200	3,235	3,249	3,361
80	2,568	2,684	3,513	300	3,420	3,425	3,476
90	2,620	2,708	3,316	600	3,477	3,479	3,485

N_2, азот [20]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	1	10	100		1	10	100
100	0,26627	-	—	400	0,24972	0,25146	0,2670
140	0,26270	0,28074	—	600	0,25046	0,25353	0,26318
180	0,24957	0,26211	—	700	0,25243	0,25292	0,26747
220	0,24111	0,25541	0,347	1000	0,27996	0,27919	0,28122
260	0,24889	0,25370	0,303	1400	0,29150	0,29456	0,29552
300	0,24884	0,25226	0,2552	1800	0,30374	0,30379	0,30420
350	0,24907	0,25146	0,2736	3000	0,31597	0,31597	0,31607

O_2, кислород [20]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	1	10	100		1	10	100
120	0,22145	—	—	450	0,22559	0,22990	0,2427
150	0,21950	0,24536	—	550	0,23612	0,23605	0,2450
170	0,21894	0,23474	—	700	0,24642	0,24690	0,2516
210	0,21848	0,22547	0,4021	1000	0,26052	0,26074	0,2629
250	0,21866	0,22400	0,2025	1400	0,27108	0,27118	0,2721
300	0,21565	0,22325	0,2566	1800	0,27850	0,27860	0,2792
350	0,22008	0,22141	0,2175	2200	0,28561	0,28565	0,2850
400	0,22507	0,22679	0,2435	3000	0,29846	0,29847	0,2986

B_2H_6, диборан [21]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	1	10	100		1	10	100
150	0,3732	—	—	420	0,6436	0,6543	0,6245
240	0,4135	0,5572	—	440	0,6666	0,6779	0,6117
270	0,4482	0,5195	—	460	0,6932	0,7013	0,6100
300	0,4963	0,5382	1,3266	500	0,7407	0,7472	0,8245
360	0,5656	0,5844	1,0150	800	1,0265	1,0257	1,0409
400	0,6179	0,6306	0,8603	1000	1,3403	1,3409	1,3468

CO, окись углерода [20]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	1	10	100		1	10	100
200	0,2195	0,2600	—	600	0,2568	0,2606	0,2692
220	0,2493	0,2775	—	700	0,2660	0,2666	0,2719
260	0,2490	0,2556	0,2902	900	0,2780	0,2763	0,2814
350	0,2485	0,2523	0,2765	1200	0,2910	0,2918	0,2935
400	0,2521	0,2538	0,2589	1800	0,3064	0,3065	0,3070
520	0,2553	0,2560	0,2660	3000	0,3176	0,3175	0,3175

CO_2, двуокись углерода [20, 22]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	1	10	100		1	10	100
220	0,1871	—	—	340	0,2127	0,2226	0,4140
240	0,1901	0,3221	—	420	0,2286	0,2339	0,2976
260	0,1924	0,2605	—	490	0,2410	0,2412	0,2695
265	0,1916	0,2715	—	550	0,2506	0,2520	0,2784
270	0,1909	0,2160	0,517*	600	0,2572	0,2589	0,2787
280	0,1992	0,2187	0,559**	700	0,2703	0,2704	0,2830
290	0,2015	0,2191	0,655***	800	0,2794	0,2802	0,2881
300	0,2078	0,2195	—	1000	0,2900	0,2904	0,2938
320	0,2089	0,2207	0,5038	1200	0,3059	0,3061	0,3080
330	0,2105	0,2215	0,6170	1500	0,3170	0,3172	0,3188

* При $T = 273,15$°K.
** При $T = 298,15$°K.
*** При $T = 280,15$°K.

H_2O, вода [23]

T, °K	Давление, атм					T, °K	Давление, атм				
	1	50	100	200	500		1	50	100	200	500
273,15	1,007	—	0,995	0,987	—	613	0,485	0,545	1,028	1,679	—
323,15	0,998	—	0,993	0,988	—	633	0,467	0,573	0,878	2,907	—
373,15	0,992	—	1,001	0,996	—	643	0,489	0,643	0,893	3,766	—
403,15	0,477	—	1,012	1,007	—	663	0,492	0,531	0,755	1,733	—
443,15	0,470	—	1,036	1,026	—	693	0,426	0,536	0,680	1,161	—
473,15	0,472	—	1,063	1,051	—	723	0,502	0,535	0,650	0,938	—
503,2	0,474	0,745	1,103	1,085	—	773	0,510	0,539	0,616	0,785	1,709
513,2	0,474	0,694	1,122	1,100	—	823	0,519	0,544	0,600	0,705	1,198
543,2	0,477	0,619	1,202	1,162	—	873	0,527	0,549	0,590	0,667	0,970
573	0,480	0,674	1,368	1,273	—	973	0,544	0,562	0,585	0,626	0,82
583	0,481	0,565	1,662	1,332	—						

NH_3, аммиак [22]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	1	10	62		300	500	1000
300	0,516	0,746	1,14*	310	1,11	1,02	0,91
320	0,519	0,063	1,17	350	1,26	1,06	0,94
340	0,524	0,616	1,26	370	1,41	1,09	0,96
360	0,536	0,599	1,13	380	1,55	1,10	0,97
380	0,538	0,583	1,04	390	1,65	1,12	0,98
400	0,546	0,587	0,86	400	1,81	1,14	0,99
420	0,554	0,587	0,79	420	1,47	1,20	1,00
440	0,563	0,587	0,73	440	1,10	1,21	1,00
460	0,580	0,599	0,70	460	0,86	1,30	1,00
520	0,598	0,616	0,69	520	0,79	1,21	0,97
580	0,624	0,640	0,68	560	0,74	1,01	0,93

* При T = 310°K.

CF_4, метан [23]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	0	25	100		0	25	100
323,15	0,5461	0,570	0,682	573,2	0,7567	0,765	0,783
373,15	0,5853	0,604	0,664	673,2	0,8435	0,848	0,860
423,15	0,6273	0,640	0,682	773,2	0,9216	0,925	0,933
473,15	0,6700	0,680	0,710	873,2	0,9926	0,996	1,003
523,2	0,7140	0,722	0,741	973,2	1,057	1,062	1,064

C_2H_6, этан [2]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	0	17	34		0	17	34
294,26	0,4183	0,4853	0,7073	344,25	0,4661	0,5068	0,5761
310,95	0,4343	0,4900	0,6215	360,95	0,4821	0,5203	0,5801
327,65	0,4602	0,4980	0,5866	377,55	0,4968	0,5355	0,5696

C_2H_2, этин (ацетилен) [19]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	0,1	1	10		0,1	1	10
240	0,3657	0,3726	0,4664	290	0,3976	0,4011	0,4422
270	0,3853	0,3896	0,4446	300	0,4034	0,4068	0,4429
280	0,3915	0,3953	0,4429	320	0,4140	0,4184	0,4472

$C_2F_3Cl_3$, трифеноитрихлорэтан (фреон-113) [23]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	10	20	30		10	20	30
253,15	0,216	0,215	0,214	323,15	0,232	0,229	0,226
263,15	0,218	0,216	0,215	333,15	0,234	0,231	0,228
273,15	0,220	0,218	0,217	343,15	0,237	0,233	0,230
283,15	0,222	0,220	0,218	353,15	0,239	0,236	0,232
293,15	0,225	0,222	0,220	363,15	0,242	0,239	0,234
303,15	0,226	0,224	0,222	373,15	0,246	0,242	0,237
313,15	0,229	0,226	0,224	383,15	0,251	0,246	0,240

C_3H_8, пропан [19]

T, °K	Давление, атм						
	0,1	1	5	10	50	100	200
230	0,322	0,537	0,537	0,537	0,528	—	—
240	0,333	0,540	0,540	0,540	0,528	—	—
250	0,342	0,349	0,542	0,542	0,531	—	—
260	0,354	0,360	0,546	0,546	0,535	—	—
270	0,365	0,372	0,558	0,555	0,542	—	—
280	0,374	0,381	0,449	0,574	0,553	0,549	—
290	0,385	0,390	0,435	0,601	0,574	0,567	—
300	0,397	0,401	0,431	0,637	0,599	0,590	—
310	0,406	0,413	0,438	0,517	0,630	0,615	0,585
320	0,417	0,424	0,444	0,499	0,659	0,642	0,596
340	0,440	0,444	0,460	0,488	0,787	0,698	0,621
360	0,463	0,465	0,476	0,492	0,880*	0,764	0,649
380	0,485	0,487	0,497	0,506	—	0,832	0,673
400	0,508	0,510	0,517	0,526	0,737**	0,905	0,696
440	0,553	0,555	0,560	0,567	0,678	0,921	0,739
480	0,596	0,599	0,605	0,608	0,664	0,874	0,778
520	0,637	0,637	0,642	0,646	0,680	0,776	0,798
560	0,669	0,669	0,671	0,676	0,701	0,755	0,789
600	0,696	0,696	0,698	0,701	0,719	0,751	0,762

* При T = 350 °K.
** При T = 420 °K.

Воздух [3]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	1	10	100		1	10	100
110	0,2442	0,2298	—	500	0,2464	0,2472	0,2565
130	0,2424	0,2600	—	700	0,25696	0,2575	0,2619
150	0,2415	0,2637	—	1000	0,2730	0,2732	0,2752
180	0,2408	0,2533	0,180	1500	0,2942	0,2943	0,2951
200	0,2404	0,2492	0,1170	2000	0,3198	0,3165	0,3159
250	0,2403	0,2465	0,3062	2400	0,3762	0,3448	0,3352
300	0,2406	0,2439	0,2776	2800	0,5399	0,4069	0,3634
400	0,2421	0,2441	0,2599	3000	0,6833	0,4613	0,3813

Таблица 10.10

Отношение теплоемкостей $\gamma = C_p/C_V$ некоторых газов

T, °K	Давление, атм: 1	10	100
	Азот, N_2 [20]		
100	1,424	—	—
140	1,410	1,526	—
180	1,406	1,402	—
220	1,403	1,417	1,85
260	1,402	1,424	1,65
300	1,401	1,417	1,566
350	1,400	1,411	1,512
400	1,396	1,406	1,480
450	1,395	1,401	1,455
500	1,391	1,396	1,437
600	1,389	1,386	1,410
700	1,371	1,373	1,390
800	1,360	1,361	1,372
900	1,350	1,351	1,359
1000	1,341	1,342	1,347
1200	1,327	1,327	1,331
1500	1,317	1,317	1,319
	Аммиак, NH_3 [22]		
330	1,308	1,410	—
340	1,298	1,356	—
360	1,304	1,343	—
400	1,277	1,315	
460	1,260	1,279	1,668
520	1,252	1,258	1,447
580	1,250	1,243	1,339
	Аргон, Ar [3, 20]		
100	1,627	—	—
120	1,676	—	—
140	1,675		—
160	1,674	1,803	—
180	1,675	1,759	—
200	1,674	1,740	3,021
240	1,673	1,711	2,596
260	1,671	1,700	2,17
280	1,670	—	—
300	1,670	1,697	1,96
320	1,669	1,687	—
360	1,669	1,679	—
400	1,668	1,682	1,80
450	1,666	1,679	1,780
500	1,668	1,676	1,753
550	1,667	1,669	—
600	1,667	1,673	1,721
	Ацетилен, C_2H_2 [19]		
160	1,354	—	
180	1,333	—	—
200	1,313	—	—
240	1,407	1,479	—
260	1,361	1,392	—
280	1,247	1,339	—
290	1,240	1,318	—
300	1,233	1,299	—
310	1,223	1,288	—
390	1,221	1,273	—

Продолжение табл. 10.10

T, °K	Давление, атм: 1	10	100
	Водород, H_2 [20]		
30	1,730	—	—
50	1,681	1,913	—
70	1,655	1,738	2,206
90	1,611	1,655	1,945
110	1,563	1,586	1,768
130	1,521	1,536	1,654
150	1,488	1,500	1,579
180	1,456	1,461	1,507
210	1,433	1,437	1,468
240	1,419	1,422	1,442
270	1,410	1,413	1,427
300	1,405	1,406	1,417
340	1,401	1,401	1,409
380	1,399	1,399	1,404
420	1,398	1,398	1,402
460	1,397	1,398	1,400
500	1,397	1,397	1,398
550	1,396	1,397	1,397
600	1,396	1,396	1,396
	Воздух [20]		
120	1,4166	1,6396	—
140	1,4119	1,5350	—
160	1,4069	1,4896	—
180	1,4071	1,4648	—
200	1,4067	1,4489	2,1376
240	1,4040	1,4313	1,7439
280	1,4024	1,4214	1,6094
300	1,4017	1,4177	1,5711
320	1,4008	1,4146	1,5425
360	1,3987	1,4091	1,5024
400	1,3961	1,4041	1,4752
450	1,3920	1,3979	1,4458
500	1,3871	1,3918	1,4221
550	1,3816	1,3854	1,4170
600	1,3760	1,3788	1,3941
650	1,3702	1,3726	1,3861
700	1,3646	1,3664	1,3832
800	1,354	1,356	1,3663
900	1,345	1,346	1,3583
1000	1,336	1,336	1,3427
1200	1,322	1,322	1,3297
1500	1,304	1,304	1,3156
	Кислород, O_2 [3, 20]		
220	1,403	1,441	2,190
260	1,400	1,425	1,721
300	1,396	1,414	1,569
350	1,391	1,403	1,526
400	1,382	1,391	1,476
450	1,374	1,381	1,445
500	1,366	1,371	1,420
600	1,350	1,363	1,383
700	1,337	1,339	1,353
	Пропан, C_3H_8 [19]		
240	1,80		—
260	1,125	—	—
280	1,100		
300	1,143	—	—
340	1,111	1,169	—
360	1,109	1,147	—

Продолжение табл. 10.10

T, °K	Давление, атм		
	1	10	100
400	1,097	1,124	—
440	1,082	1,112	1,510
480	1,065	1,099	1,421
520	1,076	1,091	1,271
560	1,069	1,090	1,159
600	1,069	1,074	1,150
	Углерода двуокись, CO_2 [28]		
220	1,349	—	—
250	1,324	1,416	—
300	1,293	1,352	—
350	1,271	1,305	2,40
400	1,251	1,276	1,630
450	1,241	1,258	1,463
500	1,230	1,241	1,387
600	1,214	1,220	1,291
700	1,202	1,206	1,247
800	1,193	1,196	1,222
900	1,186	1,188	1,206
1000	1,181	1,180	1,195
1200	1,173	1,174	1,183
1500	1,166	1,167	1,172
	Углерода окись, CO [3]		
290	1,402	1,424	1,698
300	1,401	1,420	1,633
350	1,399	1,414	1,542
400	1,396	1,406	1,494
450	1,392	1,400	1,468
500	1,387	1,390	1,441
600	1,376	1,381	1,409
700	1,364	1,366	1,386
800	1,352	1,354	1,368

10.6. РАСТВОРЫ И ЖИДКИЕ СМЕСИ

Теплоемкость соединений жидкидвухкомпонентного состава (сплавов, растворов, сплавов и т. п.) приближенно удовлетворяет правилу смешения:

$$C_{сплава} = \sum_{k=1}^{n} z_k C_k,$$

где z_k — атомная (молярная, массовая, объемная) доля k-компоненты смеси; C_k — атомная (молярная, удельная, или объемная грамматическая) теплоемкость этой компоненты.

Для твердых тел правило смешения выполняется и для простой смеси, и для интерметаллического соединения. Отклонения от правила смешения наблюдаются, когда при нагревании происходит изменение состава или структуры вещества, а также в водных растворах электролитов. Плохо выполняется правило смешения для смесей газов при больших давлениях: обычно теплоемкость, рассчитанная по правилу смешения, меньше экспериментальной.

Таблица 10.11

Теплоемкость C_p, кал/(г·град), жидких смесей и растворов при давлении 760 мм рт. ст. [23]

t, °C	C_p	t, °C	C_p
Дифенильная смесь*		$H_2O + 6\%\ Na_2SO_4$	
20	0,38		
40	0,40	15	0,867
60	0,41	20	0,867
80	0,43	40	0,869
100	0,45	60	0,885
140	0,49	70	0,900
180	0,54	80	0,929
220	0,58	90	1,002
260	0,63	92	1,022
300	0,66	94	1,08
350	0,60		
400	0,72	$H_2O + 9\%\ Na_2SO_4$	
$H_2O + 6\%\ NaCl$			
		15	0,846
15	0,954	20	0,847
20	0,951	40	0,862
60	0,929	60	0,861
100	0,907	70	0,873
$H_2O + 10\%\ NaCl$		80	0,901
		90	0,956
15	0,922	92	0,972
20	0,920	94	0,990
60	0,896	96	1,01
100	0,872		
$H_2O + 15\%\ NaCl$		$H_2O + 10\%\ KI_2$	
15	0,842	15	0,848
20	0,841	20	0,849
60	0,830	60	0,869
100	0,798	100	0,897
$H_2O + 24,20\%\ NaCl$		$H_2O + 20\%\ KI_2$	
		15	0,757
15	0,793	20	0,759
20	0,783	60	0,775
60	0,775	100	0,797
100	0,755	$H_2O + 30\%\ KI_2$	
$H_2O + 1,5\%\ Na_2SO_4$		15	0,644
		20	0,646
15	0,911	60	0,666
20	0,912	100	0,686
40	0,921		
60	0,959	$H_2O + 6,5\%\ C_2H_6O$	
70	1,001		
80	1,07	23	1,030
90	1,167	41	1,032
92	1,185		
$H_2O + 3\%\ Na_2SO_4$		$H_2O + 37\%\ C_2H_6O$	
		23	0,858
15[1]	0,896	41	0,874
20	0,886		
40	0,892	$H_2O + 78\%\ C_2H_6O$	
60	0,909		
70	0,941	23	0,669
80	0,996	41	0,681
90	1,077		

[1] Дуплекс 18,5% дифенилового эфира + 25,5% дифенила.

Таблица 10.12

Теплоемкость сталей при давлении 760 *мм рт. ст.*

Марка стали	t, °C	C_p, *кал/(г·град)*	Литература
Углеродистые стали			
08	900	0,156	[24]
	1300	0,159	[24]
Ст. 15	0÷100	0,112	[25]
	300	0,132	[24]
	500	0,163	[24]
	705	0,316	[24]
	800	0,161	[24]
	1000	0,153	[24]
Ст. 20	100	0,110	[24]
	300	0,125	[24]
	650	0,195	[24]
Ст. 25	0÷100	0,112	[25]
	0÷400	0,125	[25]
	550	0,152	[24]
	900	0,155	[24]
	1100	0,156	[24]
	1300	0,163	[24]
Ст. 10; 30; 35	0÷100	0,112	[25]
	0÷600	0,138	[25]
Ст. 40	100	0,112	[25]
	600	0,137	[25]
	1100	0,152	[24]
	1300	0,166	[24]
Ст. 45	0÷100	0,112	[25]
	0÷400	0,125	[25]
	0÷600	0,137	[25]
	900	0,150	[24]
	1100	0,159	[24]
	1300	0,164	[24]
Ст. 50	100	0,134	[24]
	400	0,153	[24]
	600	0,268	[24]
	640	0,828	[24]
	700	0,160	[24]
	800	0,153	[24]
	900	0,150	[24]
Легированные стали			
1Х13	20	0,11	[26]
2Х13	200	0,12	[25]
3Х13	200	0,117	[25]
	500	0,135	[25]
Х17, Х28	20	0,11	[26]
Х9С2	20	0,111	[27]
	600	0,218	[27]
	900	0,235	[27]
12ХС	0÷100	0,115	[25]
10ХС2М	200	0,114	[25]
Х18Н9	20	0,12	[26]
2Х18Н9	100	0,119	[26]
	600	0,174	[27]
	900	0,24	[27]
0Х18Н10	20	0,12	[26]
12Х11Ф	60	0,108	[28]
Х23Н13	20	0,121	[28]

Марка стали	t, °C	C_p, *кал/(г·град)*	Литература
Х23Н18	20	0,12	[26]
Х25Т	20	0,11	[26]
12ХМ	20	0,115	[26]
15ХМА	0÷100	0,116	[25]
20ХМ, 20ХМА	20÷100	0,113	[25]
	20÷600	0,139	[25]
30ХМ	20	0,11	[26]
1Х18Н9Т	20	0,12	[28]
Х18Н10Т	20	0,12	[26]
Х18Н25С2	20	0,123	[25]
Х20Н14С2	20	0,12	[26]
Х20Н28С2	20	0,14	[26]
12ХН3А	360	0,157	[28]
	425	0,154	[28]
30ХН3А	34	0,141	[28]
	512	0,154	[28]
35ХГСМА	20	0,11	[25]
25Х2МФА	20	0,11	[25]
1Х14Н14В2М	20	0,128	[25]
4Х14Н14В2М	20	0,124	[25]

Таблица 10.13

Теплоемкость двухкомпонентных сплавов, не содержащих железа [29]

Состав	t, °C	C_p, *кал/(г·град)*
67% Al; 33% Cu	150	0,415
	—100	0,499
	0	0,605
50% Al; 50% Cu	—100	0,35
	100	0,42
	0	0,51
33% Al; 67% Cu	100	0,46
	500	0,53
25% Al; 75% Cu	—150	0,31
	—100	0,36
	0	0,43
92% Al; 8% Mg	20	1,16
32% Al; 68% V	15÷100	0,055
60% Al; 40% Zn	20÷100	0,567
80% Au; 20% Cu	—136	0,164
	—39	0,180
	12	0,183
x% Bi; $(100-x)$% Cd	17÷100	$0,2291+0,0016816x$
x% Bi; $(100-x)$% Pb ($x \leq 50\%$)	0÷100	$0,1238+0,000113x$
x% Bi; $(100-x)$% Pb ($50\% \leq x \leq 96\%$)	0÷100	$0,1471-0,000217x$
99% Bi; 1% Sn	0÷100	0,1266
97% Bi; 3% Sn	0÷100	0,1315
94% Bi; 6% Sn	0÷100	0,1340
50% Bi; 50% Sn	0÷100	0,1818
25% Bi; 75% Sn	0÷100	0,2088
7% Bi; 93% Sn	0÷100	0,2236
3% Bi; 97% Sn	0÷100	0,2266
32% Cd; 68% Sn	—77÷20	0,242
	20÷100	0,234

Продолжение табл. 10.13

Состав	t, °C	c_p, кал/(г·град)
67% Cu; 33% Mg	—150	0,30
	0	0,40
	200	0,51
	400	0,57
33% Cu; 67% Mg	—150	0,44
	—100	0,51
	0	0,61
90% Cu; 10% Mn	—136	0,323
	—39	0,376
	12	0,396
68% Cu; 32% Mn	—136	0,346
	—39	0,400
	12	0,414
90% Cu; 5% Ni	—136	0,306
	—39	0,358
	12	0,379
90% Cu; 10% Ni	—136	0,307
	—39	0,366
	12	0,380
40% Cu; 60% Ni (кон-стантан)	0	0,410
	100	0,427
x% Cu; (100 — x)% Ni (бронзы, 10% < x < 90%)	18÷100	0,2273+0,00155x
(100 — x)% Cu; x% Zn (латуни, 10% < x < 50%)	18÷100	0,387
10% Ir; 90% Pt	20÷100	0,1352
95% Mn; 5% Ni	—136	0,387
	—39	0,435
	12	0,445
90% Mn; 10% Ni	—136	0,386
	—39	0,435
	12	0,459
55% Mn; 45% Ni	—136	0,386
	—39	0,448
	12	0,464
x% Pb; (100 — x)% Sb (5% < x < 98%)	20÷100	0,1301 + 0,0008x
64% Pb; 36% Sn	—179÷—79	0,1607
	—79÷18	0,1628
	12÷99	0,1705
36% Pb; 64% Tl	0÷25	0,1281
x% Sn; (100 — x)% Zn	16÷100	0,2294+0,001636x

Таблица 10.14

Теплоемкость многокомпонентных специальных сплавов

Сплав (состав)	t, °C	c_p, кал/(г·град)	Литература
Алюминий	0	0,126	[30]
Белый металл	15÷99	0,0858	[30]
Вуда сплав	5÷100	0,0952	[31]
	100÷150	0,0426	[31]
Инвар	—	0,12	[30]
Лишнеса сплав	5÷50	0,0345	[31]
	100÷150	0,0426	[31]
Манганин (84% Cu; 12% Mn; 4% Ni)	18	0,0973	[30]
	100	0,1004	[30]
Магний	20÷1300	0,127	[30]
Розе сплав	—77÷20	0,0356	[31]
	20÷89	0,0352	[31]
Фосфористая бронза	—188÷18	0,081	[31]
	20÷100	0,0876	[31]
Хромель (56% Na; 44% K)	—	0,107	[30]
	200	0,269	[25]
	300	0,261	[25]
	400	0,255	[25]
	800	0,250	[25]
(22% Na; 78% K)	100	0,225	[25]
	600	0,209	[25]
	800	0,213	[25]
(44,5% Pb; 55,5% Bi)	0	0,03	[25]
	100	0,035	[25]
	150	0,035	[25]
(48% Bi; 26% Pb; 13% Sn; 13% Cd)	0	0,031	[25]
(50% Bi; 31% Pb; 19% Sn)	0	0,033	[25]
(29,9% Bi; 17,5% Sb; 18,7% Zn; 33,9% Sn)	20÷99	0,0666	[30]
42% Ni; 57% Fe; 1% Mn)	—	0,12	[30]

Таблица 10.15

Теплоемкость технических материалов (неметаллов)

Наименование	t, °C	Ср, ккал/(кг·град)	Литература
Топлива и масла			
Бензин (Б-70)	20	0,492	[23]
	100	0,587	[23]
	200	0,797	[23]
Бензин, пары	100	0,558	[23]
	250	0,617	[23]
Глицерин технический	15÷30	0,576	[30]
Керосин (Т-1)	20	0,478	[23]
	100	0,568	[23]
	200	0,715	[23]
Керосин, пары	200	0,591	[27]
Масло техническое АМГ-10	20	0,44	[23]
Масло техническое МС-20	20	0,466	[23]
	150	0,584	[23]
Масла растительные	20	0,20 ÷ 0,47	[30]
Нефть	20÷60	0,51	[30]
Пластические вещества			
Акриловые пластмассы	—	0,35	[30]
Асфальт	20	0,40	[32]
Винипласт	20	0,24	[24]
Капрон	20	0,35	[24]
Пейзаж	20	0,4	[30]
Оргстекло	20	0,34 ÷ 0,37	[24]
Парафин	−20 ÷ 0	0,377	[30]
Парафин жидкий	60	0,712	[30]
Полистирольные пластмассы	20	0,32	[24]
Полиэтилен	173	0,15	[24]
	20	0,60	[16]
Полиэфирные пластмассы	20	0,20÷0,60	[24]
Фторопласт 3	20	0,22	[24]
Фторопласт-4 (тефлон)	−253	0,0165	[33]
	−223	0,0491	[33]
	196	0,0739	[33]
	−173	0,0931	[33]
	123	0,1320	[33]
	−73	0,1600	[33]
	7	0,2460	[33]
Этролы целлюлозные	—	0,37	[30]
Каучук, резина			
Каучук вулканизированный	20	0,4	[30]
Резина вулканизированная	20	0,51	[24]
Резина полувулканизированная	20	0,45	[30]
Эбонит	20	0,341	[24]
Стекла			
Кварцевое	20	0,213	[24]
	200	0,213	[24]
	400	0,230	[24]
	600	0,240	[24]
	1000	0,260	[24]
	1500	0,273	[24]

Наименование	t, °C	Ср, ккал/(кг·град)	Литература
Крон	10÷15	0,161	[30]
Натровое	20÷100	0,1924	[34]
	20÷300	0,2351	[34]
	20÷500	0,2516	[34]
	20÷700	0,2619	[34]
	20÷1000	0,2650	[34]
Оконное	0÷100	0,16	[28]
Пирекс	−100÷0	0,1445	[32]
	20÷100	0,1695	[34]
	0÷300	0,2053	[32]
	0÷500	0,2270	[32]
	40÷800	0,271	[34]
	40÷1000	0,287	[34]
Термометрическое 16ᴴᴴ	10÷100	0,1968	[30]
Флинт	10÷50	0,117	[30]
Стекла на природных силикатах			
Анорит ($CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)	0÷100	0,1881	[29]
	0÷500	0,2306	[29]
	0÷700	0,2406	[29]
Альбит ($Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$)	0÷100	0,1977	[29]
	0÷500	0,2410	[29]
	0÷900	0,2640	[29]
Микроклин ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$)	0÷100	0,1919	[29]
	0÷600	0,2321	[29]
	0÷1100	0,2598	[29]
Волластонит ($CaO \cdot SiO_2$)	0÷100	0,1852	[29]
	0÷700	0,2355	[29]
Диопсид ($CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$)	0÷100	0,1939	[29]
	0÷700	0,2439	[29]
Природные вещества, минералы			
Авантюрин	0÷100	0,168	[30]
Апатит	15÷99	0,190	[30]
Асбест	20÷98	0,195	[30]
Аугит	20÷98	0,193	[30]
Берилл	50	0,201	[30]
Бирюза	35	0,161	[30]
Гипсит	0	0,304	[30]
	400	0,273	[30]
	1200	0,357	[30]
Гипс	200	0,077	[30]
	0	0,246	[30]
Гранит	0	0,190	[30]
	400	0,256	[30]
	800	0,311	[30]
Гранит	0	0,177	[30]
	200	0,242	[30]
Графит	—	0,2	[32]
Доломит	20÷98	0,222	[30]
Каолин	0	0,237	[30]
	400	0,323	[30]
Лава вулканическая	23÷100	0,20	[30]
	31÷776	0,25	[30]
Малахит	15÷99	0,176	[30]
Слюда	20	0,21	[26]
Тальк	50	0,206	[30]
Уголь каменный	20÷1040	0,3145	[30]
Шпинель	9÷98	0,193	[30]
Шеелит	50	0,090	[30]
Строительные материалы			
Бетон	0	0,20	[35]

Наименование	t, °C	c_p, кал/(г·град)	Литература
Бумага, картон	—	0,36	[32]
Войлок	—	0,45	[28]
Глина	0	0,179	[30]
	400	0,270	[30]
	800	0,361	[30]
Дерево	20	~0,3	[30]
Изоляция	0÷100	0,22	[34]
Кирпич красный	0÷100	0,21	[32]
» силикатный	20	0,20	[30]
Камень строительный	—	0,22	[31]
Мел	20	0,21	[28]
Мрамор	20	0,22	[32]
Песок речной	0÷100	0,19	[32]
Пробка	0÷100	0,42	[32]
Пенопласт	—	~0,16	[24]
Текстолит	20	~0,35	[24]
Фанера	0	0,60	[32]
Фибролит	—	0,55	[26]
Шлаки	—	~0,18	[28]
Огнеупоры			
Алундум	100	~0,185	[29]
Глинозем	100	0,200	[29]
	500	0,219	[29]
	1000	0,261	[29]
	1500	0,275	[29]
Корунд:			
диаспоровый	100	0,201	[29]
	1000	0,261	[29]
	1500	0,297	[29]
карборундовый	100	0,211	[29]
	1000	0,186	[29]
магнезитовый	100	0,269	[29]
	1000	0,277	[29]
	1500	0,246	[29]
хромитовый	100	0,170	[29]
	1000	0,223	[29]
шамотный	100	0,199	[29]
	1000	0,229	[29]
	1500	0,295	[29]
Фарфор технический	95	0,26	[32]
Уголь электродный	1,5÷107	0,254	[29]
	26÷76	0,168	[29]
	26÷538	0,199	[29]
	50÷1450	0,397	[29]
Керамика высокотемпературная			
Al_2O_3	100	0,206	[35]
	1000	0,280	[35]
	1800	0,299	[35]
AlN	20	0,180	[37]
B_4C	20	0,224	[37]
Be_3N_2	20	0,302	[37]
BeO	20	0,259	[36]
	100	0,299	[35]
	400	0,420	[38]
	800	0,492	[38]
	1000	0,486	[38]
	1900	0,530	[38]
α-$CaCr_2$	20	0,299	[37]
HfO_2	100	0,176	[36]
LaB_6	20	0,136	[37]
MgO	100	0,233	[35]

Наименование	t, °C	c_p, кал/(г·град)	Литература
$MoSi_2$	20	0,092	[37]
NbC	20	0,085	[37]
TaC	20	0,045	[37]
TaN	20	0,049	[37]
TiB	20	0,170	[37]
TiC	20	0,134	[37]
TiN	20	0,170	[37]
TiO_2	20	0,194	[36]
ThO_2	0÷100	0,056	[36]
UO_2	0÷100	0,056	[36]
VC	20	0,131	[37]
VN	20	0,135	[37]
WC	20	0,043	[37]
ZrO_2	20	0,120	[37]
	1000	0,16	[29]
	1400	0,176	[36]
ZrC	20	0,142	[37]

10.9. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ

При фазовом переходе I рода теплоемкость изменяется скачком, что связано с заробышевым характером процесса образования новой фазы. При этом скачок конечен, но в эксперименте он обычно маскируется более или менее острым пиком, площадь которого равна скрытой теплоте перехода.

При фазовом переходе II рода теплоемкость имеет характерный λ-образный вид, являющийся аномалией собственно теплоемкости, так как теплота фазового перехода II рода равна нулю. Температурный интервал, в котором проявляется λ-особенность теплоемкости, может быть очень узким (например, при переходе в сверхпроводящее состояние этот интервал равен примерно 10^{-12} град), и экспериментальные зависимости имеют иногда вид, сходный с аналогичным явлением для фазовых переходов I рода. Поведение теплоемкости вблизи фазовых переходов II рода показано на рис. 10.9—10.20.

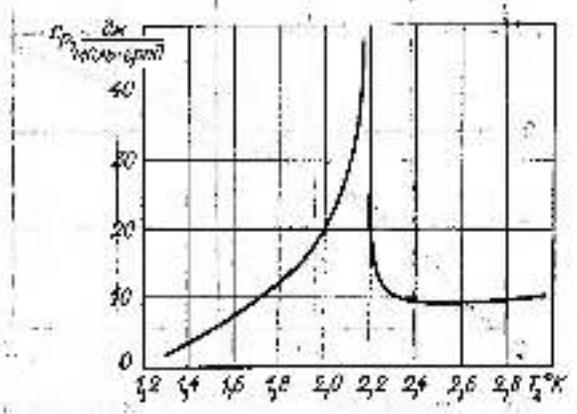


Рис. 10.1. Температурная зависимость теплоемкости ^{4}He вблизи перехода в сверхтекучее состояние [3].

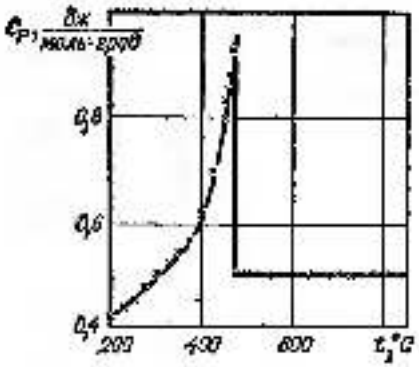


Рис. 10.2. Температурная зависимость теплоемкости β-латуни вблизи точки упорядочения [3].

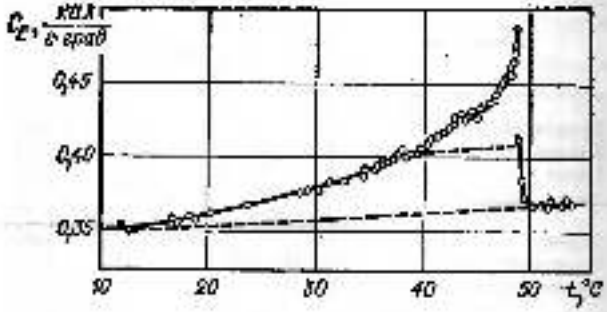


Рис. 10.5. Температурная зависимость теплоемкости C_E корнтвозамкнутого кристалла триглицинсульфата $(NH_2CH_2COOH)_3 \cdot H_2SO_4$ вблизи сегнетоэлектрического перехода [40].

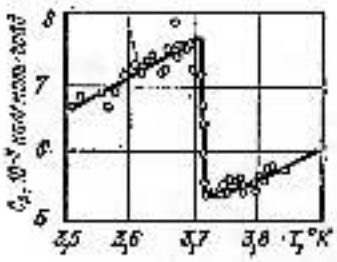


Рис. 10.3. Температурная зависимость теплоемкости Sn вблизи перехода в сверхпроводящее состояние [39].

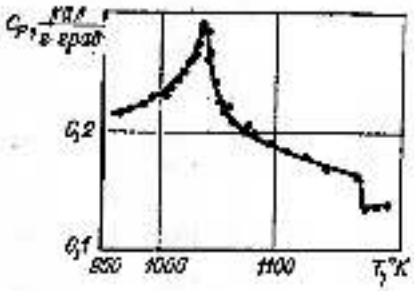


Рис. 10.6. Температурная зависимость теплоемкости Fe вблизи ферромагнитного перехода [41].

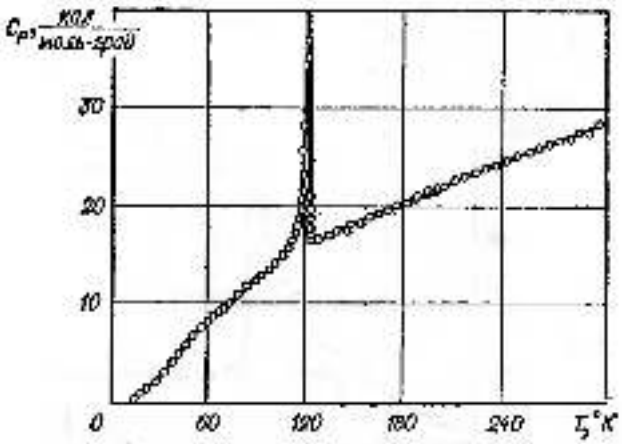


Рис. 10.4. Температурная зависимость теплоемкости KH_2PO_4 вблизи сегнетоэлектрического перехода [31].

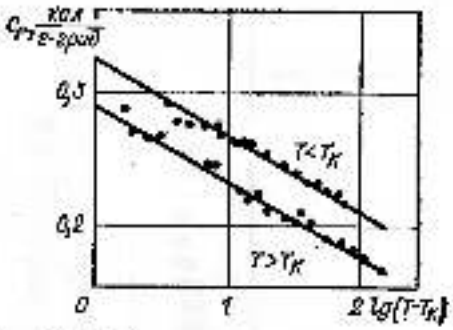


Рис. 10.7. Температурная зависимость теплоемкости Fe вблизи ферромагнитного перехода (в логарифмической шкале). T_K — температура перехода (точка Кюри) [41].

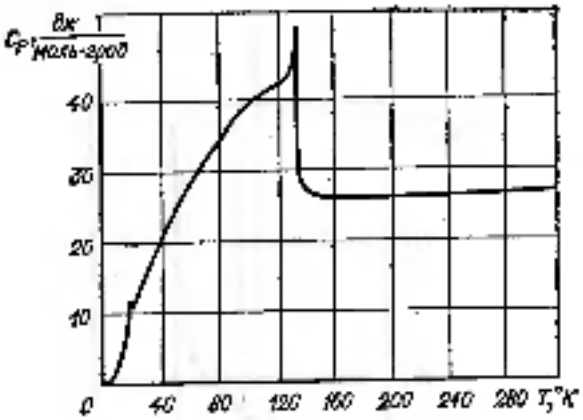


Рис. 10.8. Температурная зависимость теплоемкости Ho вблизи антиферромагнитного перехода [3].

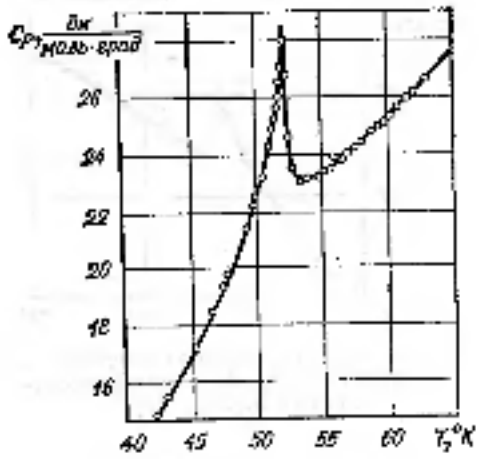


Рис. 10.11. Температурная зависимость теплоемкости $NiCl_2$ вблизи антиферромагнитного перехода [3].

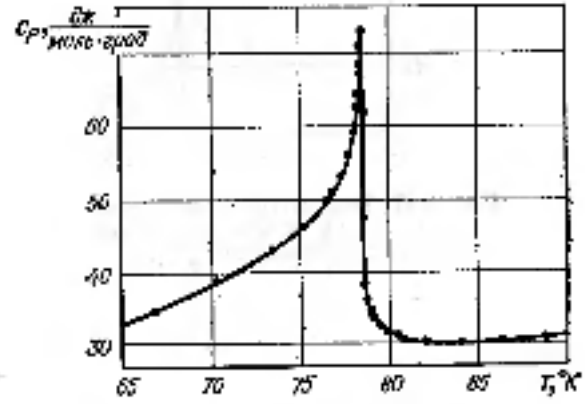


Рис. 10.9. Температурная зависимость теплоемкости FeF_2 вблизи антиферромагнитного перехода [3].

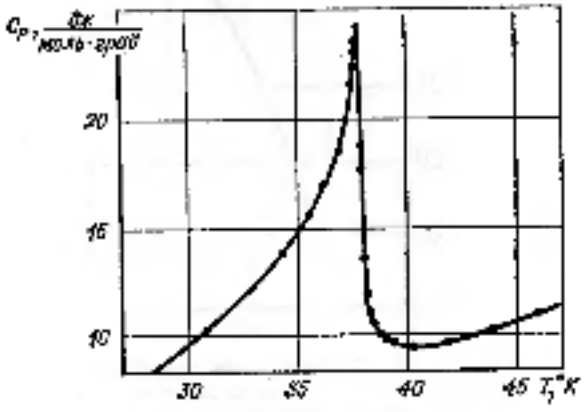


Рис. 10.12. Температурная зависимость теплоемкости CoF_2 вблизи антиферромагнитного перехода [3].

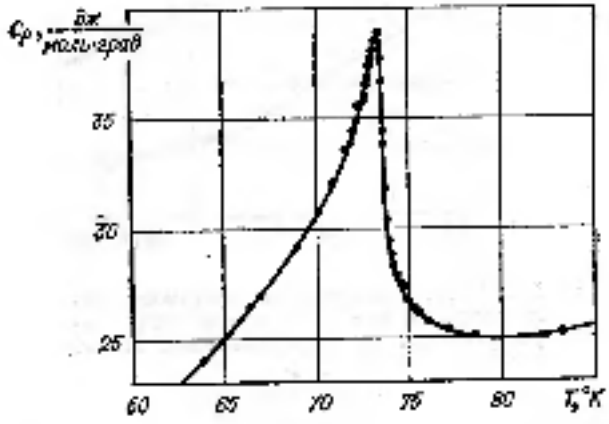


Рис. 10.10. Температурная зависимость теплоемкости NiF_2 вблизи антиферромагнитного перехода [3].

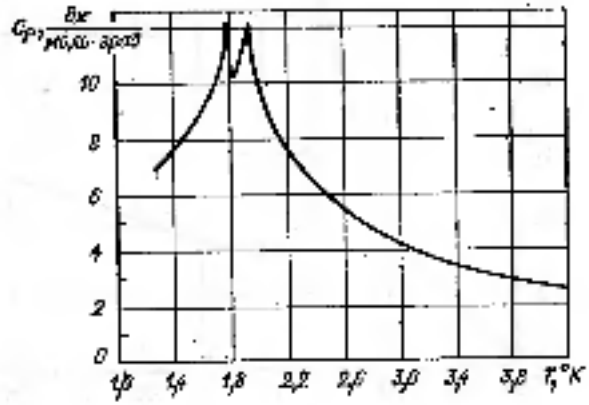


Рис. 10.13. Температурная зависимость теплоемкости $MnCl_2$ вблизи антиферромагнитных переходов II рода [3].

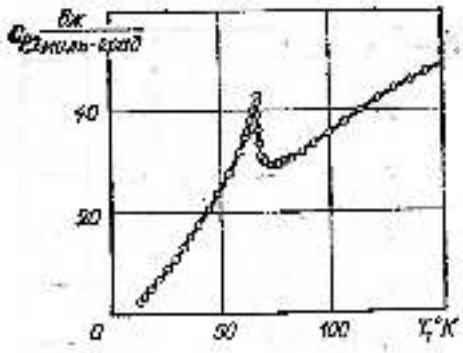


Рис. 10.14. Температурная зависимость теплоемкости MnP_2 вблизи антиферромагнитного перехода [3].

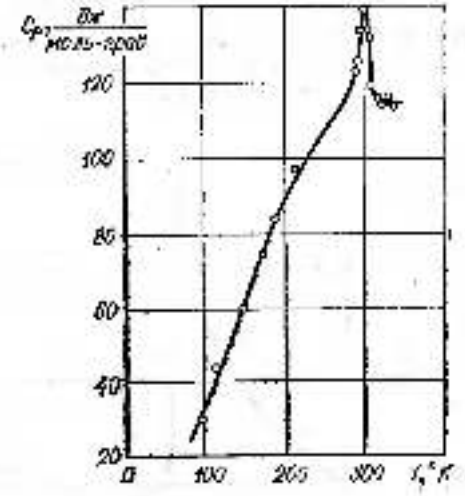


Рис. 10.15. Температурная зависимость теплоемкости Cr_2O_3 вблизи антиферромагнитного перехода [3].

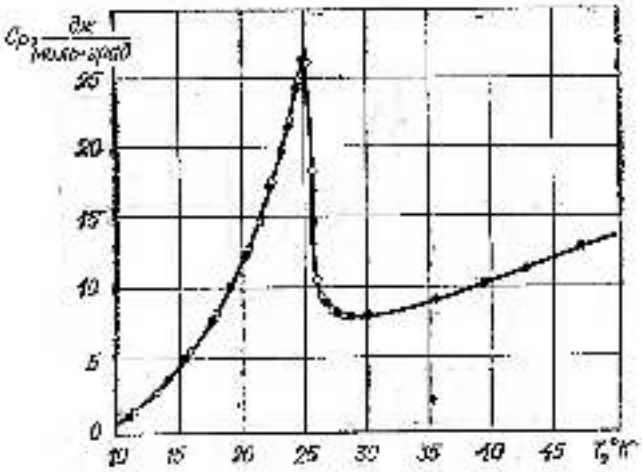


Рис. 10.16. Температурная зависимость теплоемкости NiO_2 вблизи антиферромагнитного перехода [3].

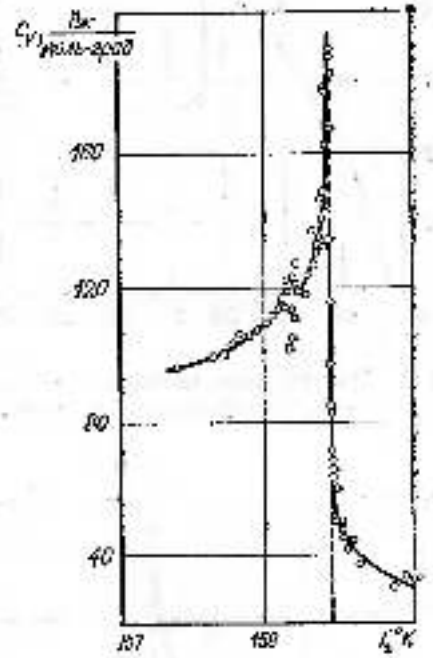


Рис. 10.17. Температурная зависимость теплоемкости O_2 вблизи критической точки парообразования [42].

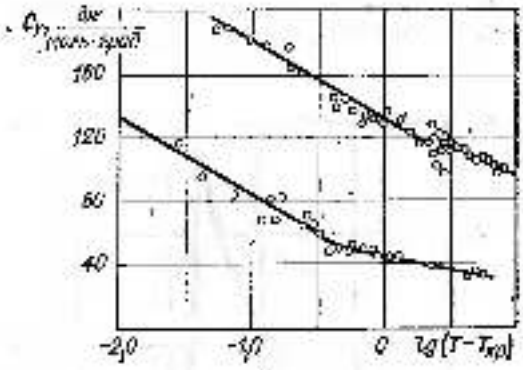


Рис. 10.18. Температурная зависимость теплоемкости O_2 вблизи критической точки парообразования (в логарифмической шкале) [42].

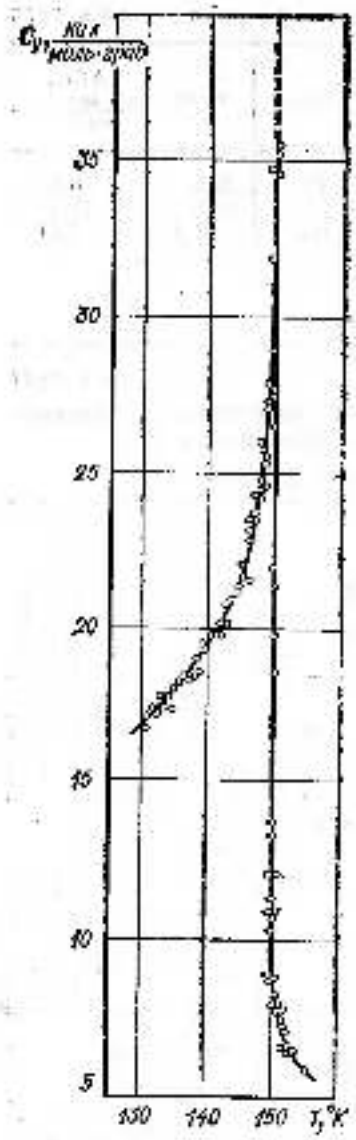


Рис. 10.19. Температурная зависимость теплоемкости Ar вблизи критической точки парообразования вдоль изохоры ρ=0,521 г/см³ [43].

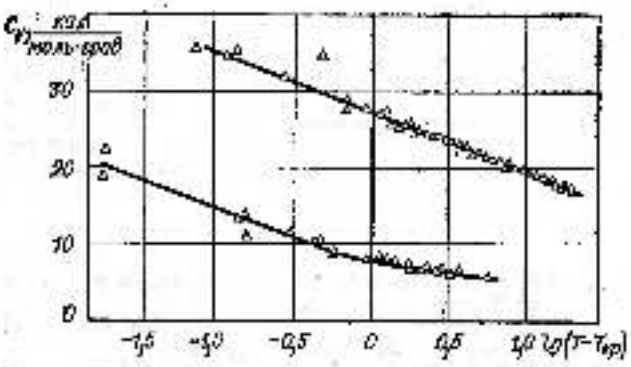


Рис. 10.20. Температурная зависимость теплоемкости Ar вблизи критической точки парообразования (в логарифмическом масштабе). $T_{кр}$ — критическая температура ($T_{кр}$ = 150,7° K) [43]

Таблица 10.16

Скачок теплоемкости ΔC_p элементов и неорганических соединений при фазовом переходе I рода [3, 4]

Обозначения: ΔC_p — разность теплоемкостей C_p вещества в конечной и начальной фазах перехода; T — температура перехода; Пл — плавление; Исп — испарение; Тв — фазовый переход в твердом телле (изменение структуры). Давление 760 мм рт. ст.

Вещество	Переход	T, °K	ΔC_p, кал/моль·град
Элементы			
Ag	Пл	1234,0	0,7
Ar	Пл	83,85	2,16
	Исп	87,29	—5,08
Au	Пл	1336,16	—0,03
	Исп	2913	2,0
Br_2	Пл	265,9	2,0
Co	Тв	721	0,5
Cl_2	Пл	172,16	2,76
	Исп	239,10	8,76
Cu	Пл	1356,2	0,5
F_2	Пл	53,20	1,86
	Исп	85,24	—1,27
Fe	Тв	1180	1,49
	Тв	1673	1
	Пл	1808	—2,8
Ge	Пл	309,94	0,38
H_2	Пл	13,96	1,9
D_2	Пл	18,72	2,2
Kr	Пл	115,95	2,01
	Исп	119,93	—5,67
Na	Пл	371	0,51
Ne	Пл	24,56	2,22
	Исп	27,07	—3,42
Ni	Тв	626	—0,71
	Пл	1728	0,0
O_2	Тв	23,66	0,3
	Тв	43,77	—0,14
	Пл	54,40	1,74
	Исп	90,19	—6,00
S	Тв	368,6	0,24
	Пл	392	1,6
Se	Тв	396	2,2
	Тв	423	0,2
	Пл	490,6	2,7
Te	Пл	723	2,0
Tl	Тв	508,3	0,68
	Пл	576,6	0,43
Неорганические соединения			
AgBr	Пл	703	—3,6
AgCl	Пл	726	—2,31
$AgNO_3$	Тв	433	—0,05
	Пл	482	4,6
Ag_2S	Тв	452	1,2
Ag_2Se	Тв	406	0,2
AsP_3	Пл	267,21	7,3
AuCd	Пл	900	—1,8
$AuSb_2$	Тв	628	2,46
AuSn	Пл	691	—0,2
AuZn	Пл	1039	—2,6
$BaCO_3$	Тв	1083	7,93
C_2N_2	Пл	245,32	6,20
CO	Тв	61,53	—3,2
	Исп	68,10	1,9

Вещество	Переход	T, °K	ΔC_p, кал/моль·град
COS	Пл	134,34	5,6
CaC_2	Тв	720	—1,20
$CaTiO_3$	Тв	1530	—0,23
Cu_2S	Тв	376	0,2
Cu_2Se	Тв	393	0,5
$FeCl_2$	Пл	950	3,63
FeS	Тв	411	—4,89
GeH_4	Пл	107,26	2,0
HBr	Пл	186,29	1,64
	Исп	206,43	7,37
HCN	Пл	259,92	1,7
HCl	Тв	98,38	1,15
	Пл	158,94	2,10
	Исп	188,11	—7,14
HF	Пл	190,09	2,65
	Исп	231,1	—10,9
HI	Пл	222,36	1,1
	Исп	237,60	—7,14
HNO_3	Пл	231,56	10,65
$HNO_3 \cdot H_2O$	Пл	235,33	22,51
H_2O	Пл	273,15	5,911
	Исп	373,15	—10,021
D_2O	Пл	276,96	9,48
H_2S	Тв	103,54	1,20
	Тв	126,24	—0,65
	Пл	187,63	1,09
	Исп	212,82	—8,34
H_2S_2	Пл	183,4	12,9
H_2SO_4	Пл	283,51	6,216
$H_2SO_4 \cdot H_2O$	Пл	281,69	25,04
H_2Se	Тв	82,3	1,3
	Тв	172,54	1,9
	Пл	207,43	1,56
KCl	Пл	1045	0,61
KF	Пл	1129	1,5
KNO_3	Тв	400,9	2,9
	Пл	610	0,7
K_2SO_4	Тв	856	—4,79
	Пл	1324	—6,49
$LiNO_3$	Пл	527	0,45
NF_3	Пл	66,36	0,647
NH_3	Пл	195,43	5,11
NO	Пл	100,1	6,0
	Исп	121,3	11,8
N_2O	Пл	182,3	4,87
N_2O_4	Пл	261,96	6,12
NaCl	Пл	1081	0,8
NaF	Пл	1268	0,66
$NaNO_3$	Пл	583	0,3
NaOH	Пл	593	1,2
Na_2TiO_3	Тв	0,60	—1,31
	Пл	1303	—1,2
SF_6	Тв	94,26	1,98
	Пл	222,5*	—1,7
SO_2	Пл	197,68	4,50
	Исп	263,14	—11,64
SiH_4	Пл	88,5	1,3
SiO_2	Тв	846	—5,6
SiI_4	Пл	417,7	5,7
$TiCl_4$	Пл	497,3	21,0

Вещество	Переход	T, °K	ΔC_p, кал/моль·град
V_2O_4	Тв	345	6,0
	Пл	1815	10,1
UF_6	Пл	337,2	8,81

* При давлении 1700 кг/см² абс. ат.

Таблица 10.17

Скачок теплоемкости ΔC_p органических соединений при фазовом переходе 1 рода [3, 4]

Пояснения те же, что и к табл. 10.16.

Формула	Название	Переход	T, °K	ΔC_p, кал/(моль·град)
CH_3Cl	Хлорметан	Пл	175,44	1,5
CCl_4	Четыреххлористый углерод	Пл	250,3	1,1
$CFCl_3$	Фторотрихлорметан	Исп	296,8	—10,4
CH_4O	Метиловый спирт	Пл	175,26	4,2
CH_2Cl_2	Муравьиная кислота	Пл	281,46	8,6
C_2H_6	Этан	Пл	89,89	2,2
		Исп	184,53	—11,5
C_2H_5Cl	Хлорэтан	Пл	134,83	1,52
$C_2H_4Cl_2$	1,2-Дихлорэтан	Пл	237,6	5,9
C_2H_5Br	Бромэтан	Исп	311,5	—7
$C_2H_4Br_2$	1,2-Дибромэтан	Тв	249,06	—11,1
		Пл	283,1	7,9
$C_2H_3F_2Cl$	1,1-Дифторо-1-хлорэтан	Пл	142,4	1,3
$C_2F_3Cl_3$	1,1,2-Трифторо-1,2,2-трихлорэтан	Исп	320,4	—10,1
C_2F_6	Этан гексафтористый	Тв	103,98	1,2
		Пл	173,10	1,78
C_2H_6O	Этиловый спирт	Пл	158,6	5,70
C_2H_6O	Диметиловый эфир	Пл	131,66	6,8
		Исп	248,34	—10,6
C_2H_4O	Ацетальдегид	Исп	293,3	—9,3
C_2H_4O	Этиленовая окись	Пл	160,71	3,45
		Исп	283,72	—9,7
$C_2H_4O_2$	Уксусная кислота	Пл	289,77	9,4
C_2H_6S	Диметилсульфид	Пл	174,86	6,95

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Stull D. R., Sinke G. C.** Thermodynamic Properties of the Elements. Ser. 18, 1956.
2. **Kelley K. K.** Contribution to the Data on Theoretical Metallurgy. V. X, Washington, 1949.
3. **Landolt-Börnstein.** Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Geophysik, Astronomie, Technik. Aufl. 6. Bd 2. Teil 4. Springer-Verlag, Berlin, 1961.
4. **Selected** Values of Chemical Thermodynamic Properties. Circular of NBS No. 500. Washington, 1952.

5. Kubaschewski O., Evans E. L. Metallurgical Termochemistry. London, 1951.
6. Dworkin A. S., Samsur D. J., van Artsdalen E. R. J. Chem. Phys., 1954, v. 22, p. 837.
7. Ицкевич Е. С., Стрелков П. Г. «Ж. физ. химии», 1959, т. 33, с. 60.
8. King E. G. J. Amer. Chem. Soc., 1957, v. 79, p. 2399.
9. Hu J.-H., Johnston H. L. J. Amer. Chem. Soc., 1953, v. 75, p. 2471.
10. Coughlin J. P., King E. G., Bonnickson K. B. J. Amer. Chem. Soc., 1951, v. 73, p. 3891.
11. Shomate C. H., Cohen J. J. Amer. Chem. Soc., 1955, v. 77, p. 285.
12. King E. G. J. Amer. Chem. Soc., 1954, v. 76, p. 3289.
13. Астров Д. Н., Ицкевич Е. С. «Ж. физ. химии», 1955, т. 29, с. 424.
14. Orr R. L., Christensen A. U. J. Phys. Chem., 1958, v. 62, p. 124.
15. Evans W. H., Munson Th. R., Wagman D. D. J. Res. Nat. Bur. Stand., 1955, v. 55, p. 147.
16. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения. М., Госэнергоиздат, 1963. (Авт.: Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б.)
17. Справочник химика. Под ред. Б. П. Никольского. Т. 1, 2. М.—Л., «Химия», 1963.
18. Gelles E., Pitzer K. S. J. Amer. Chem. Soc., 1953, v. 75, p. 5259.
19. Din F. Thermodynamic Functions of Gases. V. 2. London, 1956.
20. Tables of Thermal Properties of Gases. Circular of NBS No. 564. Washington, 1955.
21. Thermodynamic and transport properties of gases, liquids and solids. Purdue Univ., 1959. (Авт.: Evans W. H., Prosen E. J., Wagman D. D. e.a.)
22. Din F. Thermodinamic Functions of Gases. V. 1. London, 1956.
23. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.
24. Справочник по машиностроительным материалам. Т. 1—4. М., Машгиз, 1959—1960.
25. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов. М., Физматгиз, 1959.
26. Шпелов К. П., Гликман Э. Л. Жаропрочные материалы. М., Металлургиздат, 1956.
27. Славин Д. О., Штейман Е. Б. Металлы и сплавы в химическом машиностроении и аппаратостроении. М., Машгиз, 1951.
28. Теплофизические свойства веществ. Под ред. Н. Б. Варгафтика. М., Госэнергоиздат, 1956.
29. Техническая энциклопедия. Справочник. Т. VII. М., ОГИЗ, 1931.
30. Smithsonian Physical Tables. 9th ed. Washington, 1954.
31. Нока Ф., Ширане Д. Сегнетоэлектрические кристаллы. Пер. с англ. М., «Мир», 1965.
32. Теплотехнический справочник. Под ред. С. Г. Герасимова. Т. 1. М., Госэнергоиздат, 1957.
33. Скотт Р. Б. Техника низких температур. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
34. Чудновский А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М., Физматгиз, 1962.
35. Черепанов А. М., Тресвятский С. Т. Высокоогнеупорные материалы и изделия из окислов. М., Металлургиздат, 1964.
36. Самсонов Г. В., Кислый П. С. Высокотемпературные неметаллические термопары и нагреватели. Киев, «Наукова думка», 1966.
37. Симонов Т. В. Тугоплавкие соединения. М., Металлургиздат, 1963.
38. Беляев Р. А. Окись бериллия. М., Госатомиздат, 1962.
39. Шенберг Д. Сверхпроводимость. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
40. Смоленский Г. А., Крайник Н. Н. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики. М., «Наука», 1968.
41. Крафтмахер Я. А., Розанкина Т. Ю. «Физика твердого тела», 1966, т. 7, с. 2533.
42. Воронель А. В., Чашкин Ю. Р., Попов В. А., Симкин В. Г. «Ж. эксперим. и теор. физ.», 1963, т. 45, с. 828.
43. Балацкий М. И., Воронель А. В., Гусак В. Г. «Ж. эксперим. и теор. физ.», 1962, т. 43, с. 728.

ГЛАВА II

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ, ПЛАВЛЕНИЕ И КИПЕНИЕ

II.1. ТЕМПЕРАТУРА И СКРЫТАЯ ТЕПЛОТА ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

Термодинамическими фазами называются термодинамические состояния вещества, которые могут равновесно существовать, находясь в контакте друг с другом; переход вещества из одной фазы в другую называется *фазовым переходом*. В отсутствие внешних полей термодинамические фазы изотропны по всем свойствам, и для соприкасающихся фаз выполняются равенства химических потенциалов компонент, температур и давлений, которые называются *температурой и давлением фазового перехода*.

Различают фазовые переходы I и II рода.

Фазовые переходы I рода характеризуются непрерывностью термодинамического потенциала Φ и разрывом его первой производной в точке перехода. При фазовом переходе I рода происходит поглощение или выделение теплоты, измеряемые скачком энтальпии H и называемые *скрытой теплотой перехода* $L = \Delta H$. Теплоту перехода относят к 1 г или 1 моль вещества и называют соответственно *удельной* или *молярной теплотой перехода*. К фазовым переходам I рода относятся, в частности, все переходы, связанные с изменением агрегатного состояния вещества, и, в зависимости от названия перехода, теплота перехода называется *теплотой плавления* $L_{пл}$, *испарения* в точке кипения $L_{исп}$ или *сублимации* (возгонки) $L_{субл}$. Давление и температура фазового перехода I рода связаны уравнением Клапейрона—Клаузиуса

$$dP/dT = L/(T \cdot \Delta V),$$

где P — давление; T — температура; ΔV — изменение объема вещества в точке перехода.

Фазовые переходы II рода характеризуются непрерывностью в точке перехода термодинамического потенциала Φ и его первых производных и разрывом вторых производных Φ. При этом переходе не происходит тепловыделения и теплота перехода II рода равна нулю. Фазовыми переходами II рода являются переходы вещества в сверхпроводящее, сегнетоэлектрическое, ферромагнитное и т. п. состояния в отсутствие внешних полей (электрических, магнитных). В противном случае те же переходы могут стать переходами I рода: теплота перехода при этом затрачивается на противодействие внешним силам.

Таблица 11.1

Температура t и скрытая теплота ΔH фазовых переходов элементов и неорганических соединений при давлении 760 мм рт. ст.

Обозначения фазовых переходов I рода: Тв — фазовый переход между твердотельными фазами различной структуры; Пл — переход твердое тело — жидкость (плавление); Исп — переход жидкость — пар (испарение); Субл — переход твердое тело — пар (сублимация).

Обозначения фазовых переходов II рода: Ст — переход в сверхтекучее состояние; Свп — переход в сверхпроводящее состояние; Сэ и Асэ — сегнето- и антисегнетоэлектрические переходы; Фм и Афм — ферро- и антиферромагнитные переходы. В скобках приведены расчетные значения.

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кДж/моль	Литература
Ac	Пл	(1197)	(14,2)	[1]
	Исп	(3037)	(397)	[1]
Ag	Пл	960,8	11,27	[1, 2]
	Исп	2212	250,0	[1]
AgBr	Тв	254	—	[3]
	Пл	430	5,16	[4]
	Исп	1502	166	[1]
AgCl	Пл	466,6	12,73	[1]
	Исп	1547	199	[1]
AgI	Тв	146	6,16	[3]
	Пл	557	9,41	[4]
	Исп	1506	140,9	[5]
$AgNO_3$	Тв	160	2,55	[3]
	Пл	210	11,54	[3]
Ag_2S	Тв	179	4,39	[1]
	Пл	586	—	[6]
	Пл	842	14,05	[4]
Ag_2SO_4	Тв	412	7,9	[2]
	Пл	657	17,9	[3]
Al	Свп	−272,03	0,00	[7]
	Пл	660,1	10,7	[1, 8]
	Исп	2447	293,7	[1]
$AlBr_3$	Пл	97,6	11,3	[1]
	Исп	256,2	21,5	[3]
$AlCl_3$	Пл*	192	34,5	[2]
AlF_3	Тв	454	0,63	[1]
AlN	Пл	1636	—	[6]
Al_2O_3	Тв	975	86,2	[1, 9]
	Пл	2054	109	[9]
	Исп	3530	—	[1]
AlSb	Пл	1060	65,1	[9]
Am	Пл	1200	—	[10]
	Исп	3173	238	[1]
Ar	Пл	−189,30	1,176	[1]
	Исп	−186,87	6,519	[1]
As	Пл	614	—	[11]
	Субл	615	—	[11]
AsF_3	Пл	−5,96	10,40	[1]
	Исп	58	29,7	[9]
AsH_3	Тв	−107,50	6,648	[1]
	Пл	−116,92	1,196	[1]
	Исп	−62,43	16,686	[4]
At	Пл	(300)	(23,8)	[1]
	Исп	(377)	(90,4)	[1]

* При P = 1025 мм рт. ст.

Продолжение табл. 11.1

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кДж/моль	Литература
Au	Пл	1064	12,77	[1, 8]
	Исп	2709	324,4	[1]
AuCu	Тв	416	3,14	[6]
$AuSb_2$	Тв	355	4,68	[3, 2]
	Тв	465	0,42	[3, 2]
B	Пл	2030	22,2	[1]
	Исп	3900	500	[1]
	Субл	25,0	562	[1]
BBr_3	Пл	−47,6	—	[1]
	Исп	91,2	30,5	[5]
BCl_3	Пл	−107,2	—	[1]
	Исп	12,4	12,77	[1]
B_2Cl_4	Пл	−92,94	10,7	[1]
	Исп	65,5	33,6	[1]
BF_3	Тв	−131,0	4,24	[1]
	Пл	−95,9	18,9	[1]
	Исп	−92,04	16,7	[1]
B_2F_4	Пл	−56,0	—	[1]
	Исп	−34,0	26,0	[1]
B_2H_6	Пл	161,6	4,47	[1]
	Исп	−92,52	14,96	[1]
B_4H_{10}	Пл	−120,0	—	[1]
	Исп	16	27,1	[5]
BN	Исп	52	26,4	[1]
B_2O_3	Пл	460	22,0	[1, 2]
	Исп	2247	—	[1, 2]
Ba	Тв	370	0,58	[1]
	Пл	710	7,66	[1, 11]
	Исп	1637	150,9	[1, 2]
$BaCO_3$	Тв	806	16,2	[1]
	Тв	968	2,9	[1]
$BaCl_2$	Тв	920	—	[9]
	Пл	960	22,40	[4]
	Исп*	1189	238	[1]
BaF_2	Пл	1280	12,5	[4, 9]
	Исп	2260	292	[1]
BaO	Пл	1923	37,7	[1]
	Исп	2000	—	[1]
$BaSO_4$	Тв	1150	—	[9]
	Пл	1350	40,6	[9]
$BaTiO_3$	Сэ	−80	0,00	[7]
	Сэ	6	0,00	[7]
	Сэ	120	0,00	[7]
Be	Пл	1283	12,5	[1]
	Исп	2477	294	[1]
$BeBr_2$	Пл	488	18,8	[1, 6]
$BeCl_2$	Пл	410	12,6	[6]
	Исп	547	106	[2]
BeF_2	Пл	546	—	[1]
	Исп	1159	212,9	[1]
BeO	Пл	2550	71,1	[1]
	Исп	4120	—	[6]
Bi	Пл	271,3	10,9	[1]
	Исп	1559	151,5	[1]
$BiBr_3$	Тв	155	—	[1]
	Пл	218	—	[1]
	Исп	461	74,4	[5]
$BiCl_3$	Пл	244	10,5	[4]
	Исп	441	72,61	[5]
$BiNa_3$	Пл	775	69,5	[1, 6]

* При P = 0,5 мм рт. ст.

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кДж/моль	Литература
Bi_2O_3	Тв	704	—	[6]
	Жд	817	28,5	[4]
Bi_2Te_3	Пл	213	7,32	[1]
Br	Пл	−7,3	10,58	[1, 2]
	Исп	58,2	30,0	[1]
BrCl	Пл	−60,5	7,3	[1]
	Исп	40,76	30,6	[1]
BrP	Пл	−33	—	[1]
	Исп	20	25,1	[1]
BrF_3	Пл	8,78	12,03	[1]
	Исп	125,75	47,57	[1]
C_2N_2	Пл	−27,88	8,11	[1]
	Исп	−21,2	23,33	[1]
CO	Тв	−211,6	0,633	[1]
	Пл	−205,1	0,836	[1]
	Исп	−191,5	6,04	[1]
CO_2	Пл*	−56,6	7,95	[1]
	Субл	−78,50	—	[12]
COS	Пл	−138,8	4,727	[1]
	Исп	−50,28	16,51	[1]
CP	Пл	−110	10,9	[2]
CS_2	Пл	−111,6	4,39	[1, 12]
	Исп	46,25	26,77	[2]
Ca	Тв	440	1,0	[1]
	Пл	850	8,66	[1]
	Исп	1487,1	150,0	[1]
CaC_2	Тв	447	5,66	[1]
	Пл	2300	—	[1]
$CaCl_2$	Пл	782	29,36	[1]
	Исп	2000	230	[6]
CaF_2	Тв	1151	4,77	[1]
	Пл	1418	29,7	[1]
	Исп	2600	317	[1]
CaO	Пл	2603	51,2	[4]
	Исп	3670	—	[1]
$CaSO_4$	Пл	1193	—	[1]
	Исп	1397	28,0	[4]
$CaSi_2$	Пл	1250	—	[1]
$CaSiO_3$	Тв	675	—	[1]
	Тв	1190	—	[1]
	Тв	1243	1,51	[1]
	Пл (α)	1512	—	[4]
	Тв	1963	—	[1]
	Пл (γ)	2130	14,16	[1]
$CaTiO_3$	Тв	1257	2,30	[1]
Cd	Сверх	−272,61	0,00	[7]
	Пл	321,03	6,40	[1, 12]
	Исп	776	99,87	[5]
$CdBr_2$	Пл	568	20,9	[4]
	Исп	844	115	[1]
$CdCl_2$	Пл	561	48,68	[1]
	Исп	960	124,3	[1]
CdF_2	Пл	1110	22,6	[4]
	Исп	1748	214	[1]
CdSb	Пл	456	32,04	[1]
Ce	Тв	133	—	[2]
	Тв	398	—	[2]
	Тв	440	—	[2]
	Пл	777	12,9	[1]
	Исп	2900	314	[1]

* При P = 0,26 атм.

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кДж/моль	Литература
$CeCl_3$	Пл	822	38,5	[1]
	Исп	1925	200,9	[1]
Cl_2	Пл	−101	6,406	[1]
	Исп	−34,04	20,41	[1]
ClF	Пл	−154	—	[1]
	Исп	−100,8	24,0	[1]
ClF_3	Тв	−52,65	1,508	[1]
	Пл	−76,31	7,612	[1]
	Исп	11,76	27,53	[1]
Cl_2O	Пл	−116	—	[1]
	Исп	2,0	25,9	[1]
ClO_2	Пл	−59	—	[1]
	Исп	11,0	30	[1]
Co	Фм	1127	0,00	[7]
	Пл	1492	15,3	[4, 10]
	Исп	2255	383	[1, 10]
$CoCl_2$	Афм	248,3	0,00	[7]
	Пл	740	31,0	[1, 4]
	Исп	1053	144,9	[1]
CoO	Афм	1,79	0,00	[7]
	Пл	1800	40,2	[4]
$CoSi_2$	Сверх	−271,65	0,00	[7]
Cr	Афм	200	0,00	[7]
	Тв	1640	1,46	[1]
	Пл	1903	14,6	[1, 2]
	Исп	2642	349	[1]
$CrCl_3$	Пл	815	32,2	[2]
	Исп	1300	197	[6]
Cr_2O_3	Афм	32,5	0,00	[1, 7]
	Пл	2440	—	[1]
CrO_2	Фм	107	0,00	[7]
Cs	Пл	28,04	2,18	[1]
	Исп	685	65,9	[1]
CsBr	Пл	636	7,1	[1]
	Исп	1300	150,5	[5]
CsCl	Тв	445	7,5	[1]
	Пл	642	15,06	[5]
	Исп	1300	149,3	[5]
Cs_3PO_4	Сверх	−113	0,00	[7]
CsOH	Тв	223	7,36	[1]
	Пл	272,3	6,73	[1]
Cu	Пл	1083,0	13,01	[1, 12]
	Исп	2595	304	[1]
CuBr	Тв	390	5,9	[6]
	Тв	465	2,9	[6]
	Пл	489	9,6	[2, 6]
	Исп	1345	140	[6]
CuCl	Пл	430	10,0	[4]
	Исп	1490	165,7	[6]
Cu_2O	Пл	1230	56,0	[4]
CuS	Сверх	−271,55	0,00	[7]
Cu_2S	Тв	103	5,60	[4]
	Тв	350	0,837	[6]
	Пл	1126	23,0	[4]
n-D_2	Пл	−254,50	0,197	[1]
	Исп	−249,48	1,226	[1]
o-D_2	Пл	−254,52	0,197	[1]
	Исп	−249,56	1,223	[1]
DF	Пл	−83,6	—	[1]
	Исп	19,36	—	[1]
D_2O	Пл	3,76	6,260	[1]
	Исп	101,4	41,69	[2]
DI	Пл	−50,5	—	[1]
	Исп	−248,9	—	[1]

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кдж/моль	Литература
Dy	Фм	—168	0,00	[7]
	Пл	1503	—	[1]
	Исп	2600	—	[11]
Er	Тв	—189	—	[1]
	Пл	1497	—	[11]
	Исп	2900	—	[11]
Eu	Пл	826	—	[1]
	Исп	1469	—	[1]
F	Пл	—218,0	1,556	[1]
	Исп	—188,1	6,539*	[1]
F_2O	Пл	—223,8	—	[1]
	Исп	—144,8	11,00	[1]
Fe	Фм	700	0,00	[3]
	Тп	906	0,878	[3]
	Тв	1401	0,46	[3]
	Пл	1535	15,5	[5]
$FeCO_3$	Афм	—216	0,00	[7]
$FeCl_2$	Афм	—255,7	0,00	[7]
	Пл	677	43,0	[1]
	Исп	1012	125,5	[1]
$FeCl_3$	Пл	303,9	43,1	[1]
	Исп	319	—	[5]
FeF_2	Афм	—194,8	0,00	[1]
	Пл	1100	—	[6]
FeO	Афм	—75	0,00	[7]
Fe_2O_3	Тв	677	0,67	[1]
	Тп	767	—	[1]
Fe_3O_4	Тв	627	—	[1]
	Пл	1594	138	[1]
FeS	Тв	138	2,38	[1]
	Тп	325	0,00	[1]
	Пл	1196	32,34	[1]
Fe_2SiO_4	Пл	1217	92,17	[1]
Ga	Сверх	—272,06	0,00	[7]
	Тп**	2,4	2,43	[1]
	Пл	29,78	5,586	[1]
	Исп	2227	254	[1]
$GaCl_3$	Пл	77,0	10,9	[1]
	Исп	200,0	23,9	[1]
Gd	Фм	16	0,00	[7]
Ge	Пл	937,2	29,8	[1]
	Исп	2830	334	[1]
$GeCl_4$	Пл	—49,5	—	[1]
	Исп	83,1	29,7	[1, 5]
GeH_4	Тв	—200,0	0,547	[1]
	Тп	—196,6	0,542	[1]
	Пл	—165,9	0,837	[1]
	Исп	—88,35	14,058	[1]
GeO_2	Тв	707	17,6	[1]
	Пл	1115	43,9	[9]
п-H_2	Пл	—259,20	0,117	[1]
	Исп	—252,76	0,904	[1, 12]
о-H_2	Пл	—259,27	0,117	[1]
	Исп	—252,88	0,900	[1, 12]
HD	Пл	—256,5	0,1548	[1]
	Исп	—251,02	1,109**	[1]
HT	Пл	—254,7	—	[1]
	Исп	—249,6	—	[1]
HBr	Тп	—184,0	0,265	[1]
	Тв	—101,0	0,320	[1]
	Тп	—155,0	0,489	[1]

* При P = 235 мм рт. ст.
** При P = 8,5 · 10⁴ мм рт. ст.
*** При P = 93 мм рт. ст.

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кдж/моль	Литература
HBr	Пл	—86,9	2,405	[1]
	Исп	—36,7	17,6	[1]
HCN	Пл	—13,3	8,41	[1]
	Исп	25,6	25,22	[1]
HCl	Тв	—174,7	1,189	[1]
	Пл	—114,2	1,992	[1]
	Исп	—85,02	16,15	[1]
HF*	Пл	—83,36	3,926	[1]
	Исп*	19,46	7,489	[1]
HI	Тв	—247	—	[1]
	Тп	—203,0	0,078	[1]
	Тв	—147,6	0,805	[1]
	Пл	—50,79	2,87	[1]
	Исп	—35,34	19,76	[1]
HNO_3	Пл	—41,59	10,47	[1]
$HNO_3 \cdot 3H_2O$	Пл	—18,47	29,09	[1]
H_3PO_4	Пл	42,35	10,5	[2]
H_2S	Тв	—160,59	1,51	[1]
	Тп	—146,88	0,455	[1]
	Пл	—85,6	2,378	[1]
	Исп	—60,38	18,67	[1]
H_2SO_4	Пл	10,38	10,71	[1]
$H_2SO_4 \cdot 2H_2O$	Пл	—39,46	18,24	[1]
H_2Se	Тв	—190,9	1,67	[1]
	Тп	100,6	1,12	[1]
	Пл	—65,73	2,61	[1]
He	Сверх	—270,97	0,00	[1, 12]
	Пл**	—269,7	0,0809	[1]
	Исп	—268,94	0,0837	[1, 12]
^{3}He	Исп**	—271,5	0,04785	[1]
Hf	Сверх	—272,80	0,00	[7]
	Тв	1560	—	[1]
	Пл	2220	21,8	[1]
	Исп	5200	661	[1]
$Hf(BH_4)_4$	Пл	29,0	14,2	[1]
	Исп	118	40,2	[1]
HfO_2	Пл	2790	—	[1]
Hg	Сверх	—269,0	0,00	[7]
	Пл	—38,86	2,295	[1]
	Исп	356,73	59,11	[1]
$HgCl_2$	Пл	277	17,36	[4]
	Исп	304	58,69	[3]
Hg_2Na	Пл	350	26,3	[1]
HgS	Тп	386	4,2	[2]
Ho	Афм	—141,6	0,00	[1]
	Пл	1461	—	[11]
	Исп	2600	—	[11]
I	Пл	113,6	15,77	[3]
	Исп	182,8	41,71	[1, 3]
ICl	Пл	27,3	11,2	[1]
In	Сверх	—269,88	0,00	[7]
	Пл	156,61	3,27	[1, 12]
	Исп	2075	226	[1, 11]
InCl	Тв	120	0,94	[1]
	Пл	225	17,2	[1]
	Исп	609	89,9	[1]
InSb	Пл	525	25,5	[1]
Ir	Пл	2443	—	[1, 12]
	Исп	4350	—	[1]
IrF_6	Пл	44	8,4	[6]
	Исп	53	30,0	[6]

* При P = 761,4 мм рт. ст.
** При P = 105 атм.
*** При P = 152,04 мм рт. ст.

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кДж/моль	Литература
K	Пл	63,4	2,33	[1, 2]
	Исп	768,8	77,5	[1]
KBr	Пл	732	24,8	[1]
	Исп	1308	156,1	[5]
KCl	Пл	772	25,5	[2]
	Исп	1413	161,5	[1]
KD_2PO_4	Св	—60	0,00	[7]
KF	Пл	857	27,2	[4]
	Исп	1502	172,7	[5]
KH_2PO_4	Св	150	0,00	[7]
KNO_3	Тв	127,9	5,10	[1]
	Пл	334,3	9,62	[1]
$KNbO_3$	Св	435	0,00	[7]
KO_2	Тв	—79,7	—	[1]
	Пл	380	—	[1]
KOH	Тв	249	6,36	[1]
	Пл	410	7,5	[1]
	Исп	1327	129	[1]
K_2SO_4	Тв	583	8,11	[1]
	Пл	1069	36,64	[1]
$KTaO_3$	Св	—260	0,00	[7]
K_2WO_4	Тв	350		[2]
	Пл	930	19,4	[2]
Kr	Пл	—157,2	1,635	[1, 10]
	Исп	—153,2	9,029	[1]
La	Св	—268,40	0,00	[7]
	Тв	—463	—	[1]
	Тв	548	—	[1]
	Тв	709	—	[1]
	Пл	920	11,3	[1]
	Исп	3370	400	[1]
$LaCl_3$	Пл	872	43,1	[9]
	Исп	1945	224	[1]
Li	Тв	—196	—	[1]
	Пл	180,5	3,00	[1]
	Исп	1317	145,1	[1]
LiBr	Пл	546	12,96	[1]
	Исп	1310	145,1	[1, 6]
LiCl	Пл	614	13,4	[4]
	Исп	1382	150,5	[6]
LiF	Пл	848	26,4	[2, 6]
	Исп	1681	213,3	[5]
LiH	Пл	688	29,3	[1]
$LiNO_3$	Пл	250	25,5	[4]
Li_2O	Пл	1727	74,3	[1]
	Исп	2327	-	[1]
Li_2WO_4	Пл	742	28,0	[1, 6]
Lu	Пл	1652	—	[11]
	Исп	3327	—	[11]
Mg	Пл	649,5	8,96	[1]
	Исп	1120	131,8	[2]
$MgCl_2$	Пл	714	43,1	[1]
	Исп	1418	136,8	[5]
MgF_2	Пл	1263	59,1	[1]
	Исп	2260	292	[1]
MgO	Пл	2802	77,4	[1, 4]
$MgSO_4$	Пл	1127	14,6	[4]
Mn	Аф-м	—170	0,00	[7]
	Тв	727	2,24	[1]
	Тв	1101	2,28	[1]
	Тв	1137	1,8	[1]
	Пл	1244	14,6	[2]
	Исп	2095	224,7	[2]

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кДж/моль	Литература
$MnCl_2$	Пл	650	37,6	[1]
	Исп	1231	149	[1]
MnF_2	Аф-м	206,7	0,00	[1, 7]
	Пл	930	—	[6]
MnO	Аф-м	—151	0,00	[1, 7]
	Пл	1780	54,4	[1]
MnSb	Фм	314	0,00	[7]
Mo	Пл	2625	27,6	[1, 10]
	Исп	4800	594	[1]
MoB	Св	—268,75	0,00	[7]
Mo_2C	Пл	2672	—	[1]
MoF_6	Пл	17,5	0,9	[1, 9]
	Исп	35	26,2	[1]
MoN	Св	—251,15	0,00	[7]
MoO_3	Пл	795,2	52,5	[1]
N_2	Тв	—237,65	0,22271	[1, 12]
	Пл	—210,01	0,72074	[1]
	Исп	—195,85	5,577	[1]
$^{15}N_2$	Тв	—237,97	0,23086	[1]
	Пл	—210,96	0,72053	[1]
	Исп	—195,76	5,582	[1]
ND_3	Тв	—216,5	1,614	[1]
	Пл	—206,5	0,398	[1]
	Исп	—129,0	11,59	[1]
N_2F_4	Исп	—73	13,27	[1]
NaI_3	Пл	—77,73	6,65	[1]
	Исп	—33,41	23,35	[1]
N_2H_4	Пл	1,54	12,66	[1]
	Исп	113,5	41,8	[1]
NH_4Cl	Тв	—30,6	1,1	[1]
	Пл*	520	—	[1]
$(NH_4)_3PO_4$	Дес	—125	0,00	[7]
$(NH_4)NO_3$	Тв	—16	0,54	[1]
	Тв	32,1	1,59	[1]
	Тв	84,2	1,34	[1]
	Тв	125,2	4,22	[1]
	Пл	169,6	6,40	[1]
NO	Пл	—163,60	2,299	[1]
	Исп	—151,73	13,774	[1]
N_2O	Пл	—90,91	6,540	[1]
	Исп	—88,46	16,552	[1]
N_2O_4	Пл	—11,25	14,65	[1]
	Исп	21,10	38,12	[1]
Na	Пл	97,82	2,602	[2]
	Исп	880	89,04	[1]
NaCl	Пл	800	28,8	[4]
	Исп	1461	170	[1]
NaF	Пл	1012	33,60	[1]
	Исп	1704	209	[5, 6]
$NaNO_3$	Тв	275	—	[1]
	Пл	306	14,6	[1]
$NaNbO_3$	Дес	520	0,00	[7]
Na_2O	Пл	920	46,9	[1]
NaOH	Тв	292,8	6,36	[1]
	Пл	319,1	6,36	[1]
	Исп	1390	144,5	[5, 6]
Na_3PO_4	Тв	577	3,60	[1]
Na_2SO_4	Тв	177	3,10	[1]
	Тв	241	7,03	[1]
	Пл	884	28,7	[1]
Na_2TiO_3	Тв	287	1,7	[1]
	Пл	1030	70,3	[1]

* При P = 35,1 атм.

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кдж/моль	Литература
$NaTaO_3$	Аст	475	0,00	[7]
Na_2WO_4	Тп	687,6	31,8	[1]
	Тв	586,8	4,2	[1]
	Пл	696,5	23,8	[1]
Nb	Стп	—268,93	0,00	[7]
	Пл	2467	26,8	[1]
	Исп	4900	696	[1]
NbB	Стп	267,15	0,00	[7]
NbC	Стп	—202,86	0,00	[7]
NbF_5	Пл	78,9	36,0	[1]
	Исп	233,3	52,3	[1]
NbN	Стп	—258,3	0,00	[7]
Nb_2O_5	Тв	800	—	[6]
	Тв	1100	—	[6]
	Пл	1512	102,9	[1]
NbI	Тв	869	—	[1]
	Пл	1019	14,6	[1]
	Исп	3110	—	[10]
Ne	Пл	—266,60	0,335	[1]
	Исп	—246,05	1,760	[1, 12]
Ni	Фм	354	0,00	[7]
	Пл	1453	17,8	[1, 12]
	Исп	2830	380,6	[2]
$NiCl_2$	Аф/ж	—223,6	0,00	[7]
	Пл	1030	77,28	[1]
NiO	Афм	200	0,00	[1]
	Пл	1960	50,6	[1]
Ni_3S	Пл	645	12,5	[4]
$NpCl_3$	Пл	802	—	[2]
O_2	Тп	—249,50	0,0007	[1]
	Тв	—229,45	0,7431	[1, 12]
	Пл	—218,81	0,444	[1]
	Исп	—183,0	6,819	[1]
O_3	Пл	—192,5	—	[1]
	Исп	—111,5	16,66	[1]
Os	Стп	—272,44	0,00	[7]
	Пл	2700	—	[1]
OsO_4	Пл	40,1	14,27	[6]
	Исп	130	39,5	[6]
P (белый)	Тв	—77	—	[1]
	Пл	44,2	2,51	[4]
(красный)	Пл	590	20,29	[2]
	Исп	281	12,4	[1]
PCl_3	Пл	—92	4,25	[1, 9]
	Исп	74,1	30,5	[5]
PF_5	Пл	—93,8	11,8	[1]
	Исп	—84,6	17,2	[1]
PH_3	Тв	—242,8	0,0524	[1]
	Тп	—229,7	0,778	[1]
	Тв	—185,0	0,465	[1]
	Пл	—133,8	1,130	[1]
	Исп	—87,77	14,698	[1]
Pa	Пл	1600	—	[1]
	Исп	4230	—	[1]
Pb	Стп	—265,90	0,00	[7]
	Пл	327,3	4,772	[1]
	Исп	1751	179,6	[1]
$PbCl_2$	Пл	498	23,6	[4]
	Исп	951	127	[1]
PbO	Тв	489	—	[1]
	Пл	890	11,7	[4]
	Исп	1472	213	[5]
PbS	Пл	1114	17,4	[4]

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кдж/моль	Литература
$PbTiO_3$	Ст	490	0,00	[7]
$PbZrO_3$	Аст	233	0,00	[7]
Pd	Пл	1552	17,2	[4, 12]
	Исп	3560	—	[2]
$PdCl_2$	Пл	678	40,6	[1]
Pm	Пл	1035	—	[11]
	Исп	2730	—	[11]
Po	Пл	954	—	[1]
	Исп	962	102,9	[1]
Pr	Пл	919	11,3	[1, 2]
	Исп	3127	—	[11]
Pt	Пл	1769	21,7	[2]
	Исп	4310	497	[5]
Pu	Пл	639,5	—	[11]
	Исп	3235	—	[11]
$PuCl_3$	Пл	760	63,6	[1]
	Исп	1767	126,6	[1]
PuF_3	Пл	1169	33	[1]
PuF_6	Пл	50,7	19,7	[1]
	Исп	62,3	31,6	[1]
Ra	Пл	700	—	[1]
	Исп	1536	—	[10]
Rb	Пл	38,7	2,20	[1]
	Исп	701	69,20	[1]
RbCl	Пл	717	16,40	[4]
	Исп	1381	154,4	[1]
RbF	Пл	775	17,3	[1, 2]
	Исп	1408	166,3	[5]
RbH_2PO_4	Ст	—126	0,00	[7]
RbOH	Пл	245	7,11	[1]
	Исп	301	6,77	[1]
RbO_2	Пл	412	—	[1]
Re	Стп	—270,73	0,00	[7]
	Пл	3180	39	[1]
	Исп	5600	707	[1]
ReF_6	Пл	18,8	21	[1]
	Исп	47,6	28,8	[1]
Rh	Пл	1960	—	[1]
	Исп	3960	—	[1]
Rn	Пл	—71,0	2,67	[1]
	Исп	—62	16,4	[1]
Ru	Стп	—272,66	0,00	[7]
	Тп	1035	0,14	[3]
	Тв	1200	—	[3]
	Тв	1500	0,96	[3]
	Пл	2500	—	[3]
	Исп	4110	—	[1]
S	Тв	95,31	0,401	[1]
	Тв	101	0,0016	[1]
	Пл	115,18	1,718	[1]
	Исп	444,60	90,75	[2, 12]
SF_6	Тп	—175,8	1,007	[1]
	Пл*	—50,7	5,02	[2]
SO_2	Пл	—75,51	7,401	[1]
	Исп	—10,08	24,94	[1]
SO_3	Пл(γ)	16,8	2,0	[2]
	Пл(β)	32,5	10,3	[2]
	Пл(α)**	62,2	25,5	[2]
Sb	Тп	94,6	—	[1]
	Тп	413	—	[1]
	Пл	630,5	20,41	[4, 12]
	Исп	1637	122,2	[1]

* При P = 1710 мм рт. ст.
** При P = 1760 мм рт. ст.

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кДж/моль	Литература
$SbCl_3$	Пл	73,3	12,68	[4]
	Исп	221	43,19	[2]
SbF_3	Пл	8,3	—	[1]
	Исп	142,7	9,74	[1]
SbH_3	Пл	—88,5	—	[1]
	Исп	—17,0	21,3	[1]
Sc	Пл	1400	16,1	[1]
	Исп	2900	306	[1]
Se	Тк	150	0,75	[2]
	Пл	217,4	5,42	[1]
	Исп	667	—	[10]
SeT_4	Пл*	—34,6	0,69	[1]
Si	Пл	1420	46,5	[1]
	Исп	2355	394,5	[1]
$SiCl_4$	Пл	69,0	7,72	[1]
	Исп	96,7	28,7	[5]
Si_2F_6	Пл**	18,7	14,6	[2]
	Исп**	—18,7	27,7	[2]
SiH_4	Субл	19,1	42,3	[2]
	Тк	—209,7	0,615	[1]
	Пл	—184,67	0,667	[1]
	Исп	—111,4	12,1	[2]
SiF_2Cl_2	Пл	—139,7	—	[1]
	Исп	—32,2	21,2	[5]
SiO_2	Тк	117	0,29	[1]
	Тк	163	0,17	[1]
	Тп	225	0,19	[1]
	Тк	227÷232	1,3	[1]
	Тп	867	0,90	[1]
	Тк	1470	0,21	[1]
(кристалл)	Пл	1610	8,02	[2]
(аморфный)	Пл	1713	7,68	[2]
Sm	Пл	1350	—	[2]
	Исп	1600	—	[10]
Sn	Сит	—269,42	0,00	[7]
	Тк	18	2,5	[1]
	Тп	202,8	0,008	[1]
	Пл	231,9	7,07	[1, 12]
	Исп	2687	290,4	[1]
SnAu	Пл	418	25,60	[1]
$SnCl_4$	Пл	—33,3	9,16	[1]
	Исп	113,9	34,9	[1]
SnH_4	Пл	—150	—	[1]
	Исп	—51,8	19,05	[1]
SnO_2	Тк	410	1,9	[1]
SnO	Исп	1456	161	[1]
Sr	Тк	589	0,84	[1]
	Пл	770	0,9	[1]
	Исп	1367	138,9	[1]
$SrCl_2$	Пл	872	171	[4]
SrO	Пл	2460	69,9	[1, 9]
	Исп	3200	536	[1]
a T_2	Пл	—252,9	—	[1]
	Исп	—251,02	—	[1]
T_2O	Пл	4,49	—	[1]
Ta	Сит	—268,77	0,00	[7]
	Пл	2996	31,4	[1]
	Исп	5400	753	[1]
TaC	Сит	—263,75	0,00	[7]
	Пл	3877	—	[1]
$TaCl_5$	Пл	215,9	46,4	[1, 2]
	Исп	232,9	54,8	[1]

* При P = 1,60 кПа, ст.
** При P = 700 мм рт. ст.

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кДж/моль	Литература
TaF_5	Пл	91,6	—	[9]
	Исп	229,2	66,9	[1]
Tb	Тп	—45,46	—	[1]
	Пл	1356	—	[11]
	Исп	2600	—	[11]
Te	Сит	—261,95	0,00	[7]
	Пл	2140	—	[10]
	Исп	4700	—	[10]
Te	Тп	449,5	17,5	[1]
	Исп	989,8	114,08	[1]
$TeCl_4$	Пл	224,1	18,9	[1]
	Исп	388	77,0	[1]
Th	Сит	—272,83	0,00	[7]
	Тк	825	—	[1]
	Тп	1400	2,6	[1]
	Пл	1695	15,65	[1]
	Исп	4200	514	[1]
$ThCl_4$	Пл	770	40,2	[9]
	Исп	921	146,4	[2]
ThO_2	Пл	3050	—	[2]
	Исп	4400	—	[1]
Ti	Сит	—272,78	0,00	[7]
	Тк	1085	3,40	[1]
	Пл	1668	15,5	[1]
	Исп	3289	430	[1]
$TiCl_2$	Аллт	—170	0,60	[7]
	Исп	1500	232	[1, 6]
$TiCl_4$	Пл	24,3	9,37	[1, 4]
	Исп	136,5	36,2	[1]
TiC	Пл	3170	—	[1]
TiN	Пл	2947	84	[1, 9]
TiO	Тп	591	343	[1]
	Пл	2020	58,5	[9]
	Исп	2700	-	[1]
TiO_2	Тк	612	1,3	[2]
	Пл	1855	64,8	[1, 9]
	Исп	2000	—	[1]
Tl	Сит	—270,77	0,00	[7]
	Тк	234	0,40	[1]
	Пл	303,5	4,26	[1]
	Исп	1457	162,4	[5]

Продолжение табл. 11.1

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кДж/моль	Литература
TlCl	Пл	427	16,5	[3]
	Исп	807	102,2	[3]
TlF	Пл	327	14,0	[1]
	Исп	655	—	[1]
Tl_2TiO_3	Пл	14,5	2,03	[1]
$TlNO_3$	Тп	61,0	1,0	[2]
	Тп	143,0	3,12	[2]
	Пл	207	9,58	[4]
	Исп	433	-	[1]
$TlNO_3$	Пл	206	15,1	[9]
Tc	Пл	1940	—	[11]
	Исп	1797	-	[11]
U	Сп	-272,35	0,00	[7]
	Тп	602	2,93	[1]
	Тп	772	4,78	[1]
	Пл	1133	19,7	[1]
	Исп	3800	412	[1]
UC	Пл	2427	—	[2]
UCl_4	Пл	598	45,0	[1]
UF_4	Пл	1036	—	[5]
	Исп	1417	-	[6]
UF_6	Пл*	64,05	10,195	[1]
	Исп	56,5	28,7	[1]
UH_3	Фп	—93	0,00	[7]
UO_2	Пл	2730	—	[1]
V	Сп	—268,06	0,00	[7]
	Пл	1735	17,6	[1, 2]
	Исп	3380	458	[1]
VF_3	Пл	19,5	49,86	[1]
	Исп	48,3	44,72	[1]
VN	Сп	—271	0,00	[7]
V_2O_3	Тп	72	8,57	[1]
	Пл	1562	113,8	[1]
	Исп	2700	-	[1]
W	Пл	3380	35,2	[4, 12]
	Исп	5660	799	[1]
WC	Сп	—270	0,00	[7]
	Пл	2867	—	[1]
WCl_6	Тп	109	—	[1]
	Тп	226,9	14,2	[1]
	Пл	284	9,6	[1]
	Исп	348	52,7	[1]

* При P = 11,9 атм. 20

Продолжение табл. 11.1

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кДж/моль	Литература
WF_6	Тп	—8,2	6,7	[6]
	Пл	2,3	2,1	[6]
	Исп	17,06	26,13	[1]
WO_3	Асп	737	0,00	[7]
	Пл	1473	62,8	[1, 6]
	Исп	1800	-	[1]
Xe	Пл	—111,9	2,295	[1]
	Исп	—108,1	12,64	[1]
Y	Пл	1530	17,2	[1]
	Исп	3200	385	[1]
Yb	Пл	824	—	[11]
	Исп	1427	—	[11]
Zn	Сп	—272,36	0,00	[7]
	Пл	419,505	7,28	[1, 12]
	Исп	907	114,7	[5]
$ZnCl_2$	Тп	318	20,0	[1, 2]
	Исп	721	126	[1]
ZnF_2	Пл	872	—	[1]
	Исп	1500	130,1	[1]
ZnS	Тп	1020	13,4	[1, 6]
	Пл*	1850	-	[1]
	Исп	1665	250,2	[1]
Zr	Сп	272,45	0,00	[7]
	Тп	862	3,8	[1]
	Пл	1856	20	[1, 9]
	Исп	4360	582	[1]
ZrC	Сп	—270,85	0,00	[7]
	Пл	3530	-	[1]
$ZrCl_4$	Пл	437	36	[1]
ZrN	Сп	—271,88	0,00	[7]
	Пл	2987	—	[1]
ZrO_2	Тп	1205	5,44	[1]
	Пл	2687	87,0	[1, 4]
	Исп	4300	—	[1]

* При P = 10,2 атм.

Таблица 11.2

Температура и скрытая теплота фазовых переходов органических соединений при давлении 760 *мм рт. ст.*

Обозначения: Алл — аллотропное превращение; Пл — переход твердое тело — жидкость (плавление); Исп — переход жидкость — пар (испарение).

Формула	Название	Переход	t, °C	ΔH, кДж/моль	Литература
CH_4	Метан	Алл	—252,66	0,0856	[1, 2]
		Пл	—182,6	0,938	[1]
		Исп	—161,58	8,280	[13]
CH_3F	Фторметан	Пл	—141,8	—	[1]
		Исп	— 78,5	17,56	[1]
CH_3Cl	Хлорметан	Пл	— 97,71	6,429	[1]
		Исп	24,0	21,63	[1]
CH_3Br	Бромметан	Алл	— 99,4	0,47	[1]
		Пл	— 93,7	5,98	[1]
		Исп	3,5	23,90	[1]
CH_2Cl_2	Дихлорметан	Пл	— 96,6	4,6	[1]
		Исп	40	28,0	[1]
CHF_3	Трифторметан (фреон-23)	Пл	—163	—	[14]
		Исп	— 82,2	16,4	[14]
CHF_2Cl	Дифторхлорметан (фреон-22)	Пл	—160	4,12	[1, 14]
		Исп	— 40,8	20,22	[14]
$CHFCl_2$	Фтордихлорметан (фреон-21)	Пл	—135	—	[1]
		Исп	8,92	24,6	[1]
CF_4	Тетрафторметан (фреон-14) (углерод четырехфтористый)	Алл	—197,1	1,739	[1]
		Пл	—183,7	0,700	[1, 14]
		Исп	128,0	12,33	[1, 14]
CF_3Cl	Трифторхлорметан (фреон-13)	Пл	—160	—	[14]
		Исп	— 81,5	14,63	[14]
CF_2Cl_2	Дифтордихлорметан (фреон-12)	Пл	—156	4,14	[2]
		Исп	— 29,8	19,61	[14]
$CFCl_3$	Флуортрихлорметан (фреон-11)	Пл	—111,0	6,893	[1, 14]
		Исп	23,77	24,9	[1, 14]
CF_3Br	Трифторбромметан (фреон-13B1)	Пл	—175,5	—	[1]
		Пл	—143,2	—	[14]
CF_2Br_2	Дифтордибромметан (фреон-12B2)	Исп	— 57,8	22,7	[1]
		Пл	—110,1	—	[1]
CF_2ClBr	Дифторхлорбромметан	Исп	24,5	—	[14]
		Пл	—159,2	—	[1]
CCl_4	Углерод четыреххлористый	Исп	— 3,8	—	[14]
		Алл	— 47,8	4,96	[1]
		Пл	— 22,9	2,6	[1]
		Исп	76,69	30,0	[1]
CH_4O	Метанол (метиловый спирт)	Алл	—115,8	0,645	[1]
		Пл	— 97,9	3,17	[1]
		Исп	64,6	35,30	[1]
CH_2O	Формальдегид	Пл	— 118	—	[1]
		Исп	— 19,3	24,5	[1, 2]
CH_2O_2	Муравьиная кислота	Пл	8,2	12,68	[1]
		Исп	100,5	22,20	[1]
CCl_2O	Фосген	Пл	— 127,8	5,094	[1]
		Исп	7,5	24,40	[1]
CH_5N	Метиламин	Пл	— 93,5	6,134	[1]
		Исп	— 6,3	25,82	[1]
$CHON$	Циановая кислота	Исп	23,2	29,0	[1]
CH_2N_2	Цианамид	Пл	42,8	8,8	[1]
$CClN$	Хлорциан	Пл	— 6,00	11,34	[1]
		Исп	12,9	26,31	[2]
C_2H_6	Этан	Пл	— 183,3	2,857	[1]
		Исп	— 88,63	14,70	[1, 13]
C_2H_4	Этен (этилен)	Пл	—169,2	3,351	[13]
		Исп	—103,7	13,54	[1]
C_2H_2	Этин (ацетилен)	Пл	— 81,5*	3,76	[1]
		Исп	— 83,6	17,27	[13]

* При p = 930 кг/см².

Формула	Название	Переход	t, °C	ΔH, кДж/моль	Литература
C_2H_5F	Фторэтан	Пл	−143,2	—	[1]
		Исп	−32,0	21,07	[1]
C_2H_5Cl	Хлорэтан	Пл	−136,3	4,46	[1]
		Исп	12,2	24,65	[1]
C_2H_3F	Фторэтен	Пл	−160,5	—	[2]
		Исп	−72,2	17,1	[2]
C_2H_3Cl	Хлорэтен	Пл	−159,7	4,79	[1]
		Исп	−13,7	20,8	[1]
C_2HCl	Хлорэтин	Исп	−29,6	22,5	[1]
$C_2H_4Cl_2$	1,1-Дихлорэтан	Пл	−97,0	7,870	[1]
		Исп	57,4	28,71	[1]
$C_2H_4Cl_2$	1,2-Дихлорэтан	Пл	−35,9	9,837	[1]
		Исп	82,4	31,45	[15]
$C_2H_4Br_2$	1,2-Дибромэтан	Алл	−23,6	1,94	[1]
		Пл	9,9	10,94	[1]
		Исп	131,6	36,2	[15]
$C_2H_2Cl_2$	1,1-Дихлорэтен	Пл	−122,56	6,51	[1]
		Исп	31,7	26,4	[2]
$C_2H_3F_3$	1,1,1-Трихлорэтан (фреон-143)	Пл	−111,3	6,19	[14]
		Исп	−47,6	19,8	[1, 14]
$C_2H_3Cl_3$	1,1,2-Трихлорэтан	Пл	−36,1	11,38	[1]
		Исп	113,9	36,6	[2]
$C_2H_3F_2Cl$	1,1-Дифтор-1-хлорэтан (фреон-142)	Пл	−130,8	2,00	[14]
		Исп	9,8	22,4	[14]
C_2F_4	Тетрафторэтен	Пл	−131,1	7,714	[1]
		Исп	75,6	16,82	[1]
C_2Cl_4	Тетрахлорэтен	Пл	−22	10,5	[1]
		Исп	121,0	34,7	[1]
C_2F_6	Гексафторэтан	Алл	−169,2	3,74	[1]
		Пл	−100,0	2,09	[1]
		Исп	−78,6	16,15	[1]
C_2F_5Cl	Пентафторхлорэтан (фреон-115)	Алл	−192,9	2,520	[1]
		Пл	−106,0	1,876	[14]
		Исп	−38,0	19,41	[14]
$C_2F_4Cl_2$	1,1,1,2-Тетрафтор-2,2-дихлорэтан (фреон-114)	Пл	−93,9	—	[14]
		Исп	3,6	28,51	[14]
$C_2F_3Cl_3$	1,2,2-Трифтор-1,1,2-трихлорэтан (фреон-113)	Пл	−36,5	—	[14]
		Исп	47,6	27,47	[14]
$C_2F_2Cl_4$	1,2-Дифтор-1,1,2,2-тетрахлорэтан	Пл	24,6	—	[14]
		Исп	92,8	—	[14]
C_2H_6O	Этанол (этиловый спирт)	Пл	−114,7	5,02	[1]
		Исп	78,4	38,74	[15]
C_2H_6O	Диметиловый эфир	Пл	−141,5	4,94	[1]
		Исп	−24,8	21,51	[1]
C_2H_4O	Ацетальдегид	Пл	−188	3,22	[2]
		Исп	20,1	27,1	[2]
C_2H_4O	Этиленоксид	Пл	−112,5	5,173	[1]
		Исп	10,5	25,53	[1]
C_2H_2O	Кетен	Пл	−151	7,53	[1]
		Исп	−41	20,25	[1]
$C_2H_6O_2$	Этиленгликоль	Пл	−12,4	11,6	[1]
		Исп	197,4	57,03	[1]
$C_2H_4O_2$	Уксусная кислота	Пл	16,6	11,73	[1]
		Исп	118,5	23,70	[1]
$C_2H_4O_2$	Метилформиат	Пл	−99	6,7	[1]
		Исп	32,0	27,89	[15]
$C_2H_4O_3$	Гликолевая кислота	Пл	63	8,4	[2]
		Исп	78	8,6	[2]
C_2H_5ClO	Хлорэтанол	Пл	−67,5	—	[1]
		Исп	128,5	41,4	[1]
C_2H_5N	Этиламин	Пл	−81,0	—	[2]
		Исп	16,6	27,30	[1]
C_2H_7N	Диметиламин	Пл	−92,2	6,989	[1]
		Исп	7,4	26,10	[1]

Формула	Название	Переход	t, °C	ΔH, кДж/моль	Литература
C_2H_3N	Этанонитрил	Пл	−44,5	8,91	[2]
		Исп	81,5	32,75	[2]
C_2H_5ON	Ацетамид	Пл	71	14,2	[2]
		Исп	221,2	—	[1]
$C_2H_5O_3N$	Этилнитрат	Пл	−94,6	8,027	[1]
		Исп	87,7	38,9	[1]
C_3H_8	н-Пропан	Пл	−187,7	2,024	[1, 13]
		Исп	−42,03	18,77	[13]
C_3H_6	Пропен (пропилен)	Пл	−185,3	3,009	[1]
		Исп	−47,70	18,42	[13]
C_3H_4	Циклопропан	Пл	−136,1	4,380	[1, 13]
		Исп	−34,42	20,52	[13]
C_3H_4	Пропин (метилацетилен)	Пл	102,7	—	[1]
		Исп	−23,23	22,08	[13]
C_3H_7Cl	1-Хлорпропан	Пл	−122,8	5,564	[1]
		Исп	46,7	27,6	[1]
C_3H_7Br	1-Бромпропан	Пл	−103,1	6,57	[1]
		Исп	71,0	29,9	[1]
C_3H_7Br	2-Бромпропан	Пл	−119,3	—	[1]
		Исп	59,2	—	[1]
C_3H_8O	1-Пропанол (пропиловый спирт)	Пл	−126,2	5,30	[1]
		Исп	97,8	41,81	[1]
C_3H_8O	2-Пропанол (изопропиловый спирт)	Пл	−88,5	5,37	[1]
		Исп	82,4	40,48	[15]
C_3H_8O	Метилэтиловый эфир	Исп	7,5	24,73	[15]
C_3H_6O	Аллилол	Пл	−96,5	6,73	[1]
		Исп	96,1	29,69	[1]
$C_3H_6O_2$	Пропионовая кислота	Пл	20,8	7,55	[1]
		Исп	139,3	30,69	[1]
$C_3H_6O_2$	Этилформиат	Пл	−79,2	9,2	[1]
		Исп	54,3	30,31	[15]
$C_3H_6O_2$	Метилацетат	Пл	56,8	—	[1]
		Исп	57,8	31,98	[15]
$C_3H_4O_2$	Акриловая кислота	Пл	12,3	11,3	[1]
		Исп	141,6	—	[1]
$C_3H_4O_3$	Глиоксаль	Пл	15,2	16,47	[1]
		Исп	950,5	—	[1]
C_3H_5N	Пропанонитрил	Исп	96,5	30,06	[1]
C_3H_5N	Этилцианид	Пл	−91,5	6,07	[1]
		Исп	97,10	31,0	[1]
$C_3H_7O_2N$	Уретан	Пл	49,7	15,9	[1]
$C_3H_7O_3N$	Пропилнитрат	Исп	110	37,1	[1]
C_4H_{10}	н-Бутан	Пл	−165,00	3,667	[13]
		Пл	−138,36	4,680	[16]
		Исп	−0,50	22,39	[13]
C_4H_{10}	2-Метилпропан (изобутан)	Пл	−159,60	6,541	[16]
		Исп	−11,7	21,30	[13]
C_4H_8	1-Бутен (бутилен)	Пл	−185,3	3,846	[1]
		Исп	−6,25	21,92	[13]
C_4H_8	*цис*-2-Бутен	Пл	−138,91	7,308	[16]
		Исп	3,72	23,55	[13]
C_4H_8	*транс*-2-Бутен	Пл	−105,55	9,757	[16]
		Исп	0,88	22,76	[13]
C_4H_8	2-Метилпропен (изобутилен)	Пл	−140,35	5,931	[16]
		Исп	−7,01	22,12	[13]
C_4H_8	Циклобутан	Пл	−126,29	5,694	[13]
		Пл	−90,7	1,008	[1]
		Исп	12,6	24,5	[13]
		Исп	−7,5	—	[1]
C_4H_8	Метилциклопропан	Пл	−177,32	2,801	[13]
C_4H_6	1,2-Бутадиен	Пл	−136,19	6,961	[13]
		Исп	10,86	—	[13]
C_4H_6	1,3-Бутадиен (дивинил)	Пл	−108,92	7,985	[16]
		Исп	−4,6	22,59	[13]

Формула	Название	Подгруппа	t, °C	ΔH, кДж/моль	Литература
C_4H_6	1-Бутин (этилацетилен)	Пл	—125,72	6,021	[13]
		Исп	8,07	21,52	[13]
C_4H_6	2-Бутин	Пл	—32,2	9,206	[17]
		Исп	27,0	26,56	[13]
C_4H_6	Циклобутен	Исп	2,4	23,56	[13]
C_4H_6	Бутадиен (винилэтилен)	Исп	5,1	21,56	[13]
C_4H_6	1,3-Бутадиен	Пл	—36,4	—	[1]
		Исп	10,3	23,32	[13]
C_4H_9F	2-Фторбутан	Пл	—121,4		[1]
		Исп	25,1	26,65	[1]
C_4H_9Br	1-Бромбутан	Пл	—112,8	9,241	[1]
		Исп	99,4	32,13	[1]
C_4F_8	Октафторциклобутан	Пл	—40,2*	2,768	[1]
$C_4H_{10}O$	1-Бутанол (н-бутиловый спирт)	Пл	—89,3	8,98	[1]
		Исп	117,6	43,97	[1]
$C_4H_{10}O$	2-Бутанол (бутиловый спирт вторичный)	Пл	—114,7		[1]
		Исп	99,6	43,66	[15]
$C_4H_{10}O$	2-Метилпропанол (бутиловый спирт, третичный)	Пл	25,5	6,79	[1]
		Исп	82,9	39,97	[15]
$C_4H_{10}O$	2-Метилпропанол (изобутиловый спирт)	Пл	108	—	[1]
		Исп	107,2	43,47	[1]
$C_4H_{10}O$	Диэтиловый эфир	Пл	—116,2	6,90	[1]
		Исп	34,6	26,60	[1]
C_4H_8O	2-Бутанон	Пл	—87,1	8,48	[1]
		Исп	79,6	32,6	[1]
C_4H_8O	Диэтилкетон эфир	Пл	—100	7,36	[1]
		Исп	28,3	28,2	[1]
C_4H_4O	Фуран	Пл	—85,6	3,602	[1]
		Исп	31,4	27,09	[1]
$C_4H_8O_2$	Масляная кислота	Пл	—5,6	11,07	[1]
		Исп	164,0	42,01	[1]
$C_4H_8O_2$	Изомасляная кислота	Пл	—46,0	5,0	[1]
		Исп	154,7	41,1	[1]
$C_4H_8O_2$	Пропилформиат	Пл	—92,9	—	[1]
		Исп	81,3	31,9	[1]
$C_4H_8O_2$	Этилацетат	Пл	—83,8	10,46	[1]
		Исп	77,1	32,26	[1]
$C_4H_8O_2$	Метилпропионат	Исп	79,8	32,04	[15]
C_4H_8O	Метилкротонат	Исп	99,5	40,29	[1]
C_4H_4S	Тиофен	Пл	—38,3	5,09	[1]
		Исп	84,2	31,47	[1]
$C_4H_{11}N$	Бутиламин	Пл	50,5	—	[1]
		Исп	70	27,2	[1]
$C_4H_{11}N$	Диэтиламин	Пл	—48,0	—	[1]
		Исп	55,5	28,83	[1]
C_5H_{12}	н-Пентан	Пл	—129,7	8,414	[18]
		Исп	36,1	25,77	[1, 13]
C_5H_{12}	2-Метилбутан (изопентан)	Пл	—159,9	5,166	[18]
		Исп	27,8	24,59	[13]
C_5H_{12}	2-2-Диметилпропан (неопентан)	Пл	—133,1	2,575	[13]
		Пл	—16,6	3,255	[19]
		Исп	9,50	22,75	[20]
C_5H_{10}	1-Пентен	Пл	—165,2	5,907	[19, 20]
		Исп	30,0	25,2	[1, 13]
C_5H_{10}	цис-2-Пентен	Пл	—151,4	7,113	[20, 21]
		Исп	37,0	26,95	[13]
C_5H_{10}	транс-2-Пентен	Пл	140,2	8,368	[20, 21]
		Исп	36,4	26,15	[13]
C_5H_{10}	2-Метил-1-бутен	Пл	—137,5	7,912	[20, 21]
		Исп	31,2	25,90	[13]
C_5H_{10}	3-Метил-1-бутен	Пл	—168,5	5,36	[20, 21]
		Исп	20,06	24,04	[13]

* При p = 200 мм рт. ст.

Формула	Название	Переход	t, °C	ΔH, кДж/моль	Литература
C_5H_{10}	2-Метил-2-бутен	Пл	−137,6	7,168	[20, 21]
		Исп	38,7	26,30	[13]
C_5H_{10}	Циклопентан	Алл	−150,76	4,894	[1]
		Алл	−135,06	0,344	[1, 13]
		Пл	−93,8	0,600	[13]
		Исп	49,3	27,2	[13]
C_5H_6	1,3-Пентадиен	Пл	137,3	—	[22]
		Исп	44,9	27,17	[13]
C_5H_6	*цис*-1,3-Пентадиен (*цис*-пиперилен)	Пл	−137,3	—	[22]
		Исп	42,0	27,08	[13]
C_5H_6	*транс*-1,3-Пентадиен (*транс*-пиперилен)	Пл	−87,5	6,345	[22]
		Исп	42,0	26,84	[13]
C_5H_6	1,4-Пентадиен	Пл	−148,3	6,142	[22]
		Исп	36,1	26,0	[1, 13]
C_5H_6	2,3-Пентадиен	Пл	−125,5	—	[22]
		Исп	46,3	27,78	[13]
C_5H_8	2-Метил-1,3-бутадиен (изопрен)	Пл	−146,7	4,63	[1, 23]
		Исп	34,1	25,82	[13]
C_5H_8	Циклопентен	Алл	−188,06	0,4795	[1, 21]
		Пл	−135,1	3,365	[13]
		Исп	44,24	27,33	[13]
C_5H_8	Спиропентан	Пл	−107,6	6,435	[1]
		Исп	39,6	2,39	[13]
C_5H_8	1-Пентин	Исп	40,25	27,78	[13]
C_5H_6	Циклопентадиен	Исп	41,5	26,19	[13]
$C_5H_{11}Br$	1-Бромпентан	Пл	89,3	14,27	[1]
		Исп	128,6	30,6	[1]
$C_5H_{12}O$	1-Пентанол	Пл	−79,6	9,795	[1]
		Исп	138,2	—	[1]
$C_5H_{12}O$	2-Пентанол	Исп	119,15	—	[1]
$C_5H_{12}O$	2-Метил-2-бутанол	Алл	−127,2	1,90	[1]
		Пл	−9,1	4,49	[1]
		Исп	102,3	—	[1]
$C_5H_{12}O$	Этилпропиловый эфир	Исп	61,4	28,9	[1]
$C_5H_{12}O$	Метилтрет-бутиловый эфир	Пл	−108,6	—	[1]
		Исп	55,1	28,3	[1]
$C_5H_{12}O$	2-Пентанон	Пл	−77,7	10,6	[1]
		Исп	101,9	—	[1]
$C_5H_{10}O$	Циклопентанол	Алл	−70,4	5,71	[1]
		Пл	−16,3	1,54	[1]
		Исп	140,2	—	[1]
$C_5H_{10}O_2$	Валериановая кислота	Пл	−34,5	7,74	[1]
		Исп	184,7	44,0	[1]
$C_5H_{10}O_2$	Изовалериановая кислота	Пл	−30,0	7,32	[1]
		Исп	176,7	43,1	[1]
$C_5H_{10}O_2$	Бутилформиат	Пл	−91,9	—	[1]
		Исп	106,1	31,7	[1]
$C_5H_{10}O_2$	Изобутилформиат	Пл	−95,9	—	[1]
		Исп	97,8	33,85	[1]
$C_5H_{10}O_2$	Пропилацетат	Исп	101,8	34,71	[1]
$C_5H_{10}O_2$	Этилпропионат	Пл	−73,9	12,6	[1]
		Исп	99,6	36,42	[15]
$C_5H_{10}O_2$	1-Метилбутиратт	Исп	102,3	34,42	[15]
$C_5H_{10}O_2$	2-Метилбутиратт	Исп	176,5	—	[1]
$C_5H_{10}S$	Тиациклопентан	Пл	19,10	2,448	[1]
		Исп	141,7	36,14	[1]
$C_5H_{11}N$	Пиперидин	Исп	107,5	32,3	[1]
C_5H_5N	Пиридин	Пл	−4,7	8,278	[1]
		Исп	115,2	35,19	[1]
C_6H_{14}	*н*-Гексан	Пл	−95,3	13,03	[18]
		Исп	68,7	28,86	[23]
C_6H_{14}	2-Метилпентан	Пл	−153,6	6,266	[13]
		Исп	60,3	27,79	[23]

Формула	Название	Переход	t, °C	ΔH, кДж/моль	Литература
C_4H_{10}	2,2-Диметилбутан (неогексан)	Алл	—123,36	0,965	[1]
		Алл	—146,34	5,209	[1]
		Пл	— 99,7	0,679	[19]
		Исп	49,7	26,5	[23]
C_6H_{12}	1-Гексен	Пл	—139,8	9,347	[19]
		Исп	63,5	28,08	[1]
C_6H_{12}	Циклогексан	Алл	— 87,06	6,66	[1, 18]
		Пл	6,5	2,666	[1]
		Исп	80,7	30,06	[23]
C_6H_{10}	1-Гексин	Пл	—132,05	—	[13]
		Исп	71,4	29,26	[13]
C_6H_6	Бензол	Пл	5,52	9,827	[13]
		Исп	80,10	30,76	[13]
C_6H_5F	Фторбензол	Пл	— 42,2	11,30	[1]
		Исп	84,7	31,20	[1]
C_6H_5Cl	Хлорбензол	Пл	— 45,3	9,056	[1]
		Исп	132,2	35,68	[15]
C_6H_5Br	Бромбензол	Пл	— 30,7	10,63	[1]
		Исп	156,2	38,40	[15]
$C_6H_{14}O$	1-Гексанол (гексиловый спирт)	Пл	— 47,4	15,39	[1]
		Исп	157,0	50,63	[1]
$C_6H_{14}O$	2-Гексанол	Исп	139,0	49,76	[1]
$C_6H_{14}O$	Диизопропиловый эфир	Пл	— 86,8	11,24	[1]
$C_6H_{12}O$	Циклогексанол	Алл	— 9,7	8,2	[1]
		Пл	23,5	1,70	[1]
		Исп	160,5	42,4	[1]
C_6H_6O	Фенол	Пл	41	11,6	[1]
		Исп	181,8	47,30	[1]
$C_6H_{12}O_2$	Капроновая кислота	Пл	— 3,6	15,1	[1]
		Исп	205,3	—	[1]
C_6H_7N	Анилин	Пл	— 6,4	10,54	[1]
		Исп	184,4	45,15	[15]
$C_6H_5O_2N_3$	Пикриновая кислота	Пл	122	19,5	[1]
		Исп	320	87,9	[1]
C_7H_{16}	н-Гептан	Пл	— 90,6	14,022	[15]
		Исп	98,4	31,69	[23]
C_7H_{14}	1-Гептен	Пл	—119,05	12,40	[19]
		Исп	93,6	30,92	[13]
C_7H_{14}	Циклогептан	Алл	—138,4	4,966	[1]
		Алл	— 75	0,290	[1]
		Алл	— 60,8	0,450	[1]
		Пл	— 8,03	1,882	[1]
		Исп	114,4	31,60	[13]
$C_7H_5F_3$	Фенилтрифторметан	Пл	— 29,01	13,78	[1]
		Исп	102,03	32,64	[1]
$C_7H_{14}O$	1-Гептанол (гептиловый спирт)	Пл	— 32,8	18,17	[1]
		Исп	175,9	—	[1]
C_7H_8O	Бензиловый спирт	Пл	— 15,6	8,970	[1]
		Исп	204,2	50,46	[1]
C_7H_8O	о-Крезол	Исп	191,0	46,94	[1]
$C_7H_5O_7N_3$	2,4,6-Тринитрокрезол	Пл	80,5	22,6	[1]
		Исп	340	73,22	[1]
C_8H_{18}	н-Октан	Пл	— 56,8	20,74	[19]
		Исп	125,3	34,57	[13]
C_8H_8	Этенилбензол (стирол)	Пл	— 30,6	10,56	[16]
		Исп	145,1	37,54	[13]
$C_8H_{18}O$	1-Октанол	Пл	— 16,0	—	[1]
		Исп	196,8	53,1	[1]
C_8H_{20}	н-Пентан	Алл	— 55,96	6,28	[19]
		Пл	— 53,6	17,47	[17]
		Исп	150,8	37,78	[23]
C_8H_{12}	Изопропилбензол (кумол)	Пл	— 96,03	9,6	[19]
		Исп	152,29	38,40	[13]

Формула	Название	Переход	t, °С	ΔH, кдж/моль	Литература
$C_{10}H_{22}$	*н*-Декан	Пл	−29,67	29,71	[17]
		Исп	174,12	36,5	[13]
$C_{10}H_8$	Нафталин	Пл	80,28	18,86	[13]
		Исп	217,96	42,8	[1]
$C_{11}H_{24}$	*н*-Ундекан	Алл	−26,6	6,858	[13]
		Пл	25,6	29,16	[13]
		Исп	195,9	—	[1]
$C_{12}H_{26}$	*н*-Додекан	Пл	9,6	36,84	[1]
		Исп	216,3	—	[1]
$C_{12}H_{10}$	Дифенил	Пл	68,2	18,6	[1]
		Исп	255	47,95	[1]
$C_{13}H_{28}$	*н*-Тридекан	Пл	−5,4	28,5	[1]
		Исп	235	—	[1]
$C_{14}H_{30}$	*н*-Тетрадекан	Пл	−5,9	45,07	[1]
		Исп	253,6	—	[1]
$C_{15}H_{32}$	*н*-Пентадекан	Пл	10,0	34,59	[1]
		Исп	270,6	—	[1]

II.2. ПЛАВЛЕНИЕ

Плавление — переход вещества из твердого (кристаллического) состояния в жидкое; обратный переход называется *кристаллизацией*. Температура плавления от давления (кривая плавления) начинается в тройной точке и, предположительно, вверх не ограничивается, т. е. не имеет критической точки. В общем случае температура плавления $T_{пл}$ возрастает с ростом давления. Теплоту плавления можно оценить (с погрешностью около 10%) по следующим формулам [24]:

для углеводородов и кислородсодержащих органических соединений

$$L_{пл} = 4{,}95 \cdot T_{пл} \cdot 10^{0{,}208m} \text{ кал/моль};$$

для неорганических соединений [26]

$$L_{пл} = nT_{пл} f(T_{пл}) \text{ кал/г},$$

где m — молекулярная масса; n — число атомов в молекуле вещества; $f(T_{пл})$ — эмпирическая функция.

$T_{пл}$, °К	300	600	1000	1500
$f(T_{пл})$, кал/(г·град)	1,9	2,5	3,0	3,2

Для более грубых оценок можно использовать эмпирическую формулу [25]

$$L_{пл} = aT_{пл} \text{ кал/моль},$$

где $a = 2{,}5$ для элементов; $a = 6$ для неорганических соединений и $a = 13{,}5$ для органических соединений.

Изменение температуры плавления $\Delta T_{пл}$, вызванное изменением давления ΔP, можно оценить по эмпирической формуле Шоенгута [24]:

$$\Delta T_{пл} = \frac{T_{пл}\Delta P}{41{,}3 L_{пл}\rho} \text{ град},$$

где $L_{пл}$ — теплота плавления, *кал/г*; ρ — плотность твердой фазы, *г/см*^{3}; P — давление, *атм*. Соответствующее изменение теплоты плавления

$$\Delta L_{пл} = \frac{\Delta P}{41{,}3\rho} \cdot \left(1 + \frac{T_{пл}}{L_{пл}} \cdot \Delta C_p\right) \text{ кал/г},$$

где ΔC_p — скачок теплоемкости при плавлении, *кал/(г·град)*.

Плавление сплавов и твердых растворов характеризуется температурным интервалом плавления. Температура начала плавления называется *солидус*, температура конца плавления — *ликвидус*. Различие между этими температурами определяется составом сплава (раствора). В случае эвтектических сплавов солидус и ликвидус совпадают; при плавлении эвтектических сплавов состав фаз не изменяется.

Плавление неидеальных соединений (полимеров, керамик, стекол и т. п.) имеет сложный характер и происходит в температурной области, зависящей от многих факторов (состава, структуры, предыстории напряжения и т. п.). Температурой плавления называют при этом условную границу температурного интервала плавления. Многие из веществ такого типа (например, стекла, смолы, пластмассы) являются переохлажденными жидкостями, т. е. находятся в термодинамически метастабильном состоянии. При повышении температуры они постепенно размягчаются. Температурой плавления при этом считают условную температурную границу процесса размягчения. Обратный процесс (затвердевание) для переохлажденных жидкостей характеризуется аналогично температурой затвердевания. Важными характеристиками процесса размягчения и затвердевания являются соответственно теплостойкость и морозостойкость. Теплостойкость (по Мартенсу) измеряется наименьшей температурой, при которой изгибающее усилие 50 *кГ/см*^{2} вызывает заметную деформацию. Морозостойкость определяется аналогично.

Таблица 11.3

Температура плавления элементов и соединений при различных давлениях

p, мбар	t, °C
Ar, аргон [10]	
200	—179,58
750	—173,2
1 000	—169,75
2 000	—140,67
3 000	—128,8
4 000	—111,2
5 000	—93,2
6 000	—80,3
8 000	—63,2
Tl, таллий [10]	
1 000	267,5
2 000	263,5
4 000	256,5
8 000	248,0
10 000	228,5
Cs, цезий [10]	
1 000	51,5
2 000	70,2
3 000	85,7
4 000	98,6
Ga, галлий [10]	
4 000	21,5
8 000	12,6
12 000	2,5
H_2, водород [26]	
1,7	—259,15
33,2	—258,15
67,3	—257,15
103,6	—256,15
142,2	—255,15
183,1	—254,15
227,6	—253,15
272,4	—252,15
318,6	—251,15
366,1	—250,15
414,5	—249,15
464,2	—248,15
745	—243,15
1429	—233,15
2260	—223,15
3249	—213,15
Pr, гелий [27]	
37,08	—271,10
800	—261,04
1740	—253,15
3280	—243,15
5140	—233,15
7270	—223,15
^{3}He, гелий-3 [27]	
36,80	—272,15
246	—267,15
664	—263,15
1 910	—257,15
1 850	—253,15
3 410	—248,15
3 554,8	—242,57
Hg, ртуть [10]	
2 000	—26,66
4 002	—18,45
6 018	1,87
10 034	12,66
12 061	22,34
K, калий [10]	
1 000	78,7
2 000	92,4
4 000	115,8
8 000	152,5
10 000	167,0
12 000	179,6
Kr, криптон [27]	
184	—152,9
702	—137,9
1 275	—123,3
2 050	—103,2
2 961	—80,6
N_2, азот [26]	
1 000	—190,7
2 000	—175,7
3 000	—162,2
4 000	—149,7
5 000	—138,2
6 000	—126,7
7 000	—115,7
8 000	—104,2
9 000	—94,7
Na, натрий [10]	
1 000	105,9
2 000	114,2
4 000	128,6
8 000	155,1
10 000	166,7
12 000	177,5
Ne, неон [27]	
19,6	—248,28
102,7	—247,04

Продолжение табл. 11.3

p, мбар	t, °C
380	—243,15
1 360	—233,15
2 250	—223,15
3 420	—213,15
4 850	—203,15
O_2, кислород [26]	
14,5	—218,65
56,8	—218,15
100,2	—217,65
144,5	—217,15
190,8	—216,65
P, фосфор [10]	
1 000	72,7
2 000	99,5
3 000	124,4
4 000	151,3
6 000	191,9
Rb, рубидий [10]	
1 000	57,0
2 000	74,5
3 000	89,1
S, сера [10]	
400	120
1 000	140
Xe, ксенон [27]	
240	103,15
520	—93,15
910	—83,15
1 030	—73,15
1 380	—63,15
1 665	—53,15
1 800	—43,15
2 250	—33,15
2 605	—23,15
2 505	—13,15
CO_2, углекислый газ [10]	
3 000	—6,5
4 000	8,5
5 000	21,4
6 000	33,1
8 000	55,2
10 000	75,4
12 000	93,5
CS_2, сероуглерод [8, 10]	
6 000	—61
10 000	0
15 000	46
20 000	89
25 000	130
30 000	170
35 000	209
H_2O, вода [8, 10]	
610	—5,0
1 000	—88
1 580	—15
2 000	—20,15
2 115*	—22,0*
2 510	—20
3 000	—18,40
3 530*	—17,0*
3 140	—20
3 860	—15
4 510	—10
6 440	—5
6 300*	0,16*
4 790	—15
6 280	10
5 810	—5
6 380*	0,16*
7 000	5
7 640	10
8 000	12,8
9 000	20
10 590	30
12 309	40
15 000	52,6
18 000	60
20 000	73,6
25 000	102,8
30 000	137,0
35 000	166,6
40 000	192,3
$NaCl \cdot 2H_2O$, натрий хлористый [10]	
3 000	17,5
5 200	21,2
7 300	24,3
$SiCl_4$, кремний четыреххлористый [10]	
2 000	—10,0
4 000	42,6
6 000	92,5
8 000	139,6
10 000	183,6
CCl_4, углерод четыреххлористый [10]	
1 000	14,2
2 000	45,9
4 000	102,7
6 000	140,5
8 000	192,1

* Тройная точка.

P, мм	t, °C
$CHCl_3$, хлороформ [8, 10]	
3 000	−12,1
4 000	3,4
6 000	10,0
8 000	39,4
10 000	58,6
12 000	81,7
15 000	107,9
20 000	137,0
25 000	192
30 000	243
$CHBr_3$, бромоформ [10]	
1 000	31,5
2 000	63,8
4 000	94,7
6 000	130,8
8 000	153,2
10 000	194,0
CH_2Cl_2, дихлорметан [8, 10]	
5 000	−46
10 000	0
15 000	42
20 000	82
25 000	120
30 000	157
$C_2H_3O_2Cl$, хлоруксусная кислота [10]	
7 540	151,7
9 321	164,8
$C_2H_4O_2$, уксусная кислота [10]	
1 000	37,7
2 000	54,3
4 000	83
6 000	105,2
8 000	125,6
10 000	149,3
$C_2H_4Br_2$, 1,2-дибромэтан [10]	
500	27,45
1 000	34,0
C_2H_5ON, ацетамид [10]	
1 000	93,1
2 000	109,1
4 000	129,0
6 000	143,1
8 000	151,1
10 000	166,55
C_2H_5Br, бромэтан [8, 10]	
5 000	−71
10 000	−29
15 000	5
20 000	34
25 000	58
30 000	80
C_2H_6O, этанол [8, 10]	
5 000	−76
10 000	−39
15 000	−6
20 000	25
25 000	54
30 000	82
35 000	109
C_3H_7Br, 1-бромпропан [8, 10]	
5 000	−56
10 000	0
15 000	34
20 000	71
25 000	105
30 000	138
40 000	197
$C_3H_7O_2N$, уретан [10]	
1 000	57,3
2 000	64,2
4 000	75,8
6 000	88
10 000	138,4
$C_3H_8O_3$, диметилоксалат [10]	
1 000	75,8
2 000	95,8
4 000	132,6
6 000	196,8
$C_4H_8O_2$, этилацетат [10]	
12 100	25
23 800	75
$C_4H_{10}O$, бутанол [8, 10]	
5 000	−33
10 000	12
15 000	49
20 000	80
25 000	108
30 000	132
35 000	156
$C_6H_5O_2N$, нитробензол [10]	
1 000	27,9
2 000	48,1
4 000	87,6
6 000	122,2
8 000	153,8
10 000	184,5
C_6H_5Cl, хлорбензол [8, 10]	
2 000	−12
4 000	16,7
5 000	25
6 000	41,9
8 000	64,8
10 000	84,5
15 000	130
20 000	166
25 000	222
C_6H_5Br, бромбензол [10]	
1 000	−12,1
2 000	5,3
4 000	36,9
6 000	62,0
10 000	107,6
$C_6H_6O_2N$, нитрофенол [10]	
500	125,5
1 000	137,7
2 000	159,8
4 000	199,8
C_6H_6, бензол [10]	
1 000	32,5
2 000	56,5
3 000	77,7
4 000	96,0
5 000	114,6
6 000	131,2
8 000	162,2
10 000	190,5
C_6H_6O, фенол [10]	
1 000	53,4
2 000	83,3
4 000	99,8
6 000	131,9
8 000	159,6
10 000	184,6
12 000	200,2
C_6H_7N, анилин [10]	
1 000	13,1
2 000	31,6
4 000	66,5
6 000	93,2
8 000	119,1
12 000	166,3
C_7H_8O, о-крезол [10]	
1 000	47,4
4 000	91,8
8 000	118,1
$C_{10}H_8$, нафталин [10]	
395	80
580	100
$C_{12}H_{11}N$, дифениламин [10]	
1 000	79,1
4 000	144,9
8 000	212,9
$C_{13}H_{10}O$, бензофенон [10]	
1 000	74,6
4 000	142
8 000	213,7

Таблица II.4

Изменение объема $\Delta V = V_{конк} - V_{тв}$ вещества при плавлении [8]

Формула	Название	P, атм	ΔV, см³/моль
Элементы			
Al	Алюминий	1	1,61
Ar	Аргон	1	3,16
		1000	2,22
Bi	Висмут	1	0,72
		1000	−0,74
		10 000	0,87
Br	Бром	1	4,08
Cd	Кадмий	1	0,73
Cs	Цезий	1	1,8
		1000	1,43
Ga	Галлий	1	−0,37
		4 000	−0,407
		17 000	−0,516
H_2	Водород	0,073	4,85
He	Гелий	102	1,10
Hg	Ртуть	1	0,519
I	Иод	1	5,48
K	Калий	1	1,65
		1000	0,826
		10 000	0,328
Kr	Криптон	1	4,49
Li	Литий	1	0,184
N_2	Азот	1	1,01
		1000	0,81
Na	Натрий	1	0,641
		1000	0,584
		10 000	0,368
Ne	Неон	1	2,19
O_2	Кислород	1	0,82
P	Фосфор	1	0,597
		1000	0,553
Pb	Свинец	1	0,705
Rb	Рубидий	1	1,59
		1000	1,24
S	Сера моноклинная	1	0,92
		400	1,26
	ромбическая	1000	0,65
Sb	Сурьма	1	0,27
Se	Селен	1	1,41
Sn	Олово	1	0,46
Te	Теллур	1	1,57
Tl	Таллий	1	0,63
Xe	Ксенон	1	5,59
Zn	Цинк	1	0,69
Неорганические соединения			
Al_2O_3	Оксид алюминия	1	15,3
B_2O_3	Оксид бора	1	−0,81
CO_2	Диоксид углерода	2000	4,7
		10 000	2,65
COS	Сероокись углерода	1	4,68
CS_2	Сероуглерод	1	3,27
		10 000	2,17
H_3PO_4	Фосфорная кислота	1	7,6
NaCl	Хлористый натрий	3690	1,26
		7360	0,41
Na_2SO_4	Сернокислый натрий	1	1,18
PH_3	Фосфористый водород	1	2,25

Продолжение табл. II.4

Формула	Название	P, атм	ΔV, см³/моль
PCl_3	Треххлористый фосфор	1	4,92
$SbCl_3$	Треххлористая сурьма	816	12,0
SF_6	Шестифтористая сера	1	20,8
$SiCl_4$	Четыреххлористый кремний	2000	8,87
		10 000	5,2
Органические соединения			
CF_4	Четырехфтористый углерод	1	1,6
CCl_4	Четыреххлористый углерод	1	3,87
		10 000	2,69
		3000	5,32
$CHCl_3$	Хлороформ	10 000	4,16
$CHBr_3$	Бромоформ	1	9,87
		1000	8,37
		10 000	4,20
CH_2O_2	Муравьиная кислота	1	5,30
CH_3NO_2	Карбамид	1	0,6
C_2F_4	Тетрафторэтилен	1	13,5
C_2F_6	Гексафторэтан	1	6,8
$C_2F_2Br_4$	Дифтортетрабромэтан	1	6,1
$C_2H_3O_2Cl$	Хлоруксусная кислота	1	10,11
$C_2H_4O_2$	Уксусная кислота	1	9,37
		1000	5,89
		10 000	3,21
$C_2H_4Br_2$	Дибромэтан	1000	7,14
C_2H_5ON	Ацетамид	1	0,446
		1000	5,033
		10 000	2,494
C_2H_5Br	Бромэтан	1	4,53
C_2H_6O	Этиловый спирт	2000	2,00
$C_3H_6O_2$	Пропионовая кислота	1	9,13
C_3H_7Br	1-Бромпропан	2000	2,82
C_3H_8O	Этилметилэтер	12 100	2,14
$C_4H_8O_2$	Масляная кислота	1	4,19
$C_4H_{10}O$	Бутиловый спирт	10 000	3,59
$C_5H_{10}O_2$	Валериановая кислота	1	10,9
$C_6H_5O_2N$	Нитробензол	1	10,1
		1000	9,019
		10 000	4,966
C_6H_5Cl	Хлорбензол	1	8,0
C_6H_5Br	Бромбензол	1	8,86
C_6H_6	Бензол	1	10,29
		1000	3,01
		10 000	3,50
C_6H_7N	Анилин	1	7,06
		1000	7,30
		10 000	4,20
C_6H_{12}	Циклогексан	1	5,64
$C_6H_{12}O_2$	Капроновая кислота	1	13,86
C_7H_8O	о-Крезол	1	8,85
C_7H_8O	м-Крезол	1	6,98
C_7H_{14}	Метилциклогексан	13 800	3,47
C_8H_{10}	о-Ксилол	1	9,09
$C_{10}H_8$	Нафталин	1	18,74
$C_{10}H_{20}O$	Ментол	1	10,2
$C_{12}H_{11}N$	Дифениламин	1	16,21
$C_{12}H_{10}O$	Бензофенон	1	16,47
$C_{13}H_{12}$	Дифенилметан	1	15,05
$C_{14}H_{14}$	Дифенилэтан	1	20,59
$C_{19}H_{16}$	Трифенилметан	1	18,16

Таблица 11.5

Температуры плавления (солидус t_c и ликвидус $t_л$) сталей и технических сплавов [28, 29, 30]

Марка	t_c, °С	$t_л$, °С
Стали жаростойкие		
Х13 ÷ Х28, Х25Т	—	1500
Х18Н5, Х23Н18	—	1410
Х23Н13	—	1440
0Х18Н10	—	1410
Х18Н9Т	—	1426
Х18Н10Т	—	1400
Х20Н14С2, Х25Н20С2	—	1420
4Х10С2М	—	1480
Латуни		
Л 62	899	905
Л 70	915	950
Л 80	967	1000
Л 90	1020	1045
Л 96	1060	1070
ЛО 59-1 ÷ ЛО 69-1	885	906
ЛО 70-1	900	995
ЛО 90-1	906	1015
ЛО 61-2 ÷ ЛО 74-3	885	910
ЛК 80-3; ЛС 59-1	—	900
ЛС 74-3	—	965
ЛА 77-2	905	975
ЛА 85-0,5	—	1020
ЛАЖ 60-1-1-2	892	955
ЛМцЖ 55-1-1	—	904
ЛМц 58-2	865	890
ЛЖМц 59-1-1	895	900
ЛН 65-5	—	950
Бронза		
Бр А5	—	1075
Бр А7	—	1050
Бр А10	—	1040
Бр АЖ9-4	—	1040
Бр АЖН10-4-4	—	1084
Бр АЖМц10-3-1,5	—	1045
Бр С30		970
Бр Мц5	—	1047
Бр Б2 (бериллиевая)	—	1000
Бр СФ6,5-0,4	—	955
Бр Ф4-0,25	—	1060
Бр ОЦ10-1	—	935
Бр ОЦ10-2	—	1015
Бр ОЦС6-6-3	—	957
Бр ОЦС5-5-5	—	1000
Бр ОЦС4-4-2,5	—	1020
Бр ОЦСН 3-7-5-1	—	1022
Бр О10	—	1020
Алюминиевые сплавы		
АЛ1	535	620
АЛ10В	498	604
Д1	513	641
Д16	502	638
АВ (авиаль)	543	652
Д16Т	510	646
АК-2, АК-8	508	638
В-95	477	638
АМ0	643	654
АМг	627	652
АМг3, АМг5, АМг5П	569	638

Продолжение табл. 11.5

Марка	t_c, °С	$t_л$, °С
АМг7	550	630
АСМ	657	750
АН-2,5	640	650
Магниевые сплавы		
МЛ 1, МЛ 7	506	610
МЛ 2	645	650
МЛ 3	561	628
МЛ 4	455	610
МЛ 5	492	607
МЛ 6	440	600
МЛ 11	603	843
МЛ 12	569	685
МА 1	646	646
МА 2	565	632
МА 3	510	615
МА 5	482	602
МА 8	645	650
ВМ 65-1	516	634
Медноникелевые сплавы		
МС	—	1063
М1, М3, М4	—	1080
МН 19	1130	1190
МНА 13-3	—	1183
МНЖ 5-1	1080	1120
МНЦ 15-20	—	1080
МНЦС 17-18-1,5	965	1120
МНЖКМц 30-0,8-1	1170	1230
Никелевые сплавы		
Никелевая бронза (НМ-8)	—	1190
» » (НМ 50,0)	—	1300
ТБ (НМ 69)	1120	1170
ТП (НМ 99,4)	—	1084
НМц 2,5	—	1440
НМц 5	—	1410
НМЖМц 3-12	900	1010
Мельхиор (НММц 85-12)	—	1010
Константан (НММц 58,5-1,5)	—	1270
Алюмель (НМцАК 2-2-1)	—	1450
Хромель (Н9 9,5)	—	1475
Ферронихром (НХМц16-15-1,5)	—	1400
Монель (НМЖМц 28-2,5-1,5)	—	1370
Монель К	—	1349
Припои и баббиты		
ПОС 90	183	222
ПОС 40	183	235
ПОС 18	183	277
ПОС 4-6	245	285
Ti 90	241	342
Б 16, БС	240	410
Б 6	232	416
Б 83	240	370
Б Н	240	400
Б К	390	440
Сплавы серебра, золота, платины		
Ср М 500	850	—
Ср М 960	927	—
Au М 999	1063	—
ПСр 25	755	—
Au Cu 600	963	—
Au Pt 10	1200	—

Таблица II.6

Температура плавления (солидус) двухкомпонентных сплавов при давлении 1 атм [8]

Компоненты сплава		Температура плавления, °С, при содержании компонента А, %								
А	Б	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Pb	Sn	225	276	262	240	220	190	185	200	216
Pb	Tl	710	790	860	917	700	600	480	410	495
Pb	Ag	460	540	590	620	650	705	770	840	905
Pb	Na	360	420	400	370	330	290	250	200	130
Pb	Cu	870	920	925	945	950	955	980	1005	1020
Pb	Si	250	275	300	395	440	490	525	560	600
Al	Sb	750	840	925	945	950	970	1000	1010	1010
Al	Cu	630	600	560	540	590	610	755	980	1055
Al	Au	675	740	800	855	915	970	1020	1065	675
Al	Ag	625	615	600	580	580	575	570	650	750
Al	Zn	640	620	600	580	560	530	510	475	425
Al	Fe	860	1015	1110	1145	1145	1220	1315	1425	1700
Al	Sn	645	636	625	620	605	590	570	560	540
Sb	Bi	610	550	575	565	540	520	470	415	370
Si	Ag	695	770	845	920	500	505	640	680	850
Sb	Sn	680	570	525	460	430	355	350	310	255
Sn	Zn	555	510	540	570	565	540	525	510	470
Ni	Sn	1380	1250	1200	1230	1290	1305	1230	1000	800
Na	Bi	425	520	590	645	690	720	730	715	570
Na	Cd	125	195	245	285	325	330	340	360	390
Cd	Ag	420	520	610	700	760	805	840	895	940
Cd	Tl	300	285	270	262	258	245	230	210	235
Cd	Zn	280	270	295	315	327	340	355	370	350
Au	Cu	910	940	895	905	925	975	1000	1025	1050
Au	Ag	1062	1061	1058	1064	1049	1030	1025	1000	962
Au	Pt	1125	1190	1250	1320	1380	1455	1530	1610	1685
K	Tl	133	165	185	205	210	220	240	280	305
Cu	Ni	1180	1240	1290	1320	1335	1380	1410	1430	1440
Cu	Ag	1030	990	945	910	870	830	788	814	875
Cu	Sb	1055	890	790	725	660	630	590	530	440
Cu	Zn	1040	955	930	900	880	820	780	700	580
Ag	Zn	850	755	705	630	600	590	610	570	505
Ag	Sn	870	750	630	550	495	450	420	375	300

Таблица II.7

Температура плавления легкоплавких сплавов

Эвт — эвтектические сплавы; для близких к ним; для псевдоэвтектических сплавов приводятся значения солидуса.

Сплав	$t_{пл}$, °С	Литература
(97,2% Hg; 2,8% Na), эвт	—48,2	[31]
(91,5% Cs; 5,5% Na), эвт	-30	[31]
(93% Cs; 7% Na), эвт	—28	[31]
(78% K; 22% Na), эвт	-11,4	[31]
(80% K; 20% Na)	—11	[8]
(91,8% Rb; 8,2% Na), эвт	4,5	[31]
(70% K; 30% Na)	—1,6	[8]
(60% K; 40% Na)	5	[8]
(50% K; 50% Na)	11	[8]
(90% K; 10%Na)	17,6	[8]
(56% Na; 44% K), эвт	19	[31]
(85,2% Na; 14,8% Hg), эвт	21,4	[31]
(60% Na; 40% K)	26	[8]
(70% Na; 30% K)	41	[8]
(50% Na; 50% Hg)	45	[8]
(44,7% Bi; 19,1% In; 8,3% Sn; 5,3% Cd; 22,6% Pb), эвт	47	[32]
(70% Hg; 30% Na)	55	[8]
(49,4% Bi; 21% In; 11,6% Sn; 18% Pb), эвт	57	[32]

Продолжение табл. II.7

Сплав	$t_{пл}$, °С	Литература
(80% Na; 20% K)	58	[8]
(60% Na; 40% Hg)	60	[8]
(53,5% Bi; 19% Sn; 17% Pb; 10,5% Hg)	60	[8]
(92,9% Na; 7,1% Tl), эвт	64	[31]
Сплавы Вуда:		
(50,1% Bi; 24,9% Pb; 14,6% Sn; 10,6% Cd)	65,5	[8]
(50,4% Bi; 25,1% Pb; 14,3% Sn; 10,2% Cd)	67,5	[8]
(50% Bi; 25% Pb; 12,5% Sn; 12,5% Cd)	68	[8]
(70% Na; 30% Hg)	70	[8]
(49,5% Bi; 10,1% Cd; 27,97% Pb; 13,13% Sn), эвт	70	[8]
(33,7% Bi; 66,3% In), эвт	72	[32]
(50% Bi; 31,1% Pb; 9,1% Sn; 6,9% Cd)	70,5	[8]
(90% Na; 10% K)	77	[8]
(68% Bi; 17% In; 25% Sn), эвт	79	[32]
(80% Na; 20% Hg)	80	[8]

Сплав	$t_{пл}$, °C	Литература
(96,7% Na; 3,3% Au), эвт	80	[31]
(90% Na; 10% Hg)	90	[8]
(50% Na; 50% Hg)	90	[8]
(50,2% Bi; 33,3% Pb; 11,5% Tl), эвт	91	[32]
(49,1% Bi; 9,2% Tl; 23,4% Sn; 18,2% Cd), эвт	94,6	[32]
(52,5% Bi; 15,5% Sn; 32% Pb), эвт	96	[32]
Сплав Розе (50% Bi; 28% Pb; 22% Sn)	100	[32]
(54,4% Bi; 25,6% Pb; 19,8% Sn), эвт	101	[8]
(67% Bi; 33% In), эвт	109	[32]
(46% Bi; 46% Pb; 20% Sn)	113	[8]
(50% Bi; 30,7% Sn; 14,3% Tl), эвт	124	[32]
(56,5% Bi; 43,5% Sb), эвт	125	[32]
(46% Bi; 42% Pb; 14% Sn)	128	[8]
(56% Bi; 40% Sn; 4% Zn), эвт	130	[32]
(50% K; 50% Tl)	132	[32]
(70% Hg; 30% K)	136	[8]
(57% Bi; 43% Sn), эвт	136	[8]
(57% Bi; 43% Tl), эвт	139	[32]
(60% Bi; 40% Cd), эвт	144	[8]
(50% Bi; 50% Pb)	146	[8]
(66,2% Bi; 21,1% Sn; 16,7% Pb)	146	[8]
(44,8% Pb; 41,5% Sn; 13,7% Bi), эвт	160	[8]
(80% K; 20% Tl)	165	[8]
(68% Sn; 32% Cd), эвт	177	[8]
(70% Na; 30% Hg)	181	[8]
(62% Sn; 38% Pb), эвт	183	[8]
(44,2% Bi; 9,8% Pb; 48% Tl), эвт	186	[32]
(47,5% Bi; 52,5% Tl), эвт	188	[32]
(75,6% Bi; 24,5% Tl), эвт	199	[32]
(97% Bi; 3% Pb), эвт	218	[32]
(62,7% Tl; 37,3% Na), эвт	236	[32]
(82% Bi; 18% Au)	240	[32]
(99% Bi; 1% Mg)	243	[32]
(97,3% Bi; 2,7% Zn)	254	[32]
(97,5% Bi; 2,5% Ag)	262	[32]

Таблица 11.8

Температура плавления высокотемпературных керамик [1,33]

Вещество	$t_{пл}$, °C	Вещество	$t_{пл}$, °C
HfC	3890 ± 150	NbB_4	2900
TaC	3880 ± 150	VC	2810
ZrC	3530	HfO_2	2790
NbC	3490	W_2B	2770 ± 60
HfB_6	3250 ± 100	WC	2750 ± 15
TiN	3200	UO_2	2730
TiC	3147	WC	2720
TaB_2	3100	MoC	2700
TaN	3087 ± 50	ZrO_2	2700
NbB_2	3000	ZrB_{12}	2680
HfN	2982	YN	2670
ZrN	2982	ThC_2	2606 ± 75
TiB_2	2980	ScN	2650
TiO_2	2950	UN	2650 ± 100

Вещество	$t_{пл}$, °C	Вещество	$t_{пл}$, °C
ThN	2630 ± 50	ScB_2	2250
CoO	2603	Mo_2B_5	2250
NdB_6	2540	VB	2250
SmB_6	2540	Zr_3Si_2	2250
LaB_6	2530	UC_2	2250
Ta_4Si	2510	SrB_6	2235
MgO	2500	UB_{12}	2235
Ta_5Si_3	2500	CaB_6	2230
UB_4	2495	BaB_6	2220
SrO	2460	Ba_3N_2	2220
CeS	2450	TiB_4	2210
BeO	2440	Be_3N_2	2205
Cr_2O_3	2440	BaS	2205
Nb_5Si_3	2440	Be_2N_2	2200
TaB	2430	Ti_2B	2200
TiS	2425	CrB_2	2200 ± 50
TaS	2425	$TaSi_2$	2200
Nb_2N	2420	Nd_2S_3	2200
Y_2O_3	2410	GdB_6	2190
AlN	2400	WSi_2	2165
Cr_3C	2400	TiB_2	2150
VB_2	2400 ± 50	ZrSi	2150
WB (α)	2400 ± 100	Mn_2B	2140
TiB_2	2385	NdS	2140
VN	2360	Ti_5Si_3	2120
MoB	2350	GdB_4	2100
UC	2315	Th_3N_4	2100
La_2O_3	2330	MoB_2	2100
YC_2	2300 ± 50	La_2S_3	2100
W_2B_5	2300 ± 50	V_3B_2	2070
BeB_6	2300	Al_2O_3	2050
YB_6	2300	CrB	2000
CaC_2	2300	Cr_3S_4	2050 ± 75
Ti_2S	2300	$MoSi_2$	2030
Th_4S_7	2300	TiO	2020
NbB	2280	$Al_2O_3 \cdot BaO$	2000

Таблица 11.9

Температурная стойкость различных веществ [10,34]

Обозначения: $t_{пр}$ — температура размягчения; $t_н$ — нагревостойкость; $t_р$ — температура размягчения; $t_{пл}$ — температура плавления.

Вещество	Температура, °C
Смолы	
Анилиноформальдегидные	$t_н$ = 85
Карбамидные	$t_н$ = 75
Кремнийорганические	$t_н$ = 200
Полиакрилаты	$t_н$ = 65
Полиамидные	$t_н$ = 100
Полистирольные	$t_н$ = 80
Политетрафторэтиленовые	$t_н$ = 190
Поливинилхлоридные	$t_н$ = 60
Полиэтиленовые	$t_н$ = 100
Полиэфирные	$t_н$ = 115
Фенолформальдегидные	$t_н$ = 115
Эпоксидные	$t_н$ = 135

Вещество	Температура, °С
Полимеры и целлюлозные материалы	
Винипласт	$t_н$ — 65
Капрон	$t_п$ — 60
	$t_{пл}$ — 215
Лавсан	$t_д$ — 175
	$t_р$ — 230
	$t_{гл}$ — 255
Пенопон	$t_{пл}$ — 49
	$t_д$ — 60
	$t_{пл}$ — 225
Органическое стекло	$t_р$ — 55
	$t_{пл}$ — 120
Пенопласт	$t_п$ — 130
Поливинилхлорид	$t_{от}$ — —18
	$t_{пл}$ — 100
Полипропилен	$t_{пл}$ — 170
Полиэтилен (высокого давления)	$t_н$ — 110
	$t_{пл}$ — 110
Полиэтилен (низкого давления)	$t_{пл}$ — 135
Совелит	$t_п$ — 110
Тергал	$t_{пл}$ — 67
	$t_{пл}$ — 264
Триацетилцеллюлоза	$t_р$ — 110
Фторопласт-3	$t_н$ — 90
Фторопласт-4 (тефлон)	$t_{от}$ — —113
	$t_н$ — 250
	$t_р$ — 400
Целлофан	$t_н$ — 60
Целлулоид	$t_п$ — 40
Эбонит	$t_{пл}$ — 150
	$t_{пл}$ — 225
Прессованные и строительные материалы	
Аминопласты	$t_н$ — 110
Аминопласты теплостойкие ВЭИ	$t_с$ — 170
Волокнит	$t_с$ — 115
Гетинакс	$t_н$ — 150
Глины обыкновенные	$t_р$ > 1100
» огнеупорные	$t_р$ > 1580
Дельта-древесина	$t_п$ — 140
Стеклопластик	$t_п$ — 170
Стеклотекстолит СТК	$t_п$ — 170
Текстолит	$t_с$ — 130
Туф лавовый	$t_{гл}$ — 1200
Фенопласты	$t_п$ — 120
Фибра	$t_п$ — 100
Шлакит	$t_{гл}$ > 1500
Стекла, сплавы	
Стекло оконное	$t_н$ — 400
№ 23	$t_р$ — 500
№ 846	$t_р$ — 600
нейтральное	$t_р$ — 600
белое	$t_р$ — 500
№ 59'''	$t_р$ — 600
кварцевое	$t_н$ — 1500
	$t_р$ — 1750
титановое	$t_н$ — 1000
Пирекс	$t_р$ — 650
Слюда природная	$t_п$ — 600
» синтетическая (фторофлогопит)	$t_н$ — 800

Вещество	Температура, °С
Масла, природные смолы, лаки	
Вазелин	$t_{пл}$ — 52
Воск	$t_{от}$ — 60
	$t_{пл}$ — 64
	$t_{пс}$ — 68
	$t_р$ — 40
Канифоль	
Мазут	
Масло:	
авиационное	$t_{от}$ ≤ —14
цилиндровое	$t_{пт}$ ≤ —20
веретенное	$t_{от}$ ≤ —15
компрессорное	$t_{пт}$ ≤ —20
машинное	$t_{от}$ ≤ —10
солярное	$t_{пт}$ ≤ —20
трансформаторное	$t_{от}$ ≤ —45
Нефть	$t_{пл}$ = —20÷10
Олифы	$t_{пс}$ ≤ —0
Парафин	$t_{пл}$ — 45
Стеарин	$t_р$ — 55
Шеллак	$t_{пл}$ — 110
Янтарь	$t_{пл}$ — 300
Различные материалы	
Бакелит	$t_р$ — 100
Битум	$t_р$ — 70
Каолин	$t_{гл}$ — 1700
Эбонит	$t_п$ — 70

II-3 КИПЕНИЕ

Процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное называется испарением. Испарение, при котором давление паровой фазы равно внешнему давлению, называется кипением; давление при этом называется *давлением насыщенного пара*. Зависимость температуры кипения $T_{кип}$ от внешнего давления называется *изобарической кривой*, а обратная зависимость давления насыщенных паров от температуры — *кривой упругости пара*. Кипение возможно в интервале от температуры тройной точки до критической температуры $T_{кр}$; с увеличением давления $T_{кип}$ увеличивается. Для многих веществ выполняется эмпирическое правило Гульберга—Гиби

$$T^{(1)}_{кип} \approx 0{,}64\, T_{кр},$$

где $T^{(1)}_{кип}$ — температура кипения при $P = 1$ *атм*.

Теплота испарения при кипении называется *теплотой испарения* в точке кипения $L_{кип}$. С увеличением давления и температуры кипения $T_{кип}$ уменьшается до $L_{кип} = 0$ при $T = T_{кр}$. Для оценки $L_{кип}$ можно использовать формулу

$$L_{кип} = R\frac{d\ln P}{d(1/T)}, \quad T \ll T_{кр},$$

где R — газовая постоянная. Эта формула является частным случаем уравнения Клапейрона—Клаузиуса.

Для неполярных веществ найдена эмпирическая зависимость [24]

$$L_{кип} = 1{,}987\, T^{(1)}_{кип} \ln 52{,}06\, T^{(1)}_{кип}\ \textit{ккал/моль},$$

которая выполняется с погрешностью 2—3%.

Таблица 11.10

Теплота испарения при разных температурах кипения

t, °C	$L_{исп}$, кал/моль
Элементы	
Ar, аргон [27]	
—185	1,524
—173	1,437
—163	1,337
—153	1,212
—143	1,050
—138	0,940
—133	0,795
—128	0,635
Cl_2, хлор [35]	
—90	5,337
—56,67	5,017
—34,04	4,809
—12,22	4,599
16,0	4,306
43,33	3,958
66,06	3,669
87,78	3,202
110,00	2,632
132,22	1,711
137,78	1,321
143,33	0,546
H_2, водород [26]	
—251	0,211
—249	0,201
—247	0,189
—245	0,172
—243	0,147
—241	0,101
—240,4	0,065
—240	0,040
—240,05	0,060
He, гелий [27]	
—271,05	0,02162
—271,45	0,02108
—271,15	0,02232
—270,95	0,02180
—270,75	0,02106
—270,55	0,02232
—270,35	0,02248
—270,15	0,02250
—269,95	0,02252
—269,75	0,02256
—269,55	0,0226
—269,35	0,02159
—269,15	0,0208
^4He, гелий-3 [27]	
—272,69	0,00730
—272,45	0,00841
—272,15	0,00910
—271,75	0,01032
—271,35	0,01102
—270,95	0,01165
—270,55	0,01071
—270,15	0,00788
—269,95	0,00591
—268,95	0,00195
—268,65	0,00437
—268,40	0,00363
—268,15	0,00190
Hg, ртуть [35]	
118,5	14,552
161,5	14,390
207,5	14,336
241,0	14,292
326,0	14,176
451,0	13,998
627,1	13,660
677,0	13,534
K, калий [35]	
327	20,067
527	19,273
727	18,367
927	17,417
1027	16,946
1127	16,469
1227	16,002
1327	15,475
1427	14,944
1527	14,387
Kr, криптон [26, 27]	
—163	2,159
—153	1,996
—143	1,707
—93	1,475
—88	1,379
—83	1,206
—73	0,839
Li, литий [35]	
527	36,883
727	36,008
927	34,660
1127	33,619
1327	32,473
1527	31,409
1727	30,485
N_2, азот [34]	
—208	1,421
—193	1,314
—183	1,213
—173	1,102
—168	1,029
—163	0,933
—158	0,806
—153	0,622

Продолжение табл. 11.10

t, °C	$L_{исп}$, кал/моль
Na, натрий [36]	
400	23,603
800	21,079
1100	19,563
1300	18,637
1400	18,199
1500	17,736
Ne, неон [27]	
248	0,4325
—243	0,4015
—241	0,3585
—238	0,3415
—235,65	0,3060
—233	0,2555
—230,05	0,1815
O_2, кислород [26]	
—203	1,760
—193	1,6032
—183	1,440
—153	1,260
—143	1,107
—133	0,960
—123	0,740
S, сера [34]	
200	2,408
300	2,309
400	2,158
500	2,290
600	2,595
620	2,666
640	2,741
646	2,764
Неорганические соединения	
B_2H_6, диборан [36]	
—143	3,941
—123	3,737
—93	3,426
—53	2,969
—13	2,088
7	1,330
9	1,216
11	1,074
13	0,897
15	0,631
CO, окись углерода [36]	
—188	1,396
—183	1,328
—178	1,270
—173	1,192
—168	1,125
—163	1,058
—158	0,985
—153	0,884
—148	0,718
—143	0,465
CO_2, двуокись углерода [36]	
—50	3,544
—30	3,184
—20	2,992
—10	2,750
0	2,409
10	2,027
20	1,632
25	1,255
27,5	0,992
30	0,662
H_2O, вода [36]	
0	10,751
50	10,345
100	9,702
180	8,663
260	7,142
340	4,415
370	1,885
372	1,445
374	0,609
NH_3, аммиак [36]	
50	5,756
—30	5,323
0	5,129
30	4,663
60	4,055
80	3,536
100	2,873
120	1,921
130	0,952
$SnCl_4$, четыреххлористое олово [34]	
100	8,226
110	7,537
180	6,812
200	6,371
220	5,905
240	5,413
260	4,792
280	4,040
Органические соединения	
CH_4, метан [35]	
—180	2,670
—160	1,950
—150	1,880
—140	1,820
—130	1,740
120	1,630
—110	1,400
—100	1,300
—90	0,970
CH_4O, метиловый спирт [37]	
0	9,248
60	8,768

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
100	7,872
130	7,181
160	6,336
200	4,864
210	4,320
220	3,616
230	2,689

CH_3Cl, хлористый метил (фреон-40) [38]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
−60	5,500
−40	5,300
20	5,070
0	4,840
20	4,169
40	4,268
50	4,107
60	3,938

$CHFCl_2$, фторидихлорметан (фреон-21) [38]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
40	6,508
−20	6,253
0	6,006
10	5,885
20	5,768
30	5,625
35	5,609
40	5,488

CHF_2Cl, дифторхлорметан (фреон-22) [38]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
−100	5,467
−80	5,259
−50	4,919
−20	4,541
0	4,244
20	3,870
40	3,368
60	3,105

$CFCl_3$, трихлорфторметан (фреон-11) [38]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
−40	6,610
20	6,369
0	6,189
20	5,957
30	5,848
40	5,712
46	5,644
50	5,570

CF_3Cl, трифторхлорметан (фреон-13) [38]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
−140	4,310
−80	3,831
−60	3,269
−20	2,721
0	2,234
15	1,708
20	1,439
26	1,205

CF_2Cl_2, дифтордихлорметан (фреон-12) [38]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
−70	5,050
−40	4,857
0	4,430
40	3,784
80	2,600
100	1,938
105	1,906
110	0,905

C_2H_6, этан [13]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
−100	3,568
−80	3,395
−40	2,918
−80	2,580
0	2,181
20	1,630
30	0,869
31	0,680
32	0,425

C_2H_4, этен (этилен) [38]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
−120	3,306
80	2,940
−40	2,385
0	1,262
5	0,954
7	0,754
8	0,616
9	0,320
9,5	0,274

C_2H_2, ацетилен [13]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
−20	4,070
−60	3,730
10	3,350
−20	2,910
10	2,680
0	2,440
10	2,170
20	1,800
30	1,190

C_2H_6O, этиловый спирт [35]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
0	11,538
50	10,964
100	10,154
140	9,163
170	8,110
200	6,573
226	5,147
230	4,255
240	3,082

$C_2H_4O_2$, уксусная кислота [37]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
20	5,040
50	5,304
80	5,496
120	5,592
160	5,394
200	5,112
240	4,092
260	4,450
280	3,810

Продолжение табл. II.10

$C_2F_3Cl_3$, трифторхлорэтан (фреон-113) [38]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
−30	7,221
−10	7,160
0	7,049
10	6,918
30	6,659
50	6,360
70	6,101
80	5,962

$C_2F_4Cl_2$ тетрафторхлорэтан (фреон-114) [38]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
−40	5,560
−20	5,707
0	5,640
20	5,321
30	5,186
40	5,015
50	4,828
60	4,641

C_3H_8, пропан [13]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
−180	5,090
−140	5,400
−100	5,090
−60	4,690
−20	4,240
20	3,640
60	2,720
80	1,970
90	1,370

C_3H_6, пропилен [13]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
180	5,600
−120	5,120
−60	4,550
0	3,800
20	3,470
50	2,780
70	2,120
80	1,660
90	0,700

C_3H_4, аллен [13]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
−130	5,610
−100	5,440
−50	5,150
−20	4,370
20	4,150
60	3,380
100	2,220
110	1,650
120	0,450

C_3H_4, метилацетилен [13]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
−100	6,030
−60	5,700
−30	5,350
0	4,960
30	4,490
60	3,890
100	2,710
110	2,250
120	1,530

C_3H_8O, пропиловый спирт [37]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
70	12,39
120	10,78
150	9,72
180	8,12
200	7,14
220	5,95
240	4,41
250	3,5
260	2,31

C_4H_{10}, бутан [13]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
−120	6,670
−90	6,250
−60	5,880
0	5,370
60	4,650
80	3,890
130	2,500
140	1,960
150	0,980

C_4H_8, бутен-1 [13]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
−150	6,810
−150	6,650
−100	6,240
−50	5,780
0	5,190
50	4,440
100	3,290
130	2,160
140	1,500

C_4H_8, 2-метилпропен (изобутилен) [13]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
−100	6,210
−50	5,790
0	5,240
50	4,470
100	3,310
130	2,600
150	2,100
160	1,350

C_4H_6, бутин-1 (этилацетилен) [13]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
−120	7,100
−100	6,950
0	5,[illegible]
100	4,510
150	3,270
170	2,500
180	1,890
190	0,470

$C_4H_{10}O$, диэтиловый эфир [37]

t, °C	$L_{исп}$, кДж/моль
30	5,908
60	5,024
90	4,524
120	4,00
150	3,290
160	2,944
170	2,558
180	2,048
190	1,245

t, °C	$L_{исп}$, кдж/моль
$C_4H_8O_2$, этилацетат [37]	
80	7,508
110	7,04
140	6,38
160	5,85
180	5,26
200	4,58
220	3,74
230	3,17
240	2,38
C_5H_{12}, пентан [13]	
−120	7,730
−80	7,410
−60	7,240
−40	7,060
−20	6,850
0	6,650
20	6,380
30	6,250
40	6,120
C_5H_{12}, изопентан [13]	
−150	7,500
−130	7,400
−110	7,310
−90	7,160
−50	6,790
−30	6,560
10	6,130
30	5,870
40	5,720
C_5H_{10}, пентен-1 [13]	
−160	7,710
−80	7,170
0	6,390
50	5,770
100	4,990
150	3,890
180	2,640
190	2,000
200	0,800
C_5H_{10}, циклопентан [13]	
−90	7,670
−50	7,550
0	7,100
50	6,550
100	5,670
150	4,960
210	3,140
220	2,640
230	1,930
C_5H_{10}, цис-пентен-2 [13]	
−150	8,240
−100	7,860
−50	7,400
0	6,880
50	6,200
100	5,320
150	4,030
180	2,740
190	2,000

t, °C	$L_{исп}$, кдж/моль
C_5H_8, циклопентен [13]	
−150	8,080
60	7,580
0	7,020
50	6,470
100	5,740
150	4,760
200	3,170
210	2,070
220	1,970
C_5H_6, 2-метилбутадиен-1,3 (изопрен) [13]	
−140	7,820
−100	7,560
0	6,580
100	5,070
150	3,810
170	3,070
180	2,360
190	1,840
C_6H_{14}, гексан [13]	
−80	9,460
−20	8,110
20	7,580
80	6,770
140	5,510
190	4,090
210	3,200
220	2,400
236	1,700
C_6H_{12}, метилпентен [13]	
−150	8,630
−80	8,230
−30	7,720
30	7,420
90	6,170
150	4,820
200	3,160
210	2,560
220	1,630
C_6H_{12}, гексен-1 [13]	
−100	8,500
−50	8,100
0	7,590
50	6,970
100	6,190
150	5,130
200	3,420
210	2,990
220	2,170
C_6H_{12}, циклогексен [13]	
10	8,020
50	7,690
100	6,970
150	6,110
200	4,960
250	3,440
260	3,000
270	2,300
280	0,850

Продолжение табл. II.10

t, °C	$L_{исп}$, кдж/моль
C_6H_{12}, циклогексан [13]	
−100	9,120
0	8,240
50	7,720
100	7,110
150	6,310
200	5,210
250	3,440
260	2,880
270	2,070
C_6H_6, бензол [35]	
10	8,250
50	7,750
100	7,070
150	6,300
200	5,360
250	3,880
260	3,430
270	2,900
280	2,130
C_7H_{16}, гептан [13]	
−50	9,700
−10	9,560
0	8,990
60	8,200
90	7,740
180	5,950
240	3,810
250	3,080
260	2,160
C_7H_{14}, гептен [13]	
−180	9,480
−50	8,290
0	8,710
50	8,110
100	7,350
150	6,460
200	5,160
250	2,860
260	1,830
C_7H_{14}, метилциклогексан [13]	
−120	9,670
−100	9,530
0	8,660
100	7,560
150	6,860
200	5,680
250	4,450
260	3,040
290	2,260
C_7H_{14}, 1,1 диметилциклопентан [13]	
−60	8,690
0	8,360
50	7,600
100	7,140
150	6,290
200	5,100
250	3,070
260	2,320

t, °C	$L_{исп}$, кдж/моль
C_7H_8, толуол [13]	
−40	9,960
0	9,310
100	8,160
150	7,250
200	6,560
250	5,330
300	3,240
310	2,470
360	0,650
C_8H_{18}, октан [13]	
−30	10,480
30	9,850
50	8,920
150	7,770
180	7,120
210	6,340
240	5,710
260	4,490
290	2,200
C_8H_{16}, октен-1 [13]	
−100	10,790
0	9,770
50	9,190
100	8,150
150	7,700
200	6,560
250	4,660
280	3,180
290	2,140
C_8H_{14}, этилциклогексан [13]	
−100	10,770
−50	10,370
0	9,930
100	8,760
200	7,110
250	5,840
300	3,750
310	3,060
320	1,550
C_8H_{10}, п-ксилол [35]	
−40	10,700
30	10,140
100	9,310
150	8,670
200	7,690
250	6,610
300	4,900
350	3,180
340	2,160
C_8H_{10}, этилбензол [13]	
90	10,070
0	11,050
100	9,090
150	8,390
200	7,080
250	6,500
300	4,860
330	3,100
340	2,030

Продолжение табл. 11.10

t, °C	$L_{кип}$, кал/моль
C_6H_6, винилбензол (стирол) [15]	
−30	10,820
30	10,290
100	9,510
200	8,020
250	6,980
300	5,440
340	3,390
360	2,440
C_9H_{12}, изопропилбензол (кумол) [15]	
−80	11,780
0	10,950
100	9,780
200	8,300
250	7,260
300	5,700
350	3,020
360	1,600
$C_{12}H_{10}$, дифенил [35]	
260	11,68
280	10,78
310	10,04
310	9,394
350	9,103
$C_{10}H_{14}$, изопропилдифенил [35]	
100	15,092
140	14,70
180	14,31
220	13,11
260	13,52
300	12,94
320	12,64
340	11,96
360	11,37
380	10,78
400	10,0

t, °C	$L_{кип}$, кал/моль
Силикон (тиметилфенилсилоксан) [35]	
0	31,4
20	31,2
40	31,1
60	31,0
80	30,9
100	30,7
120	30,6
140	30,5
160	30,4
180	30,2
200	30,1
220	30,0
240	29,8
260	29,6
280	29,3
290	29,2
300	29,1
Даутерм (дифенильная смесь*) [35]	
20	90
40	86
60	83,5
120	80,5
150	76,6
180	75,5
210	74
240	71
260	68,5
260	65,5
300	63
320	60,6
340	56
360	55
380	52,5
400	49,5

* Химическая смесь 73,5% дифенильного эфира — 26,5% дифенила.

11.4. КИПЕНИЕ И ЗАТВЕРДЕВАНИЕ РАСТВОРОВ

Температура затвердевания (кристаллизации) $T_{кр,р}$ раствора меньше температуры затвердевания $T_{кр}$ чистого растворителя; температура кипения $T_{кип,р}$ раствора больше температуры кипения $T_{кип}$ растворителя. Это явление наблюдается при любых растворителях для бесконечно разбавленных веществ и описывается криоскопической $K_{кр}$ и эбуллиоскопической $K_э$ постоянными растворителя. Криоскопическая постоянная растворителя определяется разностью температур затвердевания $\Delta T = T_{кр} - T_{кр,р}$, которая наблюдается при растворении в 1000 г растворителя 1 моля любого нелетучего вещества. Эбуллиоскопическая постоянная определяется аналогично разностью $\Delta T = T_{кип,р} - T_{кип}$. При этом

$$K_{кр} = RT^2_{кр} / (1000\, L_{кр}); \quad K_э = RT^2_{кип} / (1000\, L_{кип}),$$

где R — газовая постоянная; $L_{кр}$ — удельная теплота отвердевания; $L_{кип}$ — удельная теплота испарения при температуре кипения.

В табл. 11.11 и 11.12 приведены криоскопические и эбуллиоскопические постоянные некоторых растворителей.

При кипении и затвердевании происходит в общем случае изменение состава фаз. Не изменяют своего состава при кипении азеотропные растворы (табл. 11.13).

Таблица 11.11

Криоскопические $K_{кр}$ и эбуллиоскопические $K_э$ постоянные неорганических растворителей. *мол.%/град* [10]

Растворитель	$K_{кр}$	Растворитель	$K_{кр}$
$AlBr_3$	26,8	NaCl	16,0
$AsBr_3$	18,2	NaOH	20,8
$BaCl_2$	108	Na_2SO_4	44
Br_2	8,31	$POCl_3$	7,57
$CaCl_2$	36	P_2O_5	14,45
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	4,73	$SnCl_4$	107
HBr	9,41		
HCl	4,98	Растворитель	$K_э$
HF	20,26		
F_2O	1,853	$AsCl_3$	7,1
F_2O_2	2,0	Br_2	5,2
H_2S	3,83	Cl_2	1,73
H_2SO_4	6,17	HBr	1,50
$HgBr_2$	30,7	HCl	0,64
$HgCl_2$	31,6	HF	1,9
I_2	20,4	HI	2,83
K_2CO_3	41	H_2O	0,513
KCl	26	H_2SO_4	5,33
KNO_3	14,0	Hg	11,4
NH_3	0,97	I_2	10,5
NH_4NO_3	22,1	NH_3	0,34
N_2O_4	4,1	PCl_3	5,0
Na_2CO_3	30,6	SO_2	1,45
		$SnCl_4$	10,2

Таблица 11.12

Криоскопические $K_{кр}$ и эбуллиоскопические $K_э$ постоянные органических растворителей. *мол.%/град* [10]

Формула	Название	$K_{кр}$	$K_э$
$C_{12}H_{10}N_2$	Азобензол	8,35	
$C_5H_{12}O$	Амиловый спирт, третичный		2,20
C_6H_7N	Анилин	5,87	3,69
C_2H_5ON	Ацетамид	363	—

Формула	Название	$A_{пр}$	A_2
C_3H_6O	Ацетон	—	1,49
$C_{10}H_{16}O_2$	Борнил	10,5	10,3
$C_7H_6O_3$	Салициловая кислота	6,789	—
C_6H_6	Бензол	5,069	—
$C_{13}H_{10}O$	Бензофенон	9,8	—
C_2H_5Br	Бромистый этил	—	2,53
$CHBr_3$	Бромоформ	14,4	—
C_7H_7Br	м-Бромтолуол	8,21	—
C_7H_7OBr	п-Бромфенол	11,2	—
$C_4H_{10}O$	Бутиловый спирт, третичный	8,30	1,77
C_6H_{14}	Гексан	—	2,76
C_7H_{16}	Гептан		4,225
$C_6H_4Br_2$	п-Дибромбензол	12,4	—
$C_{12}H_{10}$	Дифенил	8,0	7,06
$C_{18}H_{11}N$	Дифенилгидрин	8,6	—
$C_{18}H_{10}$	Дифенилметан	6,72	—
$C_2H_4Cl_2$	1,1-Дихлорэтан	—	3,20
$C_2H_4Cl_2$	1,2-Дихлорэтан	—	3,12
$C_5H_{12}O$	Изоамиловый спирт	—	2,98
$C_4H_{10}O$	Изобутиловый спирт	—	1,94
C_3H_7I	Изопропилиодид	7,98	—
CH_3I	Иодистый метил	—	4,19
C_2H_5I	Иодистый этил	—	5,01
$C_{10}H_{16}O$	Камфора	39,8	6,09
C_7H_8O	о-Крезол	11,62	—
C_7H_8O	п-Крезол	7,7	—
$C_4H_8O_2$	Масляная кислота	—	3,91
$C_{10}H_{20}O$	Ментол	12,4	0,15
$C_3H_6O_2$	Метилацетат	—	2,06
CH_4O	Метиловый спирт	—	0,84
CH_2O_2	Муравьиная кислота	2,77	2,4
$C_{10}H_8$	Нафталин	6,889	6,86
$C_6H_5NO_2$	Нитробензол	8,1	5,27
$C_{10}H_7NO_2$	α-Нитронафталин	9,1	—
$C_7H_7NO_2$	о-Нитротолуол	7,18	—
$C_7H_7NO_2$	м-Нитротолуол	6,78	—
$C_7H_7NO_2$	п-Нитротолуол	7,8	—
$C_6H_5NO_2$	п-Нитрофенол	7,44	—
C_5H_5N	Пиридин	4,97	2,686
C_3H_8O	Пропиловый спирт	—	1,73
$C_3H_6O_2$	Пропионовая кислота	—	3,51
CS_2	Сероуглерод	—	2,29
CCl_4	Углерод четыреххлористый	29,8	5,3
$C_2H_4O_2$	Уксусная кислота	3,9	3,07
$C_4H_6O_3$	Уксусный ангидрид	—	3,55
C_6H_6O	Фенол	7,97	5,60
CCl_2O	Фосген		2,9
$C_{10}H_7Cl$	β-Хлорнафталин	9,76	—
$C_6H_4NO_2Cl$	о-Хлорнитробензол	7,50	—
$C_6H_4NO_2Cl$	м-Хлорнитробензол	6,67	—
$C_6H_4NO_2Cl$	п-Хлорнитробензол	10,2	—
$CHCl_3$	Хлороформ	4,9	3,862
C_7H_7Cl	о-Хлортолуол	5,6	—
$C_2H_3O_2Cl$	Хлоруксусная кислота	5,12	—
C_6H_5OCl	о-Хлорфенол	7,72	—
C_6H_{12}	Циклогексан	20,2	2,72
$C_6H_{12}O$	Циклогексанол	38,28	—
C_2H_6O	Этиловый спирт	—	1,04
C_2H_6O	Этилформиат	—	2,18
C_4H_8O	Этилацетат	—	2,83

Температура кипения азеотропных двухкомпонентных смесей [10]

Первый компонент	Второй компонент		
	Название	Содержание в смеси, % (масс.)	$t_{кип}$, °С
Вода	Хлористый водород	61,5	90,7
»	Этиловый эфир	1,3	34,15
»	Пентан	1,4	34,0
»	Сероуглерод	1,4	37,7
»	Дихлорметан	1,6	38,1
Этанол	Сероуглерод	9	42,4
Вода	Этилформиат	5	52,6
Метанол	Хлороформ	12,5	53,5
»	Метилацетат	19	54
»	Четыреххлористый углерод	20,6	55,7
Вода	Метилацетат	5,0	56,1
»	Хлороформ	2,5	56,2
Этанол	Метанол	39,6	58,3
Этанол	Хлороформ	7	59,3
Вода	Гексан	5,6	61,6
Метанол	Этилацетат	44	63
Этанол	Четыреххлористый углерод	15,6	65
Вода	»	4,1	66
Этанол	Бензол	32,4	68,2
Вода	»	8,83	69,25
»	Этилацетат	8,47	70,38
»	Циклогексан	10	70,6
»	Изопропилформиат	23	71,6
Этанол	Этилацетат	30,5	71,8
»	1,2-Дихлорэтан	19,5	72
Вода	Анилин	81,8	75
»	Ацетонитрил	16,3	76,5
Этанол	Толуол	68	76,7
Вода	Этанол	4,43	78,17
»	Бензол	12,9	79,2

Продолжение табл. 11.13

Первая жидкость	Вторая жидкость: Наименование	Содержание в смеси, мол. %	P (мм)
Вода	Третичный бутанол	11,76	79,9
»	1,2-Диметилпропан	11	80
»	Изопропанол	12,1	80,38
»	Вторичный бутанол	26,6	87
»	Пропанол	28,31	87,72
»	Аллиловый спирт	27,7	88,89
»	Изобутанол	33,2	89,92
»	Хлорбензол	28,4	90,2
»	Бутанол	42,5	94,7
»	Пиридин	41,3	95,6
»	н-Гептан	40	94,5
»	Хлоропрен	7	95
»	Изопропиловый спирт	49,6	95,15
»	Аллиловый спирт	51,4	95,8
»	Пропионовая кислота	71,8	96,8
»	Масляная кислота	81,5	99,4
»	Фенол	90,79	99,62
»	Бензиловый спирт	91	99,9
»	Трифторуксусная кислота	21	108
»	Муравьиная кислота	26,5	107,65

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Landolt-Börnstein.** Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Geophysik, Astronomie, Technik. 4 Teil. Berlin. Springer-Verlag. 1961.
2. **Selected** Values of Chemical Thermodynamic Properties, Circular NBS № 500. Washington, 1952.
3. **Kelley K. K.** Contributions to the Data on Theoretical Metallurgy. V. X. Washington, 1949.
4. **Kelley K. K.** Contributions to the Data on Theoretical Metallurgy. V. V. Bulletin 393. Washington, 1936.
5. **Kelley K. K.** Contributions to the Data on Theoretical Metallurgy. V. III. Bulletin 383. Washington, 1935.
6. **Kubaschewski O., Evans E. L.** Metallurgical Thermochemistry. Berlin, 1959.
7. **Киттель Ч.** Введение в физику твердого тела. Изд. 2-е. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1963.
8. **Smithsonian** Physical Tables. 9th ed. Washington, 1954.
9. **Kubaschewski O., Evans E. L.** Metallurgical Thermochemistry. London, 1951.
10. **Справочник** химика. Под ред. Б. П. Никольского. Т. 1. М.—Л., «Химия», 1963.
11. **Редкие** металлы. Справочник. Пер. с англ. Под ред. В. Е. Плюшева. М., «Мир», 1965.
12. **Методы** измерения температур. Т. 1—2. Сб. статей. Под ред. В. А. Соколова. М., Изд-во иностр. лит., 1954.
13. **Физико-химические** свойства индивидуальных углеводородов. Под ред. В. М. Татевского. М., Гостоптехиздат, 1960.
14. **Якимович Е. А. Фрезиус.** Свойства и применения. Л., Изд. ГИПХ, 1969.
15. **O'Hara J. B., Fahien R. W.** — Ind. Engl. Chem., 1951, v. 43, p. 2924.
16. **Glasgow A. R.** — Analyt. Chem., 1948, v. 20, p. 410.
17. **Streiff A. J.** — J. Res. Nat. Bur. Stand., 1947, v. 38, p. 53.
18. **Glasgow A. R.** — J. Res. Nat. Bur. Stand., 1946, v. 37, p. 141.
19. **Streiff A. J.** — J. Res. Nat. Bur. Stand., 1948, v. 41, p. 323.
20. **Todd S. S., Oliver G. D., Huffman H. M.** — J. Amer. Chem. Soc., 1947, v. 69, p. 1519.
21. **Streiff A. J.** — J. Res. Nat. Bur. Stand., 1946, v. 37, p. 331.
22. **Streiff A. J.** — J. Res. Nat. Bur. Stand., 1950, v. 45, p. 173.
23. **Selected** Values of Chemical Thermodynamic Properties. Circular of the NBS. Washington, 1947.
24. **Бретшнайдер С.** Свойства газов и жидкостей. М., «Химия», 1966.
25. **Краткий** справочник физико-химических величин. Под ред. К. П. Мищенко и А. А. Равделя. Изд. 3-е. Л., Госхимиздат, 1959.
26. **Справочник** по физико-техническим основам глубокого охлаждения. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963. (Авт.: Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрядков А. Б.).
27. **Фастовский В. Г., Ровинский А. Е., Петровский Ю. В.** Инертные газы. М., Атомиздат, 1964.
28. **Справочник** по машиностроительным материалам. Т. 1, 2. М., Машгиз, 1959.
29. **Гуляев А. А., Ульянова Э. К.** Свойства благородных металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1964.
30. **Сливи Д. О., Штейнберг Е. Б.** Металлы и сплавы в химическом машиностроении и аппаратостроении. М., Машгиз, 1951.
31. **Натрий и калий.** Л., Госхимиздат, 1960. (Авт.: Алабышев А. Ф., Гриев К. Я., Зарецкий С. А., Лантратов М. Ф.)
32. **Чечулин А. В.** Высокотемпературные теплоносители. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
33. **Самсонов Г. В.** Тугоплавкие соединения. М., Металлургиздат, 1963.
34. **Теплофизические** свойства веществ. Под ред. Н. Б. Варгафтика. М., Госэнергоиздат, 1956.
35. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.
36. **Tables** of Thermal Properties of Gases. Circular of the NBS. Washington, 1955.
37. **Волк Л. Д.** — «Теплоэнергетика», 1958. № 7, с. 33.
38. **Бацилькес И. С.** Холодильная техника. Энциклопедический словарь. Т. 1. М., Госторгиздат, 1960.

ГЛАВА 12

ДАВЛЕНИЕ ПАРА РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

12.1. ВОДА И РТУТЬ

Таблица 12.1

Давление пара воды, кГ/см² [1]

t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,006228	0,006695	0,007193	0,007724	0,008289	0,008891	0,009532	0,010210	0,010932	0,011699
10	0,012513	0,013376	0,014292	0,015262	0,016289	0,017377	0,018528	0,019746	0,021035	0,022399
20	0,02385	0,02535	0,02695	0,02863	0,03041	0,03229	0,03426	0,03634	0,03853	0,04083
30	0,04327	0,04586	0,04847	0,05128	0,05424	0,05735	0,06067	0,06396	0,06755	0,07129
40	0,07520	0,07931	0,08360	0,08809	0,09279	0,09771	0,10284	0,10821	0,11382	0,11967
50	0,12578	0,13216	0,13880	0,14574	0,15297	0,16050	0,16835	0,17653	0,18504	0,19390
60	0,2031	0,2127	0,2227	0,2330	0,2438	0,2550	0,2666	0,2787	0,2912	0,3043
70	0,3178	0,3318	0,3463	0,3613	0,3769	0,3931	0,4096	0,4272	0,4451	0,4637
80	0,4829	0,5026	0,5234	0,5447	0,5667	0,5894	0,6125	0,6372	0,6623	0,6882
90	0,7148	0,7424	0,7710	0,8004	0,8307	0,8619	0,8942	0,9274	0,9616	0,9971
100	1,0332	1,0707	1,1092	1,1489	1,1896	1,2318	1,2751	1,3196	1,3654	1,4125
110	1,4609	1,5106	1,5618	1,6144	1,6684	1,7239	1,7809	1,8394	1,8995	1,9612
120	2,0245	2,0893	2,1561	2,2245	2,2947	2,3666	2,4404	2,5160	2,5935	2,6730
130	2,7544	2,8378	2,9233	3,011	3,101	3,192	3,286	3,382	3,481	3,582
140	3,685	3,790	3,898	4,009	4,121	4,237	4,355	4,476	4,599	4,725
150	4,854	4,985	5,119	5,257	5,397	5,540	5,686	5,836	5,989	6,144
160	6,302	6,464	6,630	6,798	6,970	7,146	7,325	7,507	7,693	7,883
170	8,076	8,274	8,475	8,679	8,888	9,101	9,317	9,538	9,763	9,992
180	10,225	10,462	10,706	10,960	11,201	11,456	11,715	11,979	12,248	12,522
190	12,800	13,083	13,371	13,664	13,962	14,265	14,573	14,886	15,204	15,526
200	15,857	16,192	16,532	16,877	17,228	17,586	17,948	18,316	18,690	19,070
210	19,456	19,848	20,246	20,651	21,061	21,477	21,901	22,331	22,767	23,209
220	23,659	24,115	24,577	25,047	25,523	26,007	26,497	26,995	27,499	28,011
230	28,531	29,057	29,591	30,133	30,682	31,235	31,806	32,376	32,955	33,544
240	34,140	34,745	35,357	35,976	36,607	37,244	37,890	38,545	39,208	39,880
250	40,16	41,31	41,96	42,16	43,37	44,10	44,83	45,58	46,33	47,09
260	47,87	48,65	49,44	50,24	51,05	51,87	52,71	53,55	54,40	55,26
270	56,14	57,02	57,91	58,82	59,73	60,66	61,60	62,55	63,51	64,48
280	65,46	66,45	67,46	68,47	69,50	70,54	71,59	72,65	73,73	74,82
290	75,92	77,03	78,15	79,29	80,44	81,60	82,78	83,97	85,17	86,38
300	87,61	88,85	90,11	91,38	92,66	93,95	95,26	96,59	97,92	99,28
310	100,64	102,02	103,42	104,83	106,25	107,69	109,15	110,62	112,11	113,61
320	115,12	116,66	118,21	119,77	121,35	122,95	124,56	126,19	127,84	129,50
330	131,18	132,88	134,59	136,33	138,08	139,85	141,65	143,44	145,26	147,10
340	148,96	150,84	152,73	154,65	156,59	158,54	160,52	162,52	164,53	166,57
350	168,63	170,71	172,81	174,93	177,07	179,24	181,43	183,64	185,86	188,13
360	190,42	192,72	195,06	197,41	199,80	202,21	204,67	207,11	209,60	212,12
370	214,69	217,26	219,86	222,53	225,22	—	—	—	—	—

Таблица 12.2

Давление пара ртути

При низких температурах [2]

t, °C	P, мм рт. ст.	t, °C	P, мм рт. ст.	t, °C	P, мм рт. ст.	t, °C	P, мм рт. ст.
—90	10^{-15}	42	10^{-4}	46	10^{-2}	254	100
—75	10^{-9}	—25	10^{-3}	82	10^{-1}	357	760
—66	10^{-6}	6	10^{-3}	125	1,0		
—55	10^{-5}	17	10^{-3}	202	10		

При низких температурах

t, °C	P, атм	t, °C	P, атм	t, °C	P, атм	t, °C	P, атм	t, °C	P, атм	t, °C	P, атм
400	2,1 [3] 2 [4]	550	13,6 [3] 12 [4]	700	50 [3] 46 [4]	850	137,5 [3] 115 [4]	1000	310 [4]	1250	825 [4]
450	4,25 [3] 4 [4]	600	22,3 [3] 22 [4]	750	72 [3] 63 [4]	880	162 [3]	1100	420 [4]	1300	1025 [4]
500	8 [3] 7 [4]	650	34 [3] 34 [4]	800	109 [3] 86 [4]	900 950	145 [4] 195 [4]	1150 1200	535 [4] 605 [4]	1300 1400	1025 [4] 1625 [4]
										1450	2020 [4]

12.2. ЭЛЕМЕНТЫ И ПРОСТЕЙШИЕ СОЕДИНЕНИЯ

Таблица 12.3

Температуры, °К, при которых устанавливается указанное давление паров элементов и некоторых простейших соединений (ниже 1 *мм рт. ст.*)

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*											Литература
		10^{-10}	10^{-8}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^{-1}	10^{-1}	1,0	
Азот	N_2	—	—	23,7	25,9	27,0	29,0	31,4	34,1	37,5	41,7	47,0	[5]
Алюминий	Al	824	866	917	974	1059	1114	1208	1301	1491	1566	1745	[2]
Алюминий фтористый	AlF	—	—	—	—	—	—	805	962	1026	1103	—	[6]
Алюминий четырехфтористый	AlF_3	—	—	—	—	—	—	—	573	1009	1059	1175	[7]
Аммиак	NH_3	—	—	90,6	95,9	109,0	106,5	116,5	125,5	136,0	148,0	163,0	[5]
Аргон	Ar	—	—	26,6	28,6	30,6	33,1	35,9	39,2	43,2	46,2	54,4	[5]
Барий	Ba	407	526	558	595	649	687	744	812	895	967	1134	[2]
Бериллий	Be	871	918	971	1030	1097	1173	1261	1364	1485	1634	1821	[2]
Бериллий фтористый	BeF_2	—	—	—	—	—	—	—	831	893	963	—	[6]
Бериллия окись	BeO	—	—	—	—	—	2070	2267	2766	2546	—	—	[9]
Бор	B	1468	1543	1626	1718	1821	1936	2072	2226	2409	2631	2898	[2]
Бора окись	B_2O_3	—	—	—	—	—	—	1260	1361	1468	1600	—	[9]
Бром	Br_2	—	—	129,5	136,5	143,5	152,5	163,0	174,5	189,5	204,0	224,0	[5]
Ванадий	V	1292	1368	1431	1513	1604	1708	1826	1953	2125	2317	2555	[2]
Висмут	Bi	484	501	521	543	569	600	638	688	760	857	1040	[2]
Вода	H_2O	—	—	144,5	153,0	162,0	173,0	185,0	198,5	215,0	223,0	256,0	[5]
Водород	H_2	—	—	3,71	4,03	4,40	4,84	5,38	6,05	6,90	8,03	9,55	[5]
Водород бромистый	HBr	—	—	67,6	72,1	77,1	83,9	90,6	97,5	107,0	118,5	132,5	[5]
» фтористый	HF	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	179	[5]
» хлористый	HCl	—	—	64,1	68,1	72,5	77,6	83,4	90,1	98,1	108,5	121,4	[5]
Вольфрам	W	2154	2203	2383	2517	2667	2837	3030	3249	3502	3798	4147	[2]
Гадолиний	Gd	578	609	644	684	729	779	838	906	986	1082	1199	[2]
Галлий	Ga	749	792	840	853	962	1024	1106	1201	1315	1453	1625	[2]
Гафний	Hf	1690	1780	1880	1990	2117	2260	2430	2627	2860	3145	3478	[2]
Гелий	He	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,960	1,268	[5]
Германий	Ge	985	1030	1092	1167	1250	1319	1422	1543	1687	1861	2075	[2]
Германий сернистый	GeS	—	—	—	—	—	—	596	621	668	—	—	[10]
» двусернистый	GeS_2	—	—	—	—	—	—	—	707	759	803	895	[11]
Европий	Eu	503	532	566	599	640	687	741	800	861	975	1093	[2]
Железо	Fe	1019	1072	1131	1197	1271	1356	1453	1566	1698	1850	2063	[2]
Золото	Au	973	1026	1085	1151	1231	1311	1413	1530	1676	1847	2059	[2]
Индий	In	663	700	745	794	850	914	989	1078	1186	1315	1478	[2]
Иод	I_2	161	169	178	189	199	212	226	245	262	285	312	[2]
Иридий	Ir	1568	1646	1737	1835	1944	2071	2214	2379	2570	2799	3082	[2]
Иттербий	Yb	470	456	526	561	599	644	655	757	850	920	1032	[2]
Иттрий	Y	903	1046	1105	1171	1246	1332	1430	1544	1678	1842	2048	[2]
Кадмий	Cd	310	327	346	368	393	421	454	492	538	594	667	[2]
Кадмий мышьяковистый	$CdAs_2$	—	—	—	—	—	514	548	587	631	683	—	[12, 13]
Кадмий селенистый	CdSe	—	—	—	—	—	—	798	861	934	1021	—	[12, 13]
» теллуристый	CdTe	—	—	—	—	—	—	719	776	847	930	—	[14]
» хлористый	$CdCl_2$	—	—	—	—	340	366	398	436	483	542	617	[5]
Калий	K	262,6	278,1	295,6	315,1	338,5	365,6	397,7	436,0	489,9	542	617	[2]
Калий	K_2	349	369	392	416	448	483	524	573	633	707	804	[2]

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.											Литература
		10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1,0	
Калий хлористый	KCl	—	—	—	—	—	729	781	842	912	993	1090	[18]
Калций	Ca	490	518	549	585	625	672	726	790	867	962	1081	[2]
Кислород	O_2	—	—	26,2	29,9	31,9	34,1	36,7	39,8	43,3	48,1	54,1	[5]
Кобальт	Co	880	950	976	1063	1095	1166	1247	1342	1454	1586	1744	[2]
Кремний	Si	970	1020	1075	1136	1204	1282	1370	1475	1600	1750	1938	[2]
Кремния окись	SiO_2	—	—	—	—	—	1489	1635	1814	—	—	—	[9]
Криптон	Kr	—	—	36,5	39,3	42,2	45,5	49,4	53,9	59,4	66,3	74,8	[5]
Ксенон	Xe	—	—	50,8	54,2	58,2	62,7	68,1	74,4	82,1	91,5	103,5	[5]
Лантан	La	1130	1192	1263	1343	1465	1540	1661	1803	1972	2177	2429	[7]
Лантана хлорид	$LaCl_3$	—	—	—	808	853	904	960	1025	1058	1183	—	[19]
Литий	Li	451	477	507	541	579	623	675	737	811	909	1017	[7]
	Li_2	553	584	618	658	702	754	814	885	970	1075	1207	[2]
Литий фтористый	LiF	—	—	—	—	—	676	737	811	902	1017	—	[20]
» хлористый	LiCl	—	—	—	—	—	—	—	792	859	958		[21]
Лития окись	Li_2O	—	—	—	—	—	—	—	1377	1489	1620	—	[22]
Лютеций	Lu	841	886	937	993	1057	1130	1213	1310	1424	1560	1726	[2]
Магний	Mg	407	430	455	484	517	554	598	649	710	783	875	[2]
Марганец	Mn	738	777	820	869	924	988	1060	1146	1247	1379	1522	[2]
Медь	Cu	897	946	1000	1060	1130	1207	1296	1406	1535	1692	1890	[2]
Метан	CH_4	—	—	32,0	34,3	36,9	39,9	43,5	47,7	52,9	59,2	67,3	[5]
Молибден	Mo	1677	1764	1860	1960	2090	2228	2366	2572	2797	3046	—	[2]
Мышьяк	As	747	779	812	846	881	937	1012	1110	1240	1440	1696	[2]
	As_2	482	516	545	579	613	649	686	722	758	793	827	[2]
	As_3	342	359	377	397	420	445	474	507	545	590	644	[2]
Натрий	Na	309	327	347	370	397	428	465	509	562	628	712	[2]
	Na_2	379,3	401,3	426,0	454,1	486,2	523	567	618	690	787	855	[2]
Натрий фтористый	NaF	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1205	1390	[23]
Неодим	Nd	855	946	1004	1070	1144	1231	1336	1464	1618	1808	2049	[2]
Неон	Ne	—	—	7,34	7,87	8,48	9,19	10,05	11,05	12,30	13,85	15,60	[5]
Никель	Ni	855	898	946	1000	1061	1129	1207	1296	1402	1528	1681	[2]
Ниобий	Nb	1890	1950	2091	2125	2250	2400	2580	2750	2980	3250	3570	[2]
Олово	Sn	855	905	961	1024	1096	1179	1275	1387	1521	1685	1890	[2]
Осмий	Os	1810	1896	1956	2108	2234	2375	2535	2719	2932	3196	3042	[2]
Палладий	Pd	1056	1114	1180	1253	1336	1430	1539	1667	1820	2011	2246	[2]
Платина	Pt	1404	1475	1555	1644	1744	1858	1988	2140	2322	2540	2804	[2]
Полоний	Po	356	375	396	421	448	479	515	560	616	684	771	[2]
	Po_2	364	383	404	427	453	483	517	564	623	698	796	[2]
Радий	Ra	462	489	519	553	593	638	691	754	832	926	1058	[2]
Рений	Re	1982	2085	2201	2332	2480	2640	2844	3076	3373	3648	4096	[2]
Родий	Rh	1396	1467	1546	1633	1735	1847	1976	2124	2303	2529	2791	[2]
Ртуть	Hg	184	194	205	218	231	248	267	290	319	358	389	[2]
Рубидий	Rb	239	253	270	288	310	335	364	400	443	497	569	[2]
	Rb_2	319,0	337,9	357,9	381,5	406,6	440,7	478,6	—	581	652	744	[2]
Рубидий хлористый	RbCl	—	—	—	—	—	—	—	807	870	956	1068	[24]
Рутений	Ru	1657	1741	1833	1930	2034	2150	2328	2456	2692	2929	3213	[2]
Сурьма	Sb	577	610	646	687	733	786	846	917	1001	1103	1229	[2]
Свинец	Pb	651	688	719	760	806	862	927	903	995	1110	1254	[2]
Свинец фтористый	PbF_2	—	—	—	—	—	—	737	801	879	973	1060	[25]
Свинца окись	PbO	—	—	—	—	—	—	892	953	1025	1105	1200	[26]
Селен	Se	546	576	610	648	691	741	798	867	948	1047	1170	[2]
	Se_2	—	351	370	389	410	435	464	497	539	590	652	[2]
	Se_6	—	346	362	379	398	419	443	471	506	561	629	[2]
	ΣSe^*	—	340	357	377	394	417	442	470	504	560	628	[2]
Сера	S	—	—	699	742	790	846	911	988	1080	1190	1330	[2]
	S_6	—	—	347	366	387	411	439	472	511	567	613	[2]
	S_8	—	—	261	278	294	312	332	355	380	413	458	[2]
	ΣS^*	241	245	260	275	292	310	330	362	377	410	456	[2]
Серебро	Ag	759	800	846	898	957	1024	1101	1191	1301	1436	1603	[2]
Сероводород	H_2S	—	—	73,3	78,0	83,1	89,0	95,7	103,5	113,5	124,5	136,5	[5]
Скандий	Sc	885	912	967	1045	1110	1187	1275	1375	1487	1636	1820	[2]
Стронций	Sr	457	483	512	545	582	625	676	735	806	894	1006	[2]
Сурьма	Sb	688	730	770	818	870	933	1008	1097	1204	1334	1496	[2]
	Sb_2	579	608	641	677	717	763	816	877	956	1063	1196	[2]

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.											Литература
		10^{-10}	10^{-8}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^{-0}	10^{1}	1,0	
	Sb_3	486	516	547	580	617	656	700	749	805	880	1094	[2]
	$Y\ Sb^*$	486	516	547	580	617	656	700	740	808	880	1094	[2]
Таллий	Tl	453	583	656	801	675	681	736	801	881	979	1161	[2]
Тантал	Ta	2015	2120	2237	2366	2511	2675	2862	3077	3320	3625	3978	[2]
Теллур	Te_2	403	423	445	470	497	527	562	602	649	705	790	[2]
Технеций	Tl	1207	1270	1340	1419	1508	1609	1726	1861	2021	2219	2264	[2]
Торий	Th	—	—	1706	1813	1935	2075	—	—	—	—	—	[27]
Тулий	Tu	661	696	731	778	827	885	953	1025	1121	1237	—	[2]
Углекислый газ	CO_2	—	—	76,1	80,6	85,7	91,5	98,1	106,0	114,5	125,0	137,5	[5]
Углерод	C_1	1781	1870	1969	2077	2200	2336	2491	2670	2871	3114	3397	[2]
	C_2	1990	2010	2109	2218	2336	2475	2629	2804	3001	3232	3502	[2]
	C_3	1716	1791	1873	1962	2061	2171	2293	2430	2580	2763	2508	[2]
Углерода окись	CO	—	—	26,7	28,4	30,3	32,3	35,0	38,0	41,5	45,8	51,1	[5]
Уран	U	1265	1337	1409	1498	1600	1717	1851	2014	2206	2430	2729	[2]
Уран двуокись	UO_2	—	—	1589	1669	1789	1894	2023	—	—	—	—	[28]
Уран пентафтористый	$\alpha\ UF_5$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	310**	365**	[29]
» четырехфтористый	UF_4	—	—	—	—	—	—	—	—	1080	1157	1250	[30]
Фосфор красный	P_1	942	990	1045	1106	1174	1250	1337	1436	1547	1675	1822	[2]
	P_2	427	448	470	496	524	556	592	633	680	735	800	[2]
	P_3	295	312	327	345	361	380	403	428	457	491	530	[2]
» белый	P_4	158	166	179	191	205	220	238	259	282	311	348	[2]
Франций	Fr	208	218	232	248	267	289	315	345	385	436	497	[2]
Фтор	F_2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50,5	[5]
Хлор	Cl_2	—	—	84,4	89,4	95,1	101,5	109,5	117,5	127,5	140,0	155,0	[5]
Хром	Cr	986	1037	1094	1158	1229	1311	1403	1511	1637	1786	1968	[2]
Хрома окись	Cr_2O_3	—	—	—	—	—	—	1750	1856	2006	2177	2382	[31]
Цезий	Cs	227	241	257	274	295	319	348	382	424	476	545	[2]
Цезий хлористый	CsCl	—	—	—	—	—	—	715	770	843	911	1069	[24]
Цинк	Zn	358	377	395	424	453	485	523	566	616	681	765	[2]
Цинк мышьяковистый	Zn_3As_2	—	—	—	—	575	616	663	716	784	—	—	[13]
» селенистый	ZnSe	—	—	—	—	—	—	919	982	1055	1140	—	[32]
» сернистый	ZnS	—	—	—	—	—	—	—	—	1141	1270	1430	[33]
» теллуристый	ZnTe	—	—	—	—	—	—	785	848	921	1009	—	[14]
Цирконий	Zr	1578	1662	1754	1858	1975	2100	2205	2447	2662	2918	3227	[2]

* При суммарном давлении.
** При давлении диспропорционирования.

12.3. НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА

Температуры, °С, при которых устанавливается указанное давление паров неорганических веществ (ниже 1 атм)*

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С	Литература
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760		
Азот	N_2	−226,1	−221,5	−219,1	−216,8	−214,0	−212,3	−209,7	−205,6	−200,9	−195,8	−210,0	[34]
Азота закись	N_2O	−142,4	−133,4	−128,7	−124,0	−118,3	−114,9	−110,3	−103,6	−96,2	−88,5	−90,9	[34]
» окись	NO	−159,5	−150,6	−178,2	−175,3	−171,7	−168,9	−166,0	−162,4	−156,8	−151,7	−161,6	[34]
» фторокись	NO_2F	−143,3	−132,1	−126,2	−119,8	−112,8	−108,4	−102,3	−93,5	−83,2	−72,0	−139,0	[34]
» четырехокись	N_2O_4	−55,0	−42,7	−36,7	−30,1	−23,9	−19,9	−14,7	−6,0	+8,0	21,0	−9,3	[34]
Азотный ангидрид	N_2O_5	−36,8	−23,0	−16,7	−10,0	−2,9	+1,8	7,4	15,6	24,4	32,4	30,0	[34]
Азот трехфтористый	NF_3	−183,8	−175,5	−170,7	−165,7	−160,2	−156,5	−152,3	−146,2	−137,4	−129,0	−183,7	[35]
Алюминий	Al	1472	—	1609	—	—	—	1996	—	—	2348	659	[2]
Алюминий-боргидрид	$Al(BH_4)_3$	—	−12,2	−42,9	−73,5	−96,9	−13,4	−3,9	+11,2	28,1	45,9	−64,5	[34]
Алюминий бромистый	$AlBr_3$	81,3	103,6	118,0	134,0	150,6	161,7	176,1	199,8	227,0	256,3	97,5	[34]
» иодистый	AlI_3	179,0	207,7	225,8	244,2	265,0	277,8	294,5	329,0	354,0	395,5	—	[34]
» фтористый	AlF_3	1238	1306	1394	1460	1376	1396	1422	1457	1496	1537	1040	[36]
» хлористый	$AlCl_3$	100,0	116,4	123,8	131,8	139,9	145,4	152,0	161,8	171,6	180,2	194,4	[34]
Алюминия окись	Al_2O_3	2145	2306	2346	2461	2549	2601	2665	2766	2874	2977	2050	[34]
Аммиак	NH_3	−109,1	−97,5	−91,9	−85,8	−79,2	−74,3	−68,4	−67,0	−45,4	−33,6	−77,7	[34]
Аммоний бромистый	NH_4Br	198,3	234,5	252,0	270,6	290,0	303,6	320,0	345,3	370,9	396,0	—	[34]
» иодистый	NH_4I	210,9	247,0	265,5	283,8	302,8	316,0	331,8	355,6	381,0	404,9	—	[34]
» кислый сернистый	NH_5HS	−51,1	−36,0	−28,7	−20,8	−12,3	7,0	0,0	+10,5	21,8	33,3	—	[34]
» хлористый	NH_4Cl	160,4	190,8	209,8	226,1	245,0	256,2	271,5	293,2	316,5	337,6	520	[34]
» цианистый	NH_4CN	−50,6	−35,7	−28,0	−20,9	−12,6	−7,4	−0,5	+9,6	20,5	31,7	36	[34]
Аммония азид	NH_4N_3	29,2	40,4	55,2	65,4	80,1	86,7	95,2	107,7	120,4	133,6	—	[34]
» карбонат	$NH_4CO_2NH_2$	−26,1	−10,4	−2,9	+5,3	14,0	19,6	26,7	37,2	49,0	58,3	—	[34]
Аргон	Ar	−218,3	−213,9	−210,9	−207,9	−204,9	−202,9	−200,5	−195,6	−190,6	−185,6	−189,9	[34]
Астат	At	360	—	506	—	—	—	269	—	—	354	302	[2]
Барий	Ba	—	984	1049	1120	1196	1240	1301	1403	1518	1658	710	[34]
Бериллий	Be	1348	—	1785	—	—	—	2097	—	—	2471	1283	[2]
Бериллий-боргидрид	$Be(BH_4)_2$	1,0	19,8	26,1	36,8	46,2	51,7	58,6	69,0	79,7	90,0	123	[34]
Бериллий бромистый	$BeBr_2$	269	305	342	361	379	390	408	427	451	474	490	[34]
» иодистый	BeI_2	285	322	341	361	382	394	411	435	461	487	489	[34]
» хлористый	$BeCl_2$	291	328	346	366	384	395	411	435	461	487	405	[34]
Бор	B	2621	—	2357	—	—	—	3381	—	—	3880	2027	[2]
Бор трехфтористый	BF_3	−154,0	−145,4	−141,3	−136,4	−131,0	−127,6	−123,0	−115,9	−105,3	−100,7	−126,9	[34]
» трехлористый	BCl_3	−91,5	−75,2	−66,9	−57,9	−47,8	−41,2	−32,4	−16,9	−8,6	12,7	−107	[32]
Бром	Br_2	−26,7	−12,8	25,0	−16,8	−6,0	0,6	+9,3	24,3	41,0	58,2	−7,26	[37]
Бромдихлорфторсилан	$SiBrCl_2F$	−66,5	−68,4	−50,0	−48,5	−37,0	−29,0	−19,5	−3,2	+13,4	35,4	−112,3	[34]
Бром пятифтористый	BrF_5	69,3	−61,0	−41,5	−32,0	−21,0	−14,0	−4,5	+19,9	25,7	40,0	−61,4	[34]
Бромсилан	SiH_3Br	—	−85,7	−77,3	−69,3	−57,6	−51,1	−42,3	−28,0	−13,3	12,0	−69,0	[34]
Ванадий	V	2282	—	2628	—	—	—	2933	—	—	3309	1919	[2]
Ванадия трехлорид	$VOCl_3$	−21,2	+40,3	12,2	26,0	40,0	46,8	62,5	62,0	103,5	127,2	—	[34]

* Буквой F отмечены температуры разложения.

Продолжение табл. 12.4

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С	Литература
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760		
Висмут	Bi	767	—	947	—	—	—	1134			1427	271	[2]
Висмут трифтористый	BiF_3	74,8	109,0	116,5	131,1	140,8	156,6	169,6	188,5	209,1	230,0	154,4	[38]
» хлорбромистый	$BiBrCl_2$	—	261	282	305	327	340	360	392	425	461	218	[34]
» трибромистый	$BiBr_3$	254,3	303,7	327,9	351,3	365,0	401,0	425,3	461,2	500,9	541,7	—	[39]
» трихлористый	$BiCl_3$		242	264	287	311	321	343	372	406	441	230	[34]
Вода	H_2O	—17,3	—1,2	11,3	23,2	34,1	41,6	51,6	66,5	83,0	100,0	0,0	[34]
Водород	H_2	—263,3	—261,9	—261,3	—260,4	—259,6	—258,9	257,9	—256,3	—254,6	—252,5	—259,1	[34]
Водорода перекись	H_2O_2	15,3	36,8	50,4	63,3	77,0	85,8	97,9	116,5	137,4Р	158,0Р	—0,9	[34]
Водород бромистый	HBr	—138,8	—127,4	—121,8	—115,4	—108,3	—106,5	—97,7	—88,1	—78,0	—66,5	—87,0	[34]
» двухсернистый	H_2S_2	—43,2	—34,4	15,2	—5,1	16,0	12,9	22,0	35,3	49,6	64,0	—89,7	[34]
» иодистый	HI	—125,3	—119,6	—109,3	—94,5	—85,6	—79,8	—72,1	—60,3	—48,3	—35,1	—50,9	[34]
» мышьяковистый	AsH_3	—142,6	—130,8	124,7	—117,7	—110,2	—104,8	—98,0	—87,2	—75,2	—62,1	—116,3	[34]
» селенистый	H_2Se	—115,3	105,4	—97,9	91,8	—84,7	80,9	74,2	—66,9	—55,6	—41,1	—64,6	[34]
» теллуристый	H_2Te	—96,4	—89,4	—75,4	—67,8	—60,1	—53,7	—45,7	—32,4	—17,2	—2,0	—49,0	[34]
» фтористый	HF	—91,6	75,9	—66,8	—58,1	—45,1	—38,0	—28,3	—13,8	+2,5	19,43	—83	[40]
» хлористый	HCl	—150,8	—140,2	—135,8	—130,0	—125,8	—119,8	—114,0	—105,2	—96,3	84,8	—114,3	[34]
Вольфрам	W	3671		3294	—	—	—	4910	—	—	5372	3387	[2]
Вольфрам шестифтористый	WF_6	—71,4	—56,6	—49,2	—41,5	—35,0	—27,5	—20,3	—10,0	+1,2	17,3	—0,5	[34]
Галлий	Ga	926	—	1074	—	—	—	1264	—	—	1497	1327	[2]
Галлий	Ga	1372	—	1573	—	—	—	1871	—	—	2294	30	[2]
Галлий трехлористый	$GaCl_3$	48,0	67,8	76,5	91,3	107,5	118,0	132,0	152,8	176,3	200,0	77,0	[34]
Гафний	Hf	3206	—	3702	—	—	—	3887	—	—	5687	2222	[2]
Гафний четырехлористый	$HfCl_4$	170,5	199,7	210,8	230,0	245,2	264,0	286,8	283,5	300,9	317,9	434	[41, 42]
Гексафторидсилан	Si_2F_6	—81,0	—69,8	—63,1	—57,0	—50,6	—46,7	—41,7	—34,2	—26,4	—18,9	—18,6	[34]
Гексахлордисилан	Si_2Cl_6	4,0	27,4	38,8	54,5	65,3	73,9	85,4	102,2	120,6	139,0	—12	[34]
Гексахлордисилоксан	$(SiCl_3)_2O$	5,0	17,8	29,4	41,5	55,2	63,8	77,4	99,5	113,6	136,6	—33,2	[34]
Гелий	He	—271,7	—271,5	—271,3	—271,1	270,7	—270,5	—270,3	—269,8	—269,3	—268,6	—272,0	[34]
Германий	Ge	1802	—	2074	—	—	—	2430	—	—	2832	937	[2]
Германий бромистый	$GeBr_4$	—	43,3	56,8	71,8	88,1	99,8	113,2	135,4	161,6	189,0	26,1	[34]
» хлористый	$GeCl_4$	—45,0	—24,9	—16,0	4,1	+6,0	16,2	27,5	41,4	63,8	84,0	—49,5	[34]
Германия гидрид	GeH_4	—163,0	—151,0	—145,3	—139,2	—131,6	—126,7	120,3	—111,2	—100,2	—88,9	—166	[34]
Гидроксиламин	NH_2OH	—	36,0	47,2	55,8	64,6	70,0	77,5	87,9	99,2	110,0	31,0	[34]
Дейтеромиак	ND_3	—	—	—	—	—	74,0	67,4	—57,0	—45,4	—33,4	—74,0	[34]
Дейтеродиводород	ND		—	—259,8	278,1	—256,2	—257,6	—256,6	255,0	—253,0	—251,0	—	[34]
Диборан	B_2H_6	—159,7	—149,3	—144,5	—138,5	—131,6	—127,2	—120,9	—111,2	—99,6	86,5	—165	[34]
Дибромдифторсилан	$SiBr_2F_2$		—	—86,8	—57,7	—47,4	—41,0	—31,9	—18,2	—2,6	+13,7	—66,9	[34]
Дибромсилан	SiH_2Br_2	—60,9	—40,0	—25,4	—18,0	—5,2	+3,2	14,1	34,6	50,7	70,5	70,9	[34]
Дибромхлорфторсилан	$SiBr_2ClF$	—66,2	45,5	—35,6	—24,6	—12,0	4,7	16,3	35,0	43,4	59,5	—69,3	[34]
Дигерман	Ge_2H_6	—88,7	—69,8	—60,1	49,9	—28,2	—30,7	—20,3	—4,7	+13,3	31,5	109	[34]
Декаборан	$B_{10}H_{14}$	60,0	80,8	90,2	100,0	117,4	127,8	142,8	165,8	Р	—	99,6	[34]
Пентаборан	B_5H_9	—	—40,4	—28,7	20,0	—6,0	0,4	9,6	24,6	40,6	58,1	47,0	[34]
Дисилан	SiH_3I_2	—	5,8	18,0	34,1	52,6	61,0	79,4	101,8	125,5	149,5	—132,5	[34]
Дифторсилан	SiH_2F_2	—146,7	—136,0	130,4	124,3	—117,0	—113,3	—107,3	—98,3	—87,6	77,8	1,0	[34]
Дисилазан	$(SiH_3)_2NH$	—68,7	—45,9	—40,4	—30,0	—18,5	—11,0	1,1	14,0	31,0	48,7	—105,7	[34]
Дисилан	Si_2H_6	114,8	—95,3	—91,4	—82,7	—72,8	—66,4	—57,5	—44,6	—29,0	—14,5	—132,6	[34]

Вещество	Формула	Давление пара, кг/см², мм. 1	6	10	20	40	60	80	100	400	760	Теплота плавления, ккал/моль	Температура плавления, °C	Литература
Дисилоксан	$(SiH_3)_2O$	−112,5	−95,8	−88,2	−79,8	−70,1	−64,2	−55,9	−45,5	29,3	15,4	−144,2		[34]
Дихлорофторсилан	$SiCl_2F_2$	124,7	−110,5	−109,9	−94,6	−85,0	−78,6	−70,3	−58,0	−45,0	−31,6	−139,7		[34]
Европий	Eu	820	—	960		—	—	1195	—	—	1470	1203		[2]
Железа карбонил	$Fe(CO)_5$	—	−6,5	+4,6	16,7	30,3	39,1	50,3	68,0	86,1	105,0	−21,0		[34]
Железо	Fe	1797	1957	2030	2128	2224	2283	2360	2475	2616	2735	1535		[34]
Железо хлористое	$FeCl_2$	—	—	700	757	779	805	842	897	961	1026	—		[34]
» хлорное	$FeCl_3$	194,1	221,8	235,5	246,0	256,6	263,7	272,5	285,0	298,0	319,0	304		[34]
Золото	Au	1786	—	2055	—	—	—	2412		—	2847	1063		[2]
Индий	In	1205	—	1414	—	—	—	1656	—	—	2050	156		[2]
Иод	I_2	38,7	62,2	73,2	84,7	97,5	105,4	116,5	137,3	155,8	183,0	112,9		[34]
Иод пентафтористый	IF_5	−23,9	−2,0	+8,7	20,2	32,7	40,6	51,0	68,4	83,2	100,0	9,4		[34]
» гептафтористый	IF_7	−87,0	−70,2	63,0	−54,5	−45,3	−38,4	−31,9	−26,7	8,3	+4,0	5,5		[34]
Иодсилан	SiH_3I	—	−53,0	−43,7	−33,4	−21,8	−14,3	−4,4	+10,7	27,9	45,4	−57,0		[34]
Иттрий	Y	1775	—	2057	—	—	—	3309	—	—	2772	1490		[2]
Кальций	Ca	304	455	484	516	553	578	611	658	711	965	320,9		[34]
Кальций иодистый	CaI_2	416	481	512	546	584	608	640	689	742	798	385		[34]
» фтористый	CaF_2	1365	1504	1559	1617	1673	1709	1750	1834	1921	2024	320		[34]
» хлористый	$CaCl_2$	—	618	666	695	730	762	797	847	908	967	568		[34]
Кальция окись	CaO	1000	1100	1149	1200	1257	1295	1341	1409	1484	1569	—		[34]
Калий	K	378	446	480	518	550	600	620	668	723	798	62,3		[44]
Калий бромистый	KBr	796	882	940	964	1050	1087	1137	1212	1297	1383	736		[34]
» едкий	KOH	719	814	865	918	976	1013	1064	1142	1233	1327	380		[34]
» иодистый	KI	746	840	887	968	995	1030	1060	1152	1238	1324	723		[34]
» фтористый	KF	885	988	1030	1056	1156	1193	1245	1303	1411	1502	880		[40]
» хлористый	KCl	891	919	968	1020	1078	1115	1164	1230	1322	1407	790		[34]
Кальций	Cs	808	946	985	1046	1111	1154	1207	1288	1388	1482	811		[34]
Карбонилборан	BH_3CO	−130,2	−127,3	−121,1	−114,1	106,6	101,9	−96,3	−85,5	74,8	−64,0	−137,0		[34]
Карбонилхлорид (фосген)	$COCl_2$	−92,9	−77,0	−69,3	−60,3	−50,3	−44,0	−35,6	−22,3	−7,6	+6,5	−104		[34]
Кислород	O_2	−219,1	−213,4	210,6	−207,5	−204,1	−201,9	−198,8	−194,0	−188,8	−183,1	−218,7		[34]
Кобальт	Co	1471	—	1677	—	—		1940	—	—	2255	1495		[2]
Кобальта нитрозилтрикарбонил	$Co(CO)_3NO$	—	—	—	−1,3	+11,0	18,5	29,0	44,4	62,0	80,0	−11		[34]
Кобальт хлористый	$CoCl_2$	—	—		—	770	801	843	904	974	1050	235		[34]
Кремний	Si	1665	—	1910	—	—	—	2250	—	—	2617	1415		[2]
Кремний четырехфтористый	SiF_4	−144,0	−134,6	130,4	−125,9	−120,8	−117,5	−113,3	−107,2	−100,7	−94,8	−90		[34]
Кремний четыреххлористый	$SiCl_4$	−68,4	−44,1	−34,4	−24,0	−12,1	−4,0	+5,4	21,0	36,4	56,8	−68,8		[34]
Кремния окись	SiO_2	—	—	1732	1798	1867	1911	1969	2043	2141	2227	1710		[34]
Криптон	Kr	−199,3	−191,3	−187,2	−182,9	−178,4	−175,7	171,8	−165,6	−159,0	−152,0	−156,7		[34]
Ксенон	Xe	−118,5	−108,2	−152,8	−147,1	−141,2	−137,7	−132,8	−125,4	−117,1	−108,0	−111,6		[34]
Лантан	La	2156	—	2474	—	—	—	2887	—	—	3470	920		[2]
Литий	Li	723	838	881	940	1005	1042	1077	1178	1273	1372	186		[34]
Литий бромистый	LiBr	748	840	888	939	994	1028	1076	1147	1236	1310	547		[34]
» иодистый	LiI	723	802	841	883	927	955	993	1040	1110	1171	428		[34]
» фтористый	LiF	1047	1156	1211	1270	1335	1372	1425	1503	1594	1681	848,1		[34]
» хлористый	LiCl	783	880	932	987	1045	1081	1129	1203	1290	1382	612		[34]

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст. 1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	Температура плавления, °С	Литература
Литий	Li	1453		1639			—	1938		—	2262	1727	[2]
Магний	Mg	641	702	748	789	838	868	909	967	1034	1107	651	[34]
Магний хлористый	$MgCl_2$	778	877	930	988	1050	1088	1142	1223	1316	1418	712	[34]
Марганец	Mn	1262	1434	1565	1663	1766	1720	1792	1906	2029	2151	1260	[34]
Марганец хлористый	$MnCl_2$	—	736	776	825	879	913	960	1028	1106	1190	650	[34]
Медь	Cu	1613	—	1910	—	—	—	2312	—	—	2877	1085	[2]
Медь бромистая (I)	Cu_2Br_2	592	666	715	777	844	887	951	1052	1190	1366	504	[34]
» иодистая (I)	Cu_2I_2	—	610	656	716	780	836	907	1018	1158	1336	615	[34]
» хлористая (I)	Cu_2Cl_2	546	645	702	766	836	886	980	1077	1240	1490	422	[34]
Молибден	Mo	3102	3383	3535	3696	3850	3964	4119	4322	4553	4804	2622	[34]
Молибден трехокись	MoO_3	734	785	814	851	892	917	955	1014	1082	1151	795	[34]
Молибден пентафтористый	MoF_5	—65,5	—49,0	—40,8	—32,0	—22,1	—16,2	—8,0	+4,1	17,2	36,0	17	[34]
Молибдендибромдиборан	B_2MoH_8	—93,3	—75,3	—66,8	—56,4	—46,4	—38,2	—29,0	—16,4	0,0	+16,3	—104,2	[34]
Мышьяк	As	372	416	437	459	483	498	518	548	579	610	814	[34]
Мышьяк трехокись	As_2O_3	212,5	242,6	258,7	279,2	296,2	310,5	332,5	350,0	412,2	457,2	312,8	[34]
Мышьяк пентафтористый	AsF_5	—117,9	—108,0	—103,1	—98,0	—92,4	—88,5	—84,3	—75,5	—64,0	—52,8	79,6	[34]
» трехбромистый	$AsBr_3$	41,6	70,6	85,2	101,3	118,7	130,0	145,2	167,7	190,6	221	—	[34]
» трехфтористый	AsF_3	—	—	—	—	—2,5	—4,2	13,2	26,7	41,4	56,8	—5,9	[34]
» треххлористый	$AsCl_3$	—11,4	+11,4	21,6	36,0	50,0	58,7	70,5	89,2	109,7	130,4	—18	[34]
Натрий	Na	433,8	511,6	552,8	597,5	651,1	690,6	746,8	783,9	816,5	882,9	97,83	[47, 48]
Натрий бромистый	NaBr	806	903	952	1005	1063	1099	1148	1220	1304	1392	755	[34]
» иодистый	NaI	767	857	903	952	1006	1040	1084	1150	1225	1304	651	[34]
» фтористый	NaF	1077	1186	1240	1300	1365	1403	1455	1531	1617	1704	992	[43]
» хлористый	NaCl	865	967	1017	1092	1131	1160	1220	1266	1369	1465	800	[34]
» цианистый	NaCN	817	928	963	1046	1115	1156	1214	1302	1401	1497	564	[34]
Натрия гидроокись	NaOH	739	843	897	955	1017	1057	1111	1192	1295	1376	319,1	[34, 46]
Неодим	Nd	1776		2591		—	—	2530	—		3111	1024	[2]
Неон	Ne	—257,3	—255,5	—254,6	—253,7	—252,6	—251,9	—251,0	—249,7	—248,1	—246,0	—248,7	[34]
Никель	Ni	1418	—	1602	—	—	—	2352	—	—	2142	1455	[2]
Никель хлористый	$NiCl_2$	671	731	759	789	821	840	866	901	945	987	1001	[34]
Никель карбонил	$Ni(CO)_4$	—	—	—	—	—23,0	—15,9	—6,0	+8,8	25,8	42,5	25	[34]
Ниобий	Nb	3258	—	3727	—	—	—	4237	—	—	4842	2497	[2]
Ниобий пентафтористый	NbF_5	—	—	86,3	105,0	121,5	135,2	148,5	172,2	198,0	225,0	75,5	[34]
Нитрозил фтористый	NOF	132,0	—120,3	—114,3	—107,8	—100,3	—95,7	—86,8	—79,2	—68,2	—56,0	—134	[34]
Нитрозил хлористый	NOCl	—	—	—	—	60,2	—54,2	46,3	—34,0	20,3	6,4	64,5	[34]
Озон	O_3	—189,4	—168,6	—163,2	—157,2	—150,7	—146,7	—141,0	—132,6	—123,0	—111,1	—251	[34]
Октахлоридисилан	Si_2Cl_8	46,3	74,7	89,3	104,2	121,5	132,0	146,0	168,2	189,5	211,4	—	[34]
Олова гидрид	SnH_4	—140,0	—125,8	—118,5	—111,2	—102,3	—95,6	—89,2	—78,0	—65,2	—52,3	—149,4	[34]
Олово	Sn	1613	—	1892	—	—	—	2245	—	—	2792	231,9	[2]
Олово бромное	$SnBr_4$	—	58,5	72,7	89,1	105,6	116,2	131,0	152,8	177,7	204,7	31,6	[34]
» иодное	SnI_4	—	156,0	175,6	196,2	218,8	234,2	254,2	283,5	315,5	346,0	144,5	[34]
» хлористое	$SnCl_2$	318	366	391	420	450	467	489	530	577	623	246,8	[34]
» хлорное	$SnCl_4$	—92,7	—1,0	+10,0	22,0	35,2	43,6	54,7	72,0	92,1	113,0	—30,2	[34]
Осмий	Os	3239	—	3607	—	—	—	4108	—	—	4607	3700	[2]

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C	Литература
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760		
Осмия четырехокись:													
белая	OsO_4	−5,6	+15,6	26,0	37,4	50,5	61,4	71,5	80,5	103,8	130,0	42	[34]
желтая	OsO_4	3,2	22,0	31,5	41,0	51,7	55,4	71,5	89,5	109,5	130,0	56	[34]
Палладий	Pd	1073	—	2271	—	—	—	2656	—	—	3119	1550	[2]
Платина	Pt	2531	—	2857	—	—	—	3366	—	—	3707	1773	[2]
Плутоний шестифтористый	PuF_6	—	—	—	1,3	11,1	16,8	24,2	35,0	48,8	69,16	51,59	[49]
Радий	Ra	785	—	961	—	—	—	1206	—	—	1536	700	[2]
Радон	Rn	−144,2	−132,4	−126,3	−119,9	−111,3	−106,2	−99,0	−87,7	−75,0	−61,8	−71	[34]
Рений	Re	3763	—	4249	—	—	—	4862	—	—	5642	3180	[2]
Рений семиокись	Re_2O_7	212,6	237,5	248,0	261,0	272,0	280,0	288,0	307,0	336,0	362,4	296	[34]
Родий	Rh	2621	—	2843	—	—	—	3270	—	—	3667	1966	[2]
Ртуть	Hg	125	—	202	—	—	—	354	—	—	357,6	−38,9	[2]
Ртуть бромистая (II)	$HgBr_2$	156,5	185,3	179,8	194,3	211,5	221,0	237,8	262,7	290,0	319,0	237	[34]
» иодистая (II)	HgI_2	157,5	189,2	204,5	220,0	238,2	246,0	261,8	291,0	324,2	354,0	259	[34]
» хлористая (II)	$HgCl_2$	136,2	166,0	180,2	185,8	212,5	222,5	237,0	266,5	275,5	304,0	277	[34]
Рубидий	Rb	295	—	380	—	—	—	526	—	—	705	38,5	[2]
Рубидий бромистый	RbBr	751	876	923	975	1031	1060	1114	1186	1267	1352	692	[34]
» иодистый	RbI	748	806	884	943	991	1026	1072	1141	1223	1304	642	[34]
» фтористый	RbF	921	982	1016	1052	1096	1123	1168	1239	1322	1409	760	[45]
» хлористый	RbCl	752	897	937	960	1047	1084	1138	1207	1294	1381	715	[34]
Самарий	Sm	966	—	1117	—	—	—	1338	—	—	1601	1072	[2]
Свинец	Pb	973	1059	1162	1234	1309	1378	1421	1510	1630	1744	327,5	[34]
Свинец бромистый	$PbBr_2$	513	578	610	646	696	711	746	798	858	914	373	[34]
» иодистый	PbI_2	479	540	571	605	644	668	701	750	807	872	402	[34]
» сернистый	PbS	892	928	976	1015	1049	1074	1104	1160	1221	1281	1114	[34]
» фтористый	PbF_2	—	604	904	950	1009	1096	1080	1144	1219	1293	855	[10]
» хлористый	$PbCl_2$	547	615	646	684	726	750	784	833	906	954	501	[34]
Свинца окись	PbO	943	1009	1085	1134	1189	1222	1265	1330	1402	1472	880	[34]
Селен	Se	310	—	428	—	—	—	634	—	—	657	217	[2]
Селена двуокись	SeO_2	157,0	187,7	202,5	217,5	234,1	244,6	256,0	277,0	297,7	317,0	340	[34]
» оксихлорид	$SeOCl_2$	34,5	59,8	71,9	84,2	96,0	108,5	118,0	134,6	151,7	168,6	8,5	[34]
Селен четыреххлористый	$SeCl_4$	74,0	96,3	107,4	118,1	130,1	137,8	147,5	161,0	176,4	191,58	—	[34]
» шестифтористый	SeF_6	−118,6	−104,2	−98,8	−92,0	−84,7	−80,0	−73,9	−64,8	−55,2	−45,8	−34,7	[34]
Сера	S	183,8	223,0	245,6	264,7	288,3	305,5	327,2	356,7	399,6	444,6	115,2	[34, 51]
Сера хлористая	S_2Cl_2	−7,4	+1,7	27,5	40,6	54,1	65,2	75,3	93,5	115,4	138,0	−80	[34]
» шестифтористая	SF_6	−132,5	−120,6	−114,7	−108,2	−101,5	−96,8	−90,0	−82,3	−72,6	−63,5	−50,2	[34]
Серебро	Ag	1330	—	1543	—	—	—	1925	—	—	2163	960,5	[2]
Серебро иодистое	AgI	820	927	984	1045	1114	1152	1210	1297	1400	1506	552	[34]
» хлористое	AgCl	912	1019	1074	1134	1200	1242	1297	1379	1467	1554	456	[34]
Серная кислота	H_2SO_4	145,8	178,0	194,2	211,5	231,7	241,5	257,0	279,8	305,0	330,0P	10,5	[34]
Сернистый ангидрид	SO_2	−95,5	−83,0	−76,8	−69,7	−60,5	−54,6	−46,5	−34,4	−23,0	−10,0	−73,2	[34]
Серный ангидрид (γ)	SO_3	−35,0	−23,7	−16,6	−9,1	−1,0	+4,0	10,5	20,5	32,6	44,8	16,5	[34]
» » (β)	SO_3	−24,0	−19,2	−12,3	−4,9	+2,2	8,0	14,3	23,7	32,6	44,8	32,3	[34]
» » (α)	SO_3	−15,3	−2,0	−4,3	11,1	17,0	21,4	29,0	35,6	44,0	51,6	62,1	[34]
Сероводород	H_2S	−134,3	−122,4	−116,3	−109,7	−102,5	−97,9	−91,0	−82,3	−71,6	−60,4	−85,5	[34]

Продолжение табл. 12.4

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст. 1	5	10	50	100	400	600	800	760	760	Температура плавления °С	Литература
Силан	SiH_4	−179,3	−168,6	−163,0	−156,9	−150,3	−146,3	−140,5	−131,6	−122,0	−111,5	−180	[34]
Синильная кислота	HCN	−71,0	−55,3	−47,7	−39,7	−30,9	−25,1	−17,9	−5,3	+10,2	25,9	−13,2	[34]
Скандий	Sc	1647	—	1777	—	—		2627	—	—	2427	1400	[2]
Стронций	Sr	757	—	877	—	—	—	1657	—	—	1357	770	[2]
Стронция окись	SrO	2068	2196	2262	2333	2410	—	—	—	—	—	2430	[34]
Сульфурил хлористый	SO_2Cl_2	—	−35,1	−24,8	−13,4	−4,0	+7,2	17,8	33,7	51,3	69,2	54,1	[34]
Сурьма	Sb	731	—	960	—	—	—	1269	—	—	1625	630,5	[2]
Сурьма пятифтористая	SbF_5	2,7	27,3	36,2	52,2	66,2	75,0	86,8	104,1	120,1	142,5	8,3	[52]
» пятихлористая	$SbCl_5$	29,7	48,6	61,8	76,8	94,0	101,0	114,1	—	—	—	3,8	[34]
» трехбромистая	$SbBr_3$	90,0	126,0	142,7	158,3	177,4	188,1	208,5	226,7	260,3	275,0	96,6	[34]
» трехиодистая	SbI_3	163,6	203,8	223,5	244,8	267,8	282,5	303,5	333,8	368,5	401,0	167	[34]
» трехлористая	$SbCl_3$	40,2	71,4	85,2	100,6	117,8	126,3	143,3	165,9	190,3	219,0	73,4	[34]
Сурьмы трехокись	Sb_2O_3	574	626	666	729	812	873	957	1065	1242	1425	656	[34]
Таллий	Tl	825	931	993	1040	1103	1143	1196	1274	1364	1457	300,5	[34]
Таллий бромистый	TlBr	—	490	522	559	596	621	653	705	750	819	460	[34]
» иодистый	TlI	440	502	531	567	607	631	663	713	763	823	440	[34]
» пятифтористый	TlF_3	59,3	89,0	103,5	119,2	136,2	146,9	161,2	182,2	205,4	229,0	—	[53]
» хлористый	TlCl	—	487	517	550	589	612	645	694	748	807	430	[34]
Тантал	Ta	3705	—	4135	—	—	—	4677	—	—	5292	2997	[2]
Тантала пятифтористый	TaF_5	—	—	—	—	—	110,3	130,0	150,9	194,0	230,0	96,8	[34]
Теллур	Te	517	—	632	—	—	—	762	—	—	1012	450	[2]
Теллур четыреххлористый	$TeCl_4$	—	—	233	253	273	287	309	330	360	392	224	[34]
шестифтористый	TeF_6	−111,5	95,8	−92,4	−86,0	−78,4	−73,8	−67,9	−57,3	−48,2	−38,6	−37,6	[34]
Тетраборан	B_4H_{10}	90,5	−73,1	−64,3	−54,8	−44,3	−37,4	−28,1	−14,0	+0,8	16,1	−119,9	[36]
Тетрагидроциклобутан	B_5H_{11}	−50,2	−25,9	−19,9	−9,2	+2,7	10,2	20,1	34,6	51,2	67,0	—	[34]
Тетраметилгерманий	$Ge(CH_3)_4$	−73,2	−54,6	−45,2	−36,0	−23,4	−16,2	−6,3	+8,6	26,0	44,0	−89	[34]
Тетрасилан	Si_4H_{10}	−27,7	−6,2	+4,3	15,8	26,4	36,6	47,4	63,6	81,7	100,0	−93,6	[34]
Тионилбромид	$SOBr_2$	−6,7	−16,4	31,0	44,1	58,8	68,3	80,6	99,0	119,2	139,5	−52,2	[34]
Тионилхлорид	$SOCl_2$	−52,9	−32,4	−21,0	−10,5	+2,9	10,4	21,4	37,0	56,5	75,4	−104,5	[34]
Титан	Ti	2191	—	2450	—	—	—	2833	—	—	3169	1707	[2]
Титан четыреххлористый	$TiCl_4$	−13,9	+9,4	21,3	34,2	48,4	58,0	71,0	90,5	112,7	136,0	−30	[34]
Трибромсилан	$SiHBr_3$	−30,5	−8,0	+3,4	16,0	30,0	39,2	51,6	70,2	90,2	111,8	−73,5	[34]
Трибромфторсилан	$SiBr_3F$	−46,1	−25,4	−15,1	−3,7	+9,2	17,4	26,6	45,7	64,6	85,8	−82,5	[34]
Трисурьмин	Sb_3H_3	−36,9	−12,6	−0,9	+11,6	26,3	35,5	47,9	67,0	88,6	110,8	−105,6	[34]
Трисилан	Si_3H_8	−68,9	−49,7	40,0	−29,0	−16,9	−9,0	+1,6	17,8	35,5	53,1	−117,2	[34]
Трифосфидин	Si_3H_7P	−152,0	−142,7	−138,2	−132,9	−127,3	−125,7	−116,7	111,3	−102,8	−96,0	131,4	[34]
Трихлоргермин	$GeHCl_3$	41,5	−29,5	−13,0	−3,0	+8,8	16,2	26,5	41,6	58,3	—	−71,1	[34]
Трихлорсилан	$SiHCl_3$	−80,7	−62,6	−53,4	−43,8	−32,9	−25,8	16,4	−1,8	+14,5	31,8	−126,6	[34]
Углерода двуокись	CO_2	−134,3	−134,4	−115,5	−114,4	−108,6	−104,6	−100,2	−86,0	−85,7	−76,2	−57,0	[34]
» окись	CO	−222,0	−217,2	−216,0	−212,8	−210,6	−208,1	−206,7	−201,3	−196,3	−191,3	−205,0	[34]
Уран	U	2436	—	2924	—	—	—	3506	—	—	3882	1133	[2]
Урана гексафторид	UF_6	−30,3	14,3	−7,6	+1,7	10,6	16,0	23,4	34,0	45,3	64,0	64,02	[17, 29]
Фосфин	PH_3	—	—	—	—	−129,4	−125,0	−116,8	−109,4	−98,3	−87,5	−132,5	[34]
Фосфоний бромистый	PH_4Br	−43,7	−28,5	−21,2	−13,3	−5,0	−1,3	7,4	17,6	28,0	38,30	—	[34]
» иодистый	PH_4I	−25,2	−9,0	−1,1	17,3	46,1	91,9	26,3	39,9	51,6	67,3	—	[34]

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С	Литература
		1	2	10	20	40	60	100	200	400	760		
Фосфорный хлористый	PH_4Cl	—91,0	—79,0	—71,0	—68,0	—61,5	—57,5	—52,0	—44,0	—35,4	—27,0	—28,5	[34]
Фосфор желтый	P	76,6	131,2	129,0	146,2	166,7	179,6	197,3	222,7	251,0	280,0	44,1	[34]
» фиолетовый	P	287	271	287	306	293	324	349	370	381	417	550	[34]
» черный	P	250	323	338	354	371	391	393	413	439	453	—	[34]
Фосфора оксихлорид	$POCl_3$	—	—	2,0	13,6	27,3	35,8	47,4	65,0	81,3	105,1	2	[34]
» пятиокись (метастабильная форма)	P_2O_5	189	220	230	253	270	280	294	314	336	358	—	[34]
Фосфора пятиокись (стабильная форма)	P_2O_5	384	424	442	462	481	493	510	532	556	591	569	[34]
» тribромид	PBr_3	60,0	72,5	83,6	95,5	105,0	116,0	126,3	141,8	157,5	175,0P	38	[34]
» трихлорид	PCl_3	—18,3	+4,6	16,1	20,0	42,7	51,8	63,8	82,0	102,3	124,0	—93,2	[34]
» трехокись	P_2O_3	—	39,7	53,0	57,8	64,0	94,2	108,3	129,0	150,3	173,1	22,5	[34]
Фосфор пятихлористый	PCl_5	55,5	74,0	83,2	92,5	102,5	108,2	117,0	131,3	147,2	162,0	—	[34]
» трехбромистый	PBr_3	7,5	34,4	47,8	69,4	78,0	89,8	103,6	125,2	149,7	175,3	—40	[34]
» треххлористый	PCl_3	—51,0	31,5	—21,3	—10,2	+9,8	10,2	21,0	37,0	56,0	74,2	—111,8	[34]
Франций	Fr	224	—	310		—	—	435	—	—	636	27	[2]
Фтор	F_2	—223,0	—216,9	—214,1	—211,0	—207,7	—205,6	202,7	—198,3	193,2	—188,2	219,7	[55]
Фтора окись	F_2O	—196,1	—186,6	—182,3	177,8	—173,0	170,0	—165,8	—159,0	—151,9	—145,3	—223,9	[56, 57]
Фторсилан	SiH_3F	—150,0	—145,5	—141,2	—136,3	130,8	—127,2	122,4	—116,2	—106,8	—98,0	—	[34]
Фтортрихлорсилан	$SiCl_3F$	—92,6	—76,4	—68,3	59,0	48,8	42,2	—33,2	—19,3	—4,0	+12,2	—120,8	[34]
Хлор	Cl_2	—118,0	106,7	—101,6	—93,3	84,5	—79,0	—71,7	—60,2	47,3	—33,8	100,7	[34]
Хлора двуокись	ClO_2	—	—	—59,0	51,2	—42,5	37,2	—29,4	17,8	—4,0	+11,1	—59	[34]
» окись	Cl_2O	—98,5	—81,6	73,1	—64,3	54,3	—48,0	39,4	—26,5	—12,5	+2,2	—116	[34]
» пятиокись	Cl_2O_5	7,5	30,5	42,0	54,3	66,0	76,3	87,7	104,7	123,8	142,0	3,5	[34]
Хлорный ангидрид	Cl_2O_7	—45,3	23,8	13,2	—2,1	+10,3	18,2	25,1	44,6	62,2	76,8	—91	[34]
Хлорсилан	SiH_3Cl	117,8	—104,3	—97,7	—90,1	—81,6	76,0	—68,5	57,0	—42,5	—30,4	-	[34]
Хлорсульфоновая кислота	HSO_3Cl	32,0	53,5	64,0	75,5	87,6	95,2	105,3	120,0	136,1	151,0P	—80	[34]
Хлортрифторсилан	$SiClF_3$	—144,0	—135,0	—127,0	—120,5	—119,8	—108,2	101,7	—91,7	—81,0	—70,0	—142	[34]
Хлор трехфтористый	ClF_3		—80,4	—71,8	—62,3	—51,3	—44,1	—34,7	—20,7	—4,9	+11,5	—83	[34]
» фтористый	ClF	—	—143,4	—139	—134,3	—128,6	—125,3	—120,8	—114,4	—107,0	—100,5	—145	[34]
Хром	Cr	1665	—	1952	—	—		2221	—	—	2667	1903	[2]
Хрома карбонил	$Cr(CO)_6$	36,0	58,0	68,3	79,5	91,2	98,5	108,0	121,8	137,2	151,0	—	[34]
Хромил хлористый	CrO_2Cl_2	—18,4	+3,2	13,8	26,7	38,5	46,7	56,0	70,2	85,2	117,1	—	[34]
Цезий	Cs	279	341	375	409	449	474	509	561	624	660	28,5	[34]
Цезий бромистый	CsBr	749	836	887	939	993	1026	1072	1140	1221	1300	636	[34]
» иодистый	CsI	738	829	873	923	976	1009	1056	1124	1200	1280	621	[34]
» фтористый	CsF	712	796	844	899	947	960	1025	1092	1170	1251	683	[34]
» хлористый	CsCl	744	837	884	934	989	1023	1069	1139	1217	1300	646	[34]
Цинк	Zn	487	556	593	632	673	700	736	789	844	907	419,4	[34]
Цинк фтористый	ZnF_2	1243	1329	1359	1402	1448	1480	1527	1602	1690	1770	872	[36]
» хлористый	$ZnCl_2$	429	481	508	526	566	584	610	648	689	732	365	[34]
Цирконий четырехбромистый	$ZrBr_4$	207	237	250	266	281	289	301	316	337	357	450	[34]
» четырехиодистый	ZrI_4	264	297	311	329	344	355	369	389	409	431	499	[34]
» четыреххлористый	$ZrCl_4$	181,7	214,7	278,4	242,8	258,1	267,5	279,7	297,5	316,1	334,6	437	[41]

Таблица 12.5

Температуры, °С, при которых устанавливается указанное давление паров неорганических веществ (выше 1 *атм*)

Вещество	Формула	Давление пара, *атм*									Критическая температура, °С	Критическое давление, *атм*	Литература
		1	2	5	10	20	30	40	60	80			
Азот	N_2	—195,8	—189,2	—179,1	—169,8	—157,6	—148,3	—	—	—	—147,2	33,5	[34]
Азота закись	N_2O	—88,5	—75,8	—58,0	—40,7	—18,8	—4,3	+8,0	18,0	27,4	36,5	71,7	[34]
» окись	NO	—151,7	—145,1	—135,7	—127,3	—116,8	—109,0	—103,2	—99,0	—94,8	—92,9	64,6	[34]
» четырехокись	N_2O_4	21,0	37,3	59,8	79,4	100,3	112,3	121,4	137,0	152,2	158	99	[34]
Азот трехфтористый	NF_3	—129,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—39,3±0,1	44,7±0,2	[35]
Аммиак	NH_3	—33,6	—18,7	+4,7	25,7	50,1	66,1	78,9	89,3	98,3	132,4	111,5	[34]
Аргон	Ar	—185,9	—179,0	—166,7	—154,9	—141,3	—132	—124,0	—	—	—122,0	48,0	[34]
Бор трехфтористый	BF_3	—100,7	—89,4	—72,6	—57,7	40,0	—28,4	—19,0	—	—	12,2	49,2	[34]
» треххлористый	BCl_3	12,7	33,2	56,7	135,4	161,6	—	—	—	—	178,8	38,2	[34]
Бром	Br_2	58,2	78,8	110,3	139,6	174,0	197,0	216,0	230,0	243,5	302,2	121	[34]
Вода	H_2O	99,63*	119,62*	151,11*	179,04*	211,38*	232,76*	248,18*	262,70*	274,98*	374,15	225,65	[1]
Водород	H_2	—252,5	—250,2	—246,0	—241,6	—	—	—	—	—	—240,0	12,8	[34]
Водород бромистый	HBr	—66,0	—51,5	—28,1	—8,4	+16,8	33,9	48,1	60,0	70,6	90,0	84,4	[34]
» иодистый	HI	—35,4	—18,9	+7,3	32,0	62,2	82,2	100,7	116,2	127,5	151,0	82,0	[34]
» селенистый	H_2Se	—41,1	—25,2	0,0	+23,4	50,6	69,7	84,6	97,2	106,7	137	91,0	[34]
» фтористый	HF	19,43	37,1	70,4	97,9	130,9	—	—	—	—	—	—	[40]
» хлористый	HCl	—84,9	—71,4	—50,6	—31,7	—6,8	+5,9	17,8	27,9	36,2	51,4	81,6	[34]
Вольфрам шестифтористый	WF_6	17,0	36,4	67,7	87,0	111,5	156,6	172,0	—	—	179,0	45,0	[15]
Гелий	He	—268,6	—268,0		—	—	—	—	—	—	—267,9	2,26	[34]
Дихлордифторсилан	$SiCl_2F_2$	—31,8	—15,1	+11,6	36,6	60,2	80,0	—	—	—	95,8	34,5	[34]
Кислород	O_2	—183,1	—176,0	—164,5	—158,2	—140,0	—130,7	—124,1	—	—	—118,9	49,7	[34]
Кремний четырехфтористый	SiF_4	—94,8	—84,4	—67,9	—52,6	—33,4	—21,2	—	—	—	14,2	36,7	[34]
Криптон	Kr	—152,0	—143,5	—130,0	—118,0	—101,7	—88,8	—78,4	—66,5	—	—63	54	[34]
Молибден гексафтористый	MoF_6	35,0	54,9	88,0	118,3	154,4	178,9	197,5	—	—	211,4	48,7	[16]
Неон	Ne	—246,0	—243,5	—239,9	—236,0	—230,8	—	—	—	—	—228,7	26,9	[34]
Олово хлорное	$SnCl_4$	113,0	141,3	184,3	223,0	270,0	299,9	—	—	—	318,7	37,9	[34]
Перхлорилфторид	$FClO_3$	—46,4	—30,4	—4,7	+18,2	46,0	64,9	79,7	92,3	—	95,17	53,0	[39]
Плутоний шестифтористый	PuF_6	62,16	(85,1)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[19]
Сера шестифтористая	SF_6	—68,2	—53,1	—29,4	—7,8	+18,1	35,7	—	—	—	45,5	37,1	[59]
Сернистый ангидрид	SO_2	—10,0	+6,5	32,1	55,5	83,8	102,6	118,0	130,2	141,7	157,2	77,7	[34]
Серный ангидрид	SO_3	44,8	60,0	82,5	104,0	138,0	157,6	175,0	187,8	198,0	218,3	83,6	[34]
Сероводород	H_2S	—60,4	—45,9	—22,3	—6,4	+25,5	41,9	55,8	66,7	76,3	100,3	88,9	[34]
Синильная кислота	HCN	25,9	45,9	75,8	102,7	135,0	153,8	169,9	183,5	—	183,5	50,0	[34]
Углерода двуокись	CO_2	—78,2	—69,1	—56,7	—39,5	—16,9	—5,3	+5,9	14,0	22,4	31,1	73,0	[34]
» окись	CO	—191,3	—183,6	—170,7	—161,0	—139,7	—131,9	—	—	—	—138,7	34,6	[34]
Уран шестифтористый	UF_6	56,5	—	112,7	139,3	177,3	202,9	222,4	—	—	230,1	45,3	[17]
Фторсилоксилан	$SiCl_3F$	12,2	32,4	64,6	94,2	131,8	156,0	—	—	—	169,3	35,3	[32]
Хлор	Cl_2	—33,8	—16,8	+10,3	35,6	60,0	84,8	101,6	116,2	127,1	144,0	76,1	[34]
Хлорфторсилан	$SiClF_3$	—70,0	—57,3	—37,2	—18,6	+4,1	19,4	—	—	—	34,8	34,2	[34]

* При давлении 1 *атм*.

12.4. ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА

Температуры, °С, при которых устанавливаются указанное давление паров органических веществ (ниже 1 атм)* [34]

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Адипиновая кислота	$C_6H_{10}O_4$	159,5	191,0	205,5	222,0	240,5	251,0	265,0	287,8	312,5	337,5	152,0
Аллилгликолевая кислота	$C_5H_8O_3$	178,5	210,4	225,5	242,4	260,0	271,8	286,0	305,6	332,8	350,5Р	106,5
Аллиловый альдегид	C_3H_4O	33,3	53,4	71,0	85,0	100,2	110,0	123,0	142,1	163,2	183,0	—
Анилин	C_6H_7N	103,0	135,7	151,5	168,3	187,9	199,8	216,0	240,0	266,1	293,0	68,0
Акридин	$C_{13}H_9N$	129,4	165,8	184,0	203,5	224,2	235,7	260,0	284,0	314,3	346,0	110,5
Акриловая кислота	$C_3H_4O_2$	3,5	27,3	39,0	52,0	66,2	75,0	86,1	103,3	122,0	141,0	14,0
Акрилонитрил	C_3H_3N	—51,0	—30,7	—20,3	—9,0	+3,8	11,8	22,8	38,2	58,0	78,5	—82,0
Акролеин	C_3H_4O	—64,5	—46,0	—36,7	—26,2	—15,0	—7,5	+2,5	17,5	34,0	52,5	—87,7
Аллилгликолят	$C_{20}H_{20}O_2$	157,7	181,3	192,1	203,5	215,2	222,5	232,0	247,1	263,6	275,0	70,0
Аллен	C_3H_4	—120,6	108,0	—101,0	—93,4	—85,2	—78,8	—72,5	—61,3	—48,5	—35,0	—136
4-Аллилгваякол	$C_{11}H_{16}O_2$	85,0	113,9	127,0	142,8	158,3	169,6	183,7	204,0	226,2	248,0	—
5-Аллилгваякол	$C_{11}H_{16}O_3$	80,6	113,3	127,0	143,2	159,8	170,7	185,5	206,8	229,8	254,0	—
Аллилдихлоротрихлорсилан	$C_3H_5Cl_5Si$	—3,0	+22,0	34,2	47,6	62,7	72,3	86,2	104,8	127,0	150,3	—
Аллилиодистилловый эфир	$C_6H_{13}O$	—42,7	—23,1	—12,9	—1,8	+10,9	18,7	29,0	41,3	61,7	78,5	—
Аллилизотиоцианат	C_4H_5NS	—2,0	+25,3	38,3	52,1	67,4	76,2	89,5	105,0	129,8	150,7	— 80,0
Аллиловый спирт	C_3H_6O	—20,0	+0,2	10,5	21,7	33,4	40,3	50,0	64,5	80,2	96,8	—129
Аллилтрихлоросилан	$C_3H_5Cl_3Si$	—39,0	—18,2	—7,9	—3,7	16,4	25,0	35,8	52,6	71,4	90,5	—
Аллилтрихлоросилан [60]		—20,7	+2,0	16,1	27,5	40,1	48,3	59,4	76,4	95,9	116,8	—
эфир-Аллилбензол	$C_{11}H_{14}$	27,8	53,0	65,8	79,5	94,1	103,9	116,7	135,8	156,2	178,0	—
Аллилэтилсульфонат	$C_5H_{10}O_3$	8,5	33,7	46,3	60,0	75,5	85,2	97,6	117,3	138,4	160,2	—
Аллилуретан	$C_5H_{11}O_2$	81,3	110,0	124,0	139,7	155,8	165,2	180,5	203,1	227,4	253,2	—
Аллиловый спирт	$C_5H_{12}O$	19,6	34,7	44,9	55,5	68,0	75,5	85,8	102,0	119,8	137,8	—
изо-Аллиловый спирт	$C_5H_{12}O$	—12,9	+7,2	17,2	27,9	38,8	46,0	55,3	69,7	85,7	101,7	—11,9
Аллилметилсилан	$C_4H_{10}Si$	—9,2	+14,7	29,7	39,5	54,4	63,8	76,2	95,0	116,6	139,0	—
Аллилтрихлорсилан	$C_3H_5Cl_3Si$	41,8	69,9	83,6	99,2	116,0	126,6	141,2	162,0	186,3	211,0	—
м-трет-Аллилфенол	$C_{11}H_{16}O$	—	109,8	125,5	142,3	160,3	172,6	189,6	213,0	239,5	266,0	93,0
Анетол	$C_{10}H_{12}O$	62,6	91,0	106,0	121,8	139,3	149,8	164,2	186,1	210,5	235,3	22,5
Анисол	C_7H_8O	0,4	30,0	42,2	55,8	70,7	80,1	90,0	112,3	133,8	155,5	—37,3
Анилин	C_6H_7N	34,8	57,9	69,4	82,0	95,7	106,0	119,9	140,1	161,9	184,4	—6,2
2-Анилиноэтанол	$C_8H_{11}NO$	104,0	134,3	149,6	165,7	183,7	194,0	209,5	230,0	254,5	279,6	—
Анисовый альдегид	$C_8H_8O_2$	73,2	102,6	117,8	133,5	150,5	161,7	176,7	199,0	223,0	248,0	2,5
Антраниловая	$C_{14}H_{11}O_2$	190,0	219,4	234,2	248,3	264,3	273,3	285,0	314,6	346,2	379,9	146,0
Антрацен	$C_{14}H_{10}$	145,0	177,5	187,2	201,9	217,5	231,8	250,0	279,0	310,2	342,0	217,5
Арбутин	$C_{12}H_{16}O_8$	116,0	145,9	160,2	176,2	193,7	204,3	218,0	239,8	262,1	285,0	98,0
Аценафтен	$C_{12}H_{10}$	—	114,8	131,2	148,7	168,2	181,2	197,5	222,1	250,0	277,5	95,0
Ацетальдегид	C_2H_4O	—91,0	—65,1	—56,8	—47,8	—37,8	—31,4	—22,6	—10,0	+4,9	20,2	—123,5
Ацетальдоксим	C_2H_5NO	—5,8	+15,2	25,8	36,5	48,6	56,1	66,2	81,7	98,0	115,0	47,0
Ацетамид	C_2H_5NO	65,0	92,0	105,0	120,0	135,8	145,8	158,0	178,3	200,0	222,0	81,0
Ацетанилид	C_8H_9NO	134,0	146,6	162,0	180,0	199,6	211,8	227,2	250,5	277,0	303,8	113,5
Ацетилен	C_2H_2	—142,9	—133,0	—128,2	—122,8	—116,7	—112,8	—107,9	—100,3	—92,0	—84,0	—81,5
Ацетон	C_3H_6O	—59,4	—40,5	—31,1	—20,8	—9,4	—2,0	+7,7	22,7	39,0	56,5	—94,6
1-Ацетонафтон	$C_{12}H_{10}O$	115,6	146,2	161,5	178,4	196,8	208,6	223,8	246,7	270,5	293,5	—
2-Ацетонафтон	$C_{12}H_{10}O$	120,2	152,3	168,5	185,7	203,8	214,7	229,8	251,6	275,6	301,0	55,5

* Буквой Р отмечена температура разложения, П—температура сублимации.

Продолжение табл. 12.6

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Ацетонитрил	C_2H_3N	—47,0	—26,0	—16,3	—5,0	+7,7	15,9	27,0	43,7	62,5	81,8	—41,0
Ацетофенон	C_8H_8O	37,1	64,0	76,0	92,4	109,4	119,9	133,6	154,2	178,0	202,4	20,5
Бензальдегид	C_7H_6O	26,2	54,1	62,0	75,0	90,1	99,6	112,5	131,7	154,1	179,0	—26,0
Бензантрон	$C_{14}H_{10}O$	225,0	274,5	297,2	322,5	350,0	368,8	390,0	420,5Р	—	—	174,0
Бензгидрол	$C_{13}H_{12}O$	110,0	145,0	162,0	180,5	200,0	212,0	227,5	250,0	275,0	301,0	68,5
Бензил	$C_{14}H_{10}O_2$	128,4	165,2	183,0	202,8	224,5	276,2	276,6	283,5	314,3	347,0	95,0
Бензилгексин	C_7H_9N	29,0	54,8	67,7	81,8	97,9	107,3	120,0	140,0	161,0	184,5	—
Бензилацетат	$C_9H_{10}O_2$	46,0	73,4	87,6	102,5	119,6	129,8	144,0	165,5	189,0	216,5	—51,5
Бензилдихлорсилан	$C_7H_8Cl_2Si$	45,5	70,2	83,2	96,7	111,8	121,3	133,5	152,0	173,0	191,3	—
Бензилизотиоцианат	C_8H_7NS	79,5	107,6	121,8	137,0	153,0	162,6	177,7	198,0	220,4	243,0	—
Бензиловый спирт	C_7H_8O	58,0	80,8	92,6	105,8	119,8	129,3	141,7	160,0	185,0	204,7	—15,3
Бензилфенилевый эфир	$C_{13}H_{12}O$	90,4	127,7	144,0	160,7	180,1	192,6	209,2	233,2	259,8	287,0	—
Бензилсалицилат	$C_{14}H_{12}O_3$	173,5	206,5	221,5	239,3	255,8	267,0	281,5	303,8	326,7	360,0	39,0
Бензилэтиловый эфир	$C_9H_{12}O$	26,0	59,0	65,0	79,6	95,4	105,5	118,9	139,6	161,5	185,0	—
Бензоил хлористый	C_7H_5ClO	32,1	59,1	73,0	87,0	103,8	114,7	128,0	149,5	172,8	197,2	—0,5
Бензол	C_6H_6	130,6	170,2	186,0	207,0	227,6	241,7	258,0	284,4	313,5	343,0	5,5
Бензойная кислота	$C_7H_6O_2$	96,0	119,5	132,1	146,7	162,6	172,8	186,2	205,8	227,0	249,2	121,7
Бензойный ангидрид	$C_{14}H_{10}O_3$	143,8	180,0	198,0	218,0	239,8	252,7	270,4	295,1	328,8	360,0	42,0
Бензол	C_6H_6	—26,7	—39,6	—11,5	—2,6	+7,6	15,4	26,1	42,2	60,6	80,1	5,5
Бензолсульфонилхлорид	$C_6H_5ClO_2S$	65,0	96,0	112,0	129,0	147,7	159,2	174,5	198,0	224,0	251,5Р	14,5
Бензонитрил	C_7H_5N	34,5	71,7	86,5	100,2	116,6	127,0	141,0	161,3	185,0	209,0	—13
Бензофенон	$C_{13}H_{10}O$	168,2	141,7	157,6	175,8	196,7	208,2	224,4	249,6	276,8	305,4	48,5
Бензтрихлорсилан [60]	$C_7H_5Cl_3Si_2$	—	—	77,7	92,9	109,6	120,1	134,2	155,2	178,6	202,9	—
Борсинкарбонил	CH_3BO	—139,2	—127,8	—121,1	—114,1	—106,6	—101,5	—95,0	85,6	—74,8	—64,0	—
d-Борнилацетат	$C_{12}H_{20}O_2$	46,9	75,7	90,2	106,0	123,7	135,7	149,8	172,0	197,5	223,0	29,4
Борнилбутират	$C_{14}H_{24}O_2$	74,0	106,4	118,0	133,8	150,7	161,8	176,4	198,0	222,2	247,0	—
Борнилизобутират	$C_{14}H_{24}O_2$	70,0	99,8	114,0	130,0	147,2	157,6	172,2	194,2	218,2	243,0	—
Борнилпропионат	$C_{13}H_{22}O_2$	64,6	95,7	108,0	123,7	140,1	151,2	165,7	187,5	211,2	235,0	—
Борнилформиат	$C_{11}H_{18}O_2$	47,0	74,8	89,3	104,0	121,2	131,7	145,8	166,4	190,2	214,0	—
Брассидиновая кислота	$C_{22}H_{42}O_2$	209,6	241,7	256,0	272,9	290,0	301,5	316,2	336,8	359,6	382,5Р	61,5
4-Броманизол	C_7H_7BrO	48,6	77,8	91,9	107,8	125,0	136,0	150,1	172,7	197,5	225,0	12,5
Бромбензол	C_6H_5Br	2,9	27,8	40,0	53,8	68,6	79,1	90,8	110,1	132,3	156,2	—30,7
1-Бромбутан	C_4H_9Br	—33,0	—11,2	—0,3	+11,6	24,8	33,3	44,7	62,0	81,7	101,6	—112,4
1-Бром-2-бутанол	C_4H_9BrO	23,7	45,4	56,8	67,2	79,5	87,0	97,6	112,1	128,0	145,0	—
1-Бром-2-бутанон	C_4H_7BrO	6,2	30,0	41,8	54,2	66,2	77,3	89,2	107,0	126,3	147,0	—
цис-1-Бром-1-бутен	C_4H_7Br	—44,0	—23,9	—12,8	—1,4	+11,5	19,8	30,8	47,8	65,8	86,9	—
транс-1-Бром-1-бутен	C_4H_7Br	—38,4	—17,0	—6,4	+6,4	18,4	27,2	38,1	55,7	75,0	94,7	—100,3
2-Бром-2-бутен	C_4H_7Br	47,3	—27,0	—16,5	—5,5	+7,2	15,4	26,3	42,8	61,9	81,0	—133,4
цис-2-Бром-2-бутен	C_4H_7Br	—39,0	—17,9	—7,2	+4,6	17,7	26,2	37,5	54,5	74,0	93,9	—111,2
транс-2-Бром-2-бутен	C_4H_7Br	45,0	—24,4	—13,8	—2,4	+10,5	18,7	29,9	46,5	66,0	85,5	—114,6
4-Бромдифенил	$C_{12}H_9Br$	56,0	133,7	150,0	169,8	190,8	204,5	221,8	248,2	277,7	310,0	50,5
2-Бром-4,6-дихлорфенол	$C_6H_3BrCl_2O$	84,0	116,6	130,8	147,7	166,8	177,6	193,2	216,5	242,0	268,0	68,0
Бромистый бензил	C_7H_7Br	47,0	75,4	89,8	105,4	122,6	133,4	147,7	169,2	193,7	219,5	4,0
2-Бром-1,4-диоксан	$C_4H_7BrO_2$	37,5	65,0	79,8	95,0	110,6	121,6	135,7	155,4	181,0	206,7	5,5
1-Бром-3-метилбутан	C_5H_9Br	—20,4	12,1	13,6	26,4	39,6	48,7	60,4	78,7	99,4	120,4	—
1-Бромнафталин	$C_{10}H_7Br$	84,2	117,6	133,6	150,2	170,2	183,5	198,8	224,2	252,0	281,1	5,5
2-Бром-2-нитропропан	C_3H_6BrNO	33,5	14,0	4,0	16,0	17,9	25,9	35,2	50,0	66,2	80,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	80	100	400	760	
3-Бромпиридин	C_5H_4BrN	16,8	42,0	55,2	69,1	84,1	95,1	107,8	127,7	160,0	173,4	—
1-Бромпропан	C_3H_7Br	−53,0	−30,4	−23,3	−12,4	−0,3	+7,6	19,0	34,0	52,0	71,0	−109,9
2-Бромпропан	C_3H_7Br	−61,8	−42,5	−32,8	−23,0	−10,1	−2,5	+8,0	23,8	41,6	60,0	−89,0
о-Бромтолуол	C_7H_7Br	32,2	60,6	73,4	89,3	104,8	115,6	129,6	150,6	175,2	198,5	−4,0
2-Бромтолуол	C_7H_7Br	24,4	49,7	62,3	76,0	91,0	100,0	112,0	133,6	157,2	180,8	−28,0
3-Бромтолуол	C_7H_7Br	14,8	36,8	49,0	58,1	92,9	101,1	117,6	138,0	160,0	183,7	−39,8
4-Бромтолуол	C_7H_7Br	10,3	40,5	51,1	76,9	91,6	102,3	116,4	137,4	160,2	184,5	28,5
3-Бром-2,4,6-трихлорфенол	$C_6H_2BrCl_3O$	112,4	146,2	163,2	184,8	200,5	213,0	220,3	255,0	278,0	305,8	—
Бромуксусная кислота	$C_2H_3BrO_2$	54,7	81,6	94,1	109,2	124,0	135,5	146,3	165,8	186,7	208,0	49,5
2-Бром-4-фенилфенол	$C_{12}H_9BrO$	100,0	135,4	152,3	171,8	193,6	207,0	224,5	251,0	280,2	311,0	96,0
1,4-Бромхлорбензол	C_6H_4BrCl	32,0	59,5	72,7	87,9	103,8	114,8	128,0	149,5	172,6	196,9	—
1-Бром-1-хлорэтан	C_2H_4BrCl	−36,0	−18,0	−9,4	0,0	+10,4	17,0	23,0	44,7	65,4	82,7	16,6
1-Бром-2-хлорэтан	C_2H_4BrCl	−25,8	−7,0	+4,1	16,0	29,7	38,0	49,5	66,8	86,0	106,7	−16,6
1-Бром-4-хлорбензол	C_6H_4BrCl	30,4	42,5	74,0	50,2	108,5	121,0	135,5	156,5	182,0	206,0	−45,0
(2-Бромэтил)-бензол	C_8H_9Br	48,0	76,9	90,5	106,9	125,2	135,8	148,2	169,8	194,0	219,0	—
1-Бромэтилен	C_2H_3Br	−95,4	−77,8	−68,8	58,8	−48,1	−41,2	−31,9	−17,2	−1,1	+15,8	−139,0
2-Бромэтиловый-2-хлорэтиловый эфир	C_4H_8BrClO	36,5	66,2	76,3	90,8	106,6	116,4	129,8	150,0	172,3	195,8	—
(2-Бромэтил)-циклогексан	$C_8H_{15}Br$	38,7	66,6	80,5	96,8	113,0	123,7	135,0	160,0	186,2	213,0	—
1,2-Бутадиен	C_4H_6	−80,0	−72,7	−64,2	−54,9	−44,3	−37,5	−28,3	−14,2	+1,8	18,5	—
1,3-Бутадиен	C_4H_6	−102,8	−87,6	−79,7	−71,0	−61,3	−55,1	−46,8	−33,9	−19,3	−4,5	−108,9
Бутан	C_4H_{10}	−101,5	−86,7	−77,8	−68,9	−59,1	−52,8	−44,2	−31,2	−16,3	−0,5	−138,0
1,3-Бутандиол	$C_4H_{10}O_2$	22,2	67,5	85,8	100,0	117,4	127,5	141,2	161,0	183,8	206,5	77
2,3-Бутандиол	$C_4H_{10}O_2$	44,0	68,4	80,3	93,4	107,8	116,3	127,8	145,8	164,0	182,0	22,5
2-Бутанол	$C_4H_{10}O$	−48,3	−28,0	−17,7	−6,0	+6,0	14,0	25,0	41,6	60,0	79,6	−85,9
1,2,3-Бутантриол	$C_4H_{10}O_3$	102,0	132,0	146,0	161,0	176,0	188,0	202,5	222,0	243,5	264,0	—
1-Бутен	C_4H_8	−104,8	−89,4	−81,6	−73,0	−63,4	−57,2	−48,9	−36,9	−21,7	−6,3	−130
цис-2-Бутен	C_4H_8	−96,4	−81,1	−73,4	−64,6	−54,7	−48,4	−39,8	−26,8	−12,0	+3,7	−138,9
транс-2-Бутен	C_4H_8	−98,4	−84,0	−76,3	−67,6	−57,6	−51,3	−42,7	−29,7	−14,8	+0,9	−105,4
Бутадиен	C_4H_6	−93,9	−77,7	−70,0	−61,3	−51,7	−45,3	−37,1	−24,1	10,1	+5,3	—
3-Бутенонитрил	C_4H_5N	−19,6	+2,9	14,1	26,6	40,0	48,8	60,2	78,0	98,0	119,0	—
Бутилакрилат	$C_7H_{12}O_2$	−0,5	+26,5	35,5	48,5	63,4	72,6	85,1	104,0	125,2	147,4	−64,6
Бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	22,7	48,8	62,0	76,3	92,4	102,6	116,2	136,0	159,2	183,1	−81,2
орто-Бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	18,6	44,2	57,0	70,6	86,2	96,0	109,5	128,8	150,3	173,0	−32,7
мета-Бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	13,0	39,0	51,7	66,6	80,8	90,6	103,8	123,7	145,8	168,5	−58,0
орто-Бутилгликолят	$C_6H_{12}O_3$	28,2	53,6	66,0	79,8	94,2	104,0	116,4	135,5	155,6	177,5	—
4-*трет*-Бутил-2-крезол	$C_{11}H_{16}O$	74,3	103,7	118,0	134,0	150,8	161,7	176,2	197,8	221,8	247,0	—
2-*втор*-Бутил-4-крезол	$C_{11}H_{16}O$	70,0	96,0	112,0	127,2	143,0	153,7	167,0	187,8	210,0	232,0	—
4-*трет*-Бутил-2,6-ксиленол	$C_{12}H_{18}O$	88,2	119,8	135,0	151,0	169,8	180,5	195,0	217,5	241,3	265,3	—
4-*трет*-Бутил-2-6-ксиленол	$C_{12}H_{18}O$	74,0	103,9	119,0	135,0	152,2	163,5	176,0	196,0	217,8	240,8	—
6-*трет*-Бутил-2,4-ксиленол	$C_{12}H_{18}O$	70,3	100,2	115,0	131,0	148,5	158,2	172,0	192,5	214,2	236,5	—
6-*трет*-Бутил-3,4-ксиленол	$C_{12}H_{18}O$	63,9	103,6	127,0	143,0	160,7	170,0	184,0	204,5	226,7	249,5	—
Бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	−1,2	+20,0	30,2	41,5	53,4	60,3	70,1	84,3	100,8	117,5	−79,9

Продолжение табл. 12.6

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
втор-Бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	−12,2	−7,2	10,9	27,3	38,1	45,9	54,1	67,9	83,9	99,5	−114,7
трет-Бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	−30,4	−3,0	+5,5	14,3	24,5	31,0	39,8	52,7	68,0	82,9	25,3
Бутилфенилсилан	$C_{10}H_{16}Si$	23,4	−1,3	9,9	22,1	35,9	44,7	56,3	74,0	93,8	115,0	—
Бутилтрехлорсилан	$C_4H_9SiCl_3$	27,1	53,8	67,5	82,0	98,3	108,3	123,2	144,0	167,5	192,0	—
4-*трет*-Бутилфенилдихлорфосфат	$C_{10}H_{13}Cl_2O_2P$	56,0	129,6	146,0	164,0	184,3	197,2	214,3	240,0	268,2	299,0	—
4-*трет*-Бутилфенилсалицилат	$C_{17}H_{18}O_3$	166,2	206,6	225,0	247,3	270,7	285,5	305,8	336,0	370,5	404,0*	
2-(4-*трет*-Бутилфенокси)-этилацетат	$C_{14}H_{20}O_3$	118,0	150,0	165,8	183,3	201,5	212,8	228,0	260,3	277,5	304,4	
2-*втор*-Бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	57,4	86,0	100,8	116,1	133,4	143,9	157,3	179,7	203,8	228,0	—
2-*трет*-Бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	56,6	84,2	98,1	113,0	129,2	140,0	153,5	173,8	196,3	219,5	—
4-*втор*-Бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	71,4	100,5	114,8	130,3	147,8	157,9	172,4	194,3	217,6	242,1	—
4-*трет*-Бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	70,0	98,9	114,0	129,5	146,0	156,0	170,2	191,5	214,0	238,0	99,0
Бутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	−26,4	−4,7	+6,1	18,0	31,0	39,8	51,0	67,9	86,2	106,0	—
втор-Бутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	−34,4	−13,3	−3,1	+8,4	21,3	28,0	40,2	56,8	75,2	93,6	—
трет-Бутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	−32,7	−11,9	−1,2	+10,2	23,4	31,8	42,8	59,8	78,2	98,0	—
втор-Бутилтрихлорацетат	$C_6H_{11}ClO_2$	17,0	41,8	54,6	68,2	83,6	93,0	106,5	124,1	146,0	167,8	—
втор-Бутилхлорид	C_4H_9Cl	−66,2	−39,8	−29,2	−17,7	−5,0	−3,4	14,2	31,5	50,0	68,0	−131,3
трет-Бутилхлорид	C_4H_9Cl		—		—	−19,0	−11,4	−1,0	+14,6	32,8	51,0	−26,5
2-Бутил-2-этилбутан-1,3-диол	$C_{10}H_{22}O_2$	94,1	122,6	136,8	151,2	167,8	178,0	191,9	212,0	233,5	255,0	—
2-*трет*-Бутил-4-этилфенол	$C_{12}H_{18}O$	76,3	106,2	121,0	137,0	154,0	165,4	179,0	200,3	223,8	247,8	—
1-Бутен	C_4H_8	−82,5	76,7	−68,7	59,9	−50,0	−43,4	−34,9	−21,6	−6,9	+8,7	−130
2-Бутен	C_4H_8	−73,0	−57,9	−50,5	−42,0	−33,9	−27,8	−18,8	−5,0	+10,6	27,2	32,5
Бутиронитрил	C_4H_7N	−20,0	+2,1	13,4	25,7	39,4	47,3	59,0	76,7	96,8	117,0	
Валериановая кислота	$C_5H_{10}O_2$	42,2	67,7	79,8	93,1	107,8	116,6	128,3	146,0	165,0	184,4	−34,5
α-Валеролактон	$C_5H_8O_2$	37,5	65,8	79,8	95,2	103,9	122,4	136,5	157,7	182,3	207,5	
Валеронитрил	C_5H_9N	6,0	+18,1	30,0	43,3	57,8	66,9	78,6	97,7	118,7	140,8	—
Ванилин	$C_8H_8O_3$	107,0	138,4	154,0	170,5	188,7	199,8	214,5	237,3	260,0	285,0	81,5
2-Винилпиридин	C_7H_7N	41,9	68,0	81,0	94,7	110,0	119,8	132,3	151,8	172,1	194,0	—
3-Винилпиридин	C_7H_7N	43,4	69,9	83,0	97,2	112,5	122,3	135,3	154,0	175,8	197,5	—
4-Винилпиридин	C_7H_7N	45,2	72,0	85,7	100,0	116,0	126,1	139,7	159,0	182,0	204,5	—
Винилацетат	$C_4H_6O_2$	−48,0	−28,0	−18,0	7,0	+5,3	13,0	23,3	38,4	55,5	72,5	—
Винилтрихлорсилан [60]	$C_2H_3Cl_3Si$		—	10,7	+14,3	14,5	22,9	34,2	51,3	70,5	90,0	—
Винилтриэтоксисилан [60]	$C_8H_{18}O_3Si$	—		49,4	62,6	77,2	86,4	96,9	117,6	138,6	160,5	—
4-Винилфенол	C_8H_8O	64,0	91,7	105,6	120,3	136,3	146,4	159,8	180,0	202,5	225,0*	-
Гваякол	$C_7H_8O_2$	100,0	132,0	149,0	165,0	184,0	195,8	211,9	235,3	261,2	288,0	91,0
Гексадиметилциклотрисилоксан	$C_6H_{18}O_3Si_3$	93,2	123,0	138,5	154,2	171,8	183,3	198,0	219,5	244,7	270,0	—
Гексадиметилциклотетрасилоксан	$C_8H_{24}O_4Si_4$	103,5	135,3	150,5	167,7	186,3	197,5	213,8	236,7	263,0	290,0	31,5
Гексадекан	$C_{16}H_{34}$	105,3	135,2	149,8	166,7	181,3	193,2	208,5	231,7	258,3	287,5	18,5
2-Гексадеканол	$C_{16}H_{34}O$	109,8	151,5	167,3	184,6	203,7	215,0	230,5	254,4	279,8	307,0	—
1-Гексадецен	$C_{16}H_{32}$	101,0	131,7	146,2	162,0	178,8	190,8	205,3	226,8	250,0	274,0	4,0
1,5-Гексадиен-3-ин	C_6H_6	−45,1	−24,4	14,0	−2,8	+10,0	16,1	29,5	46,0	64,4	84,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура кипения, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Гексанолат	$C_{12}H_{26}$	204,0	240,0	257,4	276,8	296,2	307,8	323,2	348,4	374,6	399,8	56,6
Гексаметилдисилоксан	$C_6H_{18}OSi_2$	29,0	—7,8	+2,8	14,0	26,7	34,7	45,6	61,6	80,0	99,2	—
Гексаметилциклотрисилоксан	$C_6H_{18}O_3Si_3$	—	—	—	—	—	67,5	78,7	90,9	114,7	134,0	64,0
Гексан	C_6H_{14}	—53,9	—34,6	—25,0	—14,1	—2,3	+5,4	15,8	31,4	49,6	68,7	—95,3
1-Гексанол	$C_6H_{14}O$	24,4	47,2	56,2	70,3	83,7	92,0	102,8	119,6	138,0	157,0	—51,6
2-Гексанол	$C_6H_{14}O$	14,6	34,6	45,0	55,9	67,9	76,0	87,3	105,7	124,8	139,8	—
3-Гексанол	$C_6H_{14}O$	2,5	25,7	36,7	48,0	59,2	70,7	81,8	98,3	117,0	135,5	—
2-Гексанон	$C_6H_{12}O$	7,7	28,6	39,8	50,0	62,0	69,8	79,8	94,0	111,4	127,5	—56,9
Гексахлорбензол	C_6Cl_6	114,4	149,3	166,4	185,7	206,0	219,0	235,5	258,5	283,5	309,4	230,0
Гексахлорэтан	C_2Cl_6	32,7	49,9	73,5	87,6	102,3	112,0	124,2	143,1	163,8	186,6	186,6
Гексилтолуол	$C_{13}H_{20}$		134,3	150,3	168,0	187,7	199,7	216,0	241,7	268,6	298,3	130,0
Гексилциклотрисилоксан	$C_{18}H_{36}O_3Si_3$	—	—	123,0	137,1	152,9	165,1	177,1	198,6	223,6	250,3	—
1-Гексен	C_6H_{12}	—57,5	—38,0	—28,1	—17,2	—5,0	+2,8	13,0	29,0	46,8	66,0	—96,5
Гексилдеканоат	$C_{16}H_{32}O_2$	90,0	120,0	134,7	150,2	167,8	179,0	193,6	215,7	241,0	266,3	—
Гексилтриметилсилан	$C_9H_{22}Si$	6,7	32,0	44,8	58,0	74,0	83,8	97,2	117,0	139,5	163,0	—
Гептадекан	$C_{17}H_{36}$	152,6	188,0	207,4	229,2	243,4	255,3	272,0	296,5	323,8	350,5	40,4
Гептадеканол	$C_{17}H_{36}O$	115,0	145,2	160,0	177,7	195,8	207,3	223,0	247,8	274,5	303,0	22,5
2-Гептадеканон	$C_{17}H_{34}O$	129,6	164,6	178,0	196,4	214,3	226,7	242,0	265,8	291,7	319,5	—
Гептаконтан	$C_{70}H_{142}$	211,7	248,6	266,9	284,6	300,7	318,3	333,5	359,4	385,0	410,6	59,5
Гептан	C_7H_{16}	34,0	—12,7	2,1	+19,5	32,3	39,6	48,8	68,7	78,0	98,4	—90,6
1-Гептанол	$C_7H_{16}O$	42,4	64,3	74,7	85,8	99,8	108,0	119,5	136,6	155,6	175,8	81,6
2-Гептанол	$C_7H_{16}O$	19,3	43,6	55,5	67,7	81,2	89,8	100,0	116,1	137,2	156,2	—
4-Гептанол	$C_7H_{16}O$	23,0	44,4	55,0	66,2	78,1	85,2	96,0	111,2	127,3	143,7	—32,6
2-Гептен	C_7H_{14}	35,8	—14,1	—3,5	+8,3	21,5	30,0	41,3	58,6	78,1	98,5	—
Гептилбензол	$C_{13}H_{20}$	66,2	94,6	109,0	124,2	141,6	151,5	165,7	188,6	210,0	233,0	—
Гептилтриметилсилан	$C_{10}H_{24}Si$	29,3	48,7	62,1	76,4	95,4	102,9	116,5	137,0	159,8	184,0	—
Геранилацетат	$C_{12}H_{20}O_2$	73,5	102,7	117,9	133,0	150,0	160,5	175,2	196,3	218,8	242,80	—
Геранилбутират	$C_{14}H_{24}O_2$	96,8	125,2	139,6	155,8	170,1	180,2	193,6	214,0	236,0	257,4	—
Геранилизобутират	$C_{14}H_{24}O_2$	90,7	119,6	133,0	147,9	164,0	174,0	187,7	207,6	228,5	251,0	—
Геранилформиат	$C_{11}H_{18}O_2$	61,8	90,3	104,3	119,8	136,2	147,2	160,7	182,6	205,8	230,0	—
Геранол	$C_{10}H_{18}O$	69,2	96,8	110,0	125,6	141,8	151,5	165,3	185,6	207,8	230,0	—
Гидрокоричная кислота	$C_9H_{10}O_3$	162,2	193,5	148,7	165,0	183,3	194,0	209,0	230,8	255,0	279,8	49,5
Гидрохинон	$C_6H_6O_2$	132,4	153,3	163,5	174,6	192,0	203,0	216,5	238,0	262,5	286,9	170,3
Гликольдиацетат	$C_6H_{10}O_4$	39,3	64,1	77,1	90,3	106,1	115,8	129,0	147,8	168,3	190,5	—31,0
Глицерин	$C_3H_8O_3$	125,5	157,6	167,2	189,2	199,0	208,0	220,1	240,0	263,0	290,0	17,9
Глутаровая кислота	$C_5H_8O_4$	156,5	183,6	196,0	210,5	226,3	235,5	247,0	266,0	293,5	303,0	97,5
Глутаровый ангидрид	$C_5H_6O_3$	100,8	135,3	149,5	166,0	185,5	196,2	212,5	236,5	261,0	287,0	
Глутаронитрил	$C_5H_6N_2$	91,3	123,7	140,0	150,5	176,4	189,5	208,5	230,0	257,3	286,2	—
Глутарилхлорид	$C_5H_6Cl_2O_2$	56,1	84,0	97,8	112,3	128,5	139,1	151,8	172,4	195,3	217,0	—
Дегидрацетовая кислота	$C_8H_8O_4$	91,7	122,0	137,5	153,0	171,0	181,5	197,5	219,5	244,5	269,0	—
Дезоксибензоин	$C_{14}H_{12}O$	123,3	156,2	173,5	192,0	212,0	224,6	241,3	266,2	293,0	324,0	60,0
Декаметилтетрасилоксан	$C_{20}H_{30}O_3Si_4$	37,3	61,5	74,3	89,5	104,0	114,2	127,3	147,4	169,8	193,5	—
Декаметилциклопентасилоксан	$C_{10}H_{30}O_5Si_5$	45,2	72,3	86,2	101,0	117,7	127,8	142,0	162,0	186,0	210,0	38,0
цис-Декалин	$C_{10}H_{18}$	39,5	50,1	64,2	79,8	97,2	108,0	123,2	145,4	168,9	194,6	—43,0

Продолжение табл. 12.6

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
транс-Декалин	$C_{10}H_{18}$	−0,8	+30,6	47,2	65,3	85,7	98,4	114,6	136,2	160,1	186,7	−30,7
Декан	$C_{10}H_{22}$	17,1	42,5	55,4	69,1	84,6	94,6	108,0	127,8	149,9	173,0	−29,7
Декан-2-он	$C_{10}H_{20}O$	44,2	71,9	85,8	100,7	117,1	127,8	142,0	163,2	186,7	211,0	3,5
1-Децен	$C_{10}H_{20}$	14,7	40,3	53,7	67,8	81,3	93,6	106,5	126,7	149,2	192,0	–
Деканол, спирт	$C_{10}H_{22}O$	69,5	97,3	111,3	125,8	142,1	152,0	165,8	186,2	208,9	231,0	7,0
Децилтрихлорсилан	$C_{10}H_{21}Cl_3Si$	67,4	95,4	111,0	126,5	144,0	154,0	169,5	191,0	215,5	240,0	—
Децилтрифенилсилан	$C_{31}H_{38}Si$	108,5	140,1	160,6	172,4	191,7	203,5	218,3	241,0	267,5	289,0	—
Диаллилдихлорсилан	$C_6H_{12}Cl_2Si$	9,5	34,8	47,4	61,3	76,4	86,3	99,7	119,4	142,0	165,5	—
Диаллилсульфид	$C_6H_{10}S$	−9,5	+14,4	26,6	39,7	54,2	63,7	75,8	94,8	116,1	138,0	−83,0
Диацетамид	$C_4H_7NO_2$	70,0	95,0	106,0	122,6	138,2	148,0	160,6	180,8	202,0	223,0	78,5
Дибензил	$C_{14}H_{14}$	86,8	119,8	130,0	153,7	170,7	186,0	202,8	227,8	255,0	284,0	51,5
Дибензиламин	$C_{14}H_{15}N$	112,5	149,8	165,6	182,9	200,2	212,2	227,3	249,8	274,3	300,0	26,0
1,4-Дибромбензол	$C_6H_4Br_2$	61,0	79,3	87,7	103,6	120,8	131,6	146,5	168,5	192,5	218,6	87,5
1,2-Дибромбутан	$C_4H_8Br_2$	7,5	33,9	46,1	60,0	76,0	86,0	99,8	120,2	145,5	166,3	−64,5
dl-2,3-Дибромбутан	$C_4H_8Br_2$	5,0	30,0	41,6	56,4	72,0	82,0	95,3	116,7	138,0	160,5	—
мезо-2,3-Дибромбутан	$C_4H_8Br_2$	1,3	26,6	35,3	53,2	68,2	78,0	91,7	111,8	134,2	157,3	−34,5
1,4-Дибромбутан	$C_4H_8Br_2$	32,0	58,8	79,4	87,6	104,0	116,1	128,7	140,8	173,8	197,5	−20
1,2-Дибромдецан	$C_{10}H_{20}Br_2$	95,7	120,6	137,3	151,0	167,4	177,5	190,9	209,6	229,8	250,4	—
α, β-Дибромянтарный ангидрид	$C_4H_2Br_2O_3$	60,0	78,0	92,0	106,7	123,5	130,8	147,7	168,0	192,0	213,0	—
Дибромметан	CH_2Br_2	−35,1	−13,2	−2,4	+0,7	23,3	30,6	42,3	58,5	79,8	96,6	−52,8
1,2-Дибром-2-метилпропан	$C_4H_8Br_2$	−26,8	−3,0	+10,6	25,7	42,3	53,7	68,6	92,1	119,8	149,0	−70,3
1,3-Дибром-2-метилпропан	$C_4H_8Br_2$	14,0	40,0	53,0	67,5	83,5	93,7	107,4	117,8	150,5	174,6	·
1,2-Дибромпентан	$C_5H_{10}Br_2$	19,9	45,4	58,0	72,0	87,4	97,4	110,1	130,2	151,6	175,0	–
1,2-Дибромгексан	$C_6H_{12}Br_2$	−7,0	+17,5	29,4	42,3	57,2	66,4	78,7	97,8	118,5	141,6	−55,5
1,3-Дибромпропан	$C_3H_6Br_2$	9,7	35,4	48,0	62,1	77,8	87,6	101,3	121,7	144,1	167,0	−34,4
2,3-Дибром-1-пропанол	$C_3H_6Br_2O$	57,0	84,5	96,2	113,5	129,8	140,0	153,0	173,6	196,0	219,0	—
2,3-Дибромпропен	$C_3H_4Br_2$	−6,0	+17,9	30,0	43,2	57,8	67,0	79,5	98,0	119,5	141,2	—
1,2-Дибромэтан	$C_2H_4Br_2$	−27,0	+4,7	18,6	32,7	48,0	57,9	70,4	89,8	110,1	131,5	10
(1,2-Дибромэтил)-бензол	$C_8H_8Br_2$	86,0	115,6	129,5	145,2	161,8	172,2	186,3	207,8	230,0	254,0	—
Ди-(2-бромэтилтиол) эфир	$C_4H_8Br_2O$	47,7	76,3	88,5	103,6	119,8	130,0	144,0	165,0	188,0	212,5	—
Дибутилдисульфид	$C_8H_{18}S_2$	34,6	73,4	94,0	117,5	145,1	163,0	186,0	227,8	275,5	330,5	—
2,6-Ди-*трет*-бутил-4-крезол	$C_{15}H_{24}O$	85,8	116,2	131,0	147,0	164,1	175,2	190,0	212,8	237,6	262,5	—
4,6-Ди-*трет*-бутил-2-крезол	$C_{15}H_{24}O$	86,2	117,3	132,4	149,0	167,4	179,0	194,0	217,5	243,4	269,3	—
4,6-Ди-*трет*-бутил-3-крезол	$C_{15}H_{24}O$	102,7	135,2	150,6	167,4	185,3	196,1	211,0	233,0	257,1	282,0	—
Дибутилсульфид	$C_8H_{18}S$	21,7	51,8	66,4	80,5	96,0	105,8	118,6	138,0	159,0	182,0	−79,7
2,4-Ди-*трет*-бутилфенол	$C_{14}H_{22}O$	84,5	115,4	130,0	146,0	164,3	175,8	190,0	212,5	237,0	260,8	—
Дибутилфталат	$C_{16}H_{22}O_4$	148,2	182,1	198,2	216,2	235,6	247,8	263,7	287,0	313,5	340,0	—
2,6-Ди-*трет*-бутил-4-этилфенол	$C_{16}H_{26}O$	89,1	121,4	137,0	154,0	172,1	183,9	198,0	220,0	244,0	268,6	—
4,6-Ди-*трет*-бутил-3-этилфенол	$C_{16}H_{26}O$	111,5	142,6	157,4	174,0	192,3	204,4	218,0	241,7	264,6	290,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
1,3-Диизопропилбензол	$C_{12}H_{18}$	39,7	60,0	73,8	86,7	100,6	110,0	130,0	151,4	176,2	199,5П	−66,9
Дитидрокарвеол	$C_{10}H_{18}O$	63,9	91,8	105,0	120,2	136,1	146,3	159,8	180,1	202,8	225,0	—
1-Декандиол-1,2	$C_{10}H_{22}O$	46,6	75,5	90,0	106,0	123,7	134,7	149,7	171,8	197,0	223,0	—
1,4-Дитидроксиантрахинон	$C_{14}H_{10}O_4$	196,7	239,8	268,8	289,0	307,4	323,2	344,5	377,5Р	413,4Р	460,0Р	194,0
Дитидроксиантрацеллол	$C_{14}H_{22}O_2$	69,0	91,7	103,0	115,0	127,6	136,7	145,0	160,2	176,8	193,5	—
Диизоамиловый эфир	$C_{10}H_{22}O$	18,6	44,2	57,0	70,7	86,3	96,0	109,6	129,0	150,3	173,4	—
Диизоамилоксалат	$C_{12}H_{22}O_4$	85,4	116,0	131,4	147,7	165,7	177,0	192,2	215,0	240,0	265,0	—
Диизоамилсульфид	$C_{10}H_{22}S$	43,0	73,0	87,6	102,7	120,0	130,6	145,3	166,4	191,0	216,0	—
Диизобутиламин	$C_8H_{19}N$	−5,1	+16,4	30,6	43,7	57,8	67,0	79,2	97,6	118,0	139,5	−70,0
Диизобутилоксалат	$C_{12}H_{22}O_4$	68,2	91,2	105,3	120,3	137,5	147,8	161,5	183,5	205,8	229,5	—
Диизобутил-d-тартрат	$C_{12}H_{22}O_6$	117,9	151,8	169,0	188,0	208,5	221,0	236,6	264,7	294,0	324,0	73,5
1,2-Диизопропилбензол	$C_{12}H_{18}$	40,0	67,8	81,8	96,8	114,0	124,5	138,7	159,8	184,3	209,0	—
1,3-Диизопропилбензол	$C_{12}H_{18}$	34,7	62,0	76,0	91,2	107,5	118,2	132,3	153,7	177,6	202,0	−105,0
Диизопропиловый эфир	$C_6H_{14}O$	−57,0	−37,4	27,4	−16,7	−4,5	+3,4	13,7	30,0	48,2	67,5	−60,0
Диизопропилоксалат	$C_8H_{14}O_4$	43,2	69,0	81,2	95,6	110,5	120,0	132,6	154,2	171,8	193,5	—
Диизопропил-d-тартрат	$C_{10}H_{18}O_6$	106,7	133,7	148,2	164,0	181,8	192,6	207,3	228,2	251,5	275,0	—
Дикарвилпролилен-(6-хлор-2-ксенил) фосфат	$C_{30}H_{41}ClO_4P$	204,2	234,6	249,3	264,5	280,5	290,7	304,9	323,8	342,0	361,0	—
Дикарвилпрол-2-толил-фосфат	$C_{30}H_{39}O_4P$	180,2	209,3	221,8	237,0	251,5	260,3	272,5	290,0	309,8	330,0	—
Диметиламин	C_2H_7N	−87,7	−72,2	−69,6	−56,0	−46,7	−40,7	−32,6	−20,1	−7,1	+7,4	−96,0
N, N-Диметиланилин	$C_8H_{11}N$	29,5	56,3	70,0	84,8	101,6	111,9	125,8	146,5	169,2	193,1	2,6
Диметиларсенилат	$C_2H_{12}AsNO_4$	15,0	39,6	51,8	65,0	79,7	88,6	101,0	119,8	140,0	160,5	—
Ди-(о-метилбензиловый) эфир	$C_{16}H_{18}O$	96,7	128,0	144,0	166,3	179,6	191,5	206,8	229,7	254,8	281,0	—
2,2-Диметилбутан	C_6H_{14}	−69,3	50,0	−44,5	−31,1	−19,5	−19,1	−9,0	+10,4	31,0	49,7	−95,8
2,3-Диметилбутан	C_6H_{14}	−58,6	−41,5	34,9	−24,1	−12,4	−4,3	+5,1	21,1	39,0	58,0	−128,2
2,2-Диметилгексан	C_8H_{18}	−29,7	−7,9	−3,1	10,0	28,2	36,7	48,9	65,7	85,6	106,8	—
2,3-Диметилгексан	C_8H_{18}	−23,0	−1,1	+9,9	22,1	30,6	44,2	56,0	73,8	94,1	115,6	—
2,4-Диметилгексан	C_8H_{18}	−28,9	−5,3	−5,2	17,2	30,5	39,0	50,6	68,1	88,2	109,4	—
2,5-Диметилгексан	C_8H_{18}	−26,7	−5,5	+5,3	17,2	30,4	38,9	50,5	68,0	87,9	109,1	90,7
3,3-Диметилгексан	C_8H_{18}	−25,8	−4,4	−6,1	18,2	31,7	40,4	52,5	70,0	90,4	112,0	—
3,4-Диметилгексан	C_8H_{18}	−22,1	+0,2	11,3	23,6	37,1	45,8	57,7	75,6	98,0	117,7	—
Диметилборан	$C_2H_{10}B_2$	−106,5	90,3	−82,1	−73,0	−62,4	55,8	47,0	30,7	−18,8	−2,6	−150,2
Диметилдихлорсилан (60)	$C_2H_6Cl_2Si$	—	—	−24,8	−13,7	−1,4	+6,5	17,2	33,2	51,4	70,5	—
Диметилоксалат	$C_4H_6O_4$	69,3	94,0	106,6	119,7	133,7	142,6	155,7	174,0	189,8	208,0	38,0
Диметил-l-малат	$C_6H_{12}O_6$	75,4	104,0	118,3	133,8	150,1	160,4	175,1	196,3	219,5	242,6	—
Диметилмалонат	$C_5H_8O_4$	45,7	73,0	86,4	101,3	117,2	127,1	140,3	160,0	182,9	205,0	—
Диметилмалеат	$C_6H_8O_4$	55,0	83,8	72,0	85,0	100,0	109,7	121,9	140,0	159,8	180,7	−62
транс-Диметилфумарат	$C_6H_8O_4$	46,8	74,0	87,8	102,1	118,0	127,6	141,5	161,0	185,5	206,0	—
Диметиловый эфир	C_2H_6O	−115,7	−101,1	−93,6	−85,2	−76,2	−70,4	−62,7	−50,9	−37,8	−21,7	−138,5
Диметилтиоксалат	$C_4H_6O_2S_2$	20,0	44,0	56,0	69,4	83,6	92,5	104,8	123,3	143,3	163,3	—
2,7-Диметилоктан	$C_{10}H_{22}$	6,3	30,5	42,3	55,8	71,2	80,9	93,9	114,0	136,0	159,7	−59,8
2,2-Диметилпентан	C_7H_{16}	−49,0	−28,7	19,7	7,5	+5,0	13,0	23,0	40,3	59,2	79,2	−123,7
2,3-Диметилпентан	C_7H_{16}	−42,0	−20,8	−10,3	−1,1	13,9	22,1	33,3	50,1	69,4	89,8	−135,0
2,4-Диметилпентан	C_7H_{16}	−48,0	−27,1	17,1	5,9	16,5	14,5	25,4	41,8	60,6	80,5	−119,0
3,3-Диметилпентан	C_7H_{16}	−45,9	−25,0	−14,4	−2,9	−8,9	16,1	29,3	46,2	65,0	86,1	135,0

Продолжение табл. 12.6

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
2,5-Диметил-3-гептанон	$C_9H_{18}O$	5,2	26,0	36,7	47,7	59,6	67,2	77,0	91,8	109,0	173,7	—
3,5-Диметил-1,2-пирон	$C_7H_8O_2$	78,0	107,6	122,0	136,4	152,7	163,8	177,5	198,0	221,0	245,0	51,5
2,2-Диметилпропан	C_5H_{12}	—102,0	—96,4	—76,7	67,2	—66,1	—49,0	—39,1	—23,7	7,1	9,5	—16,6
4,6-Диметилрезорцин	$C_8H_{10}O_2$	49,0	76,8	90,7	106,8	122,5	133,2	147,3	167,8	192,0	215,0	
Диметилсебацинат	$C_{12}H_{22}O_4$	104,0	139,8	156,2	175,8	196,0	208,0	222,6	246,0	269,6	295,5	39,0
Диметилсилан	C_2H_8Si	—110,0	—101,5	—93,1	—84,8	—75,7	—69,7	—61,4	—48,9	—35,0	—20,1	
2,4-Диэтилгептан	$C_{11}H_{24}$	39,2	61,9	75,8	90,8	107,7	118,0	132,3	153,2	177,5	202,0[1]	—
2,5-Диэтилгексан	$C_{10}H_{22}$	29,0	55,9	69,0	84,0	100,2	110,7	124,7	145,6	168,7	190,0[1]	
Диметилсульфид	C_2H_6S	—75,6	—56,0	—48,2	—39,4	—26,4	—21,4	—12,0	+2,6	18,7	36,0	—93,2
Диметилсурьма	C_2H_7Sb	44,0	72,0	86,0	101,7	118,3	129,2	143,5	164,0	187,2	211,0	—
Диметил-*dl*-тартрат	$C_6H_{10}O_6$	100,4	131,9	147,5	164,0	182,4	193,9	209,5	232,3	257,4	282,0	88,0
Диметил-*d*-тартрат	$C_6H_{10}O_6$	102,1	133,2	148,2	164,3	182,4	193,8	209,6	230,5	255,0	280,0	81,5
3,3-Диметил-2-тиобутан [61]	$C_6H_{12}S$	—34,7	—13,8	—3,3	+8,4	21,5	29,8	41,2	58,4	78,0	98,9	—88,3
N, N-Диметил-2-толуидин	$C_9H_{13}N$	29,6	54,1	66,2	80,2	95,0	105,2	118,1	139,8	161,5	184,8	—61,0
N, N-Диметил-4-толуидин	$C_9H_{13}N$	50,1	74,3	86,7	100,0	116,3	126,4	140,3	161,6	185,4	209,5	
Диметилфенилсилан	$C_8H_{12}Si$	5,3	30,3	42,6	56,2	71,4	81,3	94,2	114,2	136,4	159,3	—
Диметилфталат	$C_{10}H_{10}O_4$	100,3	131,8	147,6	164,0	182,8	194,0	210,0	232,7	257,8	283,7	
1,1-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—24,4	—1,4	+10,3	23,0	37,8	45,7	57,9	76,2	97,2	119,5	—34,0
цис-1,2-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—15,9	+7,3	18,4	31,1	45,3	54,4	66,8	85,6	107,0	129,7	—50,0
транс-1,2-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—21,1	+1,7	13,0	25,6	39,7	48,7	61,0	79,6	100,9	123,4	—88,0
цис-1,3-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—19,4	+3,1	14,9	27,4	41,4	50,4	62,5	81,0	102,1	124,4	—92,0
транс-1,3-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—22,7	0,0	+11,2	23,8	37,5	46,4	58,5	76,9	97,8	120,1	—70,2
цис-1,4-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—20,0	+3,2	14,5	27,1	41,1	50,1	62,3	80,8	101,9	124,3	—87,4
транс-1,4-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—24,3	—1,7	+10,1	22,6	36,5	45,4	57,6	76,0	97,0	119,3	—36,9
Диметилцитраконат	$C_7H_{10}O_4$	50,8	78,2	91,8	106,6	122,0	132,7	145,8	165,8	188,0	210,5	—
α, α-Диметилянтарный ангидрид	$C_6H_8O_3$	61,4	88,1	102,0	116,3	132,3	142,4	155,3	175,8	197,5	219,5	
1,2-Диметоксиэтан	$C_4H_{10}O_2$	—46,0	—26,2	—15,3	—3,0	+10,7	19,7	31,8	50,0	70,8	93,0	—
Ди-(2-метоксиэтиловый) эфир	$C_6H_{14}O_3$	13,0	37,6	50,0	63,0	77,5	86,8	99,5	118,0	138,5	159,8	—
Ди-(нитроэтил)-амин	$C_4H_8N_2O_2$	3,2	27,8	40,0	53,7	68,2	77,7	90,3	110,0	131,3	153,0	—
Ди-(нитроэтил)-нитрамин	$C_4H_7N_3O_4$	18,5	44,6	57,7	71,8	87,6	97,6	111,0	131,4	153,6	176,9	—
1,4-Диоксан	$C_4H_8O_2$	—35,8	—12,8	—1,2	+12,0	26,2	33,8	45,1	62,3	81,8	101,1	10,0
1,4-Диоксан-2,6-дион	$C_4H_4O_4$	—	105,0	116,6	132,0	148,6	158,2	171,2	194,0	217,0	240,0	97,0
Диоксифенол	$C_{10}H_{12}O_2$	66,7	95,4	110,0	124,0	140,2	151,3	165,6	186,2	208,5	232,0	—
Диметин	$C_{10}H_{16}$	14,0	40,4	53,6	68,9	84,3	94,6	108,3	128,2	150,6	174,0	—
Дипропиленгликоль	$C_6H_{14}O_3$	73,8	102,1	116,2	131,3	147,4	156,5	169,9	189,9	210,5	231,8	—
Дипропиленгликоль, изопропилиден эфир	$C_9H_{18}O_3$	46,0	72,8	86,2	100,6	117,0	126,8	140,3	160,0	185,1	205,6	—
Дипропиленгликоль, ди-н-бутилиден эфир	$C_{15}H_{28}O_3$	64,7	92,0	106,0	120,4	136,3	146,3	159,8	180,0	205,8	227,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Дипропиленгликоль эфир	$C_6H_{14}O$	—43,3	—22,3	—11,8	0,0	+13,2	21,6	30,0	50,3	66,5	80,5	—122,0
Дипропилоксалат	$C_8H_{14}O_4$	55,4	80,2	93,9	108,6	124,6	134,5	148,1	168,0	190,3	213,5	—
Дипропилсукцинат	$C_{10}H_{18}O_4$	77,5	107,6	122,2	138,0	154,8	166,0	180,3	202,5	226,5	250,8	—
Дипропил-d-тартрат	$C_{10}H_{18}O_6$	115,6	147,7	163,5	180,4	199,7	211,7	227,0	250,0	275,6	303,0	—
1,2-Дипропоксиэтан	$C_8H_{18}O_2$	—38,8	—10,7	—5,0	22,3	42,3	56,9	74,2	103,8	140,0	180,0	—
Дифенил	$C_{12}H_{10}$	70,6	101,8	117,0	134,2	152,5	165,2	180,7	204,2	229,4	254,9	69,5
Дифениламин	$C_{12}H_{11}N$	108,3	141,7	157,0	175,2	194,3	206,9	222,8	247,0	274,1	302,0	52,9
1,1-Дифенилгидразин	$C_{12}H_{12}N_2$	126,0	159,3	176,1	194,0	213,5	225,9	242,5	267,2	294,0	322,2	44,0
Дифенилсульфид	$C_{12}H_{10}S$	131,6	164,0	180,0	197,0	214,8	226,2	241,3	267,0	285,8	310,0	61,0
Дифенилдихлорсилан [60]	$C_{12}H_{10}Cl_2Si$	—	—	156,4	175,2	194,0	205,9	222,2	246,8	274,8	304,4	—
Дифенилметан	$C_{13}H_{12}$	76,0	107,4	122,6	139,6	157,8	170,2	185,3	210,7	237,5	264,5	26,5
Дифениловый эфир	$C_{12}H_{10}O$	66,1	97,8	114,0	130,8	150,0	162,0	178,6	203,3	230,7	258,5	27,0
1-Дифенилоксо-2,3-эпоксипропан	$C_{15}H_{12}O_2$	136,3	169,9	187,2	205,8	226,3	239,7	255,0	280,4	309,8	340,0	—
1,3-Дифенил-2-пропанон	$C_{15}H_{14}O$	126,6	159,8	177,6	196,7	216,8	229,4	246,6	272,3	301,7	330,0	34,5
Дифенилселенид	$C_{12}H_{10}Se$	105,7	138,4	154,4	172,9	192,2	204,8	220,8	246,1	273,2	301,5	2,5
Дифенилсульфид	$C_{12}H_{10}S$	96,1	129,0	145,0	162,0	182,8	194,8	211,8	236,8	263,9	292,0	—
Дифенил-2-толилтиофосфат	$C_{13}H_{13}O_3PS$	159,7	170,8	201,6	215,5	230,6	240,4	262,5	270,3	290,0	310,0	—
Дифенилхлорфосфат	$C_{12}H_{10}ClPO_3$	121,5	160,5	182,0	203,8	227,9	244,2	266,0	299,5	337,2	376,0	—
1,1-Дифенилэтилен	$C_{14}H_{12}$	87,4	119,6	135,0	151,6	170,8	183,4	198,6	222,8	249,8	277,0	—
транс-Дифенилэтилен	$C_{14}H_{12}$	113,2	145,8	161,0	179,8	196,0	211,5	227,4	251,7	287,3	306,5	124,0
Дифтордифенилсилан	$C_{12}H_{10}F_2Si$	68,4	100,1	115,5	131,6	149,6	160,6	176,3	199,0	225,4	252,5	—
1,1-Дифторэтан	$C_2H_4F_2$	—112,5	—98,4	—91,7	84,1	—76,8	—72,4	—64,2	—52,0	38,5	—26,5	—117,0
1,2-Дихлорбензол	$C_6H_4Cl_2$	20,0	46,0	59,1	73,4	89,4	99,5	112,9	133,4	155,8	179,0	—17,0
1,3-Дихлорбензол	$C_6H_4Cl_2$	12,1	39,0	52,0	66,2	82,0	92,2	105,0	125,9	149,0	173,0	—24,2
1,4-Дихлорбензол	$C_6H_4Cl_2$	—	—	54,8	69,2	84,8	95,2	108,4	128,3	150,2	173,9	53,0
1,2-Дихлорбутан	$C_4H_8Cl_2$	—23,6	0,3	+11,5	24,6	37,7	47,8	60,2	79,7	100,8	123,5	—80,4
2,3-Дихлорбутан	$C_4H_8Cl_2$	25,2	—3,0	+8,5	21,2	35,0	43,9	56,0	74,0	94,2	116,0	—
1,5-Дихлоргексаметилтрисилоксан	$C_6H_{16}Cl_2O_2Si_3$	26,0	52,0	65,1	79,0	94,6	105,0	118,2	138,3	160,2	184,0	—53,0
Дихлордиизопропиловый эфир	$C_6H_{12}Cl_2O$	39,6	55,2	68,2	82,2	97,3	106,9	119,7	139,0	159,8	182,7	—
Дихлордиметилсилан	$C_2H_6Cl_2Si$	—63,5	—33,8	—23,8	—12,7	—0,4	+7,4	17,5	33,9	51,9	70,3	—86,0
Дихлордифенилсилан	$C_{12}H_{10}Cl_2Si$	109,6	142,4	158,0	176,0	195,5	207,5	223,8	248,0	275,5	302,0	—
Дихлордифторметан	CCl_2F_2	—118,5	—104,6	—97,8	—90,1	—81,6	—76,1	—68,6	—57,0	—43,9	—29,8	—
1,2-Дихлор-1,2-дифторэтилен	$C_2Cl_2F_2$	—82,0	—66,6	—57,3	—49,3	—38,2	—31,8	—23,0	—10,0	+6,0	20,5	112
Дихлорметилсилан	CH_4Cl_2Si	—9,2	+13,7	25,4	37,7	51,6	63,0	71,8	86,8	110,0	130,4	
Дихлорметан	CH_2Cl_2	—70,0	—52,1	—43,3	—33,4	—22,3	—15,7	—6,3	+8,0	24,1	40,7	—96,7
Дихлорметилфенол	CH_2AlCl_2	—11,1	+13,2	24,3	37,0	51,5	60,6	73,0	91,8	112,7	134,5	59
1,1-Дихлор-2-метилпропан	$C_4H_8Cl_2$	—31,0	—8,8	+2,6	15,2	29,3	38,0	50,0	67,7	85,8	105,0	—
1,2-Дихлор-2-метилпропан	$C_4H_8Cl_2$	—26,8	—4,2	+6,7	18,7	32,0	40,2	51,7	68,0	87,8	108,0	—
1,3-Дихлор-2-метилпропан	$C_4H_8Cl_2$	—3,0	+20,6	32,0	44,8	58,6	67,5	78,8	93,1	110,4	135,0	—

Продолжение табл. 12.6

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Дихлорметилсилан	CH_4Cl_2Si	−75,0	−56,9	−47,6	−37,7	−26,2	−19,0	−9,0	−6,2	23,7	41,9	—
Дихлорметилфенилсилан [60]	$C_7H_8Cl_2Si$	35,7	63,0	77,4	92,4	109,5	120,0	134,2	155,5	180,2	205,0	
Дихлор-1-нафтилсилан	$C_{10}H_6Cl_2S$	106,2	134,6	149,2	164,5	181,7	192,0	205,9	225,6	249,7	273,3	—
1,7-Дихлоруглеметилтетрасилоксан	$C_5H_{16}Cl_2O_3Si_4$	53,3	81,7	96,8	111,0	127,8	139,0	152,7	174,2	197,8	222,0	—72,0
1,2-Дихлорпропан	$C_3H_6Cl_2$	−39,6	17,0	−6,1	+6,0	19,4	28,0	39,4	57,0	76,0	96,8	—
1,3-Дихлор-2-пропанол	$C_3H_6Cl_2O$	28,0	59,2	64,7	78,0	93,0	102,0	114,8	134,3	153,5	174,3	—
2,3-Дихлорстирол	$C_8H_6Cl_2$	61,0	90,1	104,6	120,5	137,8	149,0	163,6	185,7P	210,0P	235,0P	—
2,4-Дихлорстирол	$C_8H_6Cl_2$	53,5	82,2	97,4	111,8	129,2	140,0	153,8	176,0P	200,0P	225,0P	—
2,5-Дихлорстирол	$C_8H_6Cl_2$	55,5	83,9	98,2	114,0	131,0	142,0	156,8	178,0P	202,5P	227,0P	—
2,6-Дихлорстирол	$C_8H_6Cl_2$	47,8	75,7	90,0	105,5	122,4	133,3	147,6	169,0P	193,5P	217,0P	—
3,4-Дихлорстирол	$C_8H_6Cl_2$	67,9	86,0	100,4	116,2	133,7	144,8	159,2	181,5P	206,7P	230,0P	—
3,5-Дихлорстирол	$C_8H_6Cl_2$	53,5	82,2	97,4	111,8	129,2	140,0	153,8	176,0P	200,0P	225,0P	—
1,3-Дихлортетраметилдисилоксан	$C_4H_{12}Cl_2OSi_2$	−7,4	+16,3	28,3	41,0	55,7	64,8	76,0	95,8	116,8	138,0	−37
1,2-Дихлор-1,1,2,2-тетрафторэтан	$C_2Cl_2F_4$	−90,4	50,0	−72,3	−63,5	−53,7	−47,5	−39,1	−26,3	−12,0	+3,5	−94
1,2-Дихлортетрметилбензол	$C_{10}H_{12}Cl_2$	105,6	138,7	155,0	172,5	192,2	204,8	220,7	245,8	272,8	302,0	—
1,4-Дихлортетрметилбензол	$C_{10}H_{12}Cl_2$	91,7	126,1	143,8	162,0	183,2	196,8	212,0	238,5	265,8	296,0	—
Дихлор-4-толилсилан	$C_7H_6Cl_2Si$	46,2	71,7	84,2	97,8	113,2	122,6	135,5	153,0	175,2	196,3	—
α, α-Дихлортолуол	$C_7H_6Cl_2$	35,4	64,0	78,7	94,3	112,1	123,4	138,3	160,7	187,0	214,0	−16,1
3,4-Дихлор-α, α, α-трифтортолуол	$C_7H_5Cl_2F_3$	11,0	38,3	52,2	67,3	84,0	95,0	109,0	129,0	150,5	172,6	−12,1
Дихлоруксусная кислота	$C_2H_2Cl_2O_2$	44,0	69,8	82,6	96,3	111,8	121,5	134,0	152,3	173,7	194,4	9,7
Дихлорфениларсин	$C_6H_5AsCl_2$	61,8	100,0	116,0	133,1	151,0	163,2	178,9	202,8	228,8	250,5	—
α, α-Дихлорфенилацетонитрил	$C_8H_5Cl_2N$	58,0	84,0	99,1	113,8	130,0	141,0	154,5	176,2	199,5	223,5	—
2,4-Дихлорфенол	$C_6H_4Cl_2O$	53,0	80,0	92,8	107,7	124,4	135,5	146,0	165,2	187,5	210,0	45,0
2,6-Дихлорфенол	$C_6H_4Cl_2O$	60,0	87,6	101,	116,6	131,0	141,8	154,0	175,5	197,7	220,0	
Дихлорфторметан	$CHCl_2F$	51,3	−75,5	−67,6	58,6	−49,8	−42,0	−33,9	−20,9	−6,2	+8,9	−135
1,1-Дихлорэтан [62]	$C_2H_4Cl_2$	−61,4	−42,4	−32,8	−22,3	10,7	−3,3	10,8	21,9	30,1	57,1	97,0
1,2-Дихлорэтан	$C_2H_4Cl_2$	−44,5	−24,0	−13,6	−2,4	+10,0	18,1	29,1	46,7	64,0	82,4	−36,3
1,2-Дихлор-3-этилбензол	$C_8H_8Cl_2$	46,0	75,0	90,0	106,9	123,8	135,0	149,8	172,0	197,0	221,1	20,8
1,2-Дихлор-4-этилбензол	$C_8H_8Cl_2$	47,0	77,2	92,3	109,6	127,5	139,0	153,3	176,0	201,7	226,6	−70,4
1,4-Дихлор-2-этилбензол	$C_8H_8Cl_2$	35,5	68,0	83,2	99,6	118,0	129,0	144,0	166,2	191,5	216,3	61,2
1,1-Дихлорэтилен	$C_2H_2Cl_2$	−77,2	−60,0	−51,2	41,7	−31,1	−24,0	−15,0	−1,0	+14,8	31,7	−122,0
цис-1,2-Дихлорэтилен	$C_2H_2Cl_2$	58,4	−39,2	−29,9	−19,4	−7,9	−0,5	−9,0	24,0	41,0	59,0	−80,5
транс-1,2-Дихлорэтилен	$C_2H_2Cl_2$	−60,1	−47,2	−38,0	−26,0	−17,0	−10,0	−0,2	+14,3	30,8	47,8	−50,0
Ди-(хлорэтиловый) эфир	$C_4H_8Cl_2O$	23,5	49,0	62,0	76,0	91,5	101,5	114,0	134,0	155,4	178,5	—
1,2-Дихлорметилтрихлорсилан [60]	$C_2H_6Cl_6Si$	—	—	61,1	75,7	94,6	101,7	115,2	136,2	157,6	180,6	—
Дихлорметилфенилсилан	$C_7H_8Cl_2Si$	48,5	77,8	92,3	108,7	126,2	137,6	152,3	175,7	201,0	225,5	—
Ди-(2-хлорэтил)-метил	$C_5H_{10}Cl_2O$	53,0	80,4	94,0	109,5	126,5	135,6	149,6	170,0	192,0	215,0	—
Дихлортокиметилсилан	$C_3H_8Cl_2OSi$	−33,8	−12,1	−1,3	+11,3	24,1	32,6	44,1	61,0	80,3	102,6	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Диэтилдихлорсилилметилфосфонат	$C_5H_{12}Cl_2OSi$	52,4	80,7	94,6	110,0	126,2	137,5	161,4	172,6	197,2	222,2	—
Диоксан	$C_4H_8O_2$	−56,6	8[illegible],2	−36,8	−30,1	−22,7	−17,9	51,6	−42,0	−33,0	−21,0	34,4
Дициклопентадиен	$C_{10}H_{12}$	·	34,1	47,6	62,0	77,9	88,0	101,7	121,6	144,2	169,0	32,9
Диэтилоксалат	$C_6H_{10}O_4$	74,0	106,0	123,4	139,3	154,6	165,8	179,0	198,2	219,1	240,0	−21,0
Диэтиламин	$C_4H_{11}N$	·	—	−33,0	−22,6	−11,3	−4,0	+6,0	21,0	38,0	55,0	−38,9
N-Диэтиланилин	$C_{10}H_{15}N$	49,7	76,0	91,9	107,2	123,6	139,6	147,3	166,2	192,4	215,5	−34,4
Диэтилдиазоацетат	$C_6H_{12}N_2O_2$	38,0	62,6	74,8	88,0	102,6	111,8	123,6	141,9	161,1	181,0	—
Диэтилкетон	$C_5H_{10}O$	−23,0	−2,3	6,0	19,6	31,9	39,8	50,1	66,3	84,0	102,2	—
1,2-Диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	25,6	50,6	63,3	76,9	92,0	101,7	114,7	133,6	154,3	176,0	—
1,3-Диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	21,7	47,6	60,9	76,0	91,4	101,7	115,4	136,8	157,9	182,2	−64,2
1,4-Диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	19,4	46,8	59,0	73,4	86,6	100,0	114,0	134,8	157,7	182,6	—
Диэтилгексагидроанилин	$C_{10}H_{21}N$	139,6	175,8	194,0	213,0	235,0	248,5	265,0	292,8	324,8	356,0	—
Диэтилглутарат	$C_9H_{16}O_4$	65,6	94,7	109,7	125,4	142,8	153,2	167,8	189,5	212,8	237,0	—
Диэтилдиоксисукцинат	$C_8H_{14}O_6$	70,0	96,0	112,0	126,8	143,8	153,7	167,7	188,0	210,8	233,5	—
Диэтилдифторсилан	$C_4H_{10}F_2Si$	−56,8	−39,1	−26,6	−16,6	−7,3	−0,2	+9,8	24,2	40,6	56,0	—
Диэтилдихлорсилан (60)	$C_4H_{10}Cl_2Si$	—	·	21,0	33,7	47,9	56,9	69,1	87,6	108,4	130,4	—
Диэтилдиэтиленгликоль	$C_8H_{18}O_3$	91,6	120,0	133,6	148,0	164,3	174,0	187,5	207,0	226,5	244,8	—
Диэтиленгликоль, бутиловый эфир	$C_8H_{18}O_3$	70,0	95,7	107,8	120,6	135,5	146,0	159,8	181,9	205,0	231,2	—
Диэтиленгликоль, этиловый эфир	$C_6H_{14}O_3$	46,3	72,0	85,8	100,3	116,7	126,6	140,3	159,0	180,3	201,9	—
Диэтиленгликоль-бис-хлорацетат	$C_8H_{12}Cl_2O_5$	146,3	180,0	196,8	212,0	229,0	239,5	252,0	271,5	291,8	313,0	—
Диэтилизосукцинат	$C_8H_{14}O_4$	39,6	66,7	80,0	94,7	111,0	121,4	134,8	155,1	177,7	201,3	—
Диэтилитаконат	$C_9H_{14}O_4$	51,3	80,2	95,2	111,0	128,2	139,9	154,3	177,5	203,1	227,9	—
Диэтилкарбонат	$C_5H_{10}O_3$	10,1	−12,3	23,8	36,0	49,5	57,9	69,7	86,5	105,8	125,8	−43
Диэтилмалонат	$C_7H_{12}O_4$	80,7	110,4	125,6	141,2	157,8	169,0	183,9	205,5	228,5	253,4	—
Диэтилмаленинат	$C_8H_{14}O_4$	57,3	85,6	100,0	115,3	131,8	142,4	156,0	177,6	201,7	225,0	—
Диэтилоксалат	$C_6H_{10}O_4$	36,0	67,6	81,3	95,9	113,3	123,0	136,2	155,5	176,8	199,6	−40,8
Диэтилсукцинат	$C_8H_{14}O_4$	62,6	91,0	106,5	120,3	137,3	147,9	161,6	183,2	206,2	229,0	—
Диэтиловый эфир	$C_4H_{10}O$	−74,3	−56,9	−48,1	−39,5	−27,7	−21,6	−11,6	+2,2	17,9	34,6	−116,3
Диэтилоксалат	$C_6H_{12}O_2$	47,4	71,8	83,8	96,8	110,6	119,7	130,6	147,9	160,2	185,7	−10,6
Диэтил-γ-оксиэтилат	$C_{11}H_{20}O_6$	121,0	160,3	165,7	181,0	197,7	208,3	221,6	242,0	264,5	286,0	—
Диэтилоксибутинат	$C_{14}H_{26}O_4$	120,3	156,2	172,1	189,8	207,5	218,4	234,4	265,8	280,3	305,5	1,3
Диэтилселенид	$C_4H_{10}Se$	−25,7	−4,0	+7,0	19,0	31,2	40,3	51,8	69,0	88,0	109,0	—
2,5-Диэтилтиофен	C_8H_{12}	49,7	78,4	92,6	108,5	125,8	136,8	151,0	173,2	198,0	223,0П	—
Диэтилсукцинат	$C_8H_{14}O_4$	64,6	83,0	96,6	111,7	127,6	138,2	151,1	171,7	193,8	216,5	−30,8
Диэтилсульфат	$C_4H_{10}O_4S$	47,0	74,0	87,7	102,1	118,0	128,6	142,5	162,5	186,5	209,5Р	−25,0
Диэтилсульфид	$C_4H_{10}S$	−39,6	−16,6	6,0	+3,5	16,1	24,2	35,0	51,3	69,7	88,0	−99,6
Диэтилсульфит	$C_4H_{10}O_3S$	10,0	34,2	46,4	59,7	74,2	83,8	96,3	115,8	137,0	159,0	—
Диэтил-d-тартрат	$C_8H_{14}O_6$	102,0	130,0	146,0	164,2	182,3	194,0	208,5	230,4	254,6	280,0	—
Диэтил-dl-тартрат	$C_8H_{14}O_6$	100,0	131,7	147,2	163,8	181,7	193,2	208,0	230,0	204,3	280,0	—
3,5-Диэтилтолуол	$C_{11}H_{16}$	31,8	60,0	72,7	87,8	104,0	115,3	129,1	150,1	174,0	199,0	—
Диэтилфталат	$C_{12}H_{14}O_4$	108,8	140,7	156,0	173,8	192,1	204,1	219,5	243,0	267,5	294,0	—
Диэтилфумарат	$C_8H_{12}O_4$	58,2	81,9	95,3	110,2	126,7	137,7	151,1	179,2	195,8	218,5	0,6
Диэтилцинк	$C_4H_{10}Zn$	22,4	0,0	+17,7	24,2	38,0	47,2	59,1	77,0	97,3	118,0	−28
цис-Диэтилцитраконат	$C_9H_{14}O_4$	59,8	89,3	103,0	118,2	136,7	146,2	160,0	182,3	206,5	230,3	—

Продолжение табл. 12.6

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Диэтилвиниловый эфир	$C_6H_{12}O_2$	50,8	77,8	91,6	106,0	122,4	132,4	146,0	166,0	189,7	211,5	—
Диэтилметилсилиловый эфир	$C_{10}H_{12}O_3$	44,7	72,0	86,7	100,3	116,7	126,7	140,8	161,0	184,1	207,6	—
1,15-Диэтоксипентадекаметилпентасилоксан	$C_{20}H_{51}O_6Si_5$	133,7	164,5	179,7	196,0	213,8	224,7	240,0	261,8	286,0	311,5	—
1,5-Диэтоксигексаметилтрисилоксан	$C_{10}H_{28}O_4Si_3$	41,8	68,0	80,7	94,5	110,0	120,0	133,2	152,0	174,0	196,0	—
1,9-Диэтоксидекаметилпентасилоксан	$C_{14}H_{40}O_6Si_5$	89,0	117,5	131,5	146,3	162,2	172,5	187,0	207,0	230,0	253,3	—
Диэтоксиметилсилан	$C_5H_{14}O_2Si$	−19,1	+2,4	13,3	25,3	38,0	46,3	57,6	74,2	93,2	113,5	—
Диэтоксидифенилсилан	$C_{16}H_{20}O_2Si$	111,6	142,8	157,6	174,3	193,2	206,0	220,0	243,8	269,7	295,0	—
1,11-Диэтоксидодекаметилгексасилоксан	$C_{20}H_{54}O_7Si_6$	103,6	133,4	147,5	163,0	180,0	190,5	206,5	226,7	250,0	273,5	—
Диэтоксиметилфенилсилан	$C_{11}H_{18}O_2Si$	66,5	83,6	97,2	112,0	127,5	137,8	151,2	171,6	193,8	216,0	—
1,7-Диэтоксиоктаметилтетрасилоксан	$C_{18}H_{54}O_5Si_4$	67,7	96,2	108,6	123,0	139,0	148,5	162,0	182,3	204,0	227,5	—
1,13-Диэтоксиэтилтетрадекаметилгептасилоксан	$C_{18}H_{45}O_8Si_7$	119,0	149,2	163,5	180,0	197,0	208,2	223,2	244,7	266,2	288,5	—
1,3-Диэтоксиэтилтетраметилдисилоксан	$C_8H_{23}O_3Si_4$	14,8	39,3	51,2	64,3	78,7	87,9	100,3	118,8	139,8	160,7	—
1,2-Диэтоксиэтан	$C_6H_{14}O_2$	−33,5	−10,2	+1,6	14,7	29,7	39,0	51,8	71,8	94,1	119,0	—
Диэтин	C_4H_6	−95,8	−83,2	−76,8	−70,1	−62,7	−57,8	−51,8	−42,6	−33,0	−21,0	−34,4
Додекаметилпентасилоксан	$C_{12}H_{36}O_4Si_5$	66,6	84,1	98,0	112,7	128,8	139,4	152,8	173,8	195,5	220,5	—
Додекаметилциклогексасилоксан	$C_{12}H_{36}O_6Si_6$	67,3	95,6	110,0	124,7	141,8	151,8	166,3	187,1	210,6	235,0	−3,0
Додекан	$C_{12}H_{26}$	47,7	75,7	89,0	104,3	121,4	131,7	145,5	165,8	188,4	214,5	−9,6
Додекан-2-он	$C_{12}H_{24}O$	77,1	106,0	120,2	136,0	152,4	163,9	177,5	199,0	222,6	246,5	—
1-Додецен	$C_{12}H_{24}$	47,2	74,0	87,8	102,4	118,6	128,5	142,3	162,2	185,5	209,0	−31,5
Додециламин	$C_{12}H_{27}N$	82,2	111,8	127,5	141,6	157,4	169,0	182,1	203,0	225,0	248,0	—
Додециловый спирт	$C_{12}H_{26}O$	91,0	120,2	134,7	150,0	167,2	177,6	192,0	213,0	235,7	259,0	24,0
Додецилтриметилсилан	$C_{15}H_{34}Si$	91,2	122,1	137,7	153,6	172,1	184,2	199,5	222,0	248,0	273,0	—
Додекаметилдекасилоксан	$C_{22}H_{66}O_9Si_{10}$	160,3	189,8	202,8	217,5	233,8	243,0	255,0	273,0	293,8	314,0	—
Декалин	$C_{10}H_{18}$	157,6	195,4	213,0	233,5	254,5	268,3	286,0	314,2	343,5	376,0	44,0
Изоамилацетат	$C_7H_{14}O_2$	0,0	23,7	30,2	47,8	62,1	71,0	83,2	101,3	121,5	142,0	—
Изоамилбензоат	$C_{12}H_{16}O_2$	72,0	104,0	121,6	139,7	158,3	171,4	189,8	210,2	236,8	262,0	—
Изоамилбутиратт	$C_9H_{18}O_2$	21,2	47,1	60,9	74,0	90,0	99,6	113,1	133,2	155,3	178,6	—
Изоамилизобутиратт	$C_9H_{18}O_2$	14,8	40,1	52,8	66,8	81,8	91,7	104,4	124,2	146,0	168,8	—
Изоамилизовалерат	$C_{10}H_{20}O_2$	27,0	54,4	68,6	83,6	100,6	111,3	125,1	146,1	169,5	194,0	—
Изоамилпивалат	$C_{10}H_{18}O_2$	75,6	102,0	118,8	134,4	151,7	162,6	177,0	198,1	222,7	247,0	—
Изоамилнитрат	$C_5H_{11}NO_3$	5,2	28,6	40,3	53,5	67,6	76,3	88,6	106,7	126,5	147,5	—
Изоамиловый спирт	$C_5H_{12}O$	10,0	30,9	40,8	51,7	63,2	71,0	80,7	95,8	113,7	130,6	−117,2
Изоамилформиат	$C_6H_{12}O_2$	17,5	5,4	17,1	30,0	44,0	53,3	65,4	83,2	102,7	123,3	—
Изобутиламин	$C_4H_{11}N$	−50,0	−31,0	−21,0	−10,3	1,3	8,8	18,8	32,0	50,7	68,6	−86,0
Изобутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	−21,2	−1,4	12,8	25,5	39,2	48,0	59,7	77,6	97,5	118,0	−99,0
Изобутилбутиратт	$C_{11}H_{22}O_2$	64,0	93,6	108,0	124,2	141,8	152,0	166,4	188,2	212,6	237,0	—
Изобутилбензол	$C_{10}H_{14}$	−9,8	+21,1	37,3	54,7	73,2	84,1	99,0	120,7	145,2	170,0	—
Изобутилбутиратт	$C_8H_{16}O_2$	4,6	30,0	42,2	56,1	71,7	81,3	94,0	113,0	135,7	156,9	−80,7

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Изобутилдихлорацетат	$C_6H_{10}Cl_2O_2$	28,6	54,3	67,5	81,4	96,7	106,6	119,8	142,0	160,0	183,0	—
Изобутилизобутират	$C_8H_{16}O_2$	4,1	26,0	39,9	52,4	67,2	75,9	88,0	106,3	126,3	147,5	−80,7
Изобутилпропионат	$C_7H_{14}O_2$	16,0	41,2	54,8	67,7	82,7	92,4	105,2	124,8	146,4	168,7	—
Изобутилкарбонат	$C_9H_{18}O_3$	—	82,7	96,4	110,1	125,3	134,6	147,2	165,7	186,0	206,5	65,0
Изобутилметилкетон	$C_6H_{12}O_2$	60,0	82,1	106,0	120,2	136,2	147,0	160,2	181,8	200,6	229,9	—
Изобутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	−5,0	−11,0	21,7	32,4	44,1	51,7	61,5	75,9	91,4	108,0	−108,0
Изобутилпропиолат	$C_7H_{10}O_2$	−2,3	+20,9	32,3	44,8	58,5	67,6	79,5	97,0	116,4	136,8	−71,0
4-Изобутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	72,1	100,9	115,5	130,3	147,2	157,0	171,2	192,1	214,7	237,0	—
Изобутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	−39,7	−11,4	−0,6	+11,0	24,1	32,4	43,4	60,0	79,0	98,2	−95,3
Изобутилхлорид	C_4H_9Cl	−53,8	−34,3	−24,5	−13,8	−1,9	+5,9	16,0	32,0	50,0	68,9	−131,2
2-Изобутиропирофенон	$C_{14}H_{18}O$	133,9	165,4	181,0	197,7	215,6	227,6	242,8	264,0	288,2	313,0	—
Изобутирофенон	$C_{10}H_{12}O$	58,3	87,0	101,4	116,6	133,8	144,6	160,0	180,1	204,2	229,0	—
Изовалериановая кислота	$C_5H_{10}O_2$	24,5	59,6	71,3	84,0	98,0	107,3	118,9	136,2	155,2	175,1	−37,6
Изовальдолактон	$C_5H_8O_2$	36,3	66,4	80,3	96,7	112,3	121,2	137,2	157,8	182,1	207,0	—
Изокаприлофенон	$C_{16}H_{24}O$	136,0	167,9	184,0	201,6	219,7	231,5	246,7	269,7	294,0	320,0	—
Изокапроновая кислота	$C_6H_{12}O_2$	66,2	83,0	94,0	107,0	120,4	129,6	141,4	156,3	181,0	207,7	−36,0
Изомасляная кислота	$C_4H_8O_2$	14,7	39,3	51,2	64,0	77,8	86,3	96,0	115,8	134,5	164,0	−47
Изопрен	C_5H_8	−79,6	−62,3	−53,3	−43,5	−32,6	−26,4	−16,0	−1,2	+16,4	32,6	−146,7
Изопропилацетат	$C_5H_{10}O_2$	−38,3	−17,4	−7,2	+4,2	17,0	25,1	35,7	51,7	69,6	86,0	—
4,4-Изопропилидендифенол	$C_{15}H_{16}O_2$	199,0	224,2	240,8	255,5	273,0	282,6	297,0	317,5	330,0	360,5	—
Изопропилизобутират	$C_7H_{14}O_2$	−16,3	+5,8	17,0	29,0	42,4	51,4	62,3	80,2	100,0	120,5	—
Изопропилпировиноградный	$C_6H_{12}O_3$	46,0	74,6	88,0	102,4	118,1	127,8	141,8	161,6	185,2	208,2	—
2-Изопропилнафталин	$C_{13}H_{14}$	76,0	107,9	123,4	140,3	159,0	171,4	187,6	211,8	236,5	266,0	—
4-Изопропилстирол	$C_{11}H_{14}$	34,7	69,3	76,0	91,2	108,0	118,2	132,8	153,9	178,0	202,5Р	—
2-Изопропилфенол	$C_9H_{12}O$	56,6	83,8	97,0	111,7	127,5	137,7	150,3	170,1	192,6	214,5	15,5
3-Изопропилфенол	$C_9H_{12}O$	62,0	90,3	104,1	119,8	136,9	146,6	160,2	182,0	205,0	228,0	96,0
4-Изопропилфенол	$C_9H_{12}O$	67,0	94,7	108,0	123,4	139,8	149,7	163,3	184,0	206,1	228,2	61,0
Изопропилсульфат	$C_6H_{14}O_4$	−52,0	−32,7	−29,7	−12,1	0,2	+7,5	17,8	33,6	50,5	66,3	—
Изопропилхлорацетат	$C_5H_9ClO_2$	2,6	28,1	40,2	53,9	68,7	78,0	90,3	108,8	129,0	148,6	—
Изофорон	$C_9H_{14}O$	32,0	66,7	81,2	96,8	114,5	125,6	140,6	163,3	188,7	215,2	—
Изохинолин	C_9H_7N	69,5	92,7	107,8	123,7	141,6	152,0	167,0	190,0	214,0	240,5	24,6
Изохинолинол	C_9H_7NO	86,3	117,0	132,4	149,0	167,0	178,2	194,0	217,2	242,3	267,5	−10,0
Инден	C_9H_8	16,4	44,3	58,5	73,0	90,8	100,6	114,7	135,6	157,8	181,0	−2,4
Иодбензол	C_6H_5I	24,1	50,6	64,0	78,3	94,4	105,0	118,3	139,6	163,9	188,6	−28,5
1-Иод-3-метилбутан	$C_5H_{11}I$	−2,6	+21,9	34,1	47,6	62,3	71,9	84,4	103,8	125,8	148,2	—
1-Иод-2-метилпропан	C_4H_9I	−17,0	+5,8	17,0	29,8	42,6	51,8	63,5	81,0	100,3	120,4	−60,7
Иодпропан	C_3H_7I	70,0	96,2	108,0	123,0	139,1	147,7	160,8	179,0	199,3	219,5	—
1-Иодпентан	$C_5H_{11}I$	46,8	74,8	90,0	105,8	123,8	130,4	150,0	173,3	199,3	225,5	−40,9
1-Иодпропан	C_3H_7I	−36,0	−13,6	−2,4	+10,0	23,6	32,1	43,8	61,8	81,8	102,5	−98,8
2-Иодпропан	C_3H_7I	−43,3	−22,1	−11,7	0,0	+13,2	21,6	32,8	50,0	69,0	89,5	−90
2-Иодтолуол	C_7H_7I	37,2	65,9	79,8	95,3	112,4	123,8	138,1	160,0	185,7	211,0	—
α-Ионон	$C_{13}H_{20}O$	79,6	106,8	123,0	139,0	155,6	166,3	181,2	202,5	226,2	250,0	—
Кадинен	$C_{15}H_{24}$	101,3	131,0	146,0	161,6	179,8	191,0	205,6	226,8	250,7	275,0	—
Камфен	$C_{10}H_{16}$	—	—	47,2	60,4	75,7	85,0	97,9	117,5	138,7	160,5	50,0
Камфилиден	$C_{10}H_{15}N$	46,3	74,0	86,7	97,6	112,0	122,0	134,8	153,0	173,6	195,0	—

Продолжение табл. 12.6

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Камфолевая кислота	$C_{10}H_{18}O_2$	97,6	125,7	139,8	153,0	170,0	180,0	193,7	212,7	234,0	256,0	—
d-Камфора	$C_{10}H_{16}O$	41,5	78,6	82,3	97,5	114,0	124,0	138,0	157,0	182,0	200,2	178,6
Каприловая кислота	$C_8H_{16}O_2$	92,3	114,1	124,0	136,4	150,6	160,0	172,2	190,3	213,9	237,5	16,0
Каприловый альдегид	$C_8H_{16}O$	73,4	92,0	101,2	110,2	120,0	126,0	138,9	146,4	166,6	168,0	—
Каприлонитрил	$C_8H_{15}N$	43,0	67,6	80,4	94,6	110,6	121,2	134,6	155,2	179,5	201,5	—
Каприновая кислота	$C_{10}H_{20}O_2$	120,0	142,0	152,2	165,0	179,9	189,8	200,0	217,1	240,3	269,4	31,5
Каприновый альдегид	$C_{10}H_{20}O$	51,9	78,6	92,0	106,3	122,2	132,0	145,3	164,6	186,3	208,5	—
Капронитрил	$C_6H_{11}N$	0,2	34,6	47,5	61,7	76,9	86,8	99,8	119,7	141,0	163,7	—
Капроновая кислота	$C_6H_{12}O_2$	71,2	80,5	93,5	111,8	126,0	133,3	144,0	160,6	181,0	202,0	—1,5
Карбазол	$C_{12}H_9N$	—	—	—	—	—	246,2	265,0	294,5	323,0	354,8	244,8
Карбонилселенид	$COSe$	—117,1	—102,3	—95,0	—86,3	—76,4	—70,2	—61,7	—49,8	—35,6	—21,9	—
Карвенон	$C_{10}H_{14}O$	70,0	98,4	111,2	127,9	146,2	155,3	169,7	191,2	213,6	237,0	0,6
Карвон	$C_{10}H_{14}O$	57,4	86,1	100,4	116,0	133,0	143,8	157,3	179,6	203,5	227,5	—
Коричная кислота	$C_9H_8O_2$	127,5	157,8	171,0	185,5	207,1	217,8	232,4	253,3	276,7	300,0	133,0
Коричный альдегид	C_9H_8O	76,1	105,8	120,0	136,7	152,2	163,7	177,7	199,3	222,1	246,0	—7,5
Коричный спирт	$C_9H_{10}O$	79,6	109,5	117,8	133,7	151,0	162,0	177,8	199,8	224,6	250,0	33,0
2-Крезол	C_7H_8O	38,2	64,0	76,7	90,6	106,6	115,0	127,4	146,7	168,4	190,8	30,8
3-Крезол	C_7H_8O	62,0	76,0	87,8	101,4	116,0	125,8	138,0	157,3	179,0	202,8	10,9
4-Крезол	C_7H_8O	53,0	76,0	88,6	102,3	117,7	127,0	140,0	157,7	179,4	201,8	35,5
β-Кротоновая кислота	$C_4H_6O_2$	33,6	57,4	66,0	82,0	96,0	104,5	116,3	133,0	152,2	171,9Р	15,5
α-Кротоновая кислота	$C_4H_6O_2$	—		89,0	93,0	107,8	116,7	128,0	146,0	165,5	185,0	72,0
цис-Кротононитрил	C_4H_5N	—29,0	—7,1	+4,0	16,4	30,0	38,5	50,1	65,0	88,0	108,0	—
транс-Кротононитрил	C_4H_5N	19,5	12,5	15,0	27,8	41,8	50,0	62,8	81,1	101,5	122,8	—
2-Кресилдихлорфосфат	$C_7H_7Cl_2PO$	136,2	171,7	187,0	205,0	223,6	236,0	251,5	275,3	301,0	328,5	—
2,4-Кресальдегид	C_8H_8O	59,0	85,9	99,0	114,0	129,7	139,6	152,2	172,3	194,1	215,5	75,0
2,3-Ксиленол	$C_8H_{10}O$	56,0	82,8	97,6	112,0	129,2	139,5	152,2	173,0	196,0	218,0	75
2,4-Ксиленол	$C_8H_{10}O$	51,8	78,0	91,3	105,0	121,5	131,0	143,0	161,5	184,2	211,5	25,5
3,4-Ксиленол	$C_8H_{10}O$	66,2	93,8	107,7	122,0	138,0	148,0	161,0	181,5	202,0	225,2	62,5
3,5-Ксиленол	$C_8H_{10}O$	62,0	89,2	102,4	117,0	133,2	143,5	156,0	176,2	197,8	219,5	68,0
2,4-Ксилидин	$C_8H_{11}N$	59,6	76,8	91,0	107,6	123,8	133,7	146,8	166,4	188,3	211,0	—
2,6-Ксилидин	$C_8H_{11}N$	44,0	72,6	87,0	102,7	120,2	131,5	146,0	166,5	193,7	217,9	—
2-Ксилол	C_8H_{10}	—3,8	+20,2	29,1	45,1	59,5	68,6	81,3	100,2	121,7	144,4	—25,2
3-Ксилол	C_8H_{10}	—6,9	+18,8	28,3	41,1	56,3	64,4	76,8	95,5	116,7	139,1	—47,9
4-Ксилол	C_8H_{10}	—5,1	+16,5	27,3	40,1	54,4	63,5	76,9	94,6	115,9	139,3	13,3
Кумарин	$C_9H_6O_2$	108,0	137,8	153,4	170,0	189,0	200,5	216,5	240,0	264,7	291,0	70,0
α-Кумидин	$C_9H_{13}N$	60,0	86,2	102,2	117,8	134,2	146,0	156,0	180,0	206,2	227,2	—
Куминаль	$C_{10}H_{12}O$	59,0	87,3	102,0	117,9	136,2	146,0	160,0	182,8	206,7	232,0	—
Кумиловый спирт	$C_{10}H_{14}O$	74,2	106,7	118,0	133,8	150,3	161,7	176,2	197,0	221,7	246,6	—
Кумол	C_9H_{12}	2,9	26,8	36,3	51,6	68,1	75,4	88,1	107,3	129,2	152,4	—96,0
Лауриновая кислота	$C_{12}H_{24}O_2$	121,0	160,6	166,0	183,6	201,4	212,7	227,5	249,5	273,8	299,2	48,0
Лауриновый альдегид	$C_{12}H_{24}O$	77,7	108,4	123,7	140,2	157,8	168,7	184,5	207,5	231,8	257,0	44,5
Левулиновая кислота	$C_5H_8O_3$	102,0	129,1	141,8	154,1	169,5	178,0	190,2	208,3	227,4	245,6Р	33,5
Левуленовый альдегид	$C_5H_6O_2$	26,1	51,9	68,0	82,7	96,3	105,4	121,8	142,0	164,0	187,0	—
d-Лимонен	$C_{10}H_{16}$	14,0	43,4	53,8	68,2	84,3	94,6	106,3	126,5	151,4	175,0	—96,9
Линалилацетат	$C_{12}H_{20}O_2$	55,4	82,5	96,0	111,4	127,7	136,1	151,8	173,3	196,2	220,0Р	—
d-Линалоол	$C_{10}H_{18}O$	40,0	66,0	76,8	93,8	109,9	120,0	133,3	153,0	175,6	198,0	—
Малеиновый ангидрид	$C_4H_2O_3$	44,0	63,4	76,7	96,0	111,6	122,0	135,8	155,9	179,5	202,0	58
Масляная кислота	$C_4H_8O_2$	25,5	49,8	61,5	74,0	88,0	97,5	109,0	126,5	144,5	163,5	—4,7

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Мезитилен оксид	$C_6H_{10}O$	−8,7	+14,1	26,0	37,9	51,7	60,4	79,0	90,0	109,8	130,0	−59,0
Ментан	$C_{10}H_{20}$	9,7	35,7	48,3	62,7	78,3	88,6	102,1	122,7	140,6	169,5	—
Метилаланин	$C_{22}H_{22}O_2$	57,4	85,8	110,0	116,4	132,1	143,2	160,7	178,8	202,8	227,0	—
Метилбензоат	$C_{17}H_{16}O_2$	123,2	154,9	170,0	188,3	204,3	215,8	230,4	253,2	277,1	301,0	34,5
Метилформиат	$C_{11}H_{20}O_2$	47,3	75,6	90,0	106,8	123,0	133,8	148,0	169,8	194,2	219,0	—
L-Ментол	$C_{16}H_{20}O$	68,0	83,2	96,0	110,3	126,1	136,1	149,4	168,3	190,2	212,0	42,5
Меркаптоуксусная кислота	$C_2H_4O_2S$	60,0	87,7	101,5	115,8	131,8	142,0	154,0	—	—	—	−16,5
Метакрилонитрил	C_4H_5N	−44,5	−23,3	−12,5	−0,6	+12,8	21,5	32,8	50,0	70,3	90,3	—
Метакриловая кислота	$C_4H_6O_2$	25,5	48,5	60,0	72,7	86,4	96,3	108,6	123,9	142,5	161,0	15
Метан	CH_4	−205,9	−199,6	−195,5	−191,8	−187,7	−185,1	−181,4	−176,5	−168,8	−161,5	−182,5
Метанол	CH_4O	44,0	−25,3	−16,2	−6,0	+5,0	12,1	21,2	34,8	49,9	64,7	−97,8
Метилакрилат	$C_4H_6O_2$	−13,7	−23,6	−15,5	−2,7	+9,2	17,3	28,0	43,8	61,8	80,20	—
Метиламин	CH_5N	−95,8	−81,3	−73,8	−65,9	−56,9	−51,3	−43,7	−32,4	−19,7	−6,3	−93,5
N-Метиланилин	C_7H_9N	36,0	62,8	76,2	90,5	106,0	115,8	129,2	149,3	172,0	195,5	−57,6
Метилантранилат	$C_8H_9NO_2$	77,6	109,0	124,2	141,5	159,7	172,0	187,8	212,4	239,5	266,5	24,0
N-Метилацетанилид	$C_9H_{11}NO$	—	163,8	176,6	195,1	132,2	164,2	179,2	202,3	227,4	253,0	102,0
Метиланцетат	$C_3H_6O_2$	−57,2	−38,6	−29,3	−19,1	−7,9	−0,6	+9,4	24,0	40,0	57,8	−98,7
Метилацетилен	C_3H_4	−111,0	−97,0	−90,5	−82,9	−74,3	−68,8	−61,3	−49,8	−37,2	−23,3	−102,7
α-Метилбензилтиол, спирт	$C_8H_{10}O$	49,0	75,2	88,0	102,1	117,8	127,4	140,3	159,0	180,7	204,0	—
Метилбензоат	$C_8H_8O_2$	39,0	64,4	77,3	91,8	107,8	117,4	130,6	151,4	174,7	199,5	−12,5
2-Метилбензотиазол	C_8H_7NS	70,0	97,5	111,2	126,5	141,2	150,4	163,9	183,2	204,6	225,5	15,4
2-Метилбутан	C_5H_{12}	−82,9	−65,8	−57,0	−47,3	−36,0	−29,6	20,2	−5,9	+10,5	27,8	−159,7
3-Метил-2-бутанон	$C_5H_{10}O$	−19,9	−1,0	16,3	18,3	29,6	36,2	45,5	59,0	73,8	88,9	−92,0
2-Метил-1-бутен	C_5H_{10}	−89,1	−72,8	−64,3	−54,8	−44,1	−37,3	−23,0	−13,8	12,5	20,2	−135,0
2-Метил-2-бутен	C_5H_{10}	−75,4	−57,0	−47,9	−37,9	−26,7	−19,4	−9,9	+4,9	21,6	38,5	−133,0
Метилбутиратт	$C_5H_{10}O_2$	−36,8	−5,5	+5,0	16,7	29,6	37,4	48,0	64,3	83,1	102,3	—
Метилбромид	CH_3Br	−96,3	−80,6	−72,8	−64,0	−54,2	−48,0	−39,4	−26,5	−11,9	+3,6	−93,0
2-Метилгептан	C_8H_{18}	−40,2	−19,5	−0,1	+2,3	14,9	26,0	34,1	50,8	69,6	93,0	−119,2
3-Метилгексан	C_7H_{16}	−39,0	−18,1	−7,8	−3,6	10,4	24,5	36,0	52,4	71,6	91,9	−119,4
5-Метилгептадекан	$C_{18}H_{38}$	119,8	152,0	168,7	186,0	203,8	216,3	231,5	254,5	279,8	305,5	—
3-Метилгептан	C_8H_{18}	−21,0	+1,3	12,3	24,4	37,9	46,6	58,5	76,0	96,2	117,6	−109,5
3-Метилгептан	C_7H_{16}	−19,6	+2,6	13,3	25,4	38,9	47,6	59,4	77,1	97,4	118,9	−120,8
4-Метилгептан	C_8H_{18}	−20,4	+1,5	12,4	24,5	38,0	46,6	58,3	76,1	96,3	117,7	−121,1
2-Метил-2-гептен	C_8H_{16}	−16,1	+6,7	17,8	30,4	44,0	52,8	64,6	82,3	102,2	122,5	—
6-Метил-3-гептен-2-он	$C_8H_{14}O$	41,6	66,0	76,7	89,3	102,7	111,5	122,0	139,5	156,6	175,5	—
6-Метил-5-гептен-2-он	$C_8H_{14}O$	41,9	66,0	77,6	90,4	104,0	112,6	123,6	140,0	156,6	174,3	—
Метилгликолят	$C_3H_6O_3$	9,6	33,7	45,3	58,1	72,3	81,8	93,7	111,8	131,7	151,5	—
α-Метилглутаровый ангидрид	$C_6H_8O_3$	93,8	125,4	141,8	157,7	177,5	189,9	205,0	229,1	255,5	282,5	—
2-Метилдисилазан	CH_5NSi_2	−76,3	−66,0	−60,1	−40,5	−29,0	−22,4	−13,1	+1,3	17,2	34,0	—
Метилдифенилмин	$C_{13}H_{13}N$	103,5	134,0	149,7	165,8	184,0	195,4	210,1	232,8	257,0	282,0	−7,6
Метилдифенилсилан	$C_{13}H_{14}Si$	88,0	118,2	132,8	148,8	166,4	178,0	193,7	215,9	241,5	266,8	—
Метилдихлоросилан	$C_2H_4Cl_2O_3$	3,2	26,7	38,1	50,7	64,7	−73,6	85,4	106,2	122,6	143,0	-
Метилдихлорсилан (60)	CH_4Cl_2Si	—	—	−47,1	−36,0	−25,5	−18,3	−9,5	1,6,3	32,2	40,9	—
Метилизобутиран	$C_5H_{10}O_2$	34,1	−13,0	−2,9	+8,4	21,0	28,9	39,6	56,7	73,6	92,6	−84,7
Метилизовалерат	$C_6H_{12}O_2$	−19,2	1,9	14,0	26,4	39,8	48,2	60,6	77,3	96,7	116,7	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Метилизоцианат	C_2H_3NS	−34,7	−8,3	+5,4	20,4	38,2	47,5	59,3	77,5	97,8	119,0	35,0
Метиллитий	CH_3I	—	−66,0	−45,8	−35,6	−24,2	−16,9	−7,0	+6,0	25,3	42,4	−64,4
Метилметилат	$C_5H_{12}O_2$	34,2	61,7	74,9	89,0	105,5	115,3	128,0	149,1	170,0	193,0 P	−40,0
Метилмиристат	$C_{15}H_{30}O_2$	68,7	96,5	108,0	123,0	139,0	148,6	161,5	181,6	202,0	224,0 P	−18,0
Метилмасляная	$C_5H_{12}O_2$	5,0	30,0	42,0	55,4	70,0	79,7	91,4	109,8	129,8	150,0	—
Метилкоричная кислота	$C_{10}H_{10}O_2$	125,7	165,0	180,8	185,2	201,8	212,0	224,8	245,0	266,8	288,0	—
Метилмочевина	$C_{13}H_{28}O_2$	87,8	117,9	133,2	149,0	166,0	176,8	190,8	P	P	P	6,0
Метилмуцинат	$C_6H_{12}O_3$	30,8	66,4	79,7	93,7	109,5	119,1	133,0	153,4	175,8	197,7	·
Метилнеопентилат	$C_{15}H_{30}O_2$	115,0	145,7	160,6	177,6	196,6	207,5	222,0	240,3	269,6	290,8	18,5
Метилмеркаптан	CH_4S	−90,7	75,3	−67,5	58,8	49,2	43,1	34,6	22,1	7,9	+6,8	−121,0
Метилметакрилат	$C_5H_8O_2$	−30,5	−10,0	+1,0	11,0	25,5	34,5	47,0	63,0	82,0	101,0	—
Метиловый эфир молочной кислоты	$C_4H_8O_3$	77,4	108,1	123,0	140,0	157,9	170,0	185,8	209,6	235,0	263,0	33,4
Метилмаленат	$C_7H_{10}O_4$	134,3	166,8	184,3	202,0 P	·	—	·	·	—	—	30,0
2-Метилгептан	C_8H_{18}	−60,9	−41,7	−32,1	−21,4	−9,7	−1,9	+8,1	24,1	41,6	60,3	151,0
3-Метилгептан	C_8H_{18}	−56,0	−39,8	−30,1	−19,4	−7,5	+0,1	10,5	26,5	44,2	63,3	−118,0
2-Метил-1-пентанол	$C_6H_{14}O$	15,4	38,0	49,0	61,6	74,7	83,4	94,2	111,3	129,8	147,9	—
2-Метил-2-пентанол	$C_6H_{14}O$	−4,5	+16,8	27,6	38,6	51,3	58,6	69,2	85,0	102,6	121,1	−103,0
2-Метил-4-пентанол	$C_6H_{14}O$	−0,3	−22,1	34,3	45,4	58,2	67,0	78,0	94,0	113,6	131,7	—
3-Метил-2-пентанол	$C_6H_{14}O$	1,4	19,7	30,0	40,6	52,6	60,4	70,4	85,0	102,0	119,0	−84,7
2-Метилпропан	C_4H_{10}	−106,2	−94,1	−86,4	−77,9	−68,4	−62,4	−54,1	−41,6	−27,1	−11,7	−145,0
2-Метилпропен	C_4H_8	−105,1	−96,5	−81,9	−73,4	−63,8	−57,7	−49,3	−36,7	−22,2	−6,9	−140,3
4-Метилпиперидин	$C_6H_{13}N$	59,6	85,3	101,6	120,2	138,0	149,3	164,2	187,4	212,7	236,5	—
Метилпропиловый эфир	$C_4H_{10}O$	−72,2	−54,3	−45,4	−35,4	−24,3	−17,4	−8,1	+6,0	22,5	39,1	—
Метилпропиолат	$C_4H_4O_2$	−42,0	−21,5	−11,6	1,0	+11,0	18,7	29,0	44,0	61,6	79,8	−87,5
2-Метилпропилен бромид	C_4H_8BrO	13,5	38,4	50,0	64,1	79,4	88,6	101,0	120,5	141,7	163,0	—
Метилсилицилат	$C_8H_8O_3$	54,0	81,0	95,3	110,0	126,2	136,7	150,0	172,6	197,5	223,2	−8,6
Метилсилан	CH_6Si	−138,6	−126,3	−120,0	−113,0	−104,8	−99,6	−93,0	−82,4	−70,3	−55,9	—
α-Метилстирол	C_9H_{10}	7,4	34,0	47,1	61,8	77,8	88,3	102,2	121,8	143,0	165,4 П	−23,2
β-Метилстирол	C_9H_{10}	17,5	43,8	57,0	71,5	87,7	97,8	111,7	132,0	154,7	179,0	−30,1
4-Метилстирол	C_9H_{10}	16,0	42,0	55,1	69,2	85,0	95,0	108,6	128,7	151,2	170,0 П	—
2-Метилтиофен	C_5H_6S	−27,4	−5,1	+6,0	18,3	32,3	41,2	53,1	71,1	91,6	112,5	−63,5
3-Метилтиофен	C_5H_6S	−29,5	−9,3	+3,1	21,6	35,4	44,0	56,8	75,6	94,6	115,4	−68,9
Метилтиоцианат	C_2H_3NS	−14,0	+9,6	21,6	34,5	49,0	58,1	70,4	89,8	110,8	132,9	−51,0
Метилтрихлорсилан [60]	CH_3Cl_3Si	—	—	−27,3	−16,5	−4,6	+3,1	13,5	29,3	47,3	66,4	—
Метилуреин	$C_2H_6N_2O_2$	25,5	51,0	63,2	76,1	91,0	100,0	112,0	130,0	149,8	170,0	—
Метилформиат	$C_2H_4O_2$	−74,2	57,0	−48,6	−30,2	−28,7	−21,9	−12,9	+0,2	16,0	32,0	−99,8
Метилфторид	CH_3F	147,3	−137,9	−131,6	−125,9	−118,1	−115,0	−109,0	−99,9	−89,5	−78,2	—
2-Метилхинолин	$C_{10}H_9N$	76,3	104,0	119,0	134,0	150,8	161,7	176,2	197,8	211,7	240,5	−1,0
Метилхлорацетат	$C_3H_5ClO_2$	−2,9	+19,0	30,0	41,5	54,5	63,0	73,5	90,5	109,5	130,3	−31,9
Метилхлорид	CH_3Cl	—	−69,5	−62,4	−54,8	−46,0	−40,4	−33,0	−21,2	−8,0	+4,0	−97,7
Метилциклогексан	C_7H_{14}	−35,9	−14,0	−3,2	+6,7	22,0	30,5	42,1	59,6	79,0	100,9	−126,4
Метилциклопентан	C_6H_{12}	−53,7	−33,8	−23,7	−12,8	−0,6	+7,2	17,9	34,0	52,3	71,8	−142,4
Метилциклопропан	C_4H_8	−96,0	−80,0	−72,8	−64,0	−54,2	−48,0	−39,3	−26,0	−11,3	+4,5	—
2-Метил-3-этилпентан	C_8H_{18}	−31,0	−1,8	+9,5	21,7	35,2	43,9	55,7	73,6	94,0	115,6	−114,5
3-Метил-3-этилпентан	C_8H_{18}	−23,9	−1,4	+9,9	22,3	36,2	45,0	57,1	75,3	96,2	116,3	90,0

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
2-Метоксианилин	C_7H_9NO	61,0	88,0	101,7	116,1	132,0	142,1	156,2	176,3	197,3	218,5	5,2
2-Метоксифенол	$C_7H_8O_2$	52,4	79,1	92,0	106,0	121,6	131,0	144,0	162,7	184,1	205,0	28,3
2-Метоксиэтанол	$C_3H_8O_2$	−13,6	+10,2	22,0	34,3	47,8	56,4	68,0	85,3	104,3	124,4	—
Метоксиуксусная кислота	$C_3H_6O_3$	52,5	79,3	92,0	106,5	122,0	131,8	144,5	163,5	184,2	204,0	—
Миристиновая кислота	$C_{14}H_{28}O_2$	142,0	174,1	190,8	207,6	223,5	237,2	250,5	272,3	294,6	318,0	57,5
Миристиновый альдегид	$C_{14}H_{28}O$	99,0	132,0	148,3	165,2	186,0	198,3	214,5	240,4	267,9	297,8	23,5
Миристицин	$C_{11}H_{12}O_3$	96,2	124,1	142,0	158,0	177,7	189,5	205,0	228,1	253,5	280,0	—
Мирцен	$C_{10}H_{16}$	14,5	40,0	53,2	67,0	82,6	92,6	106,0	126,0	148,3	171,5	—
Мононитроглицериновый эфир тетранитроглицерина	$C_3H_6N_5O_{13}$	116,8	147,8	163,0	179,8	197,7	209,0	224,2	246,0	268,5	292,7	—
Муравьиная кислота	CH_2O_2	−20,0	−5,0	+2,1	10,3	24,0	32,4	43,8	61,4	80,3	100,0	8,2
Мускон	$C_{16}H_{30}O$	116,0	152,6	170,0	189,8	210,0	223,2	241,5	267,7	297,2	328,0	—
Нафталин	$C_{10}H_8$	52,8	74,2	86,8	101,7	119,3	130,2	145,5	167,7	193,2	217,9	80,2
1-Нафтиламин	$C_{10}H_9N$	104,3	137,7	153,6	171,6	191,5	203,8	220,0	244,9	272,2	300,8	50,0
2-Нафтиламин	$C_{10}H_9N$	108,0	141,6	157,6	175,8	195,7	208,1	224,3	249,7	277,4	306,1	111,5
1-Нафтойная кислота	$C_{11}H_8O_2$	160,0	184,0	196,8	211,2	226,0	234,5	246,8	263,5	281,4	300,0	160,6
2-Нафтойная кислота	$C_{11}H_8O_2$	160,8	189,7	202,8	216,9	231,5	241,3	252,7	270,3	289,5	308,6	184,0
1-Нафтол	$C_{10}H_8O$	94,0	125,5	142,0	158,0	177,8	190,0	206,0	229,6	255,8	282,5	—
2-Нафтол	$C_{10}H_8O$	—	126,6	146,5	161,6	181,7	193,7	209,8	234,0	260,0	288,0	122,5
Нафтилфенилат	$C_{11}H_{12}O_2$	67,3	85,3	99,7	114,6	131,6	142,0	156,0	176,8	200,0	224,5	—
Нерол	$C_{10}H_{18}O$	61,7	90,0	104,0	119,4	136,1	146,3	159,8	181,0	203,5	226,0	—
Никотин	$C_{10}H_{14}N_2$	61,8	91,8	107,2	123,7	142,1	154,7	169,6	196,8	218,8	247,3	—
2-Нитроанилин	$C_6H_6N_2O_2$	104,0	135,7	150,4	167,7	186,0	197,6	213,0	238,3	260,0	284,5P	71,5
3-Нитроанилин	$C_6H_6N_2O_2$	119,3	151,5	167,8	185,5	204,2	216,5	232,1	256,3	280,2	306,7P	114,0
4-Нитроанилин	$C_6H_6N_2O_2$	142,4	177,6	194,4	213,2	234,2	245,0	261,8	284,5P	310,9P	336,0P	146,5
2-Нитробензальдегид	$C_7H_5NO_3$	85,6	117,7	133,4	150,0	168,8	180,7	196,2	220,0	246,8	273,5	40,9
3-Нитробензальдегид	$C_7H_5NO_3$	96,2	127,4	142,8	159,0	177,7	189,5	204,3	227,4	259,1	278,3	58,0
Нитробензол	$C_6H_5NO_2$	44,4	71,0	84,0	99,3	115,4	125,8	139,0	161,2	186,8	210,6	5,7
Нитроглицерин	$C_3H_5N_3O_9$	159	167	188	210	230	204	Взр.	-	-	-	11,0
4-Нитро-1,3-ксилол	$C_8H_9NO_2$	65,6	95,0	109,6	125,8	143,5	155,8	168,5	191,7	217,5	244,0	2,0
Нитрометан	CH_3NO_2	−25,0	−7,9	+2,8	14,1	27,5	36,0	46,6	63,5	82,0	101,2	−29,0
1-Нитропропан	$C_3H_7NO_2$	−9,6	+13,5	25,3	37,9	51,8	60,5	72,3	90,2	110,6	131,6	−108,0
2-Нитропропан	$C_3H_7NO_2$	−18,8	+4,1	15,8	28,2	41,8	50,3	62,0	80,0	99,8	120,3	−93,0
2-Нитротиофен	$C_4H_3NO_2S$	48,2	77,7	92,0	108,2	125,8	137,0	151,5	174,0	199,6	224,5	46,0
2-Нитротолуол	$C_7H_7NO_2$	60,0	79,1	93,8	109,6	126,3	137,0	151,5	173,7	197,7	222,3	−4,1
3-Нитротолуол	$C_7H_7NO_2$	50,2	81,0	96,0	112,8	130,7	142,5	156,9	180,3	206,8	231,9	15,5
4-Нитротолуол	$C_7H_7NO_2$	53,7	85,0	100,5	117,7	136,0	147,8	163,0	186,7	212,5	238,3	51,9
2-Нитрофенилацетат	$C_8H_7NO_4$	100,0	128,0	142,0	156,8	172,8	181,7	194,1	213,0	233,0	253,0	-
2-Нитрофенол	$C_6H_5NO_3$	45,3	70,8	90,4	105,8	122,1	132,6	146,4	167,6	191,0	214,5	45,0
Нитрозан	$C_2H_5NO_2$	−21,0	+1,5	12,5	24,8	36,0	46,5	57,8	74,8	94,0	114,0	−90,0
Нонадекан	$C_{19}H_{40}$	159,2	190,3	183,0	200,8	220,0	232,8	248,0	271,8	299,8	330,0	32,0
Нонакозан	$C_{29}H_{60}$	234,2	269,8	286,4	302,6	323,2	334,8	350,0	373,2	397,2	421,8	63,8
Нонан	C_9H_{20}	2,4	28,3	38,0	51,0	65,6	74,1	86,0	104,7	120,8	149,5	−53,7
1-Нонанол	$C_9H_{20}O$	69,6	86,1	99,7	113,8	129,0	139,0	151,3	170,5	192,1	213,6	−5,0
2-Нонанол	$C_9H_{20}O$	32,1	59,0	72,3	87,2	103,4	113,8	127,4	145,2	171,2	195,6	−19,0
4-Оксибензальдегид	$C_7H_6O_2$	121,2	153,2	169,7	186,8	206,0	217,5	233,5	256,8	282,6	310,0	115,5
о-Оксибутиронитрил	C_4H_7NO	41,0	66,8	77,8	90,7	104,8	113,9	125,0	142,0	159,8	178,8	—

Продолжение табл. 12.6

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
α-Оксиизовалериановая кислота	$C_5H_8O_3$	73,6	98,6	110,5	123,8	136,0	146,4	157,7	175,9	193,3	212,0	79,0
4-Окси-5-метил-2-бутанон	$C_5H_{10}O_2$	44,6	69,3	81,0	94,0	108,2	117,4	129,0	146,5	165,5	185,0	—
4-Окси-4-метил-2-пентанон	$C_6H_{12}O_2$	22,0	46,7	58,6	72,0	86,7	96,0	108,2	126,8	147,5	167,9	—47,0
8-Оксинитрилоуксусная	$C_8H_{15}NO$	68,7	87,8	109,0	117,9	134,1	144,7	157,7	176,0	200,0	221,0	—
Октадецилтриметоксисилан	$C_{21}H_{46}O_3Si_4$	105,8	137,5	152,3	169,2	187,3	199,0	214,5	237,5	263,5	290,0	—
Октадекан	$C_{18}H_{38}$	119,6	152,1	169,6	187,5	207,4	219,7	236,0	260,6	288,0	317,0	28,0
1-Октадеканол	$C_{18}H_{38}O$	150,5	185,6	202,0	220,0	240,4	252,7	269,4	293,5	320,3	349,5	58,5
Октакозан	$C_{28}H_{58}$	220,5	260,3	277,4	295,4	314,2	326,8	341,8	364,8	388,9	412,5	61,6
Октаметилтрисилоксан	$C_8H_{24}O_2Si_3$	7,4	31,5	43,1	56,0	70,0	78,8	91,1	105,2	129,4	150,2	—
Октаметилциклотетрасилоксан	$C_8H_{24}O_4Si_4$	21,7	46,0	59,0	72,4	87,4	96,8	110,0	128,3	149,0	171,2	17,4
Октан	C_8H_{18}	—14,0	+2,3	19,2	31,6	45,1	55,8	69,7	83,6	104,0	125,6	—56,8
1-Октанол	$C_8H_{18}O$	54,0	76,5	88,3	101,0	115,2	123,8	135,2	152,0	173,8	195,2	—16,4
2-Октанол	$C_8H_{18}O$	32,8	57,6	70,0	83,3	96,0	107,4	119,8	138,0	157,5	178,5	—38,5
2-Октанон	$C_8H_{16}O$	23,6	48,4	60,9	74,3	89,8	99,0	111,7	130,4	151,0	172,9	—16,0
Октилакрилат	$C_{11}H_{20}O_2$	56,5	85,7	102,0	117,8	135,6	145,6	159,1	180,2	204,0	227,0	—
Олеиновая кислота	$C_{18}H_{34}O_2$	170,5	208,5	223,8	240,0	257,2	269,8	286,0	309,8	334,7	360,0P	14,0
Пальмитиновая кислота	$C_{16}H_{32}O_2$	153,6	188,1	205,6	223,8	244,4	256,0	271,0	299,7	326,0	363,8	64,0
Пальмитиновый альдегид	$C_{16}H_{32}O$	121,6	151,6	171,8	190,0	210,0	222,6	239,5	264,1	292,3	321,0	34,0
Пальмитонитрил	$C_{16}H_{31}N$	134,3	168,3	185,8	204,2	223,8	236,0	251,0	277,1	304,5	332,0	31,0
Параформальдегид	$C_2H_4O_2$	—9,4	+13,1	24,1	36,1	49,5	57,7	69,0	85,8	104,3	124,0	155-15
Пеларгоновая кислота	$C_9H_{18}O_2$	136,2	196,0	187,4	149,6	163,7	172,3	184,4	203,1	227,0	253,5	—12,5
Пентадекан	$C_{15}H_{32}$	91,6	121,0	135,4	150,2	167,7	178,4	194,0	216,1	242,8	270,5	10,0
1,3-Пентадиен	C_5H_8	—71,8	—53,8	—45,0	—34,8	—23,4	—16,5	—6,7	+8,0	24,7	42,1	—
1,4-Пентадиен	C_5H_8	—83,5	—66,2	57,1	—47,7	—37,0	—30,0	—20,6	—6,7	+8,3	26,1	—
Пентаноны	$C_5H_{10}O$	194,2	230,0	248,2	266,1	286,0	298,4	314,0	339,0	365,4	390,3	53,3
Пентан	C_5H_{12}	—70,6	—62,5	—50,1	—40,2	—29,2	—22,2	—12,6	+1,9	18,5	36,1	—129,7
2-Пентанол	$C_5H_{12}O$	1,6	22,1	32,2	42,6	54,1	61,0	70,7	85,7	102,5	119,7	—
2-Пентанон	$C_5H_{10}O$	—12,0	+8,0	17,9	28,5	39,8	47,3	56,8	71,0	86,3	103,3	—77,8
3-Пентанол	$C_5H_{12}O$	12,7	+7,6	17,9	27,9	39,4	46,7	56,2	70,6	86,3	102,7	—42,0
2,3,4-Пентастриол	$C_5H_{12}O_3$	166,0	189,3	204,5	220,0	239,6	249,8	263,5	284,5	307,0	327,2	—
Пентахлорбензол	C_6HCl_5	98,6	129,7	144,3	160,0	178,5	191,1	206,5	227,0	251,6	276,0	85,5
Пентахлорфенол	C_6HCl_5O	—	—	—	192,2	211,2	223,4	239,6	261,8	285,0	309,3P	186,5
Пентахлорэтан	C_2HCl_5	1,0	27,2	38,8	53,9	69,9	80,0	93,5	114,0	137,2	160,5	—22,0
Пентахлорэтилбензол	$C_8H_5Cl_5$	96,2	130,0	146,0	166,0	186,2	199,0	216,0	241,8	269,3	299,0	—
Пентаэтилбензол	$C_{16}H_{26}$	86,0	120,0	135,8	152,4	171,9	184,9	200,0	224,1	250,2	277,0	—
Пентаэтилхлорбензол	$C_{16}H_{25}Cl$	90,0	123,8	140,7	158,1	178,2	191,0	208,0	230,0	257,2	285,0	—
1-Пентен	C_5H_{10}	60,4	—63,3	—54,5	46,0	—34,1	—27,1	—17,7	—3,4	+12,8	30,1	—
Пиналифенол	$C_{12}H_{18}O$	57,8	85,7	99,0	114,3	130,4	140,8	154,0	176,0	197,7	220,0	—
2-Пиколин	C_6H_7N	11,4	+19,6	24,1	37,4	51,2	59,9	71,4	89,0	106,4	128,8	—70,0
Пиноновая кислота	$C_9H_{12}O_3$	163,4	196,2	212,0	229,3	247,0	258,2	272,0	299,5	318,5	342,1	103,0
α-Пинен	$C_{10}H_{16}$	—1,0	+24,6	37,3	51,4	66,9	76,8	90,1	110,2	132,3	155,0	—56,0
β-Пинен	$C_{10}H_{16}$	4,2	30,0	42,3	58,1	71,5	81,2	94,0	114,1	136,1	166,3	—
Пиперидин	$C_5H_{11}N$	—	—7,0	+3,9	15,8	29,2	37,7	49,0	66,2	85,7	106,0	—9,0
Пиридин	C_5H_5N	—18,9	+9,5	13,2	21,8	36,0	46,8	57,8	75,0	95,6	115,4	—42,0

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавл., °С
			5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Пировиноградный ангидрид	$C_6H_6O_3$	69,7	99,7	114,2	130,0	147,8	158,0	173,8	196,1	221,0	247,4	—
Пирогаллол	$C_6H_6O_3$		151,7	167,7	185,5	204,2	216,3	232,0	255,5	281,5	309,0 Р	133,0
Пирокатехин	$C_6H_6O_2$	—	104,0	118,3	134,0	150,0	161,7	176,0	197,7	221,5	245,5	104,0
Пробковая кислота	$C_8H_{14}O_4$	172,8	205,5	219,5	283,2	254,6	265,4	279,0	300,5	322,8	345,5	142,0
Пропан	C_3H_8	—128,9	—115,1	108,5	100,9	—92,4	—87,0	79,6	—69,4	—55,6	—42,1	—187,1
1,2-Пропандиол	$C_3H_8O_2$	45,5	70,8	83,2	95,4	111,2	119,9	132,0	149,7	168,1	188,2	—
1,3-Пропандиол	$C_3H_8O_2$	59,4	87,2	100,6	115,5	131,0	141,1	153,4	172,8	193,8	214,2	—
1-Пропанол	C_3H_8O	—15,0	+5,0	14,7	25,3	36,4	43,5	52,8	66,8	82,0	97,8	—127,0
2-Пропанол	C_3H_8O	—26,1	—7,0	+2,4	12,7	23,8	30,5	39,5	53,0	67,8	82,5	—95,8
Пропенилбензол	C_9H_{10}	17,5	43,8	57,0	71,5	87,7	97,8	111,7	132,0	154,7	179,0	—30,1
Пропиламин	C_3H_9N	—54,4	—46,3	—37,2	—27,1	—16,0	9,0	+0,5	15,0	31,5	48,5	—83,0
Пропилацетат	$C_5H_{10}O_2$	26,7	—5,4	+5,0	16,0	28,8	37,0	47,8	64,0	82,0	101,8	—92,5
Пропилбензоат	$C_{10}H_{12}O_2$	54,6	85,8	98,0	114,3	131,8	145,3	157,4	180,1	205,2	231,0	—51,6
Пропилбензол	C_9H_{12}	6,3	31,5	43,4	56,8	71,6	81,1	94,0	113,5	135,7	160,2	—40,5
Пропилбутират	$C_7H_{14}O_2$	—1,0	+22,1	34,0	47,0	61,0	70,5	82,6	101,0	121,7	142,7	—95,2
Пропилен	C_3H_6	—131,9	—120,7	—49,0	—104,7	96,5	91,3	—84,1	—73,3	—10,9	—47,7	—185,0
Пропилен оксид	C_3H_6O	—75,0	—57,8	112,1	36,3	—28,4	—21,8	—12,0	+2,1	17,8	34,5	—112,1
Пропилпивалат	$C_8H_{16}O_2$	8,0	32,8	45,1	58,0	72,8	82,3	95,0	113,9	135,0	156,9	—
Пропилхлорбензол	$C_9H_{11}NO_2$	32,4	77,0	90,0	103,2	117,7	126,5	138,3	155,8	175,8	195,0	—
Пропилпеновинат	$C_8H_{14}O_3$	59,7	86,5	99,9	114,0	130,1	140,0	154,0	175,6	198,0	221,2	—
Пропилмеркаптан	C_3H_8S	—56,0	—36,3	—26,3	15,4	—3,2	—4,6	15,3	34,5	49,2	67,4	—112,0
Пропилпропионат	$C_6H_{12}O_2$	—14,2	+8,0	19,4	31,6	45,0	53,6	65,2	82,7	102,0	122,4	—76,0
Пропилформиат	$C_4H_8O_2$	—43,0	—29,7	—12,6	1,7	+10,6	18,8	29,5	45,3	62,6	81,3	—92,9
Пропилхлоруксусный эфир	$C_5H_9ClO_2$	9,7	32,3	43,5	55,6	68,8	77,2	88,0	104,7	123,0	160,0	—
Пропионамид	C_3H_7NO	66,0	91,0	105,0	119,0	134,8	144,3	156,0	174,2	194,0	213,0	79,0
1-Пропиниэфтол	$C_{12}H_{12}O$	124,0	155,5	171,0	188,1	206,9	218,2	233,5	255,5	280,2	306,0	—
Пропионитрил	C_3H_5N	—35,0	—13,0	—3,0	+6,8	22,0	30,1	41,4	59,2	77,7	97,1	—91,9
Пропионовая кислота	$C_3H_6O_2$	4,0	28,0	39,7	52,0	65,8	74,1	85,8	102,5	122,0	141,1	—22,0
Пропионовый ангидрид	$C_6H_{10}O_3$	20,6	45,3	57,7	70,4	87,6	94,5	107,2	127,8	146,0	167,0	—45,0
Пропофенон	$C_9H_{10}O$	50,0	77,5	92,2	107,6	124,3	136,0	149,3	170,2	194,2	216,0	21,0
Пулегон	$C_{10}H_{16}O$	58,5	82,5	94,0	106,8	121,7	130,2	143,1	162,5	189,8	221,0	—
Резорцин	$C_6H_6O_2$	109,4	138,0	152,1	168,0	185,3	195,8	210,8	230,8	253,4	276,5	110,7
Салициловая кислота	$C_7H_6O_3$	113,7	139,0	146,2	156,8	172,2	182,0	193,4	210,0	230,5	256,0	159,0
Салициловый альдегид	$C_7H_6O_2$	33,0	60,1	75,8	88,7	105,2	115,7	129,4	150,0	173,7	196,5	—7,0
Салол	$C_{13}H_{10}O_3$	117,8	156,7	167,0	185,6	205,0	217,2	233,8	257,8	284,8	313,0	42,5
Сафрол	$C_{10}H_{10}O_2$	63,8	93,0	107,6	123,0	140,1	150,3	165,1	186,2	210,0	233,0	11,2
Себациновая кислота	$C_{10}H_{18}O_4$	183,0	215,7	229,0	250,0	268,2	279,8	294,5	315,2	332,8	352,3 Р	134,5
Селенофен	C_4H_4Se	—29,0	—16,0	—4,0	+9,1	24,1	33,8	47,0	66,7	88,8	114,3	—
Сероселенуглерод	CSSe	—47,3	—26,6	—16,0	—4,4	+8,6	17,0	28,3	45,7	65,2	85,6	—75,2
Сероуглерод	CS_2	—73,8	—54,3	—44,7	—34,3	—22,5	—15,3	5,1	+10,4	28,0	46,5	—110,8
Синильная кислота	HCN	70,8	—38,0	—48,2	—43,5	—31,3	—25,8	—18,8	—5,9	+6,8	26,8	—14,0
Скатол	C_9H_9N	95,0	124,2	139,6	154,3	171,9	183,6	197,4	218,8	242,5	266,2	95,0
Сукцинимид	$C_4H_5NO_2$	115,0	143,2	157,0	174,0	192,0	203,0	217,4	240,0	263,5	287,5	126,5
Сукцинилхлорид	$C_4H_4Cl_2O_2$	39,0	65,0	78,0	91,8	107,5	117,2	130,0	149,3	170,0	192,5	17,0
Стеариновая кислота	$C_{18}H_{36}O_2$	173,7	209,0	225,0	243,4	263,3	275,5	291,0	316,5	343,0	370,0 Р	69,3
Стеаритовый альдегид	$C_{18}H_{36}O$	140,0	174,0	192,1	210,6	230,8	244,2	260,0	286,0	315,8	342,5	63,5

Продолжение табл. 12.6

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Стирол	C_8H_8	−7,0	+12,0	30,8	44,0	59,8	69,5	82,0Р	101,3Р	122,5Р	145,2Р	−30,6
о-Терпиненол	$C_{10}H_{18}O$	52,8	80,4	94,3	109,8	126,0	136,3	150,1	171,2	194,3	217,5	35,0
Терпинолен	$C_{10}H_{16}$	32,3	58,0	70,6	84,8	100,0	109,8	122,7	142,0	163,5	186,0	—
1,1,1,2-Тетрабромэтан	$C_2H_2Br_4$	58,0	83,3	95,7	108,5	123,2	132,0	144,0	161,5	181,0	200,0	—
1,1,2,2-Тетрабромэтан	$C_2H_2Br_4$	65,0	95,5	110,0	126,0	144,0	155,1	170,0	192,5	217,5	243,5	—
Тетрадекаметилтетасиклосилоксан	$C_{14}H_{42}O_7Si_7$	73,7	102,0	117,0	132,8	149,8	160,0	175,2	196,5	220,5	245,5	—
Тетрадекаметилциклогептасилоксан	$C_{14}H_{42}O_7Si_7$	86,3	110,8	131,5	147,5	165,3	176,5	191,8	214,5	239,2	264,0	−32,0
Тетрадекан	$C_{14}H_{30}$	76,4	100,0	120,7	135,6	152,7	164,0	178,5	201,8	226,8	252,5	5,5
2-Тетрадеканон	$C_{14}H_{28}O$	90,3	130,0	145,5	161,3	179,5	191,4	206,0	226,2	255,3	278,0	—
Тетрадециламин	$C_{14}H_{31}N$	102,6	135,8	152,0	170,0	189,0	200,2	215,7	235,8	264,6	291,2	—
Тетрадецилтриметилсилан	$C_{17}H_{38}Si$	120,0	150,7	166,2	183,5	201,5	213,3	227,8	250,0	275,0	300,0	—
Тетраизобутилен	$C_{16}H_{32}$	63,8	93,7	108,5	124,5	142,2	152,0	167,5	190,0	214,0	240,0	—
Тетракисвинилтетраметилциклосилоксан	$C_{24}H_{52}O_{12}Si_{12}$	175,2	203,5	216,7	230,5	246,2	254,8	266,3	284,0	303,7	322,8	—
Тетраклэтан	$C_2H_2Cl_4$	153,8	219,6	237,6	255,3	276,3	288,4	305,2	330,3	358,0	386,4	51,1
Тетралин	$C_{10}H_{12}$	38,0	65,3	79,0	93,8	110,4	121,3	135,3	157,2	181,6	207,2	−31,0
1,2,3,4-Тетраметилбензол	$C_{10}H_{14}$	42,6	68,7	81,8	96,8	111,5	121,8	135,7	155,7	180,0	204,4	4,0
1,2,3,5-Тетраметилбензол	$C_{10}H_{14}$	40,0	65,8	77,8	91,0	106,5	115,4	128,3	149,9	173,7	197,9	−24,0
1,2,4,5-Тетраметилбензол	$C_{10}H_{14}$	45,0	75,0	74,0	88,0	104,2	114,8	128,1	149,5	172,1	196,9	79,5
Тетраметилбор	$C_4H_{12}B_2$	−66,0	38,1	−27,4	−16,1	−3,4	−4,6	15,3	34,0	49,8	68,6	−72,5
2,2,3,3-Тетраметилбутан	C_8H_{18}	−17,4	+3,2	13,5	24,6	36,8	44,5	54,8	70,2	87,4	106,3	102,2
Тетраметилолово	$C_4H_{12}Sn$	−51,3	31,0	−20,6	−9,3	−3,5	11,7	22,8	39,8	58,5	78,0	—
Тетраметилсиперлит	$C_4H_{12}N_2$	25,7	48,8	61,7	75,6	90,0	100,0	113,8	134,3	157,8	180,5	—
Тетраметилтиплюмбан	$C_4H_{12}Pb$	−29,0	6,8	+14,4	10,6	30,3	39,2	50,8	68,8	89,0	110,0	−27,5
Тетраметилсилан	$C_4H_{12}Si$	−85,8	−60,7	−58,0	48,3	−37,4	−30,3	−20,9	−6,5	+10,0	27,0	102,1
Тетранитрометан	CH_4O_8	—	—	22,7	35,2	48,4	57,3	68,9	86,0	105,5	125,7Р	13,0
Тетрахлорэтилен	C_2Cl_4	70,7	89,3	97,8	106,4	116,1	122,0	129,5	140,3	151,3	162,6	250
1,2,3,4-Тетрахлорбензол	$C_6H_2Cl_4$	68,5	99,6	114,7	131,2	149,2	160,0	175,7	198,0	225,5	254,0	46,5
1,2,3,5-Тетрахлорбензол	$C_6H_2Cl_4$	58,2	89,0	104,1	121,6	140,0	152,0	168,0	193,7	220,0	246,0	54,5
1,2,4,5-Тетрахлорбензол	$C_6H_2Cl_4$	—	—	—	—	146,0	157,7	173,5	196,0	220,5	245,0	139
1,1,2,2-Тетрахлор-1,2-дифторэтан	$C_2Cl_4F_2$	−37,5	−16,0	−5,0	6,7	19,8	28,1	39,6	55,0	73,1	92,0	26,5
3,4,5,6-Тетрахлор-1,2-бензол	$C_6H_2Cl_4$	94,4	125,0	140,3	156,0	174,2	185,8	200,5	223,0	248,3	273,5	—
Тетрахлорсилан [60]	$SiCl_4$	—	—	−36,1	24,4	−12,0	−6,0	1,5,3	20,9	38,6	57,3	—
2-α,α,α-Тетрахлортолуол	$C_7H_4Cl_4$	60,0	101,8	117,9	135,8	155,0	167,8	180,0	208,0	238,0	262,1	38,7
2,3,4,6-Тетрахлорфенол	$C_6H_2Cl_4O$	100,0	150,3	145,3	161,0	179,1	190,0	206,2	227,2	250,4	275,0	69,5
1,1,1,2-Тетрахлорэтан	$C_2H_2Cl_4$	−16,3	+7,4	19,3	33,1	46,7	56,0	65,0	87,2	108,2	130,5	66,7
1,1,2,2-Тетрахлорэтан	$C_2H_2Cl_4$	−3,8	+20,7	33,0	46,2	60,8	70,0	81,2	102,2	124,0	145,9	−30
1,2,3,5-Тетрахлор-4-этилбензол	$C_8H_6Cl_4$	77,0	110,0	126,0	143,7	162,1	176,0	191,6	215,3	243,0	270,0	—
Тетрахлорэтилен	C_2Cl_4	20,6	+2,4	13,8	26,5	40,1	49,2	61,3	79,8	100,0	120,8	−19,0
1,2,3,4-Тетратилбензол	$C_{14}H_{26}$	65,7	96,2	111,6	127,7	145,8	156,7	172,4	196,0	221,4	248,0	11,6
Тетратиадиэтилбен	$C_6H_{12}Si_2$	97,0	133,5	151,2	171,0	193,2	207,3	220,6	264,3	286,2	320,3	—
Тетраэтиленгликоль	$C_8H_{18}O_5$	153,9	183,7	197,1	212,3	228,0	237,8	250,0	268,4	288,0	307,8	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Тетраэтиленгликольхлоргидрин	$C_8H_{17}ClO_3$	110,1	141,8	156,1	172,6	190,0	200,5	214,9	230,5	259,2	281,5	
Тетраэтилсвинец	$C_8H_{20}Pb$	38,4	63,6	74,6	86,0	102,4	111,7	123,8	142,0	161,6	183,0	−136,0
Тетраэтилсилан	$C_8H_{20}Si$	−1,0	+23,9	36,3	50,0	65,3	74,8	88,0	108,0	130,2	153,0	—
Тетраэтоксисилан	$C_8H_{20}O_4Si$	16,0	40,5	52,6	65,8	81,1	90,7	105,6	123,5	146,2	164,5	—
Тиолиновый альдегид	C_5H_8O	−25,0	−1,0	+10,0	23,2	37,0	45,8	57,7	75,4	95,5	116,4	—
Тимол	$C_{10}H_{14}O$	64,3	92,8	107,4	122,6	136,8	149,8	164,1	185,6	209,2	231,8	51,5
2,2′-Тиодиэтанол	$C_4H_{10}O_2S$	42,0	96,0	128,0	165,0	210,0P	240,5P	285,0P	—	..	—	..
Тиофен	C_4H_4S	−10,7	20,8	10,9	0,0	+12,5	20,1	30,5	46,5	64,7	84,4	−38,3
4-Толилгидразин	$C_7H_{10}N_2$	82,0	110,0	123,8	138,6	154,1	165,0	178,0	198,0	219,5	242,0	65,5
2-Толилизоцианид	C_8H_7N	25,2	51,0	64,0	78,2	94,0	104,0	117,7	137,8	159,9	183,5	..
2-Толуидин	C_7H_9N	44,0	69,3	81,4	95,1	110,0	119,8	133,0	153,0	176,2	199,7	−16,3
3-Толуидин	C_7H_9N	41,0	65,0	82,0	96,7	113,5	123,8	130,7	157,6	180,6	206,3	−31,5
4-Толуидин	C_7H_9N	42,0	66,2	81,8	95,8	111,5	121,5	133,7	154,0	176,9	200,4	44,5
2-Толуонитрил	C_8H_7N	30,7	64,0	77,9	93,0	110,0	120,8	135,0	156,0	180,0	205,2	−13,0
4-Толуонитрил	C_8H_7N	42,5	71,3	85,8	101,7	109,5	130,0	145,2	167,3	193,0	217,6	29,5
Толуол	C_7H_8	20,7	0,4	+6,4	18,4	31,8	40,3	51,9	69,5	89,5	110,6	−95,0
Толуол-2,4-диамин	$C_7H_{10}N_2$	106,5	137,2	151,7	167,0	185,7	196,2	211,5	232,8	256,0	280,0	99,0
Трибромацетальдегид	C_2HBr_3O	18,5	46,0	58,0	72,1	87,8	97,5	110,2	130,0	151,0	174,0P	—
1,1,2-Трибромбутан	$C_4H_7Br_3$	45,0	73,5	87,8	103,2	120,2	131,6	146,0	167,8	192,0	216,2	
1,3,2-Трибромбутан	$C_4H_7Br_3$	41,0	69,0	83,2	98,0	116,0	127,0	141,8	163,5	188,0	213,8	—
2,2,3-Трибромбутан	$C_4H_7Br_3$	38,2	66,0	79,8	94,6	111,8	122,2	136,3	157,8	182,2	206,5	..
Трибромметан	$CHBr_3$	—	22,0	34,0	48,0	63,6	73,4	85,9	106,1	127,9	150,5	8,5
1,2,3-Трибромпропан	$C_3H_5Br_3$	47,5	75,8	90,0	105,8	122,8	134,0	148,0	170,0	195,0	220,0	16,5
1,1,2-Трибромэтан	$C_2H_3Br_3$	32,6	58,0	70,6	84,2	100,0	110,0	123,5	143,5	165,4	188,4	−26,0
2,4,6-Три-трет-бутилфенол	$C_{18}H_{30}O$	95,2	126,1	142,0	158,0	177,4	188,0	203,0	226,2	250,6	276,5	—
Трикозан	$C_{23}H_{48}$	59,4	95,3	104,0	120,2	137,7	148,2	162,5	185,0	209,4	234,0	0,2
Трикозиновая кислота	$C_{23}H_{46}O_2$	137,2	166,3	181,0	195,8	212,4	222,0	236,0	255,2	276,5	299,0	81,0
2-Тридеканон	$C_{13}H_{26}O$	86,8	117,0	131,8	147,8	165,7	176,6	191,5	214,0	238,3	262,5	38,5
Триизобутиламин	$C_{12}H_{27}N$	32,3	57,4	69,6	83,0	97,6	107,3	119,7	139,0	157,6	179,0	−22,0
Триизобутилен	$C_{12}H_{24}$	18,0	44,0	56,5	70,0	86,7	96,7	110,0	130,2	153,0	179,0	
Трикозан	$C_{23}H_{48}$	170,0	206,3	223,0	242,0	261,3	273,8	290,5	319,5	339,8	368,5	47,7
Триметилалюминий	C_3H_9Al	98,7	131,0	149,8	169,8	192,0	207,0	225,8	255,0	288,5	324,0	..
Триметиламин	C_3H_9N	−97,1	−81,7	73,8	65,0	−55,2	−48,8	−40,3	−27,0	−12,0	+2,9	−117,1
2,4,5-Триметиланилин	$C_9H_{13}N$	68,4	95,9	109,0	123,7	139,8	149,5	162,0	182,3	203,7	224,5	67,0
2,3,6-Триметилацетофенон	$C_{11}H_{14}O$	79,0	108,0	122,3	137,5	154,2	165,7	179,7	201,3	224,3	247,0	—
1,2,3-Триметилбензол	C_9H_{12}	16,8	42,9	55,9	69,9	85,4	95,3	108,8	129,0	152,0	176,1	−25,5
1,2,4-Триметилбензол	C_9H_{12}	13,6	38,4	50,7	64,6	79,8	89,5	102,8	122,7	145,4	169,2	−44,1
1,3,5-Триметилбензол	C_9H_{12}	9,6	34,7	47,4	61,0	76,1	85,8	98,9	118,6	141,0	164,7	−44,8
Триметилбор	C_3H_9B	−115,0	−99,6	−92,4	−84,0	−74,7	−69,9	−60,8	−48,5	−34,7	−20,1	—
2,2,3-Триметилбутан	C_7H_{16}	—	—	−18,8	−7,5	+5,2	13,3	24,4	41,2	60,4	80,9	−25,0
Триметилгаллий	C_3H_9Ga	−42,5	42,0	31,7	−20,3	−9,0	−1,6	+8,0	23,0	39,0	55,0	−19
Триметилборан	$C_3H_9B_2$	−74,0	−54,7	−44,6	−33,9	−22,0	−14,7	−4,4	+10,8	27,8	45,6	−122,0
Триметилметоксисилан	$C_4H_{12}OSi$	41,8	68,8	82,3	96,6	113,0	123,2	136,5	156,0	179,5	202,0	—
2,2,3-Триметилпентан	C_8H_{18}	−20,0	−7,1	+3,9	16,0	29,5	38,1	49,9	67,8	88,2	109,8	−112,3

Продолжение табл. 12.6

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
2,2,4-Триметилпентан	C_8H_{18}	−36,5	−15,0	−4,3	+7,5	20,7	29,1	40,7	58,1	78,0	99,2	−107,3
2,3,3-Триметилпентан	C_8H_{18}	−25,8	−3,9	6,9	19,2	33,0	41,8	53,8	72,0	92,7	114,8	101,5
2,3,4-Триметилпентан	C_8H_{18}	−20,3	4,1	+7,1	19,3	32,9	41,6	53,4	71,3	91,8	113,5	−109,2
2,2,4-Триметил-2-пентанол	$C_8H_{18}O$	14,7	36,0	46,4	57,6	69,8	77,3	87,6	102,2	118,4	135,0	—
Триметилпропилолово	$C_6H_{16}Sn$	−12,0	+10,7	21,6	34,0	48,5	57,5	69,6	86,0	109,6	131,7	—
Триметилпропилсилан	$C_6H_{16}Si$	46,0	24,7	−13,9	−2,1	+11,3	19,5	31,6	49,0	69,2	90,0	—
2,4,5-Триметилстирол	$C_{11}H_{14}$	48,1	71,0	91,6	107,1	124,2	135,5	149,8	171,8	190,1	221,2P	—
2,4,6-Триметилстирол	$C_{11}H_{14}$	37,6	65,7	79,7	94,8	111,8	122,3	136,8	157,8	182,3	207,0P	—
Триметилфосфат	$C_3H_9O_4P$	26,0	63,7	67,8	83,0	100,0	110,0	124,0	145,0	167,8	192,7	—
Триметилхлоросилан [60]	C_3H_9ClSi	—	—	−34,9	−24,2	−12,3	−4,7	+5,6	21,2	38,9	57,6	—
Триэтилцитрат	$C_9H_{14}O_7$	106,2	146,2	160,4	177,2	194,2	205,5	219,6	241,3	264,2	287,0P	78,5
1,2,4-Триметил-5-этилбензол	$C_{11}H_{16}$	43,7	71,2	84,6	90,7	105,0	126,3	140,3	160,3	184,5	208,1	—
1,3,5-Триметил-2-этилбензол	$C_{11}H_{16}$	38,5	67,0	80,5	96,0	113,2	123,8	137,9	158,4	183,5	208,0	—
Триметилцитраконовый ангидрид	$C_9H_{10}O_3$	53,5	82,6	97,4	113,8	131,0	142,2	156,5	179,8	205,5	231,0	—
Тринропилметанол	$C_{10}H_{22}O_4$	96,0	125,7	140,5	155,6	173,7	184,0	199,0	220,2	244,3	267,2	—
Тринропилметанол, монобутиловый эфир	$C_{13}H_{28}O_4$	101,5	131,6	147,0	161,8	179,6	190,2	204,4	224,4	247,0	269,5	—
Тринропилметанол, монопропиловый эфир	$C_{12}H_{26}O_4$	82,4	112,4	127,3	143,7	161,4	173,2	187,8	209,7	232,8	256,6	—
Тритолилфосфат	$C_{21}H_{21}O_4P$	154,6	184,2	199,0	213,2	229,7	239,8	252,2	271,8	292,7	313,0	—
Трифенилметан	$C_{19}H_{16}$	169,7	186,4	197,0	206,8	215,5	221,2	228,4	239,7	249,8	259,2	93,4
Трифенилгрофат	$C_{18}H_{15}O_4P$	193,5	230,4	249,8	269,7	290,5	305,2	322,5	349,8	379,2	413,5	49,4
α,α,α-Трифенилтолуол	$C_7H_5F_3$	−32,0	−10,3	+6,4	12,2	25,7	34,0	45,3	62,5	82,0	102,2	−29,3
Трифенилсилан	$C_6H_8F_3Si$	−31,0	−9,7	+6,8	12,3	25,4	33,2	44,2	60,1	78,7	98,3	—
2,4,6-Трихлоранилин	$C_6H_4Cl_3N$	134,0	157,8	170,0	182,6	195,8	204,5	214,6	229,8	246,4	262,0	78,0
Трихлорацетальдегид	C_2HCl_3O	37,8	−16,0	−5,0	+7,2	20,2	29,1	40,2	57,8	77,5	97,7	−57
Трихлорацетилбромид	C_2BrCl_3O	−7,4	+16,7	29,3	42,1	57,2	68,7	79,5	98,4	120,2	143,0	—
1,2,3-Трихлорбензол	$C_6H_3Cl_3$	40,0	70,0	85,0	101,6	119,8	131,5	146,0	168,2	193,5	218,3	52,5
1,2,4-Трихлорбензол	$C_6H_3Cl_3$	38,4	67,3	81,7	97,2	114,8	125,7	140,0	162,0	187,7	213,0	17
1,3,5-Трихлорбензол	$C_6H_3Cl_3$		63,8	78,0	93,7	110,8	121,8	136,0	157,7	183,0	208,4	63,5
1,2,3-Трихлорбутан	$C_4H_7Cl_3$	0,5	27,2	40,0	55,0	71,5	82,0	96,2	118,0	143,0	169,0	—
Трихлорвинилтрихлорсилан	C_2HCl_6Si	−24,3	−1,5	+9,9	22,5	36,5	45,7	57,8	75,8	96,8	118,5	—
Трихлорметан	$CHCl_3$	−58,0	39,1	−29,7	−19,0	7,1	+6,5	16,4	25,9	42,7	61,3	63,5
Трихлорметилсилан	CH_3Cl_3Si	−60,8	−40,7	30,7	−19,3	−7,0	+1,0	12,1	28,1	47,0	66,4	−90
1,1,1-Трихлорпропан	$C_3H_5Cl_3$	−28,8	7,0	+4,2	16,2	29,9	38,5	50,0	67,7	87,5	109,2	−77,7
1,2,3-Трихлорпропан	$C_3H_5Cl_3$	9,0	33,7	46,0	59,3	74,0	83,0	96,1	115,6	137,0	158,0	14,7
Трихлорсилан [64]	$SiHCl_3$			−53,9	−43,9	−32,9	−25,8	−16,2	−1,8	+14,6	31,9	—
α,α,α-Трихлортолуол	$C_7H_5Cl_3$	45,8	73,7	87,6	102,7	119,8	130,0	144,3	165,6	189,2	213,5	−21,2
1,1,2-Трихлор-1,2,2-трифторэтан	$C_2Cl_3F_3$	−69,0	29,4	−40,3	−30,0	−18,5	−11,2	−1,7	+13,5	30,2	47,6	35
Трихлоруксусная кислота	$C_2HCl_3O_2$	51,0	76,0	88,2	101,8	116,3	125,9	137,8	155,4	175,2	195,6	57
Трихлоруксусный ангидрид	$C_4Cl_6O_3$	56,2	85,3	99,6	114,3	131,2	141,8	155,2	176,2	199,8	223,0	—
Трихлорфенилсилан	$C_6H_5Cl_3Si$	33,0	60,4	74,2	89,5	105,8	116,3	130,5	151,3	175,7	201,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Трис 2-хлорэтилмо-фосфат	$C_6H_{12}Cl_3O_3PS$	188,2	217,2	231,2	246,7	261,7	271,5	283,8	302,8	322,0	341,3	—
2,4,5-Трихлорфенол	$C_6H_3Cl_3O$	72,0	102,1	117,3	134,0	151,5	162,5	176,0	201,5	226,5	251,8	62
2,4,6-Трихлорфенол	$C_6H_3Cl_3O$	76,5	105,9	120,2	135,8	152,2	163,5	177,8	199,6	222,5	246,0	68,5
Трихлорфторметан	CCl_3F	—81,3	67,6	—59,0	—49,7	—39,0	—32,3	—23,0	—9,1	+6,2	23,7	—
1,1,1-Трихлорэтан	$C_2H_3Cl_3$	—52,0	—32,0	—21,9	—10,8	1,6	9,5	20,0	36,2	54,6	74,1	—30,6
1,1,2-Трихлорэтан	$C_2H_3Cl_3$	—24,0	2,0	+6,3	21,6	35,2	44,0	55,7	73,3	93,0	113,9	—36,7
Трихлорсилан	$SiHCl_3$	—45,8	—22,8	—12,4	—1,0	+11,9	20,0	31,4	48,0	67,0	86,7	—73
Трихлорэтилсилан	$C_2H_5Cl_3Si$	—27,9	6,8	+3,6	15,2	27,9	35,7	46,3	62,2	80,3	99,5	—40
Трихлорэтоксисилан	$C_2H_5Cl_3OSi$	—32,2	—10,9	0,0	+12,1	25,3	33,8	45,2	62,3	82,2	102,4	—
1,2,4-Триэтилбензол	$C_{12}H_{18}$	46,6	74,2	88,5	104,0	121,7	132,2	145,6	168,3	193,7	218,0	—
1,3,4-Триэтилбензол	$C_{12}H_{18}$	47,9	76,0	90,2	105,8	122,6	133,4	147,7	168,3	193,2	217,5	—
Триэтилвинилсилан	$C_{10}H_{22}Si$	52,4	81,8	96,4	112,3	130,0	141,7	156,0	179,0	204,6	230,0	—
Триэтилгептилсилан	$C_{13}H_{32}Si$	70,0	99,8	114,6	130,3	148,0	158,2	174,0	196,0	221,0	247,0	—
Триэтилбор	$C_6H_{15}B$	—	—	—148,0	—140,5	—131,4	—125,2	—116,0	—101,0	—81,0	—56,2	—
Триэтилгликоль	$C_6H_{14}O_4$	114,0	144,0	158,1	174,0	191,3	201,6	214,6	235,2	256,6	278,3	—
Триэтилметанфосфонат	$C_7H_{17}O_4$	—	150,2	166,0	185,6	201,6	213,5	228,6	250,8	276,0	301,0	135,0
Триэтилметилсилан	$C_7H_{18}Si$	—18,2	+5,2	16,6	29,8	44,0	53,2	65,6	84,0	106,3	127,0	—
Триэтилоктилсилан	$C_{14}H_{34}Si$	75,7	104,6	120,0	137,7	155,7	168,0	182,3	208,0	235,0	262,0	—
Триэтилпропилсилан	$C_9H_{22}Si$	15,2	40,6	54,0	69,0	85,7	96,8	107,4	127,0	149,8	173,0	—
Триэтилталлий	$C_6H_{15}Tl$	9,3	37,6	51,7	67,7	85,4	95,7	112,1	136,0	163,5	192,0	—63,0
Триэтилортоформиат	$C_7H_{16}O_3$	5,5	29,2	40,5	53,4	67,5	76,0	88,0	106,0	125,7	146,0	—
Триэтилфосфат	$C_6H_{15}O_4P$	39,6	67,8	82,1	97,5	115,7	126,5	141,6	163,7	187,0	211,0	—
Триэтилцитрат	$C_{12}H_{20}O_7$	107,0	138,7	144,0	171,1	190,4	202,6	217,8	242,2	267,5	294,0	—
Триэтоксиэтилсилан	$C_8H_{22}O_3Si$	—1,5	22,8	34,0	47,2	61,7	70,4	82,7	101,0	121,8	143,5	—
Триэтоксифенилсилан	$C_{12}H_{20}O_3Si$	71,0	98,6	112,6	127,2	143,5	153,2	167,5	188,0	210,5	233,5	—
2-Туйон	$C_{10}H_{16}O$	39,3	65,7	79,3	93,7	110,0	120,2	134,0	154,2	177,8	201,0	—
Углерода двуокись	CO_2	—134,3	—124,4	—119,5	—114,4	—108,0	—104,8	—100,2	—95,0	—85,7	—78,2	—57,5
» недокись	C_3O_2	—94,2	—79,0	—71,0	—62,2	—52,0	—45,5	—36,0	—23,3	—8,9	+6,3	107
» окись	CO	—222,0	—217,2	—215,0	—212,8	—210,0	—208,1	—205,7	—201,3	—196,3	—191,3	—205,0
» сероокись	COS	132,4	—119,8	—113,3	—109,0	—98,3	—93,0	—85,9	—75,0	—62,7	—49,9	—139,8
Углерод подсернистый	C_3S_2	14,0	41,2	54,9	69,3	85,0	95,0	109,9	130,8	—	—	+0,4
» четырехбромистый	CBr_4	—	—	—	—	56,3	100,3	119,7	139,7	163,8	189,5	90,1
» четырехфтористый	CF_4	—184,6	—174,1	—169,3	—164,3	—158,8	—155,1	—150,7	—143,6	—135,5	—127,7	—187,7
» четыреххлористый	CCl_4	—50,0	—30,0	—19,6	—8,2	+4,3	12,3	23,0	38,3	57,8	76,7	—22,6
Уксусная кислота	$C_2H_4O_2$	—17,2	+6,3	17,5	29,9	45,0	61,7	63,0	80,0	99,0	118,1	16,7
Уксусный ангидрид	$C_4H_6O_3$	1,7	20,8	36,0	48,3	62,1	70,8	82,2	100,0	119,5	139,6	—73
Ундекан	$C_{11}H_{24}$	31,4	58,4	72,2	86,3	103,1	113,9	126,8	148,0	170,6	194,5	—25,6
Ундециловая кислота	$C_{11}H_{22}O_2$	101,4	133,1	149,0	166,0	185,6	197,2	212,6	237,8	262,8	290,0	29,5
Ундекан-2-ол	$C_{11}H_{24}O$	71,1	99,0	112,8	127,5	143,7	153,7	167,2	187,7	209,8	232,0	—
Ундекан-2-он	$C_{11}H_{22}O$	68,1	96,5	106,9	125,1	139,0	148,6	161,0	181,2	202,3	224,0	15,0
10-Ундеценовая кислота	$C_{11}H_{20}O_2$	114,0	142,8	156,3	172,0	188,7	190,5	213,5	232,8	254,0	275,0	24,5
Уретан	$C_3H_7NO_2$	—	65,8	77,8	91,0	105,6	114,8	126,2	144,2	164,0	182,0	48,5
α-Фелландрен	$C_{10}H_{16}$	20,0	45,7	58,0	72,1	87,8	97,6	110,6	130,6	152,0	175,0	—

Продолжение табл. 12.6

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Фенетрен	$C_{14}H_{10}$	118,2	154,3	173,0	193,7	215,8	229,9	249,0	270,1	308,0	340,2	99,5
2-Фенетидин	$C_8H_{11}NO$	67,0	92,7	108,6	123,7	139,9	149,8	163,5	184,0	207,0	228,0	—
Фенетиловый спирт	$C_8H_{10}O$	58,2	85,9	103,0	111,8	130,5	141,2	154,0	175,0	197,5	219,5	—
Фенетол	$C_8H_{10}O$	19,1	43,7	58,4	70,5	86,6	95,4	108,4	127,9	149,8	172,0	—30,2
Фенилацетат	$C_8H_8O_2$	38,2	64,6	78,0	92,3	108,1	118,1	131,6	151,2	173,0	195,9	—
Фениламинхлорид	C_6H_7ClO	46,0	75,3	89,0	103,0	119,8	129,8	143,5	163,8	186,0	210,0	—
Фенилдиазонатрий	C_6H_5N	65,0	89,0	103,5	119,4	136,3	147,7	161,6	184,2	206,0	233,5	—23,8
Фенилбензоат	$C_{13}H_{10}O_2$	108,8	141,5	157,8	177,0	197,6	210,8	227,8	254,0	283,5	314,0	70,5
4-Фенил-3-бутен-2-он	$C_{10}H_{10}O$	81,7	112,2	127,4	143,8	161,3	172,6	187,8	211,0	235,4	261,0	41,5
Фенилгидразин	$C_6H_8N_2$	71,8	101,6	115,6	131,6	148,2	158,7	173,5	196,4	218,2	243,0	19,6
Фенилгликоль	$C_8H_8Cl_4$	—	75,0	87,8	100,7	115,6	124,2	136,2	153,8	173,6	193,5	73
1,3-Фенилдиамин	$C_6H_8N_2$	99,8	131,2	147,0	163,8	182,5	194,0	209,9	233,0	259,0	285,5	62,8
Фенилдихлорфосфат	$C_6H_5Cl_2O_2P$	66,7	95,9	110,0	125,9	143,4	153,6	168,0	189,8	213,0	230,5	—
1,2-Фенилендиацетат	$C_{10}H_{10}O_4$	99,0	129,8	145,7	161,8	179,8	191,0	206,5	228,7	253,3	278,0	—
Фенилизотиоцианат	C_7H_5NS	47,2	75,6	89,6	115,5	122,5	133,3	147,7	169,6	191,0	218,5	—21,0
Фенилизоцианат	C_7H_5NO	10,6	36,0	48,5	62,5	77,7	87,7	100,6	120,8	142,7	165,6	—
Фенилгидроцианид	C_7H_5N	12,0	37,0	40,7	63,4	78,3	88,0	101,0	120,8	142,3	165,0	—
N-Фениламинкислотанат	$C_{12}H_{10}NO_2$	146,0	179,2	195,8	213,4	235,0	245,3	260,6	284,5	311,3	337,8	—
Фенилмеркаптан	C_6H_6S	18,6	43,7	56,0	69,7	84,2	93,9	106,6	125,8	146,7	168,0	—
1-Фенил-1,3-пентандион	$C_{11}H_{12}O_2$	96,0	128,5	144,0	159,0	176,0	189,8	204,5	226,7	251,2	275,5	—
3-Фенил-1-пропанол	$C_9H_{12}O$	74,7	102,4	116,0	131,2	147,4	156,8	170,3	191,2	212,8	235,0	—
Фенилтрихлорсилан [60]	$C_6H_5Cl_3Si$	—	—	75,5	89,8	105,9	116,3	130,3	151,5	175,5	201,0	—
Фенилуксусная кислота	$C_8H_8O_2$	97,0	127,0	141,3	156,0	173,6	184,5	198,2	219,5	243,0	265,5	76,5
2-Фенилфенол	$C_{12}H_{10}O$	100,0	131,6	146,2	163,3	180,3	192,2	206,9	227,9	251,8	275,0	56,5
4-Фенилфенол	$C_{12}H_{10}O$	—	—	176,2	193,8	213,0	225,3	240,9	263,2	285,5	309,0	164,5
Фенилциклогексан	$C_{12}H_{16}$	67,5	96,5	111,3	126,4	144,0	154,2	169,3	191,3	214,6	240,0	7,5
2-Фенилэтанол	$C_8H_{10}O_2$	78,0	106,6	121,2	136,0	152,2	163,2	176,5	197,6	221,0	245,3	11,0
2-Фенилэтилацетат	$C_{10}H_{12}O_2$	82,0	113,5	128,0	144,5	162,3	174,0	189,2	211,3	235,0	259,7	6,7
Фенол	C_6H_6O	40,1	62,5	73,8	86,0	100,1	108,4	121,4	139,0	160,0	181,9	40,6
dl-Фенхиловый спирт	$C_{10}H_{18}O$	46,8	70,3	82,1	96,6	110,8	120,2	132,3	150,0	173,2	201,0	35,0
Фенхлевая кислота	$C_{10}H_{16}O_3$	101,7	126,7	142,3	155,8	171,8	181,5	194,0	215,0	237,8	264,1	19,0
d-Фенхон	$C_{10}H_{16}O$	26,0	54,7	68,3	83,0	99,5	109,8	123,6	144,0	166,8	191,0	5,0
Флоорен	$C_{13}H_{10}$	—	129,3	146,0	164,2	185,2	197,8	214,7	240,3	265,6	295,0	113,0
Формальдегид	CH_2O	—	—	—88,0	—79,6	—70,6	—65,0	—57,3	—46,0	—33,0	—19,5	—92,0
Формамид	CH_3NO	70,5	96,3	109,5	122,5	137,5	147,0	157,5	175,5	193,5	210,3	—
Фурон	C_4H_4O	42,0	69,3	81,5	95,6	111,3	121,4	134,0	155,5	176,3	197,2	28,0
Фосген	CCl_2O	—92,9	—77,0	—69,3	—60,3	—50,3	—44,0	—35,6	—22,3	—7,6	+8,3	—104,0
Фталевый ангидрид	$C_8H_4O_3$	96,5	121,3	134,0	151,7	172,0	185,3	202,3	228,0	250,8	284,5	130,8
Фталид	$C_8H_6Cl_2O_2$	95,5	127,7	144,0	161,3	181,0	193,5	210,0	234,5	261,8	290,0	73,0
Фталилхлорид	$C_8H_4Cl_2O_2$	86,3	118,3	134,2	151,0	170,0	182,2	197,8	222,0	248,3	275,8	88,5
Фторбензол	C_6H_5F	—43,4	—22,8	—12,4	—1,2	+11,5	19,6	30,4	47,2	65,7	84,7	—42,1
2-Фиорстолуол	C_7H_7F	—24,2	—2,2	+8,9	21,4	34,7	43,7	55,3	73,0	92,8	114,0	—80,0
3-Фиорстолуол	C_7H_7F	—22,4	0,5	+11,0	23,4	37,0	45,8	57,5	75,4	95,4	116,0	—110,8
4-Фиорстолуол	C_7H_7F	21,8	40,3	51,8	24,0	37,8	46,5	59,1	76,0	96,1	117,0	—
1-Фиорстирол	C_8H_7F	—145,3	138,0	—132,2	—125,4	—118,0	—113,0	—105,2	—95,4	—84,0	72,2	—100,5
Фурил-2-фуэарилхлорид	$C_4H_3OCl_2O_2$	15,0	39,5	51,8	65,0	79,5	89,0	101,0	120,0	140,0	160,0	—
Фурфуриловый спирт	$C_5H_6O_2$	31,8	56,0	69,0	81,0	95,7	104,0	115,9	133,1	151,8	170,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Фурфурол	$C_5H_4O_2$	18,5	42,6	54,8	67,8	82,1	91,5	103,4	121,8	141,8	161,8	—36,5
Хинолин	C_9H_7N	59,7	89,6	103,8	119,8	136,7	148,1	163,2	186,2	212,3	237,7	—15,0
Хлоралгидрат	$C_2H_3Cl_3O_2$	—9,8	+10,0	19,5	29,2	39,7	46,2	55,0	68,0	82,1	95,2P	51,7
2-Хлоранилин	C_6H_6ClN	46,3	72,5	84,8	99,2	115,6	125,7	139,5	160,0	183,7	208,8	—
3-Хлоранилин	C_6H_6ClN	63,5	89,8	102,0	116,7	133,6	144,1	158,0	179,5	203,5	228,5	-10,4
4-Хлоранилин	C_6H_6ClN	59,3	87,9	102,1	117,8	135,0	145,8	159,9	182,3	206,6	230,5	70,5
Хлорбензол	C_6H_5Cl	—13,0	—10,6	22,2	35,3	49,7	58,3	70,7	89,4	110,0	132,2	45,2
1-Хлорбутан	C_4H_9Cl	—40,0	—28,9	—18,6	—7,4	+5,0	13,0	24,0	40,0	58,8	77,8	—123,1
Хлорметилкафенилсилан	$C_8H_{11}ClSi$	29,8	56,7	70,0	84,7	101,2	111,5	124,7	145,5	168,6	193,5	—
2-Хлордифенил	$C_{12}H_9Cl$	89,3	109,8	134,7	151,2	169,9	182,1	197,0	219,6	243,8	267,6	34,0
4-Хлордифенил	$C_{12}H_9Cl$	56,4	120,8	146,0	164,0	183,8	196,0	212,5	237,8	264,5	292,9	75,5
Хлордифторметан	$CHClF_2$	—122,8	—110,2	—103,7	—96,5	—88,6	—83,4	—76,4	—65,8	—53,6	40,8	—160
2-Хлоркротоновая кислота	$C_4H_5ClO_2$	70,0	96,6	108,0	121,2	136,6	144,4	155,6	173,8	193,2	212,0	—
Хлорметилдифенилсилан	$C_{13}H_{13}ClSi$	105,0	137,5	152,7	170,0	189,2	200,5	216,0	240,5	266,5	295,5	—
Хлорметилсилан	CH_5ClSi	95,0	—79,2	71,0	—62,0	—51,7	45,2	—36,4	—22,9	—7,8	+8,7	—
1-Хлорнафталин	$C_{10}H_7Cl$	80,6	104,8	118,6	134,4	153,2	165,6	180,4	204,2	230,8	259,3	20,0
Хлорпикрин	CCl_3NO_2	25,5	—5,3	+7,8	20,0	33,8	42,3	53,8	71,8	91,8	111,9	—64,0
2-Хлорпиридин	C_5H_4ClN	13,3	38,8	51,7	65,8	81,7	91,6	104,6	125,0	147,7	170,2	
1-Хлорпропан	C_3H_7Cl	68,3	—50,0	—41,0	31,0	—19,5	12,1	2,5	+19,2	29,4	46,4	—122,8
2-Хлорпропан	C_3H_7Cl	—78,8	—61,1	—52,0	—42,0	—31,0	—23,5	—13,7	+1,3	18,1	36,5	—117
1-Хлорпропилен	C_3H_5Cl	—81,3	—63,4	—54,1	—44,0	—32,7	—25,1	15,1	+1,3	18,0	37,0	—99,0
3-Хлорпропилен	C_3H_5Cl	—70,0	52,0	—42,9	—32,8	—21,2	—14,1	—4,5	10,0	27,5	44,6	—136,4
γ-Хлорпропилтрихлорсилан [60]	$C_3H_7Cl_4Si$	—	—	52,3	76,4	91,9	101,8	115,3	135,4	158,3	182,3	—
3-Хлортиофен	C_4H_3ClS	25,3	51,3	65,2	80,0	96,5	107,2	121,2	142,4P	165,7P	190,0P	—
4-Хлортиофен	C_4H_3ClS	28,0	54,5	67,5	82,0	98,0	108,5	122,0	143,5P	166,0P	191,0P	—15,0
1-Хлортетралин	$C_{10}H_{11}Cl$	96,5	131,8	148,2	166,2	187,0	199,8	215,5	240,3	267,5	296,0	0,0
α-Хлортолуол	C_7H_7Cl	22,0	47,8	60,8	75,0	90,7	100,5	114,2	134,0	155,8	179,4	—39,0
2-Хлортолуол	C_7H_7Cl	5,4	30,6	43,2	56,9	72,0	81,8	94,7	115,0	137,1	159,3	—
3-Хлортолуол	C_7H_7Cl	4,8	30,5	43,2	57,4	73,0	83,2	96,3	116,6	139,7	162,3	—
4-Хлортолуол	C_7H_7Cl	5,5	31,0	43,8	57,8	73,5	83,3	96,6	117,1	139,8	162,3	7,3
Хлортриметилсилан	C_3H_9ClSi	—62,8	—43,6	—34,0	25,2	—11,4	—4,0	+6,0	21,9	39,4	57,9	—
Хлортрифторметан	$CClF_3$	—149,5	—139,2	—134,1	—128,5	—121,9	—117,3	—111,7	102,5	—92,7	—81,2	—
2-Хлор-3,4,4,4-трифторбутен	$C_4H_4ClF_3$	0,0	24,7	37,1	50,6	65,9	75,4	88,3	106,3	130,0	152,2	—6,0
1-Хлор-1,2,2-трифторэтилен	C_2ClF_3	—116,0	—102,5	—95,9	—88,2	79,7	—74,1	66,7	—56,0	—41,7	—27,9	—157,5
Хлортриэтилсилан	$C_6H_{15}ClSi$	—4,9	+19,8	32,0	45,5	60,2	69,5	82,3	101,0	123,6	146,3	—
Хлоруксусная кислота	$C_2H_3ClO_2$	43,0	68,3	81,0	94,2	109,2	118,3	130,7	149,0	169,0	189,5	61,2
Хлоруксусный ангидрид	$C_4H_4Cl_2O_3$	67,2	94,1	108,0	122,4	138,2	148,0	159,8	177,8	197,0	217,0	46,0
4-Хлорфенилметиловый спирт	C_7H_7ClO	84,0	114,3	129,0	145,0	162,0	173,5	188,1	210,0	234,5	260,3	—
2-Хлор-3-метилфенол	C_7H_7ClO	118,0	152,2	169,7	186,7	207,4	219,0	237,0	261,3	289,4	317,5	6,0
2-Хлор-6-метилфенол	C_7H_7ClO	119,8	153,7	170,7	189,8	208,2	220,0	237,1	261,6	289,5	317,0	—
2-Хлорфенол	C_6H_5ClO	42,1	35,2	51,2	65,9	82,0	92,0	106,0	126,4	149,8	174,5	7,0
3-Хлорфенол	C_6H_5ClO	64,2	72,0	86,1	101,7	118,0	129,4	143,0	164,8	186,7	214,0	32,5
4-Хлорфенол	C_6H_5ClO	49,8	78,2	92,2	108,1	125,0	136,1	150,0	172,0	196,0	220,0	42,0
бис-2-Хлорэтилацеталь	$C_6H_{12}Cl_2O_2$	56,2	85,7	97,6	112,2	127,8	138,0	152,7	169,8	190,5	212,6	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
1-Хлор-2-этилбензол	C_8H_9Cl	17,2	43,0	50,1	70,3	80,2	96,4	110,0	130,2	152,2	177,0	−80,2
1-Хлор-3-этилбензол	C_8H_9Cl	18,6	45,2	58,2	73,0	89,2	99,6	113,6	133,8	166,7	181,1	−53,3
1-Хлор-4-этилбензол	C_8H_9Cl	19,2	46,4	60,0	75,5	91,8	102,0	116,0	137,0	159,8	184,3	−62,6
1-Хлоратилен	C_2H_3Cl	−105,6	−90,8	−80,7	−75,7	−66,8	−61,1	−53,2	−41,3	−28,0	−13,8	−153,7
2-Хлоратил-α-метилбензиловый эфир	$C_{15}H_{13}ClO$	69,3	91,4	106,0	121,8	139,6	150,0	164,8	186,3	210,8	235,0	—
2-Хлоратилхлорацетат	$C_4H_6Cl_2O_2$	46,0	72,1	86,0	100,0	116,0	126,2	140,0	159,8	182,2	205,0	—
2-Хлоратил-2-хлорвинилпропиловый эфир	$C_5H_{10}Cl_2O$	24,7	50,1	63,0	77,2	92,4	102,2	116,8	136,7	156,5	180,0	—
2-Хлоратил-2-хлорпропиловый эфир	$C_5H_{10}Cl_2O$	20,8	50,5	70,0	84,8	101,5	111,8	125,0	146,3	169,8	194,1	—
1-Хлор-2-этоксибензол	C_8H_9ClO	45,8	72,8	86,5	101,5	117,8	127,8	141,8	162,0	185,0	208,0	—
Хлоротоксиметилфенилсилан	$C_8H_{11}ClOSi$	44,8	72,3	94,6	101,3	117,8	128,0	142,6	163,5	187,7	212,0	—
2-(2-Хлоратокси)-этанол	$C_4H_9ClO_2$	53,0	78,3	90,7	104,1	118,4	127,5	139,5	157,2	176,5	198,0	—
Цетиламин	$C_{16}H_{35}N$	123,6	157,8	176,0	195,7	215,7	228,8	245,8	272,2	300,4	330,0	—
Цетиловый спирт	$C_{16}H_{34}O$	132,7	158,3	177,8	197,8	219,8	234,3	251,7	280,2	312,7	344,0	49,3
Циан бромистый	BrCN	−35,7	−18,3	−10,0	−1,0	+8,6	14,7	22,6	35,8	46,0	61,5	58,0
Циан иодистый	ICN	25,2	47,2	57,7	68,6	80,3	88,0	97,6	111,5	126,1	141,1	—
2-Циано-2-бутилацетат	$C_7H_{11}NO_2$	32,0	64,7	82,0	96,2	111,8	121,5	135,8	152,2	173,4	195,2	—
Циан фтористый	FCN	−134,4	−123,8	−118,5	−112,8	−106,4	−102,3	−97,0	−89,2	−80,5	−72,6	—
Циан хлористый	CClN	−76,7	−61,4	−53,8	−46,1	−37,5	−32,1	−24,9	−14,1	−2,3	+13,1	6,5
Циклобутан	C_4H_8	−92,0	−76,0	−67,9	−58,7	−48,4	−41,8	−32,8	−18,9	−3,4	+12,9	−50,0
Циклобутен	C_4H_6	−99,1	−83,4	−75,4	−66,6	−56,4	−50,0	−41,2	−27,8	−12,2	+2,4	—
Циклогексан	C_6H_{12}	−46,3	−25,4	−15,9	−5,0	+6,7	14,7	25,5	42,0	60,8	80,7	6,6
Циклогексанол	$C_6H_{12}O$	21,0	44,0	56,0	68,8	83,0	91,8	103,7	121,7	141,4	161,0	23,9
Циклогексанон	$C_6H_{10}O$	1,4	26,4	38,7	52,5	67,8	77,5	90,4	110,3	132,5	155,6	−45,0
Циклогексилгидрид	$C_6H_{12}O$	50,4	77,2	90,0	104,0	119,8	129,8	142,7	161,7	183,5	205,4	—
2-Циклогексил-4,6-динитрофенол	$C_{12}H_{14}N_2O_5$	132,8	161,8	175,9	191,2	206,7	216,0	229,0	248,7	269,8	291,5	—
Циклоалкан	C_8H_{16}	68,0	−49,6	−40,4	−30,1	−18,6	−11,3	−1,3	+13,8	31,0	49,3	−89,7
Циклопропан	C_3H_6	−110,8	−104,2	−97,5	−93,3	−82,5	−77,0	−70,0	−60,1	−46,9	−33,5	−126,6
Цимол	$C_{10}H_{14}$	19,0	44,6	57,6	71,5	87,0	96,8	110,1	130,0	151,8	175,0	—
Цинеол	$C_{10}H_{18}O$	15,0	40,9	54,1	68,5	84,2	94,3	109,2	128,7	151,6	176,0	1,0
Цитраконовый ангидрид	$C_5H_4O_3$	47,1	74,8	88,9	103,8	120,3	131,5	145,4	165,8	189,8	213,5	—
α-Цитраль	$C_{10}H_{16}O$	61,7	90,0	103,9	119,4	136,9	146,3	160,0	181,8	205,0	228,0	—
d-Цитронеллаль	$C_{10}H_{18}O$	44,0	71,4	84,9	99,8	116,1	125,2	140,1	160,0	183,8	206,5	—
Цитронеллилацетат	$C_{12}H_{22}O_2$	74,7	100,2	113,0	126,0	140,0	149,7	161,0	178,8	197,8	217,0	—
Цитронеллиновая кислота	$C_{10}H_{20}O_2$	99,5	127,3	141,4	155,6	171,9	182,1	195,4	214,5	230,6	257,0	—
Цитронеллол	$C_{10}H_{20}O$	66,4	93,6	107,0	121,5	137,2	147,2	159,8	179,8	201,0	221,5	—
Эвгенилацетат	$C_{12}H_{14}O_3$	101,6	132,3	148,0	164,2	185,0	194,0	209,7	232,5	257,4	282,0	26,5
Эвгенол	$C_{10}H_{12}O_2$	79,4	108,1	123,0	138,7	155,8	167,3	182,2	204,7	228,3	253,5	—
Этоксиметилдиоксисилоксан	$C_{20}H_{52}O_7Si_4$	144,0	173,6	189,0	205,0	220,5	231,0	244,3	264,2	286,0	307,5	—
Элаидиновая кислота	$C_{18}H_{34}O_2$	171,3	206,7	223,5	242,3	260,8	273,0	288,0	312,4	337,0	362,0	51,5
Этилгипохлорит	$C_2H_{15}ClO$	34,2	64,6	64,6	75,0	86,8	95,5	102,7	116,3	130,7	146,0	—
Этилгексановая кислота	$C_8H_{16}O_2$	76,0	101,3	113,2	125,6	139,5	148,5	160,0	179,5	199,6	221,5	−11,0
Этилгексиловый альдегид	$C_8H_{16}O$	12,0	32,7	43,0	54,0	66,3	74,0	84,0	102,0	125,5	155,0	−42,0

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Этилгексилнитрит	$C_8H_{17}N$	21,0	47,8	6,16	76,3	92,6	103,0	116,5	137,7	160,0	184,6	—
Этилгексенон	$C_{12}H_{18}O$	100,0	130,3	145,5	161,0	178,9	189,9	204,2	225,0	248,3	271,3	—
Этилгидразидин	C_2H_5ClO	— 16,5	+ 5,6	16,6	29,0	42,0	50,6	62,0	79,3	99,0	117,9	—25,0
1,2-Этиленгликоль-2-метилгексанонит	C_9H_6O	— 69,0	50,0	—40,3	- 29,5	17,3	—0,7	+ 1,2	17,5	36,0	55,5	—
Эруковая кислота	$C_{22}H_{42}O_2$	206,7	239,7	254,5	270,6	289,1	300,2	314,4	336,5	358,5	381,5	33,5
Эстрагол	$C_{10}H_{12}O$	52,6	86,0	98,7	108,4	124,0	135,2	146,5	168,7	192,0	215,0	
Этан	C_2H_6	—159,5	—148,5	142,9	—136,7	—125,8	- 125,4	- 119,3	- 110,2	—90,7	—89,6	—183,2
Этанол	C_2H_6O	— 31,3	— 12,0	—2,5	+9,0	19,0	26,0	34,9	48,1	68,5	78,4	—112
Этилакрилат	$C_5H_8O_2$	— 29,5	—8,7	+2,0	13,0	26,0	33,5	44,5	61,5	80,0	99,5	— 71,2
α-Этилакрилонитрил	C_5H_7N	— 26,0	6,4	—5,0	17,7	31,8	40,6	53,0	71,0	92,2	114,0	—
α-Этилакриловая кислота	$C_5H_8O_2$	47,0	70,7	89,0	94,4	108,1	116,7	127,5	144,0	160,7	179,2	—
Этиламин	C_2H_7N	— 82,3	- 66,4	— 58,3	—49,0	- 30,8	—33,4	- 25,1	—12,3	+2,0	16,6	—80,6
2-Этиланилин	$C_8H_{11}N$	29,7	55,9	69,0	83,1	98,8	109,0	122,3	142,1	164,2	187,1	—
3-Этиланилин	$C_8H_{11}N$	33,7	60,3	73,9	89,5	104,8	115,5	129,2	149,7	172,8	196,5	—
4-Этиланилин	$C_8H_{11}N$	33,5	60,2	73,9	88,5	104,7	115,4	128,4	149,2	172,5	196,5	—
N-Этиланилин	$C_8H_{11}N$	38,5	66,4	80,6	96,0	113,2	123,0	137,3	156,9	180,8	204,0	— 63,5
4-Этиланилин	$C_8H_{11}N$	52,0	80,0	93,8	109,0	125,7	136,0	149,8	170,6	194,2	217,4	— 4,6
Этилацетат	$C_4H_8O_2$	— 43,4	— 23,5	—13,5	—3,0	+ 9,1	16,6	27,0	42,0	59,3	77,1	— 83,4
Этилацетоацетат	$C_6H_{10}O_3$	28,5	54,0	67,3	81,1	96,2	106,0	118,5	138,0	158,2	180,8	— 45,0
Этилбензоат	$C_9H_{10}O_2$	44,0	72,0	86,0	101,4	118,2	129,0	143,2	164,8	188,4	213,4	— 34,6
Этилбензоилацетат	$C_{11}H_{12}O_3$	107,6	136,4	150,3	165,8	181,8	191,9	205,0	223,8	244,7	265,0D	—
Этилбензол	C_8H_{10}	- 9,8	+ 13,9	25,9	38,0	52,8	61,8	74,1	92,7	113,8	136,2	— 94,9
Этилбромид	C_2H_5Br	— 74,3	— 56,4	- 47,5	— 37,8	— 26,7	—19,5	—10,0	+4,5	21,0	38,4	—117,8
Этил-α-бромизобутират	$C_6H_{11}BrO_2$	10,6	36,8	48,0	61,8	77,0	86,7	99,8	119,7	141,2	163,6	—
Этилбутират [60]	$C_6H_{12}O_2$	— 18,4	+ 4,0	15,3	27,8	41,5	50,1	62,0	79,8	100,0	121,0	— 93,3
Этилвинилдихлорсилан	$C_4H_8Cl_2Si$	- -	—	15,5	28,1	42,1	51,0	63,1	81,3	102,0	125,7	—
3-Этилгексан	C_8H_{18}	— 25,0	+ 2,1	12,8	25,0	38,5	47,1	58,9	76,7	97,0	118,5	—
2-Этилгексилакрилат	$C_{11}H_{20}O_2$	56,0	77,7	91,6	105,3	123,7	134,0	147,9	168,2	192,2	216,0	—
Этилгликолят	$C_4H_8O_3$	14,5	38,8	50,5	63,9	78,1	87,6	99,8	117,8	138,0	158,2	—
2-Этилдиметилсилан	$C_4H_{11}NSi_2$	— 69,0	42,3	— 32,1	— 21,0	—8,3	—0,3	10,1	27,0	45,0	65,9	—127,0
Этилдифенилгидразин	$C_{14}H_{16}N$	98,3	130,2	146,0	162,8	182,0	193,7	209,8	233,0	258,8	286,0	—
Этилдихлорацетат	$C_4H_6Cl_2O_2$	9,6	34,0	46,3	59,0	74,0	83,6	96,1	115,2	135,9	156,6	—
Этилдихлорсилан [60]	$C_2H_6Cl_2Si$	—		24,4	— 12,0	- 0,8	9,1	20,4	37,8	56,0	75,5	—
Этил-N, N-диэтилглицинат	$C_8H_{15}NO_2$	76,0	106,3	121,7	137,7	154,4	166,0	181,3	202,8	226,5	252,0	—
Этилен	C_2H_4	—155,3	158,3	—153,2	—147,6	—141,3	-137,3	—131,8	—123,4	—113,9	-103,7	169,0
Этиленоксид	C_2H_4O	89,7	— 73,8	- 65,7	- 56,6	— 46,9	— 40,7	— 32,1	— 19,5	— 4,0	+ 10,7	—111,3
1,2-Этиленгликоль	C_2H_6O	58,0	79,7	92,1	105,8	120,0	129,5	141,8	158,5	178,5	197,3	15,6
Этилендиамин	$C_2H_8N_2$	11,0	+ 10,5	21,5	33,0	45,8	53,8	62,5	81,0	99,0	117,2	8,5
Этилен-бис-(хлорацетат)	$C_6H_8Cl_2O_4$	112,0	142,4	158,0	173,5	191,0	201,8	215,0	237,5	259,5	283,5	—
Этиленхлоргидрин	C_2H_5ClO	— 4,0	— 19,0	30,5	42,5	56,0	64,1	75,0	91,6	110,0	129,8	— 69,0
Этилизобутират	$C_6H_{12}O_2$	—24,3	— 2,4	+8,4	20,6	35,6	42,3	53,5	71,0	90,0	110,1	88,2
Этилизовалерат	$C_7H_{14}O_2$	— 6,1	+ 17,0	28,7	41,3	56,2	64,9	75,9	91,6	110,0	134,3	— 99,3
Этилизопропилат	$C_5H_{12}O_2$	11,0	35,8	48,0	61,7	76,3	85,8	98,2	117,8	131,2	160,4	—
Этилизотиоцианат	C_3H_5NS	13,2	+ 10,6	22,8	36,1	50,8	59,8	71,9	90,0	110,1	131,0	— 5,9
Этилиодид	C_2H_5I	— 64,4	- 34,3	— 24,3	— 13,1	— 0,9	+ 7,2	18,0	34,1	52,5	72,4	-108,0
Этилкротоновый эфир гидрид	$C_{11}H_{20}O_2$	118,8	149,8	165,0	181,8	190,8	211,5	225,6	246,5	272,8	298,0	—
Этилнитробензол	$C_8H_9NO_2$	107,8	134,8	143,7	155,5	168,8	177,3	187,9	203,8	220,0	237,0	52,0

Продолжение табл. 12.5

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
4-Этил-1,3-ксилол	$C_{10}H_{14}$	23,2	49,8	63,0	77,5	93,4	103,8	117,2	138,0	160,2	184,5	
5-Этил-1,3-ксилол	$C_{10}H_{14}$	23,2	49,7	62,8	77,5	93,4	103,7	117,2	138,0	160,4	185,0	—
2-Этил-1,4-ксилол	$C_{10}H_{14}$	24,1	50,6	64,0	78,5	94,1	104,3	118,0	139,4	161,0	185,0	—
3-Этилтуолол	$C_{11}H_{16}$	29,3	60,5	68,8	83,6	99,9	110,2	124,3	145,4	168,2	193,0	—
4-Этилтуолол	$C_{11}H_{16}$	31,5	58,4	72,0	86,7	103,5	113,8	127,2	148,3	171,8	195,8	—
Этиллевулинат	$C_7H_{12}O_3$	47,3	74,0	87,5	101,8	117,7	127,6	141,3	160,2	183,0	206,2	—
Этил-1-лейцинат	$C_8H_{17}NO_2$	27,8	57,3	72,1	88,0	106,0	117,8	134,8	149,8	167,3	184,0	—
Этилмеркаптан	C_2H_6S	−76,7	−60,1	−50,2	−40,7	−29,8	−22,4	−15,0	−1,5	17,7	35,0	−121,0
Этилмеласовый эфир	C_8H_8O	−91,0	−75,6	−67,8	−59,1	−49,4	−45,3	−34,8	−22,0	−7,8	+7,5	—
1-Этилнафталин	$C_{12}H_{12}$	70,0	101,4	115,8	133,8	152,0	164,1	180,0	204,6	230,8	259,1 Р	−27,0
Этил-3-нитробензоат	$C_9H_9NO_4$	108,1	140,2	155,0	173,6	192,6	205,0	220,3	244,6	270,0	256,0	47,0
Этилоксалат	$C_4H_5ClO_4$	−5,1	+18,0	29,9	42,0	56,0	65,2	76,6	94,5	114,7	135,0	—
3-Этилпентан	C_7H_{16}	−37,8	−17,0	−6,8	−4,7	17,5	25,7	36,9	51,8	73,0	93,5	−118,6
Этилпропиловый эфир	$C_5H_{12}O$	−64,5	−45,0	−35,0	−24,0	−12,0	−4,0	−6,8	23,3	41,6	61,7	—
Этилпропионат	$C_5H_{10}O_2$	−28,0	−7,2	+3,4	14,3	27,2	35,1	45,2	61,7	79,8	99,1	72,6
Этилсалицилат	$C_9H_{10}O_3$	61,2	90,0	104,2	119,3	136,7	147,8	161,5	183,7	207,0	231,5	1,3
3-Этилстирол	$C_{10}H_{12}$	28,5	55,0	68,3	82,5	99,2	109,6	123,2	144,0	167,2	191,5 П	—
4-Этилстирол	$C_{10}H_{12}$	26,0	52,7	66,3	80,8	97,3	107,6	121,5	142,0	165,0	189,0 П	—
2-Этилтолуол	C_9H_{12}	9,2	34,8	47,6	61,2	76,4	86,0	99,0	119,0	141,4	165,1	—
3-Этилтолуол	C_9H_{12}	7,2	32,3	44,7	59,2	73,3	82,9	95,9	115,5	137,8	161,3	−104,7
4-Этилтолуол	C_9H_{12}	7,6	32,7	44,9	58,5	73,6	83,2	96,3	116,1	136,4	162,0	—
Этилтриметилсилан	$C_5H_{14}Si$	−30,0	−7,6	−3,8	16,1	30,0	38,4	50,0	67,3	87,0	108,8	—
Этилтрихлорсилан	$C_2H_5Cl_3Si$	−60,6	−41,4	−31,8	−21,0	−9,0	−1,2	+9,2	25,0	42,8	62,0	—
Этилтрифенилсилан	$C_{20}H_{20}Si$	−95,4	−81,0	−73,7	−65,8	−56,8	−51,1	−43,6	−32,2	−19,1	−5,4	—
Этилтрихлорацетат	$C_4H_5Cl_3O_2$	30,7	45,5	57,7	70,6	85,5	94,4	107,4	125,8	145,0	167,0	—
Этилтрехлорсилан [60]	$C_2H_5Cl_3Si$	—	—	−1,0	+9,7	22,3	30,4	41,5	58,4	77,9	96,8	—
Этилтриэтоксисилан [63]	$C_8H_{20}O_3Si$	—	—	50,5	63,4	77,7	86,8	99,2	117,7	136,8	160,9	—
4-Этилфенетол	$C_{10}H_{14}O$	38,5	75,7	89,5	103,8	119,8	129,8	143,5	163,2	185,7	208,0	—
2-Этилфенол	$C_8H_{10}O$	46,2	73,4	87,0	101,5	117,9	127,9	141,8	161,6	184,5	207,5	−45,0
3-Этилфенол	$C_8H_{10}O$	60,0	86,8	100,2	114,5	130,0	139,8	152,0	171,8	193,3	214,0	−4,0
4-Этилфенол	$C_8H_{10}O$	59,3	86,5	100,2	115,0	131,3	141,7	154,2	175,0	197,4	219,0	46,5
Этилформиат	$C_3H_6O_2$	−60,5	−42,2	−33,0	−22,7	−11,5	−4,3	5,4	20,0	37,1	54,3	−79,0
Этилфторид	C_2H_5F	−117,0	−103,8	−97,7	−90,0	−81,8	−76,4	−69,3	−56,0	−45,5	−32,0	—
Этил-2-фуроат	$C_7H_8O_3$	37,6	63,8	77,1	91,5	107,5	117,5	130,4	150,1	172,5	196,0	34,0
Этилхлоренетат	$C_4H_7ClO_2$	1,0	25,4	37,5	50,4	65,2	74,0	86,0	103,8	123,8	144,2	−26,0
Этилхлорид	C_2H_5Cl	−89,8	−73,0	−65,8	−56,8	−47,0	−40,6	−32,0	−18,6	−3,9	+12,3	−139,0
Этил-α-хлорпропионат	$C_5H_9ClO_2$	6,6	30,2	41,9	54,3	68,2	77,3	89,9	107,2	126,2	146,5	—
Этилцетиламин	$C_{18}H_{39}N$	133,2	168,2	186,0	205,5	226,5	239,8	256,8	283,3	313,0	342,0 Р	—
Этилцианацетат	$C_5H_7NO_2$	67,9	93,5	106,0	119,8	133,8	142,1	152,8	169,8	187,8	206,0	—
Этилциклогексан	C_8H_{16}	−14,5	+9,2	20,6	33,4	47,6	56,7	69,0	87,8	109,1	131,8	−111,3
Этилциклопентан	C_7H_{14}	−32,2	−10,8	−0,1	11,7	25,0	33,4	45,0	62,4	82,3	103,4	−138,6
Этил-транс-циннамат	$C_{11}H_{12}O_2$	87,6	106,5	134,0	150,3	169,2	181,2	196,0	219,3	245,0	271,0	12,0
Этил-α-этилацетоацетат	$C_8H_{14}O_3$	40,5	67,3	80,2	94,6	110,3	120,6	133,8	153,2	175,6	198,0	—
Этоксидиметилфенилсилан	$C_{10}H_{16}OSi$	36,3	63,1	76,2	91,0	107,2	127,5	131,4	151,5	173,0	199,5	—
Этоксиметилдифенилсилан	$C_{15}H_{18}OSi$	109,0	138,5	152,7	168,2	187,0	196,7	211,8	234,0	256,8	282,0	—
Этокситриметилсилан	$C_5H_{14}OSi$	−60,9	−31,0	−20,7	−9,8	3,7	11,5	22,1	38,1	56,3	75,7	—
Этокситрифенилсилан	$C_{20}H_{19}OSi$	167,0	198,2	213,5	230,0	247,0	258,3	275,5	295,0	319,5	344,0	—
Янтарный ангидрид	$C_4H_4O_3$	92,0	115,0	128,2	145,3	163,0	174,0	189,0	212,0	237,0	261,0	119,6

Таблица 12.7

Температура, °С, при которой устанавливается указанное давление паров органических веществ (выше 1 *атм*) [94]

Вещество	Формула	Давление пара, *атм*									Критическая температура, °С	Критическое давление, *атм*
		1	2	5	10	20	30	40	50	60		
Анилин	C_6H_7N	184,4	212,8	254,8	292,7	342,0	375,5	400,0	422,4	—	426,0	52,4
Ацетилен	C_2H_2	—84,0	—71,6	—50,2	—32,7	—10,0	—4,8	10,8	20,8	34,8	36,0	62,0
Ацетон	C_3H_6O	56,5	78,0	113,0	144,5	181,0	205,0	214,5	—	—	235,0	47,0
Бензол	C_6H_6	80,1	103,8	142,5	176,8	221,5	249,5	272,3	290,3		290,5	50,1
Бромбензол	C_6H_5Br	156,2	186,2	232,5	274,5	327,0	356,8	387,5	—	—	397,0	44,6
1,3-Бутадиен	C_4H_6	—4,5	+15,3	47,0	76,0	114,0	139,8	160,0	—	—	161,8	42,8
Бутан	C_4H_{10}	—0,5	+18,8	50,0	76,5	116,0	140,6		—	—	152,8	36,0
Бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	117,5	139,8	172,5	203,0	237,0	256,0	277,0	—	—	287	46,4
втор-Бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	99,5	118,2	147,5	172,0	204,0	230,0	251,1	—	—	265	42,0
трет-Бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	82,9	102,0	130,0	154,2	184,0	207,0	222,5	—	—	270,0	45,0
Гексан	C_6H_{14}	68,7	93,0	131,7	166,0	209,4	—		—	—	234,8	25,6
Гептан	C_7H_{16}	98,4	124,8	165,7	202,8	247,0	—	—	—	—	266,8	26,9
Двуокись углерода	CO_2	—78,2	—69,1	—56,7	—39,5	—18,9	—5,5	+5,9	14,9	22,4	31,1	73,0
1,2-Дибромэтан	$C_2H_4Br_2$	131,5	167,7	200,0	237,0	260,0	280,0	295,0	300,0	301,5	309,8	70,6
Диэтиламин	C_4H_7N	7,4	25,0	59,0	80,0	111,7	132,2	149,8	162,6	—	164,5	52,4
2,3-Диметилбутан	C_6H_{14}	58,0	82,0	120,3	155,7	198,7	226,5	—	—		227,4	30,7
Диэтиловый эфир	$C_4H_{10}O$	—23,7	—6,4	+20,8	45,5	75,7	96,0	112,1	125,2	—	126,9	52,0
Диэтилоксалат	$C_6H_{10}O_4$	163,3	189,6	228,7	—	—	—	—	—		260,0	0,5
2,2-Диметилпропан	C_5H_{12}	9,5	29,5	61,1	90,7	127,6	152,5	—	—	—	159,0	33,0
Диметилсульфид	C_2H_6S	36,0	57,8	92,3	124,5	163,8	196,0	209,0	224,5	—	229,9	54,6
Дихлодифторметан	CCl_2F_2	—29,8	12,9	—16,1	42,4	74,0	95,6	—	—	—	111,5	39,6
Дихлорфторметан	$CHCl_2F$	8,9	28,4	59,0	87,0	121,2	144,0	162,6	177,5	—	178,5	51,0
1,2-Дихлор-1,1,2,2-тетрафторэтан	$C_2Cl_2F_4$	3,5	22,8	54,0	82,3	117,5	140,9		—	—	145,7	32,3
1,1-Дихлорэтан	$C_2H_4Cl_2$	57,3	80,2	117,3	150,3	192,7	220,0	242,0	261,5	—	261,5	50,0
1,2-Дихлорэтан	$C_2H_4Cl_2$	83,7	109,1	147,8	181,5	226,5	254,0	272,0	285,0	—	288,4	53,0
цис-1,2-Дихлорэтилен	$C_2H_2Cl_2$	50,0	82,1	119,3	152,3	194,0	221,5	244,5	260,0	—	271,0	57,9
транс-1,2-Дихлорэтилен	$C_2H_2Cl_2$	47,6	69,6	104,0	135,7	174,0	199,8	220,0	236,5		243,3	54,5
Диэтиламин	C_2N_2	—21,0	—4,4	+27,4	44,6	72,6	91,6	106,5	118,2	—	126,8	58,2
Диэтиламин	$C_4H_{11}N$	55,6	77,8	113,0	145,3	184,5	210,0	—			223,3	36,8
Диэтиловый эфир	$C_4H_{10}O$	34,6	56,0	90,0	122,0	159,0	183,3	—	—	—	193,8	35,5
Диэтилсульфид	$C_4H_{10}S$	88,0	112,0	153,8	190,2	234,0	263,0	—			283,8	30,1
Додекан	$C_{12}H_{26}$	214,5	248,2	300,0	345,8			—	—	—	385	17,5
Изобутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	108,0	127,3	156,2	182,0	212,0	232,0	251,0			265	44,0
Изобутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	98,3	121,8	157,8	192,4	234,0	261,0	—	—	—	278,0	38,0
Изомасляная кислота	$C_4H_8O_2$	154,5	179,8	217,0	250,0	286,0	315,0	336,0		—	336	40,0
Иодбензол	C_6H_5I	188,6	220,0	270,0	315,7	371,5	405,0	437,2	—	—	448,0	44,7
Муравьиная кислота	CH_2O_2	166,5	188,3	225,0	257,0	295,0	319,0	338,0	352,0	—	359	62,0
Метан	CH_4	—161,5	—152,5	—139,3	—124,8	—108,5	—96,3	—86,3	—	—	—82,1	45,8
Метанол	CH_4O	64,7	84,0	112,5	138,0	167,8	186,5	203,5	214,0	224,0	240,0	78,7
Метиламин	CH_5N	—6,3	+10,1	36,0	59,5	87,8	106,3	121,8	133,7	144,6	176,5	73,6
Метилацетат	$C_3H_6O_2$	57,8	79,5	115,1	144,2	181,0	205,0	225,0		—	233,7	46,3
Метилбромид	CH_3Br	3,6	23,3	54,8	84,0	121,7	147,5	170,2	190,0	—	191	51,6
2-Метилбутан	C_5H_{12}	27,8	48,8	82,8	114,5	154,0	180,3	—	—	—	187,8	32,8
Метилбутират	$C_5H_{10}O_2$	102,3	127,0	168,7	203,0	244,5	272,0	—	—	—	281,2	34,2
Метилизобутират	$C_5H_{10}O_2$	92,6	116,7	155,2	190,2	232,0	259,5			—	267,5	33,0
Метилиодид	CH_3I	42,4	67,5	101,6	138,0	176,5	206,0	228,5	248,0		253	54,6
Метилмеркаптан	CH_4S	6,8	26,1	55,5	83,4	117,5	140,0	157,7	172,0	184,0	196,8	71,4

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.									Критическая температура, °С	Критическое давление, атм
		1	2	5	10	20	30	40	60	80		
2-Метилгептан	C_8H_{18}	−11,7	+7,5	30,0	60,3	108,7	139,5	—		—	336,0	37,0
Метилпропионат	$C_4H_8O_2$	79,9	103,0	139,8	172,6	212,9	239,0	—	—		257,4	39,3
Метилформиат	$C_2H_4O_2$	32,0	51,9	83,5	112,0	147,2	169,7	188,5	213,0	—	214,0	60,1
Метилфторид	CH_3F	−78,2	−64,5	−42,0	−21,0	+2,0	15,5	26,5	36,0	43,5	44,9	62,0
Метилхлорид	CH_3Cl	−24,0	−6,4	+22,0	47,3	77,3	97,5	113,8	126,0	137,5	143,8	66,6
Окись углерода	CO	−191,3	−183,5	−170,7	−161,0	−149,7	−141,9	—	—	—	−139,7	34,6
Октан	C_8H_{18}	125,6	152,7	186,2	235,6	281,4	—	—	—	—	296,2	24,7
Пентан	C_5H_{12}	36,1	58,0	92,4	121,7	164,3	191,3	—	—	—	197,2	33,0
Пропадиен	C_3H_4	−35,0	−18,4	+8,0	33,2	64,5	86,6	103,5	118,0	—	120,7	51,4
Пропан	C_3H_8	−42,1	−25,6	+1,4	26,5	58,1	78,7	94,8	—	—	96,8	42,0
1-Пропанол	C_3H_8O	97,8	117,0	145,0	177,0	210,8	232,3	250,0	—	—	263,7	40,9
2-Пропанол	C_3H_8O	82,0	101,3	130,2	157,0	186,0	205,0	220,2	232,0	—	235	53
Пропиламин	C_3H_9N	48,5	69,9	102,8	133,4	170,0	194,3	214,5	—	—	227,8	46,8
Пропилацетат	$C_5H_{10}O_2$	101,8	126,8	160,7	200,5	242,8	269	—	—	—	276,2	33,2
Пропилен	C_3H_6	−47,7	−31,4	−4,8	+19,6	49,5	70,0	85,0	—	—	91,4	46,4
Пропилформиат	$C_4H_8O_2$	81,8	104,3	142,0	176,4	217,5	245,0		—		264,6	39,5
Пропин	C_3H_4	−23,3	−7,1	+19,5	43,6	74,0	94,0	111,5	125,0	—	128,0	62,6
Пропионовая кислота	$C_3H_6O_2$	141,1	160,0	186,0	203,5	220,0	228,0	233,0	238,0	—	250,5	53,1
Сероуглерод	CS_2	46,5	69,1	101,8	136,3	175,0	201,5	222,8	240,0	250,0	273,0	72,9
Синильная кислота	HCN	25,8	45,5	75,0	103,5	134,2	154,0	170,2	189,0	—	183,5	50,0
Тетраметилсилан	$C_4H_{12}Si$	27,0	49,0	82,0	113,0	152,0	176,0	—	—	—	185,0	33,0
Толуол	C_7H_8	110,6	136,5	178,0	215,8	262,5	292,8	319,0	—	—	320,6	41,6
Трихлорметан	$CHCl_3$	61,3	89,9	120,0	152,3	191,2	216,5	237,0	254,0	—	260,0	54,9
1,1,2-Трихлор-1,2,2-трифторэтан	$C_2Cl_3F_3$	47,6	70,0	105,5	136,0	177,7	205,0	—	—	—	214,1	33,7
Трихлорфторметан	CCl_3F	23,7	44,3	77,3	106,2	146,7	172,0	194,0	—	—	198,0	43,2
Уксусная кислота	$C_2H_4O_2$	118,1	143,5	180,3	214,0	252,0	276,5	297,0	312,5	—	321,6	57,2
Уксусный ангидрид	$C_4H_6O_3$	130,6	162,0	194,0	224,5	253,0	279,6	288,5	—	—	296,0	46,0
Фенол	C_6H_6O	181,9	206,0	248,2	283,8	328,7	358,0	382,1	400,0	418,7	419,0	60,5
Фосген	CCl_2O	8,3	27,3	57,2	85,0	119,0	141,8	159,8	174,0	—	181,7	56,0
Фторбензол	C_6H_5F	81,7	109,9	148,5	184,4	227,0	257,0	279,3	—	—	286,5	44,7
Хлорметан	CH_3Cl	132,9	160,2	206,0	245,3	292,8	324,4	349,8	—	—	360,2	44,0
Хлордифторметан	$CHClF_2$	−40,8	−24,7	+0,3	21,0	52,0	70,5	85,3	—	—	96,0	48,7
Хлортрифторметан	$CClF_3$	−81,2	66,3	−42,7	−18,5	+12,0	34,8	52,8	—	—	63,0	40,3
1-Хлор-1,2,2-трифторэтилен	C_2ClF_3	−27,3	−11,1	+15,5	40,0	71,1	91,5	—	—	—	107,0	39,0
Циклогексан	C_6H_{12}	80,7	106,0	146,4	181,0	228,4	257,5	—	—	—	279,9	39,8
Четыреххлористый углерод	CCl_4	76,7	102,0	141,7	178,0	222,0	251,2	276,0	—	—	283,1	45,0
Этан	C_2H_6	−88,6	−75,0	−52,8	−32,0	−6,4	+10,0	23,6	—	—	32,3	48,2
Этанол	C_2H_6O	78,4	97,5	126,0	151,8	183,0	203,0	218,0	230,0	242,0	243,5	63,1
Этиламин	C_2H_7N	16,6	35,7	65,3	91,8	124,0	146,0	163,0	176,0	—	183,2	55,5
Этилацетат	$C_4H_8O_2$	77,1	100,0	136,0	169,7	205,5	235,0	—	—	—	250,1	38,9
Этилбензол	C_8H_{10}	136,2	163,5	207,5	245,3	294,5	326,5	—	—	—	346,4	38,1
Этилбромид	C_2H_5Br	38,4	60,2	95,0	126,8	164,3	188,0	206,5	220,0	225,5	230,8	61,0
Этилен	C_2H_4	−103,7	−90,8	−71,1	−52,8	−29,1	−14,2	−1,5	+8,5	—	9,6	50,7
Этилизобутират	$C_6H_{12}O_2$	110,1	135,5	174,2	210,0	255,0	280,0	—	—	—	280,0	30,0
Этилмеркаптан	C_2H_6S	35,0	56,6	90,7	121,9	159,5	184,3	204,7	220,0	—	225,5	54,2
Этилметиловый эфир	C_3H_8O	7,6	26,5	56,4	84,0	106,0	141,4	160,0	—	—	164,7	43,4
Этилпропиловый эфир	$C_5H_{12}O$	61,7	85,3	123,1	156,2	187,2	223,0	—	—	—	227,4	32,1
Этилпропионат	$C_5H_{10}O_2$	99,1	123,8	162,7	197,8	240,0	264,5	—	—	—	272,8	39,2
Этилформиат	$C_3H_6O_2$	54,3	76,0	110,5	142,2	180,0	205,0	225,0	—	—	235,3	46,8
Этилфторид	C_2H_5F	−32,0	−16,7	+7,7	30,2	57,5	75,7	90,0	—	—	102,9	49,6
Этилхлорид	C_2H_5Cl	12,4	32,5	64,0	92,6	127,3	149,5	167,0	185,0	—	187,2	52,0

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вукалович М. П. Термодинамические свойства воды и водяного пара. М., Машгиз, 1955.
2. Несмеянов А. Н. Давление пара химических элементов. М., Изд-во АН СССР, 1961.
3. Caillet L., Colardeau, Rivière. Compt. rend., 1960, v. 150, p. 1585.
4. Brinkardt F. Phys. Z., 1926, Bd 26, S. 265.
5. Honig R. E., Hook H. O. R. C.A. Rev., 1960, v. 21, p. 360.
6. Witt W. D., Barrow R. F. Trans. Faraday Soc., 1958, v. 55, p. 792.
7. Давление пара фтористого алюминия. — «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 2196 (Авт.: Евсеев А. М., Пожарская Г. В., Несмеянов А. Н., Гераскин Я. И.)
8. Давление насыщенного пара фторидов бериллия. — «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 2192 (Авт.: Хандамирова Н. Э., Евсеев А. М., Пожарская Г. В. и др.)
9. Несмеянов А. Н., Фирсов Л. П. «Изв. АН СССР. Отд. техн. науч. Металлургия и топливо», 1959, № 3, с. 160.
10. Shimozaki Wada. Bull. Chem. Soc. Japan, 1956, v. 29, p. 294.
11. Дриз И. П., Давыдов В. Н. «Изв. инст. физиков АН СССР», 1957, № 7, с. 60.
12. Несмеянов А. Н., Ильичева И. А. «Ж. физ. химии», 1958, т. 32, с. 422.
13. Измерение давления насыщенного пара твердых сплавов методом радиоактивных индикаторов. — «Ж. физ. химии», 1956, т. 30, с. 1250 (Авт.: Несмеянов А. Н., Кифа Б. З., Стрельников А. А., Фирсов Л. П.)
14. Корнеева И. В., Белиов А. В., Новоселова А. В. «Ж. неорган. химии», 1960, т. 5, с. 3.
15. Малышев В. В. «Теплофизика высоких температур», 1974, т. 12, с. 743.
16. Малышев В. В. «Теплофизика высоких температур», 1973, т. 11, с. 1016.
17. Малышев В. В. «Атомная энергия», 1973, т. 34, с. 42; В сб.: «Теплофизические свойства газов». М., «Наука», 1973.
18. Несмеянов А. Н., Сазонов А. А. «Ж. неорган. химии», 1957, т. 2, с. 1183.
19. Несмеянов А. Н., Сазонов А. А. «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 230.
20. Давление пара фтористого лития. — «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 2169 (Авт.: Евсеев А. М., Пожарская Г. В., Несмеянов А. Н., Гераскин Я. И.)
21. Несмеянов А. Н., Сазонов А. А. «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 231.
22. Несмеянов А. Н., Белых Л. В. «Ж. физ. химии», 1960, т. 34, с. 841.
23. The Vapour pressure of sodium. Bloxide. J. Phys. Chem., 1957, v. 61, p. 384. (Auth.: Sense K. A., Alexander C. A., Bowman R. L. e. a.)
24. Treadwell W. D., Werder W. Z. angew. Math. und Phys., 1953, Bd 4, S. 470.
25. Несмеянов А. Н., Кифа Б. З. «Ж. неорган. химии», 1958, т. 4, с. 486.
26. Horbe R., Knacke O. — Z. Erzbergbau und Metallenhüttenwesen, 1959, Bd 12, S. 321.
27. Darnell A. J., McCullum W. A., Milne T. A. J. Phys. Chem., 1960, v. 64, p. 341.
28. Ackermann R. J., Giffes P. W. J. Chem. Phys., 1956, v. 25, p. 1089.
29. Кац Дж., Рабинович Е. Химия урана. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1954.
30. Попов М. М., Костылев Ф. А., Зубова Н. В. «Ж. неорган. химии», 1960, т. 4, с. 1768.
31. Wang Ke-Qin. J. Amer. Ceram. Soc., 1962, v. 45, p. 509.
32. Корнеева И. В., Сокова В. В., Новоселова А. В. «Ж. неорган. химии», 1960, т. 5, с. 241.
33. Аербух Б. Д., Ветренко Е. А., Чуфаров Г. И. «Ж. прикл. химии», 1959, т. 32, с. 1221.
34. Кей Дж., Лэби Т. Справочник физика-экспериментатора. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1949.
35. Jacy R. L., Miller H. C. J. Phys. Chem., 1956, v. 60, p. 1412.
36. Ruff O., Le Boucher L. Z. anorgan. Chem., 1934, Bd 216, S. 376.
37. Hildenbrandt D. L. J. Amer. Chem. Soc., 1958, v. 80, p. 4129.
38. Fischer J., Rudzitis E. J. Amer. Chem. Soc., 1959, v. 81, p. 6376.
39. Cubicciotti D., Keneshea F. J. J. Phys. Chem., 1959, v. 63, p. 295.
40. Рысс И. Г. Химия фтора и его неорганических соединений. М., Госхимиздат, 1956.
41. Palko A. A., Ryon A. D. J. Phys. Chem., 1958, v. 62, p. 319.
42. Сун Инь-Чжу, Миронов И. С. «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 492.
43. Iodine pentafluoride, Freezing and boiling point, heat of vaporisation and Vapour pressure temperature relation. — J. Amer. Chem. Soc., 1951, v. 76, p. 4943 (Auth.: Rogers M. T., Speis J. L., Thompson H. B., Parish M. D.)
44. Трачев И. С., Кириллов П. Л. «Изв.-физ. журнал», 1960, т. 3, с. 62.
45. Wartenberg H., Schulz H. Z. Elektrochemie, 1921, Bd 27, S. 568.
46. Douglas T. B., Dever J. L. J. Res. Nat. Bur. Standards, 1954, v. 53, p. 81.
47. Makansi M. M., Mueller C. H. J. Phys. Chem., 1955, v. 59, p. 40.
48. Ситтиг М. Натрий, его производство, свойства и применения. Пер. с англ. М., Госатомиздат, 1961.
49. Weinstock B., Weaver E. E., Malm J. G. J. Inorg. and Nucl. Chem., 1959, v. 11, p. 104.
50. Wartenberg H., Bosse O. Z. Elektrochemie, 1922, Bd 28, S. 384.
51. West Udall D. J. Amer. Chem. Soc., 1959, v. 81, p. 29.
52. Hoffman C. J., Jolly W. H. J. Phys. Chem., 1957, v. 61, p. 1574.
53. Fairbrother F., Frith W. C. J. Chem. Soc., 1951, Nov., p. 3051.
54. Oliver G. D., Milton H. T., Grisard J. W. J. Amer. Chem. Soc., 1953, v. 75, p. 2827.
55. Ho J.-H., White D., Johnston H. L. J. Amer. Chem. Soc., 1953, v. 75, p. 1642.
56. Schnitzlein O. O. J. Phys. Chem., 1952, v. 56, p. 233.
57. Ruff O., Clasius K. Z. anorgan. Chem., 1906, Bd 160, S. 267.
58. Jarry R. L. J. Phys. Chem., 1957, v. 61, p. 408.
59. Clegg H. P., Rowlinson J. S., Sutton J. R. Trans. Faraday Soc., 1955, v. 51, p. 1327.
60. Jenkins A. S., Chambers G. F. Ind. Engrg. Chem., 1954, v. 46, p. 2267.
61. 3,3-dimethyl-2-butanol: chemical thermodynamic properties and barriers to internal rotation. — J. Chem. Phys. 1962, v. 36, p. 406 (Auth.: Scott D. W., Good W. D., Todd S. S. e.a.)
62. Li J. C., Pitzer K. S. J. Amer. Chem. Soc., 1956, v. 78, p. 1077.
63. Douglas T. B., Dever J. L. J. Amer. Chem. Soc., 1954, v. 76, p. 4826.

ГЛАВА 13

КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЕЩЕСТВ И ВИРИАЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

13.1. ВИРИАЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

Термодинамическое уравнение состояния определяется как соотношение экспериментальных P, V, T-данных, выраженное в произвольной аналитической форме:

$$f(P, V, T) = 0, \qquad (13.1)$$

где P — давление; T — температура; V — молярный объем газа. Теоретическая форма изотермы уравнения состояния реального неионизованного газа имеет вид так называемого вириального разложения:

$$\frac{PV}{RT} = 1 + \frac{B(T)}{V} + \frac{C(T)}{V^2} + \frac{D(T)}{V^3} + \ldots, \qquad (13.2)$$

где R — универсальная газовая постоянная. Коэффициенты $B(T)$, $C(T)$, ... называются соответственно вторым, третьим и т. д. вириальными коэффициентами; они зависят только от температуры и полностью определяются температурой и потенциалами взаимодействия молекул газа. В частности,

$$B(T) = \frac{1}{2}\int_V \left(1 - e^{-U(r)/kT}\right) dV,$$

где $U(r)$ — бинарный межмолекулярный потенциал; k — постоянная Больцмана. Аналогичные выражения для $C(T)$, $D(T)$, ... используются как для вычисления вириальных коэффициентов при известном межмолекулярном потенциале, так и для решения обратной задачи. В табл. 13.1 приведены значения второго вириального коэффициента для некоторых газов в зависимости от температуры.

Таблица 13.1

Второй вириальный коэффициент некоторых газов

T, °К	B, см³/моль	T, °К	B, см³/моль
Ar, аргон [1]		373,2	−6,87
84,80	−413,98	398,2	−1,59
88,30	−391,69	423,2	2,42
92,31	−351,67	447,2	6,18
95,07	−303,50	473,2	8,28
101,41	−269,75	573,2	17,88
105,16	−266,10	673,2	26,13
133,16	−279,28	773,2	29,43
142,60	−156,10	873,2	32,34
150,66	−142,7		
165,20	121,69	F_2 фтор [2]	
175,70	−103,30	200,2	−91
188,20	−91,00	400	2,0
203,20	−77,22	600	8,0
223,2	−62,10	600	14
235,8	−52,10	700	18
248,2	−47,43	800	21
273,2	−36,69	900	23
295,0	−27,40	1000	25
298,2	−26,00	1200	27
323,2	−18,65	1400	29
348,2	−12,24		

Продолжение табл. 13.1

T, °К	B, см³/моль	T, °К	B, см³/моль
H_2, водород [2–4]		600	10,51
14	−255	700	10,32
16	−212	800	10,13
18	−181	1000	9,81
20	−156	1200	9,58
25	−114		
30	−87	^4He, гелий-3 [5]	
35	−69	0,2	−1350
40	−56	0,4	−672,5
45	−50	0,6	−446,7
50	−38	0,8	−333,8
55	−30	1,0	−266,0
60	−24	1,2	−220,9
65	−19	1,4	−188,0
300	12,1	1,6	−164,4
400	12,3	1,8	−145,6
500	14,4	2,0	−136,6
600	15,0	2,2	−118,2
700	15,7	2,4	−109,0
800	16,4	2,6	−99,3
900	16,7	2,8	−94,8
1000	16,7	3,0	−85,4
1200	16,7		
1400	16,6	Kr, криптон [2,6]	
He_3, гелий [2,4]		107,55	−387
14	−11,5	109,99	−365
15	−10,6	112,26	−350
16	−8,9	115,35	−331
17	−7,5	118,60	−315
18	−6,2	121,47	−302
19	−5,1	128,14	−271
20	−4,0	132,13	−255
21	−3,1	138,07	−237
293,2	11,5	293,2	54
400	10,94	400	−23
500	10,72	500	−7,25

T, °K	B, кал/моль
600	2,56
700	5,23
800	12,01
900	17,6
1000	20,3
1200	24,2
1400	26,8

N_2, азот [2]

T, °K	B, кал/моль
298,2	−4,85
400	9,31
500	17,05
600	21,84
700	25,03
800	27,26
900	28,9
1000	30
1200	31,5
1400	32,6

Ne, неон [2]

T, °K	B, кал/моль
298,2	13,02
400	12,47
500	13,19
600	13,62
700	13,77
800	13,87
900	13,91
1000	13,88
1200	13,75
1400	13,61

O_2, кислород [2]

T, °K	B, кал/моль
293,2	−17
400	0,65
500	8,5
600	13,9
700	17,5
800	20
900	22
1000	23
1200	25
1400	26

O_3, озон [2]

T, °K	B, кал/моль
293,2	−167
500	−28
800	14

Xe, ксенон [2]

T, °K	B, кал/моль
298,15	−130,8
400	−71
500	−39
600	−20
700	−6,9
800	2,6
900	9,7
1000	15,3
1200	23
1400	28,5

BCl_3, трехлористый бор [2]

T, °K	B, кал/моль
255,2	−398
400	−231
500	−192
600	−105
700	−72
800	−49
900	31
1000	−16
1200	1,4
1400	4,6

BF_3, трехфтористый бор [2]

T, °K	B, кал/моль
298,2	−89,8
400	−42,6
500	−17,1
600	−1,1
700	9,6
800	17,7
900	23,6
1000	28
1200	34
1400	39

C_2N_2, дициан [2]

T, °K	B, кал/моль
298,2	−367
400	−172
500	−66
600	−0,8
700	44
800	77
900	101,4
1000	120
1200	146,6
1400	164

CO, окись углерода [2]

T, °K	B, кал/моль
298,2	−8,86
400	7,64
500	16,57
600	22,14
700	25,85
800	28,40
900	30,39
1000	31,80
1200	33,48
1400	34,76

CO_2, двуокись углерода [2]

T, °K	B, кал/моль
298,2	−94
400	−49
500	−25
600	−9,9
700	0,4
800	7,9
900	13,4
1000	17,7
1200	23,8
1400	27,9

H_2O, вода (пар) [2]

T, °K	B, кал/моль
400	−332
500	−168
600	−95
700	−65
800	−47
900	−35
1000	−26
1200	−15
1400	−8

NH_3, аммиак [2]

T, °K	B, кал/моль
298,2	−285
400	−120
500	−68
600	−46
700	−30
800	−21
900	−15
1000	−10
1200	−4,2
1400	0,38

NO, окись азота [2]

T, °K	B, кал/моль
298,2	−17,3
400	−4,0
500	3,4
600	7,9
700	11,0
800	13,2
900	14,8
1000	16,0
1200	17,8
1400	18,8

N_2O, закись азота [2,7]

T, °K	B, кал/моль
273,2	161
298,2	−133
398,2	−66,4
600	−9,9
700	0,4
800	7,9
900	13,4
1000	17,7
1200	23,8
1400	27,9

SF_6, шестифторид серы [2]

T, °K	B, кал/моль
298,2	−281
400	−139
500	−64
600	−16
700	16,4
800	40
900	57
1000	70
1200	90
1400	102

SO_2, двуокись серы [2]

T, °K	B, кал/моль
298,2	−524
400	−359
500	−123
600	−85
700	−61
800	−46
900	−33
1000	−27
1200	−15
1400	−8

SiF_4, четырехфтористый кремний [2]

T, °K	B, кал/моль
298,2	−137
400	−50
500	−3
600	26,5
700	47
800	61
900	72
1000	80
1200	92
1400	100

T, °K	S, кал/(моль·°K)
CH_4, метан [2]	
298,2	—307
400	—172
500	—66
600	0,8
700	45
800	77
900	101
1000	120
1200	147
1400	164
C_2H_6, этан (этилен) [2]	
298,2	—140
400	—72
500	—36
600	—13
700	2,5
800	14
900	22
1000	29
1200	38
1400	44
C_2H_2, этин (ацетилен) [2]	
298,2	—137
400	—87
500	—51
600	—28
700	—12
800	—1,0
900	7
1000	14
1200	23
1400	19
C_3H_6, пропен [8]	
298,4	—359
306,5	—360
317,0	—339
327,6	—324
337,8	—299
347,9	—274
357,0	—255
366,2	—244
377,7	—229
388,5	—213
400,1	—208
412,9	—182
C_4H_{10}, бутан [8]	
290,4	—720
307,5	—607
318,2	—619
328,5	—568
337,8	—533
348,4	—501
359,4	466
368,4	—440
377,9	410
387,6	—383
400,4	—353
413,4	322
C_5H_{12}, пентан [8]	
298,2	—1194
300,1	—1117
318,1	—1011
329,0	—923
339,0	—865
349,0	—800
358,0	—758
368,0	—701
378,9	—652
388,4	—612
401,0	578
413,6	—547
C_7H_{16}, гептан [8]	
313,5	—1670
318,1	—1637
324,0	—1496
332,1	—1419
338,5	—1326
339,0	—1310
342,4	—1269
347,3	—1259
354,0	—1194
360,2	—1147
366,0	—1075
376,4	—981
387,9	—913
396,3	—860
413,1	—771
C_8H_{18}, гептан [8]	
349,1	—1819
358,3	—1651
368,5	—1560
379,1	—1440
381,1	—1325
400,8	—1212
413,7	—1108
C_8H_8, октан [8]	
375,0	—2122
379,2	—2048
383,2	—1959
384,1	—1909
388,2	—1825
393,5	—1778
403,5	—1641
413,5	—1518
$C_2H_4O_2$, метилформиат [9]	
310,2	—840
326,7	—760
333,2	—710
342,3	—660
348,2	—640
351,3	610
360,2	—560
378,0	500
386,3	—470
396,7	—440

T, °K	S, кал/(моль·°K)
$C_3H_6O_2$, метилацетат [9]	
323,2	—1240
328,4	—1210
333,5	—1150
338,2	—1080
343,5	—1000
353,2	—960
358,8	—890
368,2	—850
374,3	—820
378,8	—810
383,6	—785
391,0	—740
$C_3H_6O_2$, этилформиат [9]	
323,0	—1100
328,8	—1000
333,2	—960
337,7	—930
340,7	875
348,3	—830
360,2	—730
382,0	—650
388,9	625
394,9	—590
$C_4H_8O_2$, этилацетат [9]	
330,2	—1530
333,5	—1490
336,8	—1470
343,2	—1400
348,2	—1260
353,2	—1240
358,6	—1160
368,2	—1080
375,1	1040
385,6	950
390,2	930
398,7	—895
$C_3H_6O_2$, пропилформиат [9]	
298,6	—1550
333,2	—1440
337,6	—1380
342,3	—1370
347,4	—1270
351,4	—1190
361,1	—1140
367,2	—1060
377,1	—960
386,0	—900
397,1	—860
403,1	—865
$C_3H_6O_2$, метилпропионат [9]	
228,0	—1610
333,2	—1540
339,8	—1455
347,0	—1390

T, °K	B, см³/моль
352,4	—1310
355,2	—1240
360,8	—1230
366,2	—1110
381,7	—1060
387,4	— 940
398,9	— 905

CF_4, четырехфтористый углерод (фреон-14) [9, 10]

T, °K	B, см³/моль
273,2	—111
298	— 88,3
303	— 84
323	— 70
348	— 58
373	— 43,5
398	— 33,2
423	— 24,4
448	16,8
473	— 10,1
498	— 4,25
523	1,0
548	5,6
573	9,80
598	13,6
623	17,06
700	26,03
800	34,9
900	41,5
1000	46,5
1200	53,6
1400	58,2

CF_2Cl_2, дифторидихлорметан (фреон-12) [2]

T, °K	B, см³/моль
298,2	—449
400	—254
500	—107,5
600	—106
700	— 69
800	— 40
900	— 18,4
1000	— 1,6
1200	22,1
1400	36,5

$CFCl_3$, фторотрихлорметан (фреон-21) [2]

T, °K	B, см³/моль
298,2	—502,3
400	—335
500	—233
600	—156
700	—111
800	79
900	— 55,2
1000	— 36,2
1200	— 10,4
1400	— 7,6

$CHCl_3$, хлороформ [2]

T, °K	B, см³/моль
298,2	—1354
400	— 581
500	— 348
600	—241
700	—181
800	—142

T, °K	B, см³/моль	T, °K	B, см³/моль
900	—116	18	—22
1000	— 90	19	—19
1200	— 69,8	20	—17
1400	— 52,5	21	—15
CH_3Cl, метил хлористый (фреон-40) [2]		50% Ar—50% Kr [6]	
298,2	—420	108	—236
400	—208	111	—229
500	—128	115	—208
600	— 86	119	—198
700	— 44	124	—186
800	— 31,6	50% CO_2—50% He [11]	
1000	— 10		
1200	— 1,8	303,2	21,6
1400	3,9	333,2	24,0
50% H_2—50% He [11]		363,2	22,6
14	—38	50% CO_2—50% Ar [11]	
15	—33	303,2	—31,8
16	—28	333,2	—25,8
17	—25	363,2	—19,6

13.2. ПАРАМЕТРЫ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ — ПАР

Уравнение состояния (13.1) имеет единственную точку с параметрами $P_{кр}$, $T_{кр}$, $V_{кр}$, определяемую по условиям

$$(\partial P/\partial V)_{кр} = (\partial^2 P/\partial V^2)_{кр} = 0.$$

Эта точка называется критической, а параметры — соответственно критическим давлением, критической температурой и критическим объемом. Критическая точка является одним из концов линии перехода жидкость — пар: при температурах выше критической переход жидкость — пар осуществляется без скачка плотности. Критическая точка характеризуется исчезновением мениска в капилляре, обращением в нуль теплоты испарения и обращением в бесконечность сжимаемости $(\partial V/\partial P)_{кр}$. Критические параметры веществ приведены в табл. 13.2.

Помимо вириального разложения (13.9) для аппроксимации экспериментальных данных часто используют уравнение состояния Ван-дер-Ваальса:

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT,$$

коэффициенты которого связаны с параметрами критической точки:

$$a = (27/8)\,RT_{кр}b, \quad b = RT_{кр}/8P_{кр}.$$

Коэффициент b приблизительно равен учетверенному собственному объему молекул газа. За некоторыми исключениями (водород в органических соединениях и т. п.), для коэффициентов Ван-дер-Ваальса справедливы отношения аддитивности:

$$\sqrt{a_A} + \sqrt{a_B} = \sqrt{a_{AB}}; \quad b_A + b_B = b_{AB},$$

где a_A и b_A — коэффициенты Ван-дер-Ваальса для газа, состоящего из молекул типа A; a_B и b_A — коэффициенты для газа, состоящего из молекул типа B; a_{AB} и b_{AB} — коэффициенты для смеси этих газов.

Таблица 13.9

Критические параметры и коэффициенты Ван-дер-Ваальса некоторых газов и смесей

Формула	Название	$p_{кр}$, атм	$T_{кр}$, °К	Критическая плотность, г/см³	$V_{кр}$, см³/моль	Литература	a, $\frac{л^2 \cdot атм}{моль^2}$	b, см³/моль
	Элементы							
Ar	Аргон	48,0	150,71	0,531	75,2	[2, 12]	0,1344	32,213
Br_2	Бром	102	584,15	1,18	135	[2, 13]	0,8547	58,778
Cl_2	Хлор	76,1	417,15	0,573	124	[2, 12, 13]	0,6497	56,241
Cs	Цезий	145	2057±40	—	311	[14]	—	—
F_2	Фтор	55	144	—	—	[11]	0,1071	26,861
H_2	Водород равновесный	12,8	33	0,069	64,8	[15]	0,0242	26,461
	» нормальный	12,799	33,244	0,031	64,99	[2, 13]	0,0246	26,653
	Параводород	12,759	32,976	—	—	[13]	0,0242	26,617
D_2	Дейтерий равновесный	16,3	38,4	—	—	[2]	0,0257	24,170
	» нормальный	16,432	38,35	0,067	60,3	[2, 13]	0,0254	23,946
DH	Дейтеро-водород	14,646	35,908	0,048	69,8	[2, 13]	0,0250	25,1562
T_2	Тритий нормальный	20,8	43,7	0,112	53,7	[2, 13]	0,0201	21,506
HT	Водород-тритий	16,1	36,3	—	60,3	[2]	0,0254	23,964
DT	Дейтеро-тритий	17,3	39,5	0,087	58,5	[2, 13]	0,0235	21,260
He	Гелий	2,26	5,20	0,0639	57,8	[2, 13, 15]	0,00339	23,605
^3He	Гелий-3	1,17	3,37	-	—	[13]	0,00272	29,376
Hg	Ртуть	1640±50	1460±20	5 (1,2)	46	[2, 10, 17]	-	—
I	Иод		826	-	—	[16]	—	-
K	Калий	160	2228+330	—	209	[2]	-	—
Kr	Криптон	54,97	209,39	0,908	92,2	[2, 12, 13]	0,2295	39,964
Li	Литий	680	3200+600	—	66	[14]	—	—
Na	Натрий	350	2570±350		116	[14]	—	—
N_2	Азот	33,54	126,25	0,311	90,1	[2, 16]	0,1350	38,620
Ne	Неон	26,86	44,43	0,484	41,7	[2, 12, 13]	0,2088	16,971
O_2	Кислород	50,14	154,78	0,41	76	[13, 16]	0,1358	31,601
O_3	Озон	54,6	261,05	0,54	80,4	[2, 13, 16]	0,3540	49,054
P	Фосфор	624	968	—	—	[2, 13]	0,3231	42,053
Rb	Рубидий	157	2093±55	—	247	[14]	—	-
Rn	Радон	62,43	377,5	—	—	[13]	0,6185	62,088
S	Сера	116,0	1313	0,406	80	[2]	0,4051	111,421
Xe	Ксенон	57,64	289,74	1,157	119,5	[2, 12]	0,4365	51,405
	Неорганические соединения							
BBr_3	Трехбромистый бор	—	573,2	0,60	278	[18]	—	—
BCl_3	Трехлористый бор	38,2	452	0,79	148	[2]	1,5196	121,391
BF_3	Трехфтористый бор	49,2	200,0	-		[2]	0,2051	51,405
B_2H_6	Диборан	39,52	289,65	0,166	107	[2, 10]	0,1469	75,197
CO	Окись углерода	34,529	132,91	0,301	93,06	[2, 16]	0,14530	39,492
CO_2	Двуокись углерода	72,85	304,19	0,468	94,04	[2, 16]	0,36095	42,860
COS	Сероокись углерода	62	375,4		—	[2]	0,6458	62,122
CS_2	Сероуглерод	78	552	0,44	170	[2, 16]	1,1039	72,668
C_2N_2	Дициан	60	400	—	—	[2]	0,7705	69,558
$HClO_4$	Перхлорилфторид	53,0	362,32	—	-	[2]	0,7912	71,300
F_2O	Окись фтора	48,0	215,15	0,562	97,6	[2, 13]	0,26896	45,140
$GeCl_4$	Четыреххлористый германий	38,0	550	—	—	[10]	2,2618	148,458
HBr	Бромистый водород	84,0	362,95	0,825	98	[2, 12, 13]	0,4450	44,331
HCl	Хлористый водород	81,5	324,55	0,42	46	[2, 12, 13]	0,3672	40,557
HCN	Синильная кислота	53,5	456,65	0,195	138,6	[2]	1,1674	87,573
HF	Фтористый водород	65	144	0,29	69	[2, 13]	0,10712	26,861
HI	Иодистый водород	80	423	1,09	117	[2, 13]	0,6395	54,949
H_2O	Вода	218,30	647,3	0,32	56	[2, 13, 16]	0,5451	30,410
D_2O	Окись дейтерия (тяжелая вода)	215,70	644,05	0,358	54,8	[2, 13, 19]	0,5464	30,534
H_2O_2	Перекись водорода	214	730	-	—	[2]	0,7075	34,946
H_2S	Сероводород	88,9	373,6	0,349	97,7	[2, 12, 16]	0,4461	43,116
H_2Se	Селенистый водород	91,0	410,2		—	[18]	0,5251	46,225
NF_3	Трехфтористый азот	44,72	233,9	—		[2]	0,3473	53,625
NH_3	Аммиак	111,3	405,5	0,235	72,46	[2, 12]	0,4197	37,360
NO	Окись азота	64	180	0,52	58	[2, 12]	0,14381	26,856
$NOCl$	Хлористый нитрозил	92,0	438,2	—	—	[18]	0,5658	46,605

Формула	Название	$P_{кр}$, атм	$T_{кр}$, °К	Критическая плотность $\rho_{кр}$, г/см³	$V_{уд.\ кр}$, см³/г	Литература	ρ, г/см³	σ, дин/см
NO_2	Перекись азота	100	413	0,56	62	[2, 15]	0,4846	42,373
N_2H_4	Гидразин	145	653	—	—	[2]	0,8255	46,254
N_2O	Закись азота	71,7	309,7	0,457	96,3	[2, 16]	0,3601	44,310
N_2O_4	Двуокись азота	99	431,2	0,56	164	[18]	0,5336	44,687
PF_3	Трехфтористый фосфор	42,09	271,1	—	—	[2]	0,4891	65,154
PH_3	Фосфористый водород	64,5	324,4	0,30	113,5	[18]	0,4635	51,601
PH_2Cl	Хлористый фосфонил	72,7	322,2	—	—	[18]	0,4000	45,471
SF_4	Четырехфтористая сера	—	347	—	—	[2]		
SF_6	Шестифтористая сера	37,113	318,7	0,751	194,3	[2]	0,5770	88,103
SO_2	Двуокись серы	77,8	430,7	0,524	122	[2]	0,6775	36,798
SO_3	Трехокись серы	83,6	491,4	0,635	126	[2]	0,8187	60,563
SH_2	Сероводород	2,3	716,2	—	—	[18]	0,6372	32,036
SeF_4	Четырехфтористый селен	—	503	—		[18]	—	—
$SiCl_4$	Четыреххлористый кремний	37,1	506,8		—	[2, 18]	1,9670	140,153
$SiCl_3F$	Фиттрихлорсилан	35,3	438,4	—		[18]	1,5470	127,420
$SiCl_2F_2$	Дифторидихлорсилан	34,5	369,0		—	[18]	1,1214	109,736
SiF_3Cl	Трифторхлорсилан	34,2	309	—		[18]	0,7981	92,390
SiF_4	Четырехфтористый кремний	36,6	259,0		—	[2]	0,5287	72,594
SiH_4	Силан	47,8	269,6	—		[15, 18]	0,4390	57,807
$SnCl_4$	Четыреххлористое олово	37,0	591,8	0,742	350	[18]	2,6875	165,583
UF_6	Шестифтористый уран	45,5	370	1,30		[18]	1,5700	113,422
	Органические соединения **1. Углеводороды**							
CH_4	Метан	45,8	190,7	0,162	98	[15, 18, 20, 21]	0,2256	42,710
C_2H_6	Этан	48,8	305,5	0,203	129	[15, 16, 20, 21]	0,5427	64,197
C_2H_4	Этен (этилен)	50,5	282	0,227	124	[15, 16]	0,4474	57,292
C_2H_2	Этин (ацетилен)	61,6	309	0,230	113	[15]	0,4400	51,454
C_3H_8	Пропан	42,0	368,8	0,225	209	[15, 18, 19, 20]	0,9200	90,081
C_3H_6	Пропен (пропилен)	45,6	365	0,233	184	[15, 18]	0,8301	82,123
C_3H_6	Циклопропан	54,2	397,1	—	—	[18]	0,8200	75,158
C_3H_4	Пропин (аллилен)	52,8	401	—	—	[19]	0,8953	77,920
C_3H_4	Пропадиен		393	—	—	[15]		—
C_4H_{10}	Бутан	37,5	426,2	0,228	276	[15, 18, 20]	1,3703	116,607
C_4H_{10}	Изобутан	36,0	408,1	0,221	263	[15, 18]	1,3145	110,297
C_4H_8	1-Бутен	39,7	419,6	0,234	240	[15]	1,2601	108,139
C_4H_8	2-Бутен	41	420	0,238	236	[15, 18]	1,2914	107,004
C_4H_8	2-Метилпропен	39,5	417,9	0,235	239	[15, 18]	1,2562	108,547
C_4H_6	1,3-Бутадиен (дивинил)	42,7	425	0,245	221	[15, 18]	1,2019	109,118
C_4H_6	1-Бутин (этилметилацетилен)		463,7	—	—	[15]	—	—
C_4H_6	2-Бутин (диметилацетилен)	—	488,7	—	—	[15]	—	—
C_5H_{12}	Пентан	33,3	470,4	0,232	311	[15, 18, 20]	1,8880	144,962
C_5H_{12}	2-Метилбутан	32,9	461,0	0,234	306	[15, 19]	1,8354	143,763
C_5H_{12}	2,2-Диметилпропан (неопентан)	31,6	433,8	0,238	303	[15, 19]	1,6920	140,846
C_5H_{10}	1-Пентен	40	474	—		[15]	1,5958	121,570
C_5H_{10}	2-Пентен	40,4	475,6		—	[15]	1,6907	120,771
C_5H_{10}	Изопрен	33,9	464,5	—		[15]	1,8107	140,672
C_5H_{10}	2-Метил-2-бутен	34	470		—	[15]	1,8438	141,817
C_5H_{10}	Циклопентен	44,6	511,5	0,270	260	[15, 18]	1,5349	117,735
C_5H_{10}	Циклопентан	44,9	504	0,277	251	[18]	1,6074	115,166
C_5H_8	Пропилацетилен	—	493,5		—	[15]	—	—
C_6H_{14}	Гексан	29,9	508,0	0,234	368	[15, 18, 20]	2,4523	174,315
C_6H_{12}	Циклогексан	40,0	553	0,273	305	[15]	2,1722	141,843
C_6H_6	Бензол	48,6	562	0,304	300	[15, 19]	1,8465	118,042
C_7H_{16}	Гептан	27,01	540,2	0,235	426	[15, 18, 20]	3,0697	205,197
C_7H_8	Толуол	41,6	594	0,29	320	[15, 16]	2,4007	146,489

Формула	Вещество	$p_{кр}$, атм	$T_{кр}$, °К	Критическая плотность, г/см³	$V_{кр}$, см³/моль	Литература	a, $\frac{л^2 \cdot атм}{моль^2}$	b, см³/моль
C_8H_{18}	Октан	24,6	569,4	0,233	490	[15, 18, 20]	3,7445	237,466
C_9H_{20}	н-Нонанол	22,9	651,6	0,28	379	[15, 18]	3,0715	175,003
C_9H_{20}	Нонан	22,86	595,4	0,236	543	[18, 20, 22]	2,7543	267,225
$C_{10}H_{22}$	Декан	21,24	619,3	0,236	603	[18, 20, 22]	5,1292	299,071
$C_{10}H_8$	Нафталин	39,3	742	0,314	408	[18]	3,9804	155,711
$C_{11}H_{24}$	Ундекан	19,32	642,6	0,237	659	[18, 20, 22]	6,0798	341,252
$C_{12}H_{26}$	Додекан	18,00	663,8	0,237	718	[18, 20, 22]	6,7346	364,352
$C_{12}H_{10}$	Дифенил	43	803,1	0,343	415	[19]	4,2615	191,011
$C_{13}H_{28}$	Тридекан	17,56	683,2	0,24	767	[18, 20, 22]	7,5507	399,404
$C_{14}H_{30}$	Тетрадекан	16,06	695	0,24	826	[18, 22]	8,2865	430,598
$C_{15}H_{32}$	Пентадекан	15,75	710,6	0,24	890	[18, 22]	9,1093	462,900
$C_{16}H_{34}$	Гексадекан	14	726,3	0,24	942	[18, 19]	10,6761	531,525
$C_{17}H_{36}$	Гептадекан	13	735,0	0,24	1003	[18, 19]	11,8070	566,068
$C_{18}H_{38}$	Октадекан	13	753,2	0,24	1059	[18]	12,4052	594,732
$C_{19}H_{40}$	Нонадекан	12	760	0,24	1118	[18]	13,6759	649,785
$C_{20}H_{42}$	Эйкозан	11	775	0,24	1176	[18]	15,5139	722,846
II. Кислородсодержащие соединения								
CCl_2O	Фосген	56	455	0,52	190	[2]	1,0016	81,519
CH_4O	Метиловый спирт (метанол)	78,5	513,2	0,272	118	[15]	0,9532	67,074
C_2H_6O	Этиловый спирт (этанол)	63,0	516	0,276	167	[15]	1,2008	84,033
C_2H_6O	Диметиловый эфир	53	400,1	0,242	190	[15, 18]	0,8582	77,452
$C_2H_6O_2$	Этиленгликоль	—	798	—	—	[23]	—	—
C_2H_4O	Ацетальдегид	—	461	—	—	[18]	—	—
C_2H_4O	Окись этилена	50,7	468	0,36	122	[18]	1,2273	94,906
$C_2H_4O_2$	Уксусная кислота	57,1	594,5	0,351	171	[15, 18]	1,7605	106,865
$C_2H_4O_2$	Метилформиат	59,2	487,2	0,349	172	[15, 18]	1,1392	84,626
C_3H_8O	Пропиловый спирт (пропанол)	50,2	537	0,273	220	[15]	1,6930	109,732
C_3H_8O	Изопропиловый спирт (изопропанол)	53	509,4	0,274	219	[15]	1,3877	98,485
C_3H_8O	Метилэтиловый эфир	43,4	437,9	0,272	221	[15, 18]	1,0077	83,068
C_3H_6O	Ацетон	46,6	508,7	0,273	213	[15, 18]	1,5770	111,990
$C_3H_6O_2$	Пропионовая кислота	53	612	0,32	230	[15, 18]	2,0077	116,402
$C_3H_6O_2$	Метилацетат	46,3	506,9	0,305	228	[15, 18]	1,6700	112,516
$C_3H_6O_2$	Этилформиат	46,6	508,5	0,323	229	[15, 18]	1,5697	111,487
$C_4H_{10}O$	Бутиловый спирт (бутанол)	50,6	561	—	—	[15, 19]	1,7670	113,740
$C_4H_{10}O$	Изобутиловый спирт (изобутанол)	48,0	538	—	—	[18]	1,7132	114,985
$C_4H_{10}O$	Диэтиловый эфир	35,6	467	0,265	281	[15, 18, 19]	1,7405	134,578
C_5H_8O	Метилтетрадикетон	39,5	535	0,25	290	[15, 18]	2,0435	139,443
$C_5H_8O_2$	Масляная кислота	52	628	0,304	290	[15, 18]	2,1548	123,898
$C_5H_8O_2$	Изомасляная кислота	40	609	0,302	292	[15, 18]	2,6314	110,207
$C_5H_8O_2$	Пропилформиат	40,1	538,1	0,309	285	[15, 18]	2,0514	137,665
$C_5H_8O_2$	Метилпропионат	39,3	530,5	0,312	282	[18]	2,0345	136,485
$C_4H_8O_2$	1,4-Диоксан	50,7	585	0,36	240	[15]	1,9176	118,372
$C_4H_6O_3$	Уксусный ангидрид	46,2	569	—	—	[15, 19]	1,9911	126,361
$C_4H_6O_4$	Диметилоксалат	9,5	533	—	—	[18]	8,4966	575,632
$C_4H_{10}O$	Этилизопропиловый эфир	32,1	500,6	0,260	339	[15, 18]	2,2182	168,003
C_6H_6O	Фенол	60,5	692,4	—	—	[15]	2,2600	117,420
C_7H_8O	м-Крезол	45,0	705	0,35	310	[15]	3,1890	140,727
C_7H_8O	Метилфениловый спирт (анизол)	41,3	649	—	—	[18]	2,7644	155,207
$C_8H_{10}O$	Фенетол	33,8	647	—	—	[18]	3,6189	196,396
$C_{12}H_{10}O$	Дифениловый эфир	35,2	765	—	—	[19]	4,7751	224,133
III. Галогензамещенные углеводороды								
CF_4	Углерод четырехфтористый (фреон-14)	38,15	227	0,633	136	[2, 24]	0,386	61,268

Формула	Название	$P_{кр}$, атм	$T_{кр}$, °К	Критическая плотность $\rho_{кр}$, г/см³	$V_{кр}$, см³/моль	Литература	α, $\frac{м\cdot м^2}{моль^2}$	b, см³/моль
CF_3Cl	Трифторхлорметан (Фреон 13)	39,36	301,9	0,580	218	[9, 24]	0,658	78,605
CF_2Cl_2	Дифтордихлорметан (фреон-12)	39,6	384,6	0,555	216	[15, 24]	1,051	99,645
$CFCl_3$	Фтортрихлорметан (Фреон 11)	43,2	471,2	0,554	249	[15, 24]	1,460	111,899
CCl_4	Углерод четыреххлористый	47	556,4	0,558	257	[2, 18]	1,555	126,847
CF_2Br_2	Дифтордибромметан (фреон-12B2)	41,68	464	—	—	[9, 24]	1,465	114,217
CF_3Br	Трифторбромметан (фреон-13B1)	44,28	340	—	—	[24]	0,742	78,761
$CClF_2Br$	Дифторхлорбромметан (фреон-12B1)	42,53	428	—	—	[24]	1,224	103,249
CHF_3	Трифторметан (фреон-23)	48,4	298,9	0,516	136	[24]	0,468	61,006
CHF_2Cl	Дифторхлорметан (фреон-22)	50,35	369,2	0,525	165	[24]	0,770	75,261
$CHFCl_2$	Фтордихлорметан (фреон-21)	52,7	451,6	0,522	197	[24]	1,080	87,019
$CHCl_3$	Хлороформ	54	536,6	0,50	240	[2, 16]	1,515	101,942
CH_2F_2	Дифторметан		356	—	—	[2]	—	—
CH_2Cl_2	Дихлорметан	60	510	—	—	[2]	1,2517	87,900
CH_2Br_2	Дибромметан	70,6	583	0,525	165	[15]	1,3679	84,782
CH_3F	Фтористый метил	58,0	317,8	0,500	113	[2, 18]	0,4548	56,217
CH_3Cl	Хлористый метил (фреон-40)	65,9	416	0,355	143	[2, 16]	0,7461	64,766
C_2F_4	Тетрафторэтилен	38,9	306,45	0,578	175	[2]	0,6961	80,825
$C_2H_4F_2$	1,1-Дифторэтилен	40,7	303,2	0,435	147	[18]	0,6118	76,432
C_2F_5Cl	Пентафторхлорэтан (фреон-115)	31	355	—	—	[24]	1,0539	116,923
$C_2F_4Cl_2$	Тетрафтор-1,1-дихлорэтан (фреон-114)	32,6	418,6	0,582	276	[2]	1,5271	131,736
$C_2F_3Cl_3$	Трифтортрихлорэтан (фреон-113)	34,65	487,0	0,576	325	[24]	1,9448	144,201
$C_2H_4F_2$	1,1-Дифторэтан	44,4	386,6	0,365	181	[16]	0,9564	89,335
$C_2H_4Cl_2$	1,2-Дихлорэтан	53	561	0,44	220	[15]	1,0872	108,600
$C_2H_3F_2Cl$	1,1-Дифтор-1-хлорэтан (фреон-142)	40,7	410,2	0,435	231	[18]	1,1746	106,355
$C_2H_3F_3$	1,1,1-Трифторэтан (фреон 143)	42	346,2	0,434	191	[24]	0,8108	84,370
$C_2H_2Cl_6$	Гексахлорэтан (фреон-216)	26,9	449	0,62	356	[24]	1,9820	159,401
C_4F_{10}	Перфторбутан (фреон-31-10)	24,75	386	0,63	378	[24]	1,7105	160,012
C_4F_8	Октафторциклобутан (фреон-ФС-318)	28,6	388,6	-	-	[19]	1,5002	139,406
C_6H_5F	Фторбензол	44,6	559,8	0,354	271	[15]	1,9964	128,777
C_6H_5Cl	Хлорбензол	46,1	632,4	0,365	208	[15, 19]	2,4649	140,745
$C_6H_3Cl_3$	1,2,4-Трихлорбензол	39,3	735,0	0,472	364	[18]	3,9067	151,883
$C_6H_4Cl_2$	п-Дихлорбензол	40,5	697	0,408	360	[18]	3,4082	176,571
C_6F_{12}	Перфторметилциклогексан	24	426,6	—	—	[15]	2,8069	208,019
$C_6H_5F_5$	Бензотрифторид	35,1	569,6	0,497	342	[18]	2,5020	164,440
C_6F_{14}	Перфторгексан	16,0	474,8	0,584	664	[15]	4,0033	304,402
IV. Азот- и серосодержащие углеводороды								
CH_3N	Метиламин	73,0	430,1	0,223	254	[15]	0,7141	56,056
C_2H_7N	Диметиламин	36,6	436	0,246	297	[15, 18]	1,9006	130,041
C_2H_5N	Этиламин	57,4	699,8	0,519	274	[15, 18]	2,6478	136,824
CH_4S	Метилмеркаптан	71,4	470,0	0,393	149	[18]	0,8790	67,537
C_6H_5S	Тиофенол	46	590	0,34	247	[18]	2,0600	126,110
Смеси								
	Воздух	37,9	213,8	0,35	—	[12]	1,3078	114,127
	Даутерм (42% дифенила; 58% нафталина)	—	801		—	[23]	—	—
	Даутерм (73,5% дифенилового эфира; 26,5% дифенила)	41	801	—	—	[10]	4,4462	206,432

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rossi J. C., Danon F. Disc. Faraday Soc., 1965, v. 40, p. 97.
2. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник. Под ред. В. П. Глушко. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1962.
3. Knaap H. F. P. Physica, 1962, v. 28, p. 21.
4. Varekamp F. H., Beenakker J. J. M. Physica, 1959, v. 25, p. 880.
5. Sherman R. H., Sydoriak S. G., Roberts T. R. J. Res. Nat. Bur. Standards, 1964, v. 68A, p. 579.
6. Fender B. E. F., Halsey G. D. J. Chem. Phys., 1962, v. 36, p. 1881.
7. Schamp H. W., Mason E. A., Su K. Phys. Fluids, 1962, v. 5, p. 772.

8. McGlashan M. L., Potter D. J. B. Proc. Roy. Soc., 1962, v. A267, p. 478.
9. Lambert J. D. Proc. Roy. Soc., 1959, v. A249, p. 414.
10. Douslin D. R. J. Chem. Phys., 1961, v. 35, p. 1364.
11. Cotrell T. L., Hamilton R. A. Trans. Faraday Soc., 1950, v. 52, part 2, p. 156; 1956, v. 52, part 10, p. 1311.
12. Pickering S. A. Review of the literature relating to the critical constants. Washington, 1926.
13. Термические константы веществ. Справочник. Под ред. В. П. Глушко. Вып. 1. М., Изд-во АН СССР, 1965.
14. Dillon J. G., Nelson P. A., Swanson B. S. J. Chem. Phys., 1966, v. 44, p. 4229.
15. Kohr K. A., Lynn R. E. Chem. Revs, 1953, v. 52, p. 117.
16. Smithsonian Physical Tables. 9th ed. Washington, 1954.
17. Жихович И. К., Семенцов А. П. Физика металлов и металловедение, 1967, т. 24, с. 843.
18. Справочник химика. Под ред. Б. П. Никольского. Т. 2. М., Л., «Химия», 1965.
19. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.
20. Varshni Y. P. J. Chem. Phys., 1953, v. 21, p. 2335.
21. Mitra S. S. J. Chem. Phys., 1953, v. 21, p. 2334.
22. Kurata M., Isida K. J. Chem. Phys., 1955, v. 23, p. 1127.
23. Строение и физические свойства веществ в жидком состоянии. Киев, Изд. Киевск. ун-та, 1962.
24. Яковкин Г. А. Оптика. Свойства и применения. Л., Изд. ГИТТЛ, 1959.

ГЛАВА 14

КОЭФФИЦИЕНТ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

Коэффициент поверхностного натяжения жидкости σ равен работе, необходимой для увеличения поверхности жидкости на единицу площади при постоянной температуре, и зависит не только от свойств самой жидкости, но и от свойств среды, с которой жидкость граничит. Зависимость σ жидкости от температуры выражается равенством [1]

$$d\sigma/dT = -B(\rho/\mu)^{2/3},$$

где ρ — плотность; μ — молекулярная масса; $B = 2{,}1$ эрг·см²/(см³·град).

Коэффициент поверхностного натяжения твердого тела также определяется как работа образования единицы площади поверхности. Иногда вместо поверхностного натяжения экспериментально определяется работа адгезии, представляющая собой работу против сил притяжения при разделении граничащих тел. В случае, когда твердое тело граничит с жидкостью, работа адгезии $W_{TL} = \sigma_{LV} + \sigma_{SV} - \sigma_{SL}$, где σ_{LV} и σ_{SV} — поверхностные натяжения на границах твердого тела соответственно с газом и жидкостью; σ_{SL} — поверхностное натяжение жидкости на границе с газом.

14.1. ЖИДКОСТИ

Таблица 14.1

Коэффициент поверхностного натяжения элементов в жидком состоянии

Вещество		Газовая среда	t, °C	σ, мН/м	Литература
Наименование	Символ				
Алюминий	Al	–	$t_{пл}$	914	[2]
Барий	Ba	—	$t_{кип}$	370	[3]
Бериллий	Be	–	$t_{пл}$	1145	[4]
Бром	Br	Воздух	–21	62,1	[6]
		»	13,0	44,1	[6]
Ванадий	V	—	$t_{пл}$	1750	[3]
Висмут	Bi	—	$t_{пл}$	590	[5]
		CO_2	264	429,5	[6]
		CO_2	265	464,9	[6]
		H_2	30,0	388	[7]
		H_2	062	360	[7]
		Вакуум	293	389,0	[7]

Продолжение табл. 14.1

Вещество		Газовая среда	t, °C	σ, мН/м	Литература
Наименование	Символ				
Висмут	Bi	Вакуум	200	360	[6]
		»	600	343,0	[7]
Вольфрам	W	—	$t_{пл}$	2300	[8]
Гадолиний	Gd	—	$t_{пл}$	650	[3]
Галлий	Ga	—	$t_{пл}$	707	[9]
Гафний	Hf	—	$t_{пл}$	1400	[10]
Германий	Ge	—	$t_{пл}$	600	[11]
Гольмий	Ho	—	$t_{пл}$	650	[3]
Диспрозий	Dy	—	$t_{пл}$	640	[3]
Европий	Eu	—	$t_{пл}$	450	[3]
Железо	Fe	—	$t_{пл}$	1840	[3]
		—	1500	1768	[12]
		Воздух	$t_{пл}$	949,7	[6]
				997	
		H_2	1207	906	[7]
Золото	Au	—	$t_{пл}$	1134	[13]
		Воздух	700	1007	[14]
		»	1070	612,2	[6]
		H_2	1120	1128	[14]
Иридий	Ir	—	$t_{пл}$	550	[15]
Иридий	Ir	—	$t_{пл}$	2400	[3]
Иттербий	Yb	—	$t_{пл}$	450	[3]
Иттрий	Y	—	$t_{пл}$	500	[3]
Кадмий	Cd	—	$t_{пл}$	508	[13]
		CO_2	$t_{пл}$	815,2	[6]
		CO_2	372	832,4	[6]
		H_2	336	570	[7]
		H_2	600	565	[7]
		Вакуум	350	546,4	[6]
		»	305	616,9	[7]
		»	589	589,9	[7]
Калий	K	—	$t_{пл}$	101	[12]
		CO_2	62	411,5	[6]
Кальций	Ca	—	$t_{пл}$	420	[3]
Кобальт	Co	—	$t_{пл}$	1870	[16]
		—	1550	1886	[12]
Кремний	Si	—	$t_{пл}$	960	[17]
Лантан	La	—	$t_{пл}$	700	[3]
Литий	Li	—	$t_{пл}$	308	[12]

Вещество		Газовая среда	t, °C	τ, мин	Литература
Лютеций	Lu	—	$t_{пл}$	950	[3]
Магний	Mg	—	$t_{пл}$	650	[18]
Марганец	Mn	—	$t_{пл}$	1250	[3]
Медь	Cu	—	$t_{пл}$	1356	[19]
		Воздух	$t_{пл}$	581	[6]
		H_2	1140	1120	[14]
		H_2	1335	1251	[14]
Молибден	Mo	—	$t_{пл}$	2650	[3]
Натрий	Na	—	$t_{кип}$	191	[12]
		CO_2	50	293,0	[6]
		Вакуум	100	222	[7]
		»	250	211	[7]
Неодим	Nd	—	$t_{пл}$	660	[3]
Никель	Ni		$t_{пл}$	1810	[10]
		—	1600	1934	[20]
Ниобий	Nb	—	$t_{пл}$	2450	[3]
Олово	Sn	—	$t_{пл}$	554	[21]
		CO_2	226	612,4	[6]
		Вакуум	247	539,6	[6]
		»	250	576,1	[6]
		»	600	506,6	[6]
		H_2	253	326	[7]
		H_2	904	314	[7]
		Воздух	259	652,7	[6]
		»	408	616,4	[6]
Осмий	Os	—	$t_{пл}$	2600	[3]
Палладий	Pd	—	$t_{пл}$	1600	[3]
Платина	Pt	—	$t_{пл}$	1740	[22]
		—	1800	1689	[20]
		—	2000	1816	[6]
Празеодим	Pr	—	$t_{пл}$	950	[3]
Радий	Ra	—	$t_{пл}$	450	[3]
Рений	Re	—	$t_{пл}$	2700	[3]
Родий	Rh		$t_{пл}$	2050	[3]
Ртуть	Hg	—	$t_{пл}$	478	[23]
		Воздух	17,5	547,2	[6]
		»	18	505	[6]
		O_2	18	504	[6]
		N_2	18	497	[6]
		CO_2	18	487	[6]
		H_2	18	559	[6]
		CO_2	19	473,2	[7]
		CO_2	201	429,1	[7]
		Вакуум	16	430,3	[7]
		Пар	12,5	438,1	[14]
		»	20	471,6	[6]
		»	15	435,6	[6]
		Пар	67,0	423,9	[14]
Рубидий	Rb	—	$t_{пл}$	90	[3]
Рутений	Ru	—	$t_{пл}$	2000	[3]
Самарий	Sm	—	$t_{пл}$	620	[3]
Свинец	Pb	—	$t_{пл}$	480	[16]

Вещество		Газовая среда	t, °C	τ, мин	Литература
Свинец	Pb	CO_2	325	606,3	[6]
		CO_2	330	535,9	[6]
		CO_2	335	473	[6]
		H_2	350	450	[7]
		H_2	750	423	[7]
		H_2	982	414	[7]
		H_2	1036	397	[7]
		Вакуум	370	435,4	[7]
		»	375	394,2	[6]
		»	657	415,5	[7]
Селен	Se	—	$t_{кип}$	106	[3]
		Воздух	217	92,6	[6]
Сера	S	»	141	69,3	[6]
Серебро	Ag	—	$t_{пл}$	960	[24]
		Воздух	1000	782,4	[6]
		—	1000	751	[6]
		H_2	995	993	[14]
			1103	902	[14]
Скандий	Sc	—	$t_{пл}$	600	[26]
Стронций	Sr	—	$t_{пл}$	350	[3]
Сурьма	Sb	—	$t_{пл}$	364	[26]
		CO_2	430	317,2	[6]
		H_2	640	300	[7]
		H_2	970	342	[7]
		H_2	750	308	[7]
		H_2	1100	348	[7]
		Вакуум	620	367	[7]
Таллий	Tl	$t_{пл}$		450	[27]
		Вакуум	300	377	[14]
			320	496	[14]
Тантал	Ta	—	$t_{пл}$	2400	[3]
Тербий	Tb	—	$t_{пл}$	650	[3]
Титан	Ti	—	$t_{пл}$	1660	[10]
Торий	Th	—	$t_{кип}$	1030	[3]
Тулий	Tm	—	$t_{пл}$	620	[3]
Уран	U	—	$t_{пл}$	1910	[3]
Фосфор	P	CO_2	$t_{пл}$	59,3	[6]
Хром	Cr	—	$t_{пл}$	1550	[28]
Цезий	Cs	—	$t_{пл}$	66	[3]
		—	62	67,5	[29]
		—	106	62,9	[29]
		—	132	62,1	[29]
Церий	Ce	—	$t_{пл}$	680	[3]
Цинк	Zn	—	$t_{пл}$	410	[13]
		Воздух	360	767,1	[6]
		Вакуум	470	772,9	[7]
		»	630	798,1	[7]
		H_2	510	785	[14]
		H_2	800	787	[7]
		H_2	640	761	[14]
		H_2	700	763	[7]
Цирконий	Zr	—	$t_{пл}$	1400	[10]
Эрбий	Er	—	$t_{пл}$	620	[3]

Таблица 14.5

Коэффициент поверхностного натяжения воды* [6]

t, °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
σ, дин/см²	75,62	74,11	72,58	71,03	69,41	67,79	66,04	64,27	62,50	60,69	58,80

* При 37°С коэффициент поверхностного натяжения D_2O в [illegible] дин/см² [14]

Таблица 14.3

Коэффициент поверхностного натяжения ртути [6]

t, °C	20	40	60	80	100	120	140	160	180
σ, дин/см²	471,6	468,2	464,4	460,5	456,2	452,0	447,2	442,0	436,9

Продолжение табл. 14.3

t, °C	200	220	240	260	280	300	320	340	360
σ, дин/см²	431,2	425,2	419,0	412,7	406,4	399,6	392,3	384,6	376,4

Таблица 14.4

Коэффициент поверхностного натяжения сжиженных газов [14]

Вещество	Формула	t, °C	σ, дин/см²	Вещество	Формула	t, °C	σ, дин/см²
Азот	N_2	−203,1	10,53	Метиловый эфир	$(CH_3)_2O$	−10,1	21,0
		−196,0	8,7	Неон	Ne	−248,4	5,01
Аммиак	NH_3	−29	41,2	Окись азота	NO	−163,6	27,79
Аргон	Ar	−186,1	13,2	Окись углерода	CO	−205,1	12,10
Ацетилен	C_2H_2	−76,1	18,2	Окись водорода	$(CH_3)_2O$	−10,1	35,8
Водород	H_2	−252,8	2,13	Сернистый газ	SO_2	50,57	37,90
Гелий	He	−271,6	0,354			−20	32,6
Диметиламин	$(CH_3)_2NH$	−78	25,20	Триметиламин	$(CH_3)_3N$	73	24,6
Закись азота	N_2O	−89,3	26,3	Углекислый газ	CO_2	−39,2	16,51
		−50	14,39	Фтористый водород	HF	81,8	17,60
Кислород	O_2	−203,1	16,3	Хлор	Cl_2	−79	33,0
		−182,9	13,2	Этиламин	$(C_2H_5)NH_2$	−74	28,9
Метиламин	CH_3NH_2	−70	20,2				

Таблица 14.5

Коэффициент поверхностного натяжения неорганических соединений в жидком состоянии [6]

Вещество	Формула	Газовая среда	t, °C	σ, мН/м
Азотистый ангидрид	N_2O_4	Пар	1,6	29,72
			19,8	26,56
Бария хлорид	$BaCl_2$	»	$t_{пл}$	150,5
		—	$t_{пл}$	171
Висмута бромид	$BiBr_3$	—	250,0	66,5
			442,0	46,9
» хлорид	$BiCl_3$	—	271,0	66,2
		—	392,0	52,0
Калия бихромат	$K_2Cr_2O_7$	Азот	420	140,1
		»	535	135,0
» бромид	KBr	»	775	85,7
		»	920	75,4
» вольфрамат	K_2WO_4	»	925,0	161,0
		»	1520,3	105,6
» иодид	KI	»	737	75,2
		»	673	66,5
» метаборат	KBO_2	»	909	124
		»	1149	97
» метафосфат	KPO_3	»	697	136,5
		»	1536,0	100,3
» молибдат	K_2MoO_4	»	930,6	150,6
		»	1692,3	112,6
» нитрат	KNO_3	»	380,0	110,4
		»	771,6	80,2
» сульфат	K_2SO_4	»	1070,0	143,7
		»	1656,0	106,6
» фторид	KF	»	912,7	138,4
		»	1310	104,9
» хлорид	KCl	»	790,0	96,8
		»	1167	69,6

Продолжение табл. 14.5

Вещество	Формула	Газовая среда	t, °C	σ, мН/м
Калия цианид	KCN	Воздух	$t_{пл}$	96
Кальция хлорид	$CaCl_2$	»	$t_{пл}$	98,7
Лития карбонат	Li_2CO_3	»	$t_{пл}$	152,5
» метаборат	$LiBO_2$	Азот	879,2	261,9
		»	1320	192,4
» метасиликат	Li_2SiO_3	»	1254	374,6
		»	1601	346,6
» нитрат	$LiNO_3$	»	308,5	111,5
		»	600,4	95,2
» сульфат	Li_2SO_4	»	860	223,8
		»	1214	200,3
» фторид	LiF	»	868,5	249,5
		»	1270	201,1
» хлорид	LiCl	»	614,0	137,8
		»	1074,0	104,6
Мышьяка трибромид	$AsBr_3$	»	40,0	49,6
		»	179,7	36,1
» трихлорид	$AsCl_3$	»	−21,0	43,6
		»	110,0	31,0
Натрия ацетат	$NaCH_3COO$	Воздух	$t_{пл}$	38,8
» аммонийный фосфат	$Na(NH_4)HPO_4$	»	$t_{пл}$	207,8
» бромид	NaBr	Азот	760,9	165,8
		»	1165,7	78,0
» вольфрамат	Na_2WO_4	»	710	203,3
		»	1555	142,6
» иодид	NaI	—	705,6	85,0
		—	860,7	77,6

Вещество	Формула	Газовая среда	t, °C	σ, мн/м²
Натрия карбонат	Na_2CO_3	Воздух	$t_{пл}$	179,0
» метаборат	$NaBO_2$	Азот	1015,6	193,7
» метафосфат	$NaPO_3$	»	1441	126,2
» ортофосфат	Na_3PO_4	»	827	197,5
» молибдат	Na_2MoO_4	»	1516,5	147,5
» нитрат	$NaNO_3$	»	689,6	214,0
» сульфат	Na_2SO_4	»	1212	171,6
» тетраборат	$Na_2B_4O_7$	»	321,0	119,7
» фторид	NaF	»	738,5	93,7
» хлорид	$NaCl$	»	900	194,6
Олова дихлорид	$SnCl_2$	Воздух	1077	184,7
Рубидия бромид	$RbBr$	Азот	1000	211,9
» иодид	RbI	—	1010	199,5
» нитрат	$RbNO_3$	—	1540	143,5
» сульфат	Rb_2SO_4	—	602,6	113,8
» фторид	RbF	—	1171,8	86,0
» хлорид	$RbCl$	Азот	307	97,0
Свинца и калия хлорид	$PbCl_2 \cdot KCl$	»	480	81,6
Серебра бромид	$AgBr$	»	729,2	87,7
» хлорид	$AgCl$	»	1121	60,6
Серы монохлорид	S_2Cl_2	»	673,4	79,4
Стронция хлорид	$SrCl_2$	»	1016	55,4
Таллия нитрат	$TlNO_3$	»	306,5	109,5
Фосфора оксихлорид	$POCl_3$	»	720,2	77,7
» трибромид	PBr_3	»	1086	179,5
» трииодид	PI_3	»	1545	108,9
» трихлорид	PCl_3	»	802,6	127,2
Цезия иодид	CsI	»	1685,6	102,2
» нитрат	$CsNO_3$	»	750	93,7
» сульфат	Cs_2SO_4	»	1150	61,4
» фторид	CsF	Воздух	457	105,3
» хлорид	$CsCl$	»	646	94,4
		»	$t_{пл}$	121,4
		»	459,2	212,7
		»	550,0	113
		Азот	0,0	43,4
		»	121,0	29,4
		Воздух	$t_{пл}$	111,1
		Азот	210,0	117,3
		»	439,0	90,5
		Пар	18,1	31,91
		»	46,1	28,37
		Азот	—20	45,6
		»	170	36,3
		»	75,3	56,5
		»	15,0	61,4
		»	—70	37,4
		»	75,1	21,9
		Пар	18,4	28,71
		Азот	655,6	75,1
		»	1030,0	61,1
		»	426,5	91,6
		»	680,4	72,6
		»	1036	111,3
		»	1530	65,0
		»	722,5	104,5
		»	1400,0	78,9
		»	663,7	80,2
		»	1080	56,3

Таблица 14.6

Коэффициенты поверхностного натяжения органических соединений в жидком состоянии [6]

Вещества приведены в порядке возрастания числа атомов углерода

Вещество	Формула	Газовая среда	t, °C	σ, мн/м²
Муравьиная кислота	CH_2O_2	Пар	16,6	37,47
Хлороформ	$CHCl_3$	N_2	25,0	26,2
Метиловый спирт	CH_4O	Пар	20	23,02
Метиламин	CH_5N	N_2	—12	21,7
Четыреххлористый углерод	CCl_4	Пар	20	25,68
Формамид	CH_3ON	Воздух	34,6	56,63
Уксусная кислота	$C_2H_4O_2$	Пар	20	23,46
Диметиламин	C_2H_7N	N_2	—78,0	27,2
Хлораль	C_2HOCl_3	Пар	19,4	24,49
Иодистый этил	C_2H_5I	»	19,1	30,0
Бромистый этилен	$C_2H_4Br_2$	»	12,2	38,91
Хлористый этилен	$C_2H_4Cl_2$	N_2	99,9	30,1
Этилдиамин	$C_2H_8N_2$	N_2	9,9	26,4
Этиловый спирт	C_2H_6O	Пар	20	22,03
Четырехбромистый ацетилен	$C_2H_2Br_4$	N_2	30,4	46,7
Четыреххлористый ацетилен	$C_2H_2Cl_4$	N_2	47,4	36,5
Хлористый ацетил	C_2H_3OCl	Пар	14,8	25,79
Ацетонитрил	C_2H_3N	Воздух	13,8	29,19
Аллоксан	$C_4H_2O_4$	Пар	16,8	23,35
Этилсульфоцианат	C_3H_5SN	»	17,6	35,92
Аллиловый спирт	C_3H_6O	»	14,5	25,99
Глицерин	$C_3H_8O_3$	Воздух	18,0	64,7
Этилацетат	$C_4H_8O_2$	N_2	25,1	22,3
Этилловый эфир	$C_4H_{10}O$	N_2	25,3	16,7
Цианистый этилен	$C_4H_4N_2$	Воздух	80,1	54,52
Диэтиламин	$C_4H_{11}N$	N_2	25,4	18,3
Ацетилацетон	$C_5H_8O_2$	N_2	25,2	29,2
Фурфурол	$C_5H_4O_2$	N_2	0	42,5
Пиридин	C_5H_5N	Пар	17,5	36,69
Анилин	C_6H_7N	»	19,5	40,84
Бензол	C_6H_6	Воздух	17,5	29,16
Бромбензол	C_6H_5Br	N_2	37,6	35,2
Хлорбензол	C_6H_5Cl	N_2	25,0	32,9
Циклогексан	C_6H_{12}	Воздух	11,9	27,58
Гексен	C_6H_{12}	Пар	9,2	18,54
Иодид бензола	C_6H_5I	N_2	25,4	37,1
Капронитрил	$C_6H_{11}N$	N_2	47,9	23,1
Толуол	C_7H_8	Воздух	17,5	28,52
Бензонитрил	C_7H_5N	Пар	8,0	39,61
Ацетофенон	C_8H_8O	N_2	24,6	40,1
Этилпиридин	$C_7H_{11}N$	Пар	7,4	37,26
Октан	C_8H_{18}	»	15,5	21,31
Хинолин	C_9H_7N	»	19,5	47,34
Нафталин	$C_{11}H_8$	»	197,0	27,96
Крезол	—	Воздух	37,0	45,4
Масло эфирное (ρ=0,9149 г/см³)	—	»	18,6	32,77
Масло петроленое (ρ=0,8197 г/см³)	—	»	25,0	28,9

Таблица 14.7

Коэффициент поверхностного натяжения σ, эрг/см², циклогексана при различных давлениях водорода [30]

P, атм	t, °C				
	0	25	50	75	100
1	25,3	24,7	21,9	19,1	—
50	23,7	23,2	20,4	17,7	15,1
100	22,5	22,0	19,3	16,6	14,0
150	21,5	21,0	18,4	15,9	13,4
200	20,7	20,25	17,6	15,4	13,0
300	15,2	18,75	16,5	14,3	12,1

Таблица 14.8

Коэффициент поверхностного натяжения сплавов в жидком состоянии в вакууме [7, 14]

Сплав	t, °C	σ, эрг/см²
81% Au — 19% Cu	1250	1007
51% Au — 49% Cu	1250	1123
71,9% Ag — 28,1% Cu	1125	1027
19% Ag — 81% Cu	1130	1114
81% Cu — 19% Sb	1100	797
24% Cu — 76% Sb	1100	865
82% Cu — 18% Sn	1000	922
25% Cu — 75% Sn	1000	539
87,3% Bi — 12,7% Sn	1000	359
16% Bi — 84% Sn	1000	449
48,7% Bi — 51,3% Pb	1000	352
10% Bi — 90% Pb	1000	388

14.2. ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

Таблица 14.9

Коэффициенты поверхностного натяжения твердых тел [11, 29]

Вещество	Формула	t, °C	σ, эрг/см²
Барита сульфат	$BaSO_4$	25	1250
Воск пчелиный	—	—	40
Калия бромид	KBr	—	91,6
» иодид	KJ	—	74,0
» хлорид	KCl	—	107,5
Кальция фторид	CaF_2	30	2500
Натрия бромид	NaBr	—	118,7
» иодид	NaJ	—	95,9
» хлорид	NaCl	—	150,2
Парафин	—	—	40,4
Свинца иодид	PbJ_2	30	130
» фторид	PbF_2	25	900
Серебра хромат	Ag_2CrO_4	25	375
Соль каменная	—	—	315
Стекло	—	—	130
Стронция сульфат	$SrSO_4$	30	1400

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киковин И. К., Киковин А. К. Молекулярная физика. М., Физматгиз, 1963.
2. Pelzel E. Berg- und Hüttenmänn. Monatsh., 1948, Bd 95, S. 276.
3. Еременко В. Н. «Укр. хим. журн.», 1962, т. 28, с. 4; Еременко В. Н., Иващенко Ю. Н., Богатыренко Б. Б. Поверхностные явления в расплавах и их роль в процессах порошковой металлургии. Киев, Изд-во АН УССР, 1964.
4. Еременко В. Н., Иваненко В. И., Тай Шоу-цей.— «Изв. АН СССР. ОТН. Металлургия и топливо», 1960, т. 3, с. 116.
5. Семенченко В. К. Поверхностные явления в металлах и сплавах. М., Гостехиздат, 1957.
6. Landolt-Börnstein. Physikalisch-Chemische Tabellen, Bd I, Berlin, 1923, S. 196.
7. Landolt-Börnstein. Physikalisch-Chemische Tabellen, Bd 2. Ergänzungsband, Berlin, 1931, I Teil, S. 148.
8. Calvery A. Proc. Phys. Soc. (B), 1957, v. 70, p. 1040.
9. Mack D. L., Davis J. K., Burlell T. P. J. Phys. Chem., 1941, v. 45, p. 846.
10. Surface Tension of Titanium, Zirconium and Hafnium. J. Appl. Phys., 1968, v. 29, p. 213. (Auth.: Peterson A. W., Hedesdy H., Keck P. H., Schwartz E.)
11. Keck P. H., Van Horn W. Phys. Rev., 1955, v. 91, p. 512.
12. Taylor J. W. Philos. Mag., 1965, v. 46, p. 857.
13. Кунин Л. Л. Поверхностные явления в металлах. М., Металлургиздат, 1955.
14. Landolt-Börnstein. Physikalisch-Chemische Tabellen, Bd 3. Ergänzungsband, Berlin, 1935, I Teil, S. 200.
15. Melford D. A., Hoar T. P. J. Inst. Metals, 1957, v. 85, p. 197.
16. Еременко В. Н., Иваненко В. И. «Укр. хим. ж.», 1960, т. 26, с. 423.
17. Kingeri W. D., Humenik M. J. Phys. Chem., 1953, v. 57, p. 359.
18. Жиров В. Г. «Труды Всесоюз. алюминиево-магниевого ин-та», 1947, т. 14, с. 99.
19. Найдич Ю. В., Еременко В. Н. «Физика металлов и металловедение», 1961, т. 11, с. 6.
20. Kozakevitch P., Urrain G. Compt. rend. Acad. Sci., 1961, v. 20, p. 263.
21. Еременко В. Н., Иващенко Ю. Н., Иваненко В. И. Экспериментальная техника и методы высокотемпературных исследований. М., Изд-во АН СССР, 1960, с. 295.
22. Еременко В. Н., Найдич Ю. В. «Изв. АН СССР. ОТН. Металлургия и топливо», 1959, т. 6, с. 130.
23. Пугачевич П. П., Константинов В. А. «Докл. АН СССР», 1947, т. 57, с. 797.
24. Василиу М. Н., Еременко В. Н., Фесенко В. Н. Строение вещества и спектроскопия. Л., Изд-во АН СССР, 1960, с. 78.
25. Астаков К. В., Панин Н., Добкин Л. «Ж. физ. химии», 1946, т. 20, с. 4.
26. Greenway H. T. J. Inst. Metals, 1947, v. 74, p. 183.
27. Филина М. А., Семенова Е. И. Свойства редких элементов. М., Металлургиздат, 1950.
28. Еременко В. Н., Найдич Ю. В. «Изв. АН СССР, ОТН. Металлургия и топливо», 1959, т. 2, с. 111.
29. Тимофеичева О. А., Лазарев В. Б. «Изв. АН СССР. Сер. хим. наук», 1962, т. 2, с. 358.
30. Ефремов Ю. В., Голубев И. Ф. «Ж. физ. химии», 1962, т. 6, с. 36.

III. КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

ГЛАВА 15

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Коэффициент теплопроводности λ может быть определен из уравнения:

$$Q_x = -\lambda\, dt/dx,$$

где Q_x — плотность теплового потока в направлении x; t — температура тела, °С. В системе СИ плотность теплового потока определяется как количество тепла, проходящего в 1 сек через 1 м² поверхности, расположенной нормально к направлению x. Размерность λ — вт/(м·град).

Таблица 15-1

Коэффициенты перевода единиц измерения коэффициента теплопроводности [1—8]

Единицы измерения	$\frac{вт}{м \cdot град}$	$\frac{вт}{см \cdot град}$	$\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$	$\frac{ккал}{м \cdot ч \cdot град}$	$\frac{Btu}{ft \cdot h \cdot °F}$	$\frac{CHU}{ft \cdot h \cdot °F}$
$\frac{вт}{м \cdot град}$	1	0,01	0,0023885	0,85984	0,57780	0,32100
$\frac{вт}{см \cdot град}$	100,0	1	0,23885	85,984	57,780	32,100
$\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$	418,68	4,1868	1	360,0	241,91	134,39
$\frac{ккал}{м \cdot ч \cdot град}$	1,1630	0,011630	0,0027778	1	0,67198	0,37332
$\frac{Btu}{ft \cdot h \cdot °F}$	1,7307	0,017307	0,0041338	1,4881	1	0,55556
$\frac{CHU}{ft \cdot h \cdot °F}$	3,1169	0,031152	0,0074410	2,6787	1,800	1

15.1. ЭЛЕМЕНТЫ

Теплопроводность тел независимо от их химического состава существенно зависит от их физического состояния. Коэффициент теплопроводности может меняться в широких пределах в зависимости от того, находится ли тело в аморфном (стеклообразном) состоянии или представляет собой монокристалл. Поликристаллическое тело обладает промежуточной теплопроводностью между теплопроводностями монокристалла и аморфного тела. Их теплопроводность тем ближе к теплопроводности аморфного тела, чем меньше размеры кристаллов.

Сильное влияние на теплопроводность тел могут оказывать кристаллическая система, пористость, влажность, пористость и т. д.

На практике часто случается, что теплопроводность внутри тела и вблизи его границ различна. Это различие может быть вызвано как изменением условий протекания процессов теплопередачи, так и изменением структуры вещества (в результате термообработки, наклепа и т. д.) [5].

В таблицах приведены коэффициенты теплопроводности для части тела, удаленной на достаточное расстояние от границы.

В табл. 15.2 приведены коэффициенты теплопроводности элементов. В первой колонке таблицы даны атомные номера элементов Z, во второй — химические символы элементов или их соединений (например, N_2, O_2 и т. д.), для которых приведены значения коэффициентов теплопроводности. Для каждого значения коэффициента теплопроводности внизу в скобках указана температура, °С, при которой измерена теплопроводность.

Коэффициенты теплопроводности паров и газов даны при давлении 1 атм. В тех случаях, когда значения коэффициента теплопроводности приведены для температуры фазового перехода, агрегатное состояние вещества указано буквой, стоящей рядом со значением температуры, например (182 ж.). При этом к. означает кристаллическое состояние; ж. — жидкость; г. — газ; т. — твердое вещество; ам. — вещество в аморфном состоянии; мк. — монокристалл. Если коэффициент теплопроводности проявляет сильную зависимость от агрегатного состояния вещества при данной температуре, то буква указывает на состояние, для которого приведено значение λ.

Погрешности приводимых значений колеблются от ±10 до 1,20%.

Таблица 15.2

Коэффициенты теплопроводности элементов

Z	Химический элемент	Коэффициент теплопроводности λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$ (при температуре t, °С)								Литература
1	H_2	0,106 (—257)	0,141 (—243)	0,163 (—193)	0,131 (—73)	0,168 (0)	0,268 (500)	0,560 (1027)	0,876 (1727)	[1]
2	He	0,018 (—270,8)	0,027 (—268,9)	0,058 (—200)	0,115 (—73)	0,143 (0)	0,279 (427)	0,479 (1227)	0,941 (4000)	[1, 3]
3	Li	418 (—200)	71 (—50)	71 (182 т.)	42,8 (182 ж.)	52,9 (527)	62,1 (1027)	100 (1427)	110 (1727)	[1,4—6]
4	Be	206 (—173)	194 (—73)	182 (97)	156 (227)	120 (527)	89* (800)	76 (1227)	62,8* (1600)	[1,6,7]
5	B	1,5 (27—87)								
6	C [1*]	114 (20)	86 (200)	61 (600)	47 (900)	40 (1200)	34 (1500)	25 (1800)		[6]
7	N_2	0,0078 (—153)	0,0243 (0)	0,0449 (300)	0,0693 (600)	0,0772 (900)	0,087 (1127)	0,142 (2000)	0,549 (3000)	[1,6]
8	O_2	0,161 (—193)	0,0252 (—173)	0,025 (0)	0,0649 (627)	0,0525 (1127)	0,131 (1727)	2,924 (2527)	0,306 (3727)	[1,6,8]
9	F_2	0,0080 (—173)	0,0182 (—73)	0,0248 (0)	0,0656 (27)	0,0944 (127)	0,0413 (227)	0,0528 (527)	0,0774 (727)	[9]
10	Ne	0,117 (—248)	0,092 (—243)	0,0205 (—183)	0,0454 (0)	0,0598 (127)	0,0829 (377)	0,101 (577)	0,133 (1027)	[1,3,6]
11	Na	168 (—244)	142 (—150)	143 (—53)	134 (27)	123 (97)	84 (98)	72 (377)	65 (927)	[1,6,8]
12	Mg	800* (—217)	1380* (—254)	180* (—203)	165 (0)	152 (500)	130 (649)	100 (651)	98 (900)	[3,6]
13	Al	1340* (—270)	4520* (—258)	1675* (—233)	197 (—173)	247 (27)	233 (327)	232 (627)	62 (927)	[3,6]

[1*] Значения коэффициент теплопроводности λ у кристаллов графита с плотностью 1,63 - 1,72 г/см³ вдоль направления прессования. Коэффициент теплопроводности вдоль направления прессования $\lambda_\parallel$ обычно в 1,5 раза выше, чем $\lambda_\perp$.

Z	Химический элемент	Коэффициент теплопроводности λ, $\frac{кВт}{м \cdot °С}$ при температуре t, °С								Литература
14	Si	167 (0)	25,9 (1414)							[3]
16	S	0,64 (—190)	0,205 (40)							[10]
17	Cl_2	0,0064 (—73)	0,0079 (0)	0,0088 (27)	0,0106 (77)	0,0134 (127)	0,0156 (227)	0,0188 (327)	0,0215 (427)	[1, 3]
18	Ar	0,006 (—183)	0,0126 (—73)	0,0167 (7)	0,0222 (127)	0,0436 (727)	0,0667 (1727)	0,102 (3227)	0,131 (4727)	[1, 6]
19	K	110 (—53)	100 (7)	90 (63,4)	49 (63,9)	38 (527)	29 (827)	21,1 527	24,3 1227	[1, 3, 6]
20	Ca	16 (0)								[9]
22	Ti	15,1 (—173)	15,5 (20)	16,9 (300)	19,4 (700)	10,5* (1000)	8,8*1 (1600)			[3, 6]
23	V	32,1 (—173)	33,2 (20)	34,4 (300)	35,7 (600)	37,2 (600)	39,5 (900)	42,3 (1200)	45,6 1500	[6]
24	Cr	72 (—73)	67 (27)	59 (127)	50 (227)	43 (327)	36 (527)	31 (727)	29 (1127)	[3, 6]
26	Fe	561 (—269)	151 (—190)	75 (0)	68 (127)	50 (427)	41 (727)	39 (1127)	35,6 (1530)	[3, 6, 8]
27	Co	37,5 (—173)	70,9 (17)	84,0 (97)	117 (297)	126,8 (497)	107 (797)	66 (1097)	11 (1397)	[6]
28	Ni	127 (—173)	92 (20)	83 (100)	68 (300)	62 (500)	58 (700)	56 (900)	65 (1300)	[3, 6]
29	Cu	1000* (—270)	5200* (—254,3)	1500* (—229,1)	600* (—210,2)	396÷402 (20)	373 (300)	321 (600)	301 (1083 т.)	[3, 6]

Z	Химический символ	Коэффициент электропроводности λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$ при температуре t, °C								Литература
30	Zn	1300* (−269,5)	1500* (−261,5)	440* (−243,8)	160* (−196,4)	111 (20)	110 (100)	59 (419)	57 (619)	[3, 4]
31	Ga	41 (0)	33 (27)	26 (31)	27 (100)					[6]
32	Ge	105 (−100)	60,3 (0)	13,4 (957)						[3, 6]
33	As	38,8 (20)								[6]
34	Se	0,13 (25)								[6]
36	Kr	0,0042 (−148)	0,0072 (−48)	0,0097 (27)	0,0149 127	0,0196 427	0,0238 727	0,0275 827	0,0307 1027	[1, 3]
37	Rb	36,5 (20)	35,3 (39 ж.)	29,6 (227)	25,9 (497)	22,2 (627)	0,0118 (727)	0,0125 (1027)	0,0141 (1297)	[1, 6]
40	Zr	22,3 (−173)	21,4 (20)	20,5 (200)	20,4 (400)	19,9 (700)	19,7 (1000)	19,6 (1300)	19,6 (1600)	[6]
41	Nb	53 (−173)	50 (−73)	53 (27)	56 (327)	67 (727)	76 (1227)	91 (1827)	102 (2427)	[6]
42	Mo	205 (−173)	169 (−73)	162 (27)	158 (327)	158 (727)	114 (1227)	100 (2127)	74,3 (2620 ж.)	[3, 6]
44	Ru	108 (20)								[3]
45	Rh	3380 (−252)	211 (−160)	125 (18)	120 (100)					[3, 7, 8]
46	Pd	76,2 (20)								[3]

Z	Химический символ	Коэффициент теплопроводности λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$ при температуре t, °C								Литература
47	Ag	7000* (−200)	10 500* (−265)	3910* (−252)	800* (−230)	422 (−100)	418 (27)	362 (300)	5,82 (960 т.)	[3,5,6]
48	Cd	950* (−272)	1200* (−271)	550* (−269)	96 (−100)	93 (20)	91,9 (100)	45,2 (321 ж.)	41 (700)	[3,5,6]
49	In	500* (−272)	800* (−269)	190* (−269)	50* (−243)	88 (20)	71,5 (40)	71,0 (140)		[3,6]
50	Sn	80,4 (−100)	74 (−100)	65 (20)	60 (400)	34,3 (232 ж.)	33,8 (300)	33,1 (400)	32,5 (500)	[3—6]
51	Sb	23 (−100)	23 (20)	17 (400)	17 (400)	21,9 (630 ж.)	21 (700)	20,9 (700)		[3, 5]
52	Te	3,61 (0 ж. к.)	58,15 (20)	1,38 (452 ж.)						[3,6]
53	I	0,416 (24,4)	0,444 (30)	0,486 (42,85)						[9,10]
54	Xe	0,0055 (−98)	0,0052 (0)	0,0067 (77)	0,0090 (227)	0,0121 (427)	0,0149 (627)	0,0176 (827)	0,0200 (1027)	[1]
55	Cs	~23,8 (20)	19,0 (28,5 ж.)	19,3 (127)	19,2 (427)	17,7 (627)	8,28 (727)	9,09 (1027)	10,1 (1227)	[1,6]
72	Hf	23,5 (20)	22,6* (100)	21 (300)	18,6* (1000)	17,6 (2130 т.)	16,7* (2400)			[3,5]
73	Ta	63 (−173)	63 (−73)	63 (27)	68 (627)	74 (927)	86 (1627)	100 (2427)	110 (3000)	[3,6]
74	W	3135 (−202)	232,5 (−100)	130 (27)	126 (327)	115 (927)	101 (1827)	92 (2427)	88 (3000 т.)	[3,6]
75	Re	50,7 (20)								[3]
76	Os	88 (20)								[3]

Z	Химический символ	Коэффициент теплопроводности λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$ при температуре t, °C								Литература
77	Ir	151 (—100)	148 (0)	138 (20)	143 (100)					[3, 6, 7, 10]
78	Pt	~333 (—252)	77,8 (—190)	74,1 (20)	75,3* (300)	83,7* (1100)	~90 (1755 т.)	110* (3000)		[3, 8]
79	Au	1100* (—270)	2900* (—263)	1000* (—249)	500 (—235)	330 (—100)	310 (0)	310 (100)		[3, 5]
80	Hg	48 (—173)	26,6 (—73)	7,669 (—38,87 ж.)	8,447 (20)	9,475 (100)	11,09 (300)	14,04 (600)	14,98 (800)	[1, 6]
81	Tl	1150* (—272)	1370* (—270)	500* (—253)	150* (—243)	63 (—173)	47 (27)	40 (127)	36 (227)	[5, 6]
82	Pb	53,6 (—250)	47,3 (—200)	40,6 (—100)	34,89 (20)	29,14 (300)	16,9 (327,5 ж.)	15,56 (600)	16,77 (800)	[3, 5, 6, 8]
83	Bi	12 (—200)	8 (80)	7—8,8 (270)	11,3 (271 ж.)	14 (360)	16 (400)	17 (600)	19 (800)	[3, 6]
90	Th	40,4 (—173)	35,6 (27)	33,3 (127)	28,6 (327)	21,7 (627)	12,0 (1027)	7,5 (1227)	2,8 (1427)	[3, 8]
92	U	17,8 (—73)	22,5 (27)	26,5 (127)	31,8 (327)	32,4 (627)	22,4 (927)	13,7 (1127)	13,8 (1227)	[6]
94	Pu	4,1 (—173)	4,65 (—73)	5,23 (27)	5,90 (127)	6,40 (227)	6,98 (327)	8,20 (527)	9,30 727	[6]

* Получены путем пересчета с графиков, приведенных в оригинале.

13.2. ГАЗЫ И ПАРЫ

Коэффициент теплопроводности газа связан с его молекулярными характеристиками выражением $\lambda \approx \frac{1}{3} n l \bar{v} c_p$, где $\bar{v}$ — скорость молекул; l — длина свободного пробега молекулы; n — число молекул в единице объема; m — масса молекулы; c_p — теплоемкость единицы массы при постоянном объеме. Связь λ с коэффициентом вязкости газа μ выражается формулой $\lambda = S\mu c_p$. Число Стаффора S меняется от 2,5 для одноатомного газа до ~1 при увеличении числа атомов в молекуле до бесконечности. Коэффициент теплопроводности газов слабо зависит от давления, поскольку увеличение числа молекул в единице объема n приводит к пропорциональному уменьшению длины свободного пробега l. Небольшое уменьшение коэффициента теплопроводности с уменьшением давления (в среднем —1% на 1 атм) вызвано изменением удельной теплоемкости [3]. Если длина свободного пробега равна размеру слоя (сосуда) или больше, то приведенное условие не выполняется, и коэффициент теплопроводности пропорционален числу молекул n, т. е. давлению газа, и стремится к нулю с уменьшением давления.

Таблица 15.3

Коэффициенты теплопроводности газов, содержащих углерод [3] (при давлении 1 *атм*)

Газ	Химическая формула	t, °C	$\lambda \cdot 10^3$, кал/(см·сек·°C)
Ацетальдегид	CH_3COH	100	42,0
Ацетилен	C_2H_2	0	44
Ацетон	CH_3COCH_3	100	40,5
Ацетонитрил	CH_3CN	100	33,0
Бензол	C_6H_6	100	40,1
Изобутан	C_4H_{10}	0	30,4
н-Бутан	C_4H_{10}	0	39,4
Гексан	C_6H_{14}	100	48,0
Диоксан	$(C_2H_4O)_2$	100	40,0
Диэтиламин	$(C_2H_5)_2NH$	100	52,0
Метан	CH_4	0	69,6
Метилацетат	CH_3COOCH_3	100	42,1
Метил бромистый	CH_3Br	100	28,0
» хлористый	CH_3Cl	0	27,5
Метилен хлористый	CH_2Cl_2	100	20,2
Нитрометан	CH_3NO_2	100	30,0
Изопентан	C_5H_{12}	0	29,0
н-Пентан	C_5H_{12}	0	28,3
Пропан	C_3H_8	0	35,5
Спирт метиловый	CH_3OH	100	53,0
» изопропиловый	C_3H_7OH	100	62,5
» н-пропиловый	C_3H_7OH	100	49,3
» этиловый	C_2H_5OH	100	64,0
Триэтиламин	$C_6H_{15}N$	100	60,0
Углерод четыреххлористый	CCl_4	100	20,5
Углерода двуокись	CO_2	0	34,6
Углерода окись	CO	0	51,1
Фреон-11	CCl_3F	100	30,0
Фреон-12	CCl_2F_2	0	20,5
Фреон-21	$CHCl_2F$	0	21,5
Фреон-22	$CHClF_2$	0	24,5
Фреон-113	$C_2Cl_3F_3$	100	23,0
Хлороформ	$CHCl_3$	100	23,4
Циклогексан	C_6H_{12}	100	40,0
Циклопропан	C_3H_6	0	27,0
Этан	C_2H_6	0	43,5
Этил хлористый	C_2H_5Cl	100	40
Этилацетат	$CH_3COOC_2H_5$	100	38,6
Этилен	C_2H_4	0	41,5
Этилен хлористый	$C_2H_4Cl_2$	100	32,2
Этилена окись	C_2H_4O	100	46
Этилнитрат	$C_2H_5NO_3$	100	38,0
Этилформиат	$HCOOC_2H_5$	100	44,0
Эфир диэтиловый	$C_2H_5OC_2H_5$	100	53,0

15.3. ЖИДКОСТИ

Коэффициент теплопроводности жидкостей при температуре 0°C и атмосферном давлении с погрешностью ±10% может быть рассчитан по полуэмпирической формуле [3]

$$\lambda \approx 10^{-6}\frac{5C_p}{N^{0,25}}\sqrt{\rho T_{кип}},$$

Таблица 15.4

Коэффициент теплопроводности газов, не содержащих углерода (при давлении 1 *атм*)

Газ или пар	Химическая формула	Температура кипения, °C	t, °C	$\lambda \cdot 10^3$, кал/(см·сек·°C)	Литература
Азот	N_2	—196	0	57,4	[3]
Азота двуокись	NO_2	—	55	95,7	[10]
» закись	N_2O	—88	0	33,4	[3]
» окись	NO	—152	0	56,4	[3]
Аммиак	NH_3	—33	0	52,2	[3]
Аргон	Ar	—185	0	39,0	[3]
Вода	H_2O	100	100	56,1—59,0	[1,4,6]
			300	103,9	[4, 6]
			500	164	[4, 6]
			700	234	[1, 6]
Вода тяжелая	D_2O	101,4	100	57	[1]
			300	106	[1]
			500	175	[1]
Водород	H_2	—253	0	401	[3]
Воздух			—191,1	18,2	[10]
			0	57,5	[3,1]
			800	88	[3]
Гелий	He	—269	0	342	[3]
Кислород	O_2	—183	0	57,5	[3]
Криптон	Kr	—153	0	20,9	[3]
Ксенон	Xe	—107	0	12,3	[3]
Неон	Ne	—246	0	109,0	[3]
Сероводород	H_2S	—62	0	30,4	[3]
Сера двуокись	SO_2	—10	0	19,8	[3]
Уран шестифтористый	UF_6	56	100	21,4	[3]
Хлор	Cl	—35	0	17,5	[3]

где λ — коэффициент теплопроводности, *кал/(см·сек·град)*; $T_{кип}$ — температура кипения, °K; ρ — плотность жидкости, *г/см*³; C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, *кал/(г·град)*; N — число атомов в молекуле жидкости. С понижением температуры коэффициенты теплопроводности жидкостей увеличиваются. В интервале температур $-50 < t < -50$°C данная кость $\lambda(t)$ может быть приближенно представлена выражением:

$$\lambda(t) = \lambda(0)\,[1 + 0,01\,t\,(\sqrt{T_{кип}}/23,5 - 1)].$$

Вода и глицерин представляют исключение.

У всех жидкостей коэффициент теплопроводности возрастает с ростом давления. Это увеличение практически несущественно до давлений 50 *атм*. При высоких давлениях p, достигающих 12 000 *атм*, коэффициент теплопроводности при температуре 0°C можно рассчитать по формуле:

$$\lambda(p) \approx \lambda(0)\,[1 + (5T_{кип})^{-1/2}\,(P/144)^{1/2}],$$

где P — избыточное давление, *атм*.

В табл. 15.5 приведены коэффициенты теплопроводности жидкостей при температуре 0°C (если не указано другое значение температуры).

Таблица 1.5

Коэффициенты теплопроводности жидкостей

Жидкость	Формула	$t_{пл}$, °C	$\lambda \cdot 10^{-4}$, $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot °C}$	Литература
Аллил бромистый	C_3H_5Br	71	278	[3]
Аммиак	NH_3	-33	1200	[2]
Анилин	$C_6H_5NH_2$	184	432	[3, 4]
Ацетальдегид	CH_3COH	21	415	[3]
Ацетон	CH_3COCH_3	56	406	[3]
Бензол	C_6H_6	80	365	[3, 4]
Бромбензол	C_6H_5Br	56	280	[3]
Бромоформ	$CHBr_3$	149	251	[3]
о-Бромфенол	C_6H_4OHBr	195	318	[3]
Бутилацетат	$CH_3COOC_4H_9$	125	402	[3]
Вода при $t = 0$°C	H_2O	100	1330	[3]
100°C			1631	[1, 6]
200°C			1569	[1]
350°C			578	[1]
Вода тяжелая при $t = 0$°C	D_2O	101.4	1336	[3]
100°C			1522	[1, 6]
200°C			1419	[1, 6]
300°C			838	[1, 6]
Гексан	C_6H_{14}	69	365	[3]
Глицерин	$(CH_2OH)_2CHOH$	290	680	[3]
Дихлорметан	CH_2Cl_2	41	372	[3]
Дихлорэтан	$C_2H_4Cl_2$	97	310	[3]
Дихлорэтан	$C_2H_2Cl_2$	83	350	[3]
Кислота муравьиная	$CHOOH$	101	648	[3]
» пропионовая	CH_3CH_2COOH	141	490	[3]
» серная	H_2SO_4	330	715	[3]
» стеариновая	$CH_3(CH_2)_{16}COOH$	397	400	[3]
» уксусная	CH_3COOH	118	450	[3]
Метилацетат	CH_3COOCH_3	57	300	[3]
Метил иодистый	CH_3I	42	237	[3]
Метилформиат	$HCOOCH_3$	33	480	[3]
Нитробензол	$C_6H_5NO_2$	211	357	[3]
Нитрометан	CH_3NO_2	101	509	[3]
о-Нитротолуол	$C_6H_4CH_3NO_2$	222	366	[3]
Пентахлорэтан	C_2HCl_5	162	305	[3]
Пиридин	C_5H_5N	115	440	[3]
Пропанол	C_3H_7OH	97	410	[3]
Сероуглерод	CS_2	46	336	[3]
Спирт аллиловый	C_3H_5OH	103	455	[3]
» метиловый	CH_3OH	65	530	[3]
» этиловый	C_2H_5OH	78	440	[3]
Тетрахлорэтан	$C_2H_2Cl_4$	146	296	[3]
Тетрахлорэтилен	C_2Cl_4	191	308	[3]
Трихлорэтилен	C_2HCl_3	87	290	[3]
Толуол	$C_6H_5CH_3$	111	330	[3]
Углерод четыреххлористый	CCl_4	77	268	[3]
Фреон-11	CCl_3F	22	250	[3]
Фреон-12	CCl_2F_2	—30	220	[3]
Фреон-21	$CHCl_2F$	9	290	[3]
Фреон-22	$CHClF_2$	—41	295	[3]
Фреон-113	$C_2Cl_3F_3$	46	225	[3]
Фреон-114	$C_2Cl_2F_4$	4	215	[3]
Фторбензол	C_6H_5F	85	312	[3]
Хлорбензол	C_6H_5Cl	133	317	[3]
Хлороформ	$CHCl_3$	61	300	[3]
о-Хлорфенол	C_6H_4OHCl	76	364	[3]
Этил бромистый	C_2H_5Br	38	269	[3]
» иодистый	C_2H_5I	72	230	[3]
Этиленгликоль	CH_2OHCH_2OH	198	635	[3]
Этилформиат	$HCOOC_2H_5$	54	407	[3]

15.4. СПЛАВЫ

В табл. 15.6—15.15 приведены коэффициенты теплопроводности сплавов при различных температурах. Для некоторых сплавов в статей в первой колонке таблиц дано полное или сокращенное наименование согласно ГОСТу. В скобках приведены устаревшие названия. Число перед химическим символом элемента, входящего в сплав, означает его массовое содержание в сплаве.

Таблица 15.6

Коэффициенты теплопроводности сталей [6]

Марка стали	t, °C	λ, Вт/(м·°С)
Ст. 20	27	0,136
	527	0,10
	927	0,0945
Ст. 35	27	0,115
	527	0,0965
	927	0,0715
Ст. 45	27	0,115
	527	0,0885
	927	0,050
Ст. 65Г	27	0,107
	727	0,0575
Ст. У8	27	0,12
	527	0,0815
	997	0,062
13Н2ХА, 15ХА, 15Х, 20Х	27	0,093
	927	0,072
30ХГС, 30ХГСА	27	0,0925
	927	0,064
15ХМ	27	0,10
	927	0,075
30ХМ, 30ХМА	27	0,092
	927	0,0835
1Х11МФ, 1Х12В1МФ	27	0,10
	927	0,074
1Х12М1Ф	27	0,10
	927	0,086
65Г, 20Г+65Г	27	0,109
	997	0,0785
Х5М	—73	0,105
	1127	0,061
1Х13 (ЭЯ1)	—73	0,0735
	1127	0,079
2Х13Н4Б4Ф (ЭИ 590)	—73	0,069
	1127	0,072
4Х13 (ЭЯ4)	—73	0,078
	1127	0,0755
1Х12В2МФ (ЭИ756)	—73	0,0797
	1127	0,0708
Х18Н9Т (1Х18Н9Т, ЭЕ1Т)	73	0,1623
	427	0,148
	1127	0,167
0Х18Н12Б (Х18Н11Б, ЭИ402)	—73	0,1325
	427	0,0882
	927	0,0622
Х23Н18 (ЭИ417)	—73	0,0993
	1127	0,0866
Х17Н13М2Т (Х18Н12М2Т, ЭИ448)	—73	0,163
	1127	0,0424
1Х16Н13М2Б (ЭИ680), 3Х18Н12М3ТЕ (ЭИ578)	—73	0,0928
	1127	0,0419
Х16Н25М6 (ЭИ395)	—73	0,0204
	1127	0,0461

Продолжение табл. 15.6

Марка стали	t, °C	λ, Вт/(м·°С)
Х15Н9Ю (ЭИ612), ХН35ВТР (ЭИ725), ХН36ВМТ (ЭИ692)	—73	0,0316
	1127	0,0455
Х22Н2Б, ВЖ100	—73	0,0556
	727	0,056
Х17Н7Ю (ЭИ435, Пальтиник 80, США)	27	0,090
Х17Н2ЮР (ЭИ437Б), ХН77ТЮР (ЭИ437А)	627	0,0645
	—73	0,0263
Х18Н7БЮ (ЭИ607, Инконель X, США)	727	0,0675
	—73	0,0263
ХН70ВМЮТ (ЭИ765), Х17Н8М3Т (ЭИ617)	1127	0,0645
	—73	0,0107
	1127	0,0575
Х16Н6Ю (ЭИ559)	—73	0,0191
	1127	0,070
Х16Н9В (ЭИ868)	—73	0,0215
	727	0,054
Армко-железо (0,03% C; 0,007% Si; 0,025% Mn; 0,007% P; 0,02% S; остальное Fe)	0	0,186
Чугун:	27	0,07...0,14

Таблица 15.7

Коэффициенты теплопроводности сплавов меди [3, 6]

Сплав (состав, % по М)	t, °C	λ, Вт/(м·°С)
Бронзы:		
ОФ 10-1	27	34
	627	62
ОЦ 10-2	27	55
	627	77
ОС 10-10	27	40
	527	67
Л 5	27	105
	627	153
ЛАЖМЦ 10-3-1-5	27	59
	527	84
КМЦ 3-1	27	42
	427	54
МЦС 8-30	27	32
	627	63
Константан МНМц 40-1,5 (40% Ni + примесь Co; 1,5% Mn; 58,5% Cu)	0	20,9
	400	37,2
Копель МНМц 43-0,5 (56,5% Cu; 0,5% Mn; 43% Ni + примесь Co)	0	24,2
Латунь ЛАН 59-3-2, алюминиево-никелевая	27	84
	627	142
Латунь ЛМц 58-2, марганцовистая	27	70
	627	122
Латунь ЛС 59-1В, свинцовистая	27	105
	627	183
Латунь ЛО 70-1, оловянистая	27	92
	327	136
Манганин МНМц 3-12 (3% Ni; 12% Mn; 85% Cu)	0	21,7
	300	36,0

Продолжение табл. 15.7

Сплав (состав, вес. %)	t, °C	λ, $\frac{вт}{м \cdot °C}$
Нейзильбер МНЦ 15-20 (15% Ni; 20% Zn; 65% Cu)	0	125
	600	229,1
Мельхиор МНЖМц 30-0,8-1	0	37,1
Томпак ЛТ 96, полосовый	27	244
	527	260
» ЛТ 90, проволочный	27	114
	527	268
Cu — Al (98,29% Cu; 0,71% Al)	20	170
(95,39% Cu; 4,61% Al)	20	82,9
(90,0% Cu; 10,0% Al)	20	46,5
Cu — Si (99% Cu; 1% Si)	20	82,5
(96,09% Cu; 3,91% Si)	20	36,4
Cu — P (99,925% Cu; 0,075% P)	20	938,6
(99,520% Cu; 0,480 P)	20	90,5
Cu — Mn (85% Cu; 15% Mn)	20	21,7
(70% Cu; 30% Mn)	20	12,6
Cu — Ni (98,03% Cu; 1,97 Ni)	20	171,6
(90% Cu; 10% Ni)	27	59
(82,7% Cu; 17,3% Ni)	20	34
(54% Cu; 46% Ni)	20	30,3
Cu — Zn (70% Cu; 30% Zn)	17	109 [4]
(61,5% Cu; 38,5% Zn)	20	78,7
Cu — Sn (99,01% Cu; 0,99 Sn)	20	228
(95,08% Cu; 4,92% Sn)	20	81,6
(75% Cu; 25% Sn)	27	25,1

Таблица 15.9

Коэффициенты теплопроводности сплавов алюминия [3, 6]

Сплав (состав, вес. %)	t, °C	λ, $\frac{вт}{м \cdot °C}$
А (примесь <0,2%)	—	225
А1, А2, АД1, АД2 (примесь <1%)	20	203
АВ (Al; 0,6% Cu; 0,7% Mg; 0,25% Mn)	—	209
АК4, АК4-1	27	144
	427	167
АК8 (Al; 4,4% Cu; 0,5% Mg; 0,8% Mn; 0,8% Si)	—	161
АЛ9, АЛ9В	27	165
АЛ4 (Al; 9,2% Si; 0,25% Mg; 0,38% Mn; 0,5% Fe)	27	146
Al—Li (99% Al; 1% Li)	20	125
(96% Al; 5% Li)	20	75
(90% Al; 10% Li)	20	54
АМг (Al; 2,5% Mg; 0,3% Mn; 0,1% Cu)	—	126
АМг (Al; 5% Mg; 0,35% Mn; 0,2% Cu)	—	116
АМц (Al; 0,2% Cu; 0,03% Mg; 1,3% Mn)	—	186
В95 (Al; 1,7% Cu; 2,3% Mg; 0,6% Mn; 6% Zn)	—	143
Д1 (Al; 4,3% Cu; 0,6% Mg; 0,6% Mn)	—	170
Д16 (Al; 4,4% Cu; 1,5% Mg; 0,6% Mn)	—	169
Д18 (Al; 2,6% Cu; 0,35% Mg; 0,2% Mn)	—	174
Al—Si (95% Al; 5% Si)	20	142
(88% Al; 12% Si)	20	176
(80% Al; 20% Si)	20	100
ВС (Al; 12% Si; 0,30% Mg; 0,95% Fe; 0,29% Mn)	20	186
В96-77 (Al; 2,9% Cu; 2,5% Mg; 4,96% Zn)	20	163
Y (Al; 3,76% Cu; 1,85% Ni; 1,35% Mg)	20	182

Таблица 15.8

Коэффициенты теплопроводности сплавов никеля [3, 6]

Сплав (состав, вес. %)	t, °C	λ, $\frac{вт}{м \cdot °C}$
Алюмель НМцАК 2-2-1	0	39,7
Инвар (35% Ni; 65% Fe)	0	11,0
	300	12,7
Монель (68% Ni; 28% Cu; 2,5% Fe; 1,5% Mn)	0	22,1
	400	33,7
	800	46,0
Нихром (60% Ni; 16% Cr)	0	17,1
	400	24,1
Нихром (80% Ni; 20% Cr)	0	12,2
	600	22,6
Ферронихром (61% Ni; 20% Fe; 15% Cr; 4% Mn)	0	11,6
	600	13,1
Хромель Х10Н (91% Ni; 9% Cr)	0	16,0
	400	21,5

Таблица 15.10

Коэффициенты теплопроводности сплавов титана [3, 6]

Сплав (состав, вес. %)	t, °C	λ, $\frac{вт}{см \cdot сек \cdot град}$
ВТ, ВТ1-1 (Ti; 0,1% C; 1,3% Fe; 0,15% Si; 0,15% O)	27	0,0307
ВТ3 (Ti; ~5% Al; ~2,5% Cr)	27	0,017
ВТ4 (Ti; ~4,5% Al; ~1,4% Mn)	27	0,0215
ВТ5-1 (Ti; 5% Al; 2,5% Sn)	27	0,0179
ВТ6 (Ti; ~6,5% Al; 4% V)	27	0,0179
ВТ8 (Ti; ~6,3% Al; 3,3% Mo)	27	0,017
ВТ14 (Ti; 4% Al; 3% Mo; 1% V)	27	0,020
ВТ15 (Ti; 3% Al; 5% Mo; 11% Cr)	27	0,0191
ВТ16 (Ti; 2,5% Al; 7,5% Mo)	27	0,0251
ОТ3 (Ti; ~2% Al; ~1,4% Mn)	27	0,0217
ОТ4 (Ti; 3% Al; 1,5% Mn)	27	0,0195
(92,5% Ti; 2,5% Sn; 5,0% Al)	50	0,0183
	400	0,0277
(89,5% Ti; 4,0% Al; 4,0% Mo; 2,0% Sn; 0,5% Si)	50	0,0185
	400	0,0275
(90% Ti; 2,0% Mn; 2,0% Al)	50	0,0237
	400	0,033

Таблица 15.11

Коэффициенты теплопроводности сплавов магния [3, 6]

Состав (состав, вес.%)	t, °C	λ, Вт/(м·град)
МА1 (Mg; 0,3% Al; 0,1% Zn; 2,0% Mn)	—	151
МА2 (Mg; 4% Al; 0,8% Zn; 0,5% Mn)	—	104
МА3 (Mg; 6% Al; 1% Zn; 0,5% Mn)	—	96
МА5 (Mg; 8% Al; 0,5% Zn; 0,5% Mn)	—	83,7
Магнокс АL2 (Mg; 1,15% Al; 0,45% Be)	0	129
МЛ2 (Mg; 0,2% Al; 0,2% Zn)	—	137
МЛ3 (Mg; 3,6% Al; 1,5% Zn; 0,5% Mn)	—	108
МЛ4 (Mg; 6% Al; 2,5% Zn; 0,5% Mn)	—	75
МЛ5 (Mg; 8,5% Al; 0,5% Zn; 0,3% Mn)	—	76
МЛ6 (Mg; 10% Al; 0,3% Mn)	—	74
AZ61 (Mg; 6,5% Al; 1,1% Ir; 0,6% Mn)	27	82,9
M1X (Mg; 0,5% Zr; 0,1% Mn; 0,53% Zn)	27	120
M25 (Mg; 0,37% Zr; 0,24% Mn)	27	114
M10C (Mg; 0,57% Zr; 0,1% Mn; 1,36% Ce)	27	109
W1645 (Mg; 0,76% Ni)	50	142
W1652 (Mg; 3,17% Ce; 1,6% Mn)	50	117
W1646 (Mg; 2,65% Ce; 6,36% Ni)	50	130
W1702 (Mg; 2,2% Cr; 2,4% Ce; 1,6% Mn)	50	132
ZW1 (Mg; 0,7% Ir; 1,5% Zr)	27	137

Таблица 15.12

Коэффициенты теплопроводности сплавов урана [6]

Состав (состав, вес.%)	t, °C	λ, Вт/(м·град)
99,6% U; 1,0% Al	—73	14,1
	227	13,5
	627	13,6
60% U; 10% Al	—73	10,1
	227	9,9
	627	9,8
50% U; 30% Al	—73	30,6
	227	29,3
	527	27,9
50% U; 50% Al	—73	68,2
	427	34,4
10% U; 90% Al	27	180,0
99,65% U; 0,35% V	300	28,5
99,89% U; 0,11% Cr	300	31,0
95% U; 5% Zr	27	14,5
90% U; 10% Zr	27	14,6
80% U; 20% Zr	27	9,0
30% U; 70% Zr	27	6,0
95% U; 5% Mo	27	25,08
70% U; 30% Mo	27	26,75
30% U; 70% Mo	27	67,46
10% U; 90% Mo	27	105,16
95% U; 5% Fe	27	24
90% U; 10% Fe	27	22

Продолжение табл. 15.12

Состав (состав, вес.%)	t, °C	λ, Вт/(м·град)
80% U; 20% Fe	27	18
30% U; 70% Fe	27	33
67% U; 33% Bo	77	106
	427	76
	1127	45
55,1% U; 46,9% B	27	21
36,1% U; 63,9% B	27	17
70% U; 30% Pu; 10% продукты деления	50	9,65
	300	15,91
	600	26,86
	800	30,14
20% U; 80% Th	600	41
10% U; 90% Th	600	42

Таблица 15.13

Коэффициенты теплопроводности сплавов свинца [6]

Состав (состав, вес.%)	λ, Вт/(м·град)
Баббит Б6	21
Б16	21
Б83	33
Б89	33
Припой ПОС-18	38
ПОС 30	39
Сплав 90,25% Pb; 8% Sb; 1,75% As	11,3

Таблица 15.14

Коэффициенты теплопроводности сплавов циркония [3, 6]

Состав (состав, вес.%)	t, °C	λ, Вт/(м·град)
92% Zr; 8% U	100	14,5
	400	17,0
91% Zr; 8% U; 1% H	100	19,6
	400	17,2
99,66% Zr; 0,1% C; 0,04% Sn	250	15,9
97,5% Zr; 2,3% Sn; 0,1% C; 0,1% O	250	12,5
92,2% Zr; 7,6% Mo; 0,1% C; 0,1% O	250	14,6
90% Zr; 9,8% Nb; 0,2% C	200	14,6

Таблица 15.15

Коэффициенты теплопроводности сплавов Na, K, Bi и других металлов

Сплав (состав, вес.%)	t, °C	λ, $\frac{вт}{см \cdot °C}$	Литература
56% Na; 44% K; $t_{пл}$ — 19° C, $t_{кип}$ — 825°C	19	0,059	[6]
	427	0,066	[6]
	927	0,0714	[6]
22% Na; 78% K; $t_{пл}$ — −11,5°C, $t_{кип}$ — 784°C	−11,7	0,0295	[6]
	427	0,063	[6]
	927	0,0574	[6]
55,5% Bi; 44,5% Pb; $t_{пл}$ — 123,4°C	150	0,0258	[6]
	700	0,0400	[6]
50% Bi; 31% Pb; 19% Sn	0	0,0406	[6]
48% Bi; 26% Pb; 13% Sn; 13% Cd	0	0,0311	[6]
67% Be; 33% Al	27	0,0458	[6]
64% Be; 36% Al	27	0,0511	[6]
57% Be; 43% Al	27	0,046	[6]
90% Pt; 10% Ir	17	0,074	[4]
90% Pt; 10% Rh	17	0,079	[4]
Сплав Вуда	—	0,0319	[4]
92% Au; 8% Pt	18	0,191	[8]
53% Au; 47% Pt	18	0,060	[8]
4% Au; 96% Pt	18	0,410	[8]

15.5. ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОМПОЗИЦИИ ЯДЕРНОГО ГОРЮЧЕГО

Таблица 15.16

Коэффициент теплопроводности огнеупорных материалов

Материал (состав, вес.%)	ρ, $\frac{г}{см^3}$	t, °C	λ, $\frac{вт}{см \cdot °C}$	Литература
Графит реакторный (вдоль направления прессования)	1,7	173	210	[6]
		423	100	[6]
		1421	46,9	[6]
Графит реакторный (перпендикулярно к направлению прессования)	1,7	−173	160	[6]
		423	75,7	[6]
		1423	40,2	[6]
Карборунд (19,12% Al_2O_3; 25,66% SiO_2; 48,39% SiC; 5,01% MgO; 0,44% Fe_2O_3)	2,18	300	4,81	[3]
		1100	3,85	[3]
Корунд (81,54% Al_2O_3; 15,35% SiO; 1,27% MgO; 1,84% Fe_2O_3)	2,72	300	2,36	[3]
		1100	2,06	[3]
Муллит ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)	2,6	100	5,73	[7]
		1500	3,04	[7]
Периклаз	—	0	41,5	[3]
		1100	5,86	[3]
Силлиманит (62,96% Al_2O_3; 34,87% SiO_2; 0,01% MgO; 1,26% Fe_2O_3)	2,12	300	1,31	[3]
		1100	1,30	[3]
Шамот (66,80% SiO_2; 31,06% Al_2O_3; 1,19% Fe_2O_3; 1,95% MgO)	1,84	300	0,88	[3]
		1100	1,03	[3]
Шпинель ($MgO \cdot Al_2O_3$)	3,27	100	10,5	[7]
		1200	5,02	[7]
Форстерит ($2MgO \cdot SiO_2$)	2,22	100	3,68	[7]
		1500	1,63	[7]
Циркон ($ZrO_2 \cdot SiO_2$)	3,60	300	4,6	[7]
		1400	3,1	[7]

Таблица 15.17

Коэффициенты теплопроводности окислов [6, 7]

Окисел	ρ, $\frac{г}{см^3}$	t, °C	λ, $\frac{вт}{см \cdot °C}$
Al_2O_3 (плавленый)	3,7—3,8	100	0,09
		1600	0,0138
BeO	2,7—2,86	100	0,500
		1600	0,0316
CaO (известь)	3,0—3,1	100	0,0633
		1000	0,0170
SiO_2 (кремнезем)	2,3—2,6	127	0,0167
		827	0,012
MgO (плавленая магнезия)	3,3—3,5	110	0,0833
		1600	0,0157
NiO	5,0—5,1	600	0,010
TiO_2	4,0—5,1	600	0,0083
ThO	9,72	600	0,011
ZrO_2	5,2—5,55	100	0,007
		1400	0,005

Таблица 15.18

Коэффициенты теплопроводности карбидов [6, 7]

Карбид	ρ, $\frac{г}{см^3}$	t, °C	λ, $\frac{вт}{см \cdot °C}$
SiC	3,23	−73	0,166
	3,08	527	0,0455
	—	1127	0,0287
	—	2227	0,0335
B_4C	2,3—2,4	27	0,0705
	—	627	0,013
ZrC	6,6	27	0,0476
TiC	4,92	−23	0,079
	4,75	127	0,0263
NbC	7,82	127	0,0335
		1600	0,105
Nb_2C	7,85	127	0,0455
TaC	14,5	−20	0,0525
Ta_2C	15,5	−20	0,086
Mo_2C	9,18	−20	0,0187
VC	5,48	−20	0,0502
V_2C	5,75	−20	0,0717
WC	15,63	−20	0,0604
W_2C	17,30	−20	0,056
HfC	12,67	127	0,0155
Cr_3C_2	6,68	−20	0,031
B_4C	—	−200	0,07—0,2

Таблица 15.19

Коэффициенты теплопроводности силицидов при $t = 27°C$ [6]

Соединение	ρ, $\frac{г}{см^3}$	λ, $\frac{вт}{см \cdot сек \cdot град}$	Соединение	ρ, $\frac{г}{см^3}$	λ, $\frac{вт}{см \cdot сек \cdot град}$
$TiSi_2$	4,35	0,031	$CrSi_2$	4,4	0,0143
$ZrSi_2$	4,88	0,043	$MoSi_2$	6,3	0,0551
$NbSi_2$	5,46	0,062	WSi_2	9,33	0,0454
$TaSi_2$	8,83	0,0287			

Таблица 15.20

Коэффициенты теплопроводности боридов [6, 7]

Соединение	ρ, $г/см^3$	t, °C	λ, $\frac{вт}{см \cdot сек \cdot град}$
TiB_2	4,5	23	0,058
ZrB_2	6,1	23	0,058
NbB_2	6,0	23	0,040
TaB_2	11,7	23	0,026
CrB_2	5,6	—	0,0526
Mo_2B_5	8,0	—	0,0645
W_2B_5	11,0	—	0,0765
CaB_6	—	20	0,055
SrB_6	—	20	0,062
BaB_6	—	20	0,066

Таблица 15.21

Коэффициенты теплопроводности нитридов [6] при $t = 20°C$

Нитрид	ρ, $г/см^3$	λ, $\frac{вт}{см \cdot сек \cdot град}$	Нитрид	ρ, $г/см^3$	λ, $\frac{вт}{см \cdot сек \cdot град}$
TiN	5,21	0,0656	CrN	5,9	0,0705
ZrN	7,35	0,0335	Cr_2N	6,5	0,143
VN	6,04	0,074	MoN	8,6	0,0682
NbN	8,4	0,0239	Mn_3N	9,9	0,12
TaN	13,8	0,055			

Таблица 15.22

Коэффициенты теплопроводности кремнийорганических соединений [1]

Соединение	ρ, $г/см^3$	t, °C	λ, $10^{-4} \frac{вт}{см \cdot сек \cdot град}$
Тетра-о-крезилоксисилан $(CH_3C_6H_4O)_4Si$	1,128	20	2,94
	0,987	200	2,53
	0,858	350	2,19
Дифенилсиликоксиэфир (силикон)	0,916	20	3,16
	0,863	150	2,5
	0,744	300	1,76

Таблица 15.23

Коэффициенты теплопроводности высокотемпературных композиций ядерного горючего [6]

Соединение (состав, вес.%)	ρ, $\frac{г}{см^3}$	t, °C	λ, $\frac{вт}{см \cdot сек \cdot град}$
UO_2 (спеченная двуокись урана)	10,97	0	0,0276
		400	0,0177
		700	0,0106
		1500	0,008
50% PuO_2; 50% UO_2 (спеченная смесь) PuO_2	11,10	27	0,0103
	11,46	—73	0,0172
		427	0,0101
		1227	0,00627
ThO_2 (спеченная двуокись тория)	9,96	73	0,0276
		527	0,0136
		1327	0,0055
UC	10,2	100	0,10
		400	0,063
		827	0,0674
UC_2	10,8	200	0,0305
		1000	0,0484
47% UO_2; 53% BeO (спеченная смесь)	3,2—3,6	27	0,0698
60% UO_2; 40% Al (спеченная смесь)	4,9	27	0,0167
19,9% UO_2; 80,1% C (спеченная смесь)	1,94	27	0,042
30,3% UC; 69,7% C (спеченная смесь)	2,32	27	0,136
50 об.% UO_2; 50 об.% W	—	100	0,125
		1000	0,101
60 об.% UO_2; 40 об.% Mo	—	100	0,0706
		1000	0,064
20% UO_2; 80% графитные	—	20	$7,1 \cdot 10^{-4}$
20% UO_2; 20% сажа; 60% поглотители	—	20	$8,7 \cdot 10^{-4}$
U_3O_8	7,90	27	0,0163
UN	14,32	27	0,0406
U_3Si	15,6	27	0,0471
USi	10,4	27	0,0387
USi_0	8,16	27	0,043
USi_2	9,25	27	0,0406
U_3Si_2	12,2	27	0,0335
UAl_2	6,8	27	0,0691
UBe_{13}	4,37	27	0,0251
US	10,87	27	0,0951
$ThBr_{13}$	4,36	27	0,215
ThB_6	—	20	0,10

15.6. СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ДРИЗЕНЫЕ ПОРОДЫ И ПРОЧИЕ ВЕЩЕСТВА

Таблица 15.24

Коэффициенты теплопроводности некоторых строительных материалов и грунтов [3, 5]

Материал (состав, вес. %)	ρ, $\frac{г}{см^3}$	t, °С	λ, 10^{-4} $\frac{вт}{см \cdot °С \cdot сек}$
Асфальт	2,1	20	1070
Базальт [4]	—	—	6200
Бетоны (предварительно не просушенные) на легких заполнителях (пемзе) или тощих шлаках	0,6	20	350
	0,8	20	560
	1,0	20	790
	1,2	20	950
	1,4	20	1200
Бетоны (предварительно не просушенные) на доменных шлаках	0,6	20	350
	0,8	20	500
	1,0	20	640
	1,2	20	780
	1,4	20	940
Бетоны (легкие, предварительно не просушенные) на золах или кирпичном бое	0,6	20	470
	0,8	20	640
	1,0	20	860
	1,2	20	1090
	1,4	20	1360
	1,6	20	1700
Бетоны ячеистые (газобетоны) на кварцевом песке (предварительно просушенные)	0,6	20	720
	0,8	20	1050
	1,0	20	1440
	1,2	20	1920
	1,4	20	2000
Бетоны ячеистые (пенобетоны) на аморфном песке (предварительно не просушенные)	0,6	20	580
	0,8	20	890
	1,0	20	1050
	1,2	20	1360
	1,4	20	1700
Бетон с гравием	—	—	3080
Битум	1,05	20	2300
Бокситы	3,2	—	~10 500
Вермикулит	·		155
Гипс (или известковый песчаник), высушенный на воздухе	0,6	—	420
	1,0	—	760
	1,6	—	1470
	2,0	—	2500
Гипсы огнеупорные горячевые	2,0	415	2500
	—	1028	3000
» огнеупорный высокого качества	2,05	346	2000
		960	2700
» глиноземистый огнеупорный	1,985	423	2800
		981	3000
Гранит [4]	2,6—2,7	—	6400—8000
Диатомовая земля	—	—	170
Кварциты	~2,63	—	~11 000
Кирпич глиноземистый 99% Al_2O_3	2,867	137	12 600
		1079	5900
90% Al_2O_3 (без пор)	2,980	120	10 200
		1089	6170
50% Al_2O_3	2,747	152	5670
		1101	4500
60% Al_2O_3	2,307	376	3300
		1011	3170

Продолжение табл. 15.24

Материал (состав, вес. %)	ρ, $\frac{г}{см^3}$	t, °С	λ, 10^{-4} $\frac{вт}{см \cdot °С \cdot сек}$
Кирпич огнеупорный:			
для доменных печей	2,439	367	3900
		1036	4400
для тяжелых условий эксплуатации (55—40% Al_2O_3)	2,196	135	2980
		1047	3900
для сверхтяжелых условий эксплуатации (~44% Al_2O_3)	2,355	147	3300
		1091	3700
Кирпич силикатный:			
для тяжелых условий эксплуатации (96,3% SiO_2; 0,2% Al_2O_3; 2,0% CaO)	1,874	153	3050
		1117	4300
обычный (95,8% SiO_2; 0,5% Al_2O_3; 2,9% CaO)	1,81	167	2620
		1086	4170
футтерсоный (91,9% SiO_2; 1,0% Al_2O_3; 2,9% CaO)	1,714	167	2400
		1085	3000
изоляционный (пористый), (~92,5% SiO_2)	0,945	106	660
		1056	1900
Кирпичи:			
магнезитовый (~93,6% MgO)	2,787	161	21 000
		906	10 200
магнезитово-хромитовый (46,6% MgO; 11,4% Cr_2O_3; 14,6% Al_2O_3)	2,787	131	4280
		1090	4200
хромито-магнезитовый (34,2% MgO; 24,9% Cr_2O_3; 21,7% Al_2O_3)	3,012	160	4000
		1097	4280
хромитовый (18,2% MgO; 29,7% Cr_2O_3; 31,1% Al_2O_3)	3,108	161	5170
		1127	4670
форстеритовый (50,5% MgO; 39,5% SiO_2; 10,9 Al_2O_3)	2,697	161	4300
		1094	3360
Кремень	2,5	—	4000
Лед (шпардайский)	1,9	—	~2500
Мрамор [3]	2,8	—	~6300
Петролит	2,7	—	~6400
Порфир	2,65	—	~6400
Руда железная	~4,0	—	~7000

Таблица 15.25

Коэффициенты теплопроводности некоторых теплоизоляционных материалов растительного и искусственного происхождения [3–5]

Материал (плотн. кг/м³)	ρ, г/см³	t, °C	λ, 10⁻⁴ вт/(м·°С)
Лебяжьи волокнистый	0,47	20	375
	0,70	20	570
» прессованный	1,9	20	860
» распушенный	0,5	20	355
	0,6	20	400
Лебяжьяя вата	—	—	130
Асбестовый картон	—		270
Асбестовая ткань	—	—	300
Асбестоцеллюлоза	1,32	20	410—700
Бумага	—	—	144—308
Вата хлопковая	—	—	82
» шлаковая	0,1—0,8	100	120—330
Войлок	—	—	88—94
Войлок стеклянный	0,1	100	140
» древесный	0,3—0,4	50	196
Воск пчелиный	—	—	89
Гуттаперча	—	—	480
Замша	—		170
Ирпита	0,011	20	84
Камышит прессованный	0,216	—	129
Камыш (растительный пух)	—	—	83
Картон	—	—	330
Каучук натуральный	0,086	60	100
Каучук (80% металлической; 20% ZnO)	—	—	1070
(80% металлической; 20% TiO_2)		—	930
(80% металлической; 20% $CaCO_3$)	—	—	780
(70% дегтевой; 18% TiO_2; 12% ZnO)	—	20	1520
Кожа	1,0	50	420—445
Лед	0,9	0	5300
Линолеум прессованный	0,196		110
Льняное полотно	—	—	210
Мякиш	0,356		125
Ондолин	—	—	120
Пенопласт	0,110	20	120
Пенек (сосновый, $\delta_{пред}$ = 0,2 мм)	1,63	50	720
Пробка шлифованная	0,037	50	95
» прессованная	0,4	—	158
Пряжа хлопковая	—		63
Полистирол	1,06	20	116
Резина вулканизированная:			
38% каучука	—	20	700
60% каучука	—	20	630
Сажа	—	110	70
Сатин (перпендикулярно к слоям)	2,6	20	570
Снег уплотненный	—	—	510
Сапропел	0,102	20	92
Тальк (природный магниевый силикат)	2,6	20	~1500
Торф высушенный	0,1	50	133
Фарфор	—	—	2500
Фланель	—	—	230
Целлулоид		—	1100
Цеолитка	—	20	130
Шелк	0,1	0	95—120
Шелковая пряжа	0,068	0	80
Шлак	—	—	2000
Эбонит	—	—	420

Таблица 15.26

Коэффициенты теплопроводности древесины [3, 4]

Приведены коэффициенты теплопроводности древесины в направлении, перпендикулярном к волокнам. Экспериментально установлено, что теплопроводность вдоль волокон в два-три раза выше теплопроводности перпендикулярно к волокнам. Значения λ приведены для содержания влаги в древесине 12% вес. сухой древесины, что соответствует среднему влагосодержанию древесины в воздухе с влажностью 60% при комнатной температуре. Коэффициент теплопроводности сухой древесины λ = 0,0232 + 0,174 ρ, вт/(м·град), где ρ — плотность древесины, г/см³.

Порода дерева	ρ, г/см³	λ, вт/(м·град)
Бальзовое	0,125	0,045
Береза	0,72	0,15
Береза желтая	0,69	0,117
Дуб	0,85	0,171
Дуб белый	0,74	0,130
» красный	0,72	0,138
Ель елисейская	0,425	0,079
Ильм белый	0,52	0,105
Кедр красный	0,47	0,095
» красный западный	0,4	0,082
Кипарис красный	0,38	0,099
Клен белый	0,63	0,12
» черный	0,71	0,134
Лиственница	0,6	0,128
Лиственница западная	0,62	0,114
Пихта		0,037
» (вдоль слоев)	—	0,127
» дугласова	0,53	0,099
» колорадская	0,4	0,075
Пробковое	—	0,04
Сосна	0,5	0,11
Сосна белая	0,44	0,095
» желтая длиннохвойная	0,61	0,11
» » короткохвойная	0,54	0,111
» норвежская	0,48	0,096
» погдзова	0,49	0,096
» сахарная	0,41	0,080
Тополь	0,45	0,100
Фанера	—	0,125
Хемлок восточный	0,46	0,093
» калифорнийский	0,38	0,087
Ясень	0,7	0,145
Ясень белый	0,64	0,12

Таблица 15.27

Коэффициенты теплопроводности стекол [3, 10]

Название	ρ, кг/м³	t, °C	λ, Вт/(м·°C)
Бетон	—	—78	0,129
Пемзо	—	90	1,32
Кремнезем-фосфатный	—	45	0,758
» бариевый	—	—110	0,404
		45	1,13
		100	1,36
» калийно-фосфатный	—	45	0,825
» обыкновенный	—	45	1,40
» фосфат	—	0	0,753
Кварц плавленый	—	100	1,46
Сера плавленая	—	0	0,197
Пенопе	2,93	20	1,14
Стекло:			
A	2,22	20	1,13
B	2,27	20	1,13
C	2,45	20	1,07
D	2,52	20	1,00
E	2,42	20	1,00
F	2,53	20	1,10
G	3,19	20	0,825
H	3,18	20	0,749
I	3,55	20	0,749
J	3,56	20	0,778
K	4,29	20	0,70
кремнезем	—	0	1,390
L	6,10	20	0,536
Флинт обыкновенный	—	0	0,795
» тяжелый	—	0	0,793
Хрусталь	2,72	20	0,896

Таблица 15.28

Коэффициенты теплопроводности масел и некоторых продуктов перегонки нефти

Вещество	t, °C	λ, Вт/(м·°C)	Литература
Бензин Б-70	—50	0,131	[1]
	30	0,1108	[1]
Бензин	25	0,184	[2]
Глицерин	30	0,138	[3]
Глицерин	20	0,276	[1, 3, 4]
Керосин Т-1	—50	0,127	[1]
	0	0,119	[1]
	150	0,0965	[1]
Масло касторовое	20	0,178	[4]
» оливковое	20	0,165	[4]
» парафиновое	30	0,129	[3]
» трансформаторное № 1	30	0,132	[3]
» » » № 3	30	0,124	[3]
» Ministry of works	25	0,108	[3]
» Medium cylinder oil	30	0,150	[3]
» Mobiloil B	30	0,157	[3]
» Rabbeth Spindle oil	30	0,143	[3]
» Red oil	30	0,141	[3]
» Velocite B	30	0,143	[3]
Нефть	—	0,140	[3]
Парафин	30	0,123	[1, 3]
Парафин медицинский	30	0,116	[3]
Тяжелая дизельное	20	0,117	[1]

Таблица 15.29

Коэффициенты теплопроводности некоторых диэлектрических монокристаллов и кристаллических тел [8]

Кристалл	Химическая формула	Температура плавления, °C	$\lambda_{\parallel}$, Вт/(см·°C) при t = 0°C	$\lambda_{\perp}$, Вт/(см·°C) при t = 0°C
Алмаз	C	3950	0,104	1,5
Бромистый аммоний	NH_4Br	815	0,00315	0,0084
Бромистый калий	KBr	1008	0,0026	0,0100
Бромистый натрий	NaBr	1029	0,00215	0,0080
Иодистый калий	KI	563	0,0021	0,0075
» рубидий	RbI	515	0,0037	0,0122
Кальцит	$CaCO_3$	1612	0,00472	0,0102
Корунд	Al_2O_3	2323	0,00775	0,0659
Кремнезем (кварц)	SiO_2	1600	0,00477	0,0332
Магнезия	MgO	2773	0,0139	0,1408
Нитрат бария	$Ba(NO_3)_2$	508	0,00131	0,00417
Окись бериллия	BeO	2543	0,135	0,354
Сернистый цинк	ZnS	1950	0,0115	0,0778
Фтористый барий	BaF_2	1373	0,00502	0,0269
Фтористый калий	KF	1129	0,00107	0,0168
Фтористый кальций	CaF_2	1634	0,00437	0,0262
Фтористый литий	LiF	1143	0,00676	0,0282
Хлорат натрия	$NaClO_3$	550	0,00132	0,00206
Хлористый аммоний	NH_4Cl	793	0,00207	0,00602
Хлористый калий	KCl	1050	0,0064	0,0245
Хлористый натрий	NaCl	1074	0,00605	0,0257
Хлористый рубидий	RbCl	987	0,0029	0,0105

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Изд. 2-е. М., «Наука», 1972.
2. **Рид Р., Шервуд Т.** Свойства газов и жидкостей. Пер. с англ. М., Госэнергоиздат, 1964.
3. **Миснар А.** Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. Пер. с франц., М., «Мир», 1968.
4. **Handbook** of Chemistry and Physics. Cleveland rubber publishing Co., Cleveland, Ohio. s. a.
5. **Кэй Дж., Лаби Т.** Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз, 1962.
6. **Чиркин В. С.** Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М., Атомиздат, 1968.
7. **Техника** низких температур. Пер. ред. И. Э. Кнаусбергера. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1950.
8. **Landolt-Börnstein.** Physikalisch-Chemische Tabellen. Berlin, 1931.
9. **Gmelins** Handbuch der Anorganischen Chemie. Berlin, Weinheim, 1927—1958.
10. **Техническая** энциклопедия. Справочник. Т. 7. М., «Советская энциклопедия», 1931.

ГЛАВА 16

ВЯЗКОСТЬ

Сила сопротивления сдвигу τ, возникающая при относительном движении двух слоев жидкости или газа, пропорциональна градиенту скорости v в направлении нормали к потоку жидкости или газа:

$$\tau = \eta dv/dn.$$

Коэффициент пропорциональности η называют *динамической вязкостью*. В системе СГС динамическая вязкость измеряется в *г/(см·сек)*, в системе СИ — в *кг/(м·сек)*.

Величина φ, обратная динамической вязкости, называется *текучестью*. Единица текучести в системе СИ — *м²/(н·сек)*.

Кинематической вязкостью называется отношение динамической вязкости η к плотности жидкости ρ:

$$\nu = \eta/\rho.$$

В системе СГС кинематическая вязкость измеряется в *см²/сек*, в системе СИ — в *м²/сек*.

Для газов зависимость η от абсолютной температуры T определяется формулой

$$\eta_T = \eta_{T_0} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \frac{1 + C/T_0}{1 + C/T},$$

где C — постоянная Сезерленда.

16.1. ВЯЗКОСТЬ ГАЗОВ И ПАРОВ ПРИ ДАВЛЕНИИ ВЫШЕ АТМОСФЕРНОГО

Таблица 16.1

Вязкость водорода η, 10^{-5} *кг/(м·сек)* [1]

P, *атм*	Температура, °C						
	16	25	50	100	150	200	250
1	860	886	935	1030	1125	1210	1295
50	875	895	943	1040	1130	1215	1300
100	885	906	952	1050	1140	1220	1305
200	910	931	977	1070	1155	1235	1315
300	943	960	1005	1090	1175	1250	1330
400	975	994	1035	1115	1195	1265	1340
500	1010	1030	—	1140	1215	1285	1355
600	1050	—	—	1165	1235	1300	1370
800	1120	—	—	1220	1280	1335	1400

Таблица 16.2

Вязкость азота η, 10^{-5} *кг/(м·сек)* [1]

P, *атм*	Температура, °C							
	0	25	50	75	100	150	200	300
1	1665	1775	1880	1985	2090	2280	2460	2620
20	1665	1805	1905	2010	2115	2300	2480	2635
50	1760	1850	1955	2050	2155	2340	2510	2680
100	1905	1985	2080	2175	2270	2440	2605	2730
150	2090	2175	2180	2245	2335	2475	2630	2760
200	2300	2305	2325	2370	2430	2565	2700	2845
300	2750	2680	2645	2655	2675	2760	2860	2980
400	3200	3075	2995	2965	2940	2970	3025	3120
500	3675	3400	3335	3260	3220	3150	3210	3275
600	4125	3850	3670	3565	3490	3405	3390	3430
700	—	4295	3995	3865	3765	3630	3580	3590
800	—	4520	4325	4160	4030	3850	3770	3750

Таблица 16.3

Вязкость кислорода η, 10^{-5} *кг/(м·сек)* [1]

P, *атм*	Температура, °C			P, *атм*	Температура, °C	
	25	50	100		15,5	34,5
1	1993	2182	2437	1	1957,5	2207
22	2013	2211	2460	20	2024,0	—
42	2055	2249	2490	50	2060,5	2288
62	2114	2296	2525	100	2250,0	2434
82	2185	2345	2564	150	2451,5	2610
102	2289	2401	2606	200	2688,5	—
122	2351	2463	2655	300	3220	—
				400	3768	—
				500	4336	—
				600	4862,0	—
				700	5362,0	—

Таблица 16.4

Вязкость гелия η, 10^{-5} *кг/(м·сек)* [1]

P, *атм*	Температура, °C			
	−50,1	−29,5	0,0	99,0
69,05	1701	1724	1816	1980
137,1	1622	1734	1853	1983
205,15	1664	1758	1876	2007
273,2	1668	1781	1884	2015
409,25	1734	1830	1931	2042
545,4	1794	1890	1993	2103
681,5	1879	1971	2068	2164

Таблица 16.5

Вязкость аргона η, 10^{-5} *кг/(м·сек)* [1]

P, *атм*	Температура, °C					
	0	16	25	50	100	200
1	2005	2190	2250	2400	2655	3225
25	2180	2265	2320	2465	2745	3265
50	2260	2370	2425	2555	2815	3330
100	2585	2640	2680	2780	2995	3440
150	2940	2920	2935	3010	3195	3570
200	3265	3225	3225	3265	3390	3710
300	4030	3885	3830	3780	3900	4000
400	4865	4625	4510	4336	4220	4290
475	—	—	—	—	—	4520

Таблица 16.6

Вязкость воздуха η, 10^{-6} *кг/(м·сек)* [1]

P, *атм*	Температура, °C						
	0	14	18	25	50	90	100
1	1730	1786	1795	1837	1955	2135	2180
20	—	1816	1825	—	1980	2170	—
50	1815	1877	1885	1922	2032	2200	2240
100	1970	2018	2025	2060	2150	2298	2335
150	2165	2190	2195	2215	2280	2390	2420
200	2370	2382	2385	2395	2435	2510	2530
250	2505	2589	2590	2590	2600	2640	2650
300	2560	2920	2615	2800	2760	2800	2810

Таблица 16.7

Вязкость окиси углерода η, 10^{-6} *кг/(м·сек)* [1]

P, *атм*	Температура, °C						
	0	25	50	100	150	200	250
1	1660	1765	1870	2075	2270	2450	2625
20	1660	1795	1900	2105	2290	2470	2645
50	1750	1850	1945	2145	2320	2500	2670
100	1835	1930	2050	2225	2385	2560	2715
150	2020	2140	2175	2330	2465	2630	2770
200	2300	2305	2315	2430	2550	2710	2800
300	2740	2580	2640	2680	2765	2870	2970
400	3175	3055	2985	2960	2970	3035	—
500	3600	3450	3330	3225	3185	3200	—
600	—	3825	3660	3490	3405	3400	—
800	—	4570	4300	4010	3920	3780	—

Таблица 16.8

Вязкость углекислого газа η, 10^{-6} *кг/(м·сек)* [1]

P, *атм*	Температура, °C								
	10	20	40	60	80	100	125	200	250
1	1463	1510	1560	1 650	1790	1825	2045	2254	2406
20	1560	1590	1630		1820	1850	2075	2280	2485
50	1850	1830	1845	—	1970	1950	2140	2340	2540
70	2390	2300	2120	-	2030	2040	2150	2385	2590
80	2680	5310	2470	—	2110	2100	2220	2420	2640
90	8000	6090	3350	-	2200	2160	2250	2450	2640
100	8280	6500	4675	—	2300	2240	2280	2480	2660
120	8820	7300	6030	-	2590	2440	2390	2540	2730
160	9520	8050	7050	4650	3120	2850	2760	2660	2810
200	10400	9090	8000	6020	4190	3300	2960	2900	2980
250	11170	9950	8850	6960	5130	4700	3480	3300	3150
300	11820	10610	9590	7810	5970	5470	3950	3540	3260
400	12960	11780	10800	9130	7300	6780	4980	4260	3890
500	14000	12800	11850	10230	8400	7860	5920	4900	4440
600	15000	13850	12830	11200	9370	8800	6760	5640	5020
700	—	14840	13720	12110	10200	9620	7530	6280	5570
800	—	15600	14600	12950	11000	10400	8250	6900	6100

16.2. ВЯЗКОСТЬ ГАЗОВ ПРИ ДАВЛЕНИИ НИЖЕ АТМОСФЕРНОГО

Таблица 16.9

Вязкость η газов при давлении ниже атмосферного, 10^{-8} кг/(м·сек)

Водород				Гелий				Азот				Воздух		Углекислый газ	
33,05°K		90,17°K		90,27°K		14,62°K		90,05°K		90,02°K		15°C		15°C	
P, мм рт. ст.	η	P, мм рт. ст.	η	P, мм рт. ст.	η	P, мм рт. ст.	η	P, мм рт. ст.	η	P, мм рт. ст.	η	P, мм рт. ст.	η	P, мм рт. ст.	η
760	394,1	700	110,7	760	910	760	203,7	300	1344	300	359,3	750	1810	750	1400
7,31	391,0	7,19	111,8	15,4	907	3,32	293,7	9,51	1340,6	3,71	359,3	380	1828	380	1400
1,542	392,3	0,909	110,3	1,876	864,8	0,472	266,4	2,183	1303,4	0,898	344,1	20,5	1817	20	1480
0,569	350,4	0,120	101,6	0,886	816,2	0,1258	260,4	1,149	1267,7	0,217	333,9	0,978	1770	2	1470
0,260	319,2	0,0562	92,5	0,416	729,6	0,0529	221,0	0,600	1209,5	0,097	316,5	0,966	1730	0,6	1380
0,116	259,9	0,0237	74,3	0,228	620,9	0,0186	142,9	0,312	1105,4	0,0246	244,1	0,908	1643	—	—
0,0568	165,8	0,0113	52,3	0,049	275,9	0,00704	61,43	0,0772	696,5	0,0111	165,6	—	—	—	—
0,0112	56,2	0,00414	22,81	0,0103	66,9	—	—	0,0222	313,0	0,005	92,5	—	—	—	—
0,00514	23,75	0,00214	11,78	0,0057	36,67	—	—	0,0102	77,5	0,0218	39,8	—	—	—	—

16. 3. ВЯЗКОСТЬ ГАЗОВ И ПАРОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ [1]

Таблица 16.10

Вязкость η газов и паров в интервале температур от −220 до 1000°C, 10^{-8} кг/(м·сек)

Температура, °C	Азот N_2	Окись азота NO	Закись азота N_2O	Аммиак NH_3	Аргон Ar	Водород H_2	Водяной пар H_2O	Воздух	Гелий He	Кислород O_2	Криптон Kr	Ксенон Xe	Метан CH_4	Неон Ne	Сернистый газ SO_2	Углекислый газ CO_2	Окись углерода CO	Этан C_2H_6	Этилен C_2H_4
−220	—	—	—	—	470	—	—	—	640	—	—	—	—	858	—	—	—	—	—
−210	—	—	—	—	550	—	—	—	715	—	—	—	—	1006	—	—	—	—	—
−200	—	—	—	—	630	332	—	520	790	—	—	—	—	1149	—	—	—	—	—
−190	—	—	—	—	710	367	—	—	862	635	—	—	336	1280	—	—	—	—	—
−180	660	—	—	—	790	399	—	662	930	710	—	—	370	1400	—	—	—	—	—
−170	716	—	—	—	870	430	—	730	995	785	—	—	414	1510	—	—	—	—	—
−160	763	—	—	—	950	460	—	800	1060	860	—	—	453	1615	—	—	—	—	—
−150	849	860	—	—	1025	488	—	860	1117	935	—	—	490	1720	—	—	—	—	—
−140	907	930	—	—	1106	516	—	922	1176	1010	—	—	528	1819	—	—	—	—	—
−130	957	1000	—	—	1180	549	—	990	1235	1085	—	—	566	1315	—	—	—	—	—
−120	1009	1064	—	—	1255	568	—	1050	1290	1150	—	—	603	2005	—	—	1090	—	—
−110	1082	1130	—	—	1325	590	—	1100	1345	1219	—	—	640	2096	—	—	1090	—	—
−100	1143	1196	—	—	1400	618	—	1170	1400	1286	—	—	677	2182	—	886	1130	552	—
−75	1285	1357	990	870	1585	677	—	1312	1526	1452	—	—	769	2368	805	1007	1275	915	623
−50	1419	1510	1115	760	1760	733	—	1445	1640	1617	—	—	860	2600	955	1126	1400	1022	703
−25	1542	1666	1240	860	1950	785	—	1582	1750	1753	—	—	946	2788	1053	1247	1528	1126	780
0	1665	1800	1360	930	2085	840	883	1706	1860	1910	2330	2110	1028	2975	1158	1367	1662	1223	855
20	1766	1869	1460	1000	2215	880	—	1812	1946	2025	2480	2255	1092	3113	1250	1463	1749	1290	915
25	1778	1920	1482	1025	2248	894	975	1840	1969	2052	2513	2290	1109	3142	1270	1486	1766	1319	929
50	1863	2045	1595	1110	2400	953	1063	1954	2065	2182	2695	2470	1185	3310	1350	1607	1872	1410	1020

Температура, °C	Азот N_2	Окись азота NO	Закись азота N_2O	Аммиак NH_3	Аргон Ar	Водород H_2	Водяной пар H_2O	Воздух	Гелий He	Кислород O_2	Криптон Kr	Ксенон Xe	Метан CH_4	Неон Ne	Сернистый газ SO_2	Углекислый газ CO_2	Окись углерода CO	Этан C_2H_6	Этилен C_2H_4
75	1985	2190	1712	1205	2550	985	1137	2068	2175	2310	2680	2645	1260	3492	1.300	1716	1980	1500	1070
100	2086	2272	1822	1296	2695	1083	1250	2180	2281	2437	3060	2820	1332	3646	1611	1827	2076	1690	1150
150	2278	2476	2040	1463	2965	1123	1435	2391	2475	2674	3400	3165	1472	3900	1830	2045	2271	1750	1260
200	2464	2682	2246	1648	3223	1213	1615	2558	2672	2867	3726	3484	1604	4248	2010	2254	2462	1910	1410
250	2639	2870	2450	1820	3462	1299	1870	2760	2875	3103	4040	3790	1725	4527	2255	2450	2622	2055	1526
300	2800	3055	2649	1990	3680	1382	1985	2942	3065	3310	4326	4080	1850	4785	2455	2646	2768	2200	1640
400	3112	3400	3030	2337	4110	1538	2350	3275	3415	3686	4850	4520	2080	5300	2820	2994	3090	2480	1900
500	3408	3700	3375	2650	4505	1686	2720	3567	3750	4030	5350	5120	2268	5796	3156	3309	3370	2700	2140
600	3665	4010	—	2925	4870	1826	3090	3842	4070	4350	5810	5600	2465	6235	3465	3605	3630	2940	2340
700	3916	4275	—	3210	5215	1965	3460	4110	4370	4662	—	—	2650	6689	3760	3876	3870	—	—
800	4160	4535	—	3460	5550	2103	3820	4365	4660	4940	—	—	2820	7100	4040	4140	4100	—	—
1000	4600	5075	—	3990	6100	2355	4560	4850	5240	5470	—	—	3135	7835	4540	4658	4530	—	—

Таблица 16.11

Вязкость η газов и паров в интервале температур от 0 до 700°C, 10^{-6} *кг/(м·сек)* [1]

Температура, °C	Ацетон C_3H_6O	Ацетилен C_2H_2	Бензол C_6H_6	Бром Br_2	Бромная ртуть $HgBr_2$	н-Бутан C_4H_{10}	Бутен C_4H_8	н-Бутилен (1-бутен) C_4H_8	и-Бутилен (2-бутен) C_4H_8	Бромоводород бромистый HBr	Бромоводород хлористый HCl	Водород бромистый (бромоводородная кислота)	Водород фтористый (фтороводородная кислота) HF	н-Гексан C_6H_{14}	н-Гептан C_7H_{16}	Диметиловый эфир $(CH_3)_2O$	Диэтиловый эфир $(C_2H_5)_2O$	Дифенилметан $C_{13}H_{12}$	Дифенилоксид эфир $(C_6H_5)_2O$
0	686	935	693	1390	—	682	690	708	684	1710	1700	1320	1072	600	—	870	680	—	—
20	735	1017	746	1495	—	735	744	761	746	1843	1830	1425	1150	644	—	925	730	—	—
25	750	1043	758	1520	—	749	739	776	760	1877	1862	1450	1171	654	—	942	742	—	—
50	815	1140	822	1645	—	814	—	841	825	2040	2020	1580	1264	710	618	1020	808	605	610
75	880	1188	886	1770	—	881	—	906	890	2200	2172	1705	1368	766	667	1095	870	653	657
100	945	1265	960	1890	—	947	—	971	952	2365	2323	1830	1451	820	716	1168	980	700	703
150	1076	1417	1077	2135	—	1070	—	1098	1076	2690	2625	2070	1635	930	810	1315	1050	790	797
200	1210	—	1203	2380	2253	1183	—	1228	1192	3010	2923	2302	1818	1040	900	1465	1172	888	888
250	1340	—	1326	2625	2487	1300	—	1355	1301	—	3216	2530	—	1150	985	1610	1290	976	978
300	1466	—	1453	2865	2725	1420	—	1483	1410	—	3510	2755	—	1260	1072	1750	1405	1063	1064
400	1720	—	1690	3340	3190	—	—	—	—	—	—	—	—	1475	—	2040	1640	1228	1238
500	1975	—	1926	3815	3654	—	—	—	—	—	—	—	—	1685	—	—	—	1390	—
600	—	—	2170	4290	4120	—	—	—	—	—	—	—	—	1900	—	—	—	1550	—

Продолжение табл. 16.11

Температура, °C	Изопрен (2-метил-1,3-бутадиен) C_5H_8	Изобутилен C_4H_8	Изобутиловый эфир $C_8H_{18}O$	Изобутиловый бромид C_4H_9Br	Изобутан C_4H_{10}	Изопропиловый спирт C_3H_7OH	Иод I_2	Иодистый этил C_2H_5I	Изопропилен C_3H_6	Изопропилхлорид C_3H_7Cl	3-Метилбутен-1 (изопрен) C_5H_8	Изопропилбромид C_3H_7Br	Иодистый метил CH_3I	Изопропилиодид C_3H_7I	Изопропиловый спирт C_3H_7OH	Изопропилацетат $C_5H_{10}O_2$	Изопропилтиол C_3H_7SH
0	663	680	—	—	638	720	—	—	—	906	905	1232	—	916	—	870	680	1468
20	716	744	776	840	696	774	—	—	—	867	716	1327	—	960	824	935	742	1570
25	729	756	800	856	696	786	—	—	—	879	729	1300	—	1005	843	950	750	1602
50	803	821	906	951	752	853	—	—	870	961	752	1471	660	1006	934	1040	654	1734
75	857	896	1014	1047	805	915	—	—	944	1020	854	1590	704	1181	1028	1130	868	1867
100	915	947	1120	1142	860	980	1730	—	1016	1090	915	1707	745	1260	1120	1225	964	1996
150	1050	1074	1332	1330	969	1112	1959	—	1160	1230	1040	1945	831	1440	1304	1363	1085	2253
200	—	1202	—	—	1079	1242	2175	2015	1298	—		2190	907	1609	—	1503	1218	—
250	—	1326	—	—	1185	1370	2400	2262	1435	—	—	2430	988	1766	—	1726	1349	—
300	—	1450	—	—	1294	1505	2630	2476	1567	—	—	2670	1007	1936	—	1895	1479	—
400	—	—	—	—		1760	3065	2906	1830	—	—	3146	—	2220	—	2220	—	—
500	—	—	—	—	—	2020	3505	3335	2090	—		—	—	—	—	2550	—	—
600	—	—	—	—	—	—	3937	3752	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 16.11

Температура, °C	Метилацетат $C_3H_6O_2$	Метилхлорацетат $CH_2ClCOOCH_3$	n-Нонан C_9H_{20}	Окись этилена C_2H_4O	Окись углерода CO	n-Гептан C_7H_{16}	n-Гептен-1	Пропионовая кислота $C_3H_6O_2$	Пропан C_3H_8	Пропилацетат $C_5H_{10}O_2$	Пропилен C_3H_6	n-Пропиловый спирт C_3H_7OH	Ртуть Hg	Сероводород H_2S	Сероуглерод CS_2	Сильвин KCl	Ртуть C_6H_6
0	1084	989	—	—	1132	693	629	—	760	740	784	715	—	1179	920	1076	—
20	1170	1062	—	—	1290	666	676		800	797	840	770	—	1285	990	1148	685	
25	1193	1090	—	—	1240	660	685	—	811	813	855	780	—	1250	1038	1107	698	
50	1297	1173	504	586	1346	737	744	630	875	880	930	860	—	1366	1084	1258	763	
75	1402	1264	592	630	1456	796	801	692	942	952	1002	910	—	1505	1184	1344	826	
100	1509	1355	683	674	1557	850	856	963	1006	1022	1073	970	—	1608	1262	1435	891	
150	1718	1537	702	757	1755	967	972	1064	1130	1167	1211	1111	—	—	1432	1610	1008	
200	1910	1725	778	843	—	1079	—	1234	1248		1340	1245	4500	—	1600		1120	
250	2115	1905	850	927		1191		1334	1362	—	1470	1380	5060	—	1766	—	1230	
300	2315	2070	940	1007	—	1295	—	1402	1475		1592	1500	5530	—	1930		1335	
400	2505	2420		—		1510		1720	1715	—	—	1755	6570	—	—	—	1515	
500	—	—	—	—	—	1725	—	—	1940			2010	7620	—		—	1746	
600		—		—		1920	—	—	2180	—	—		8770	—	—	—	1950	
700	—	—	—	—	—		—	—	—			—		—	—	—	—	

Температура, °С	Тиолы C_2H_5SH	Тиофен C_4H_4S	2,2-Диметилпропан C_5H_{12}	Циклопентан C_5H_{10}	Четыреххлористый кремний $SiCl_4$	Пентахлорид ниобия $NbCl_5$	Четыреххлористый углерод CCl_4	Диоксид серы SO_2	Диметилсульфоксид $(CH_3)_2SO$	Циклогексан C_6H_{12}	Циклогексанол $C_6H_{11}OH$	Цинк Zn	Хлорное олово $C_4H_9SnCl_3$	Хлор Cl_2	Хлороформ $CHCl_3$	Этилацетат $C_4H_8O_2$	Этилметилкетон C_4H_8O	Этилацетат $C_4H_8O_2$	Этилхлорид C_2H_5Cl
0	910	765	—	489	—	—	906	933	672	653	836	—	—	1245	835	960	775	—	911
20	958	814	—	696	—	—	960	1002	737	701	870	—	—	1335	1000	743	835	890	978
25	972	828	—	598	—	—	962	1020	754	712	882	—	—	1360	1017	756	850	905	994
50	1031	901	601	772	—	—	1061	1108	834	770	930	—	825	1465	1100	820	930	990	1080
75	1098	973	741	820	—	—	1141	1194	914	817	1038	—	912	1570	1192	884	1010	1074	1164
100	1162	1046	768	898	1422	1330	1216	1279	994	878	1113	—	1000	1675	1295	949	1083	1158	1247
150	1285	1190	867	1102	1496	1485	1367	1452	1150	986	1265	—	1170	1882	1430	1078	1230	1325	1410
200	1410	1333	941	—	1770	1640	1517	—	1305	1090	1414	—	1340	2090	1590	1206	1375	—	1574
250	1535	1472	1027	—	1945	1795	1670	—	1400	1191	—	—	1510	2295	1750	1206	1512	—	1736
300	1658	1612	1110	—	2112	1950	1815	—	1613	1291	—	—	1670	2505	1906	1333	1650	—	1900
400	—	—	—	—	2458	2260	2100	—	1950	1482	—	—	1980	2920	2205	1462	1920	—	2225
500	—	—	—	—	2818	2570	—	—	—	1670	—	6250	—	3326	—	1710	2200	—	—
600	—	—	—	—	3160	2880	—	—	—	1863	—	6800	—	7730	—	1900	—	—	—
700	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6750	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 16.12

Вязкость сжиженных газов, 10^{-6} кг/(м·сек) [1]

Азот		Аммиак		Аргон		Водород		Окись		Гелий		Воздух		Иодистый водород		Бромистый водород	
T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η
63,9	292	186,16	147,9	84,2	280	14,85	21,62	1,282	0,154	2,176	2,30	90,1	132	223,3	1418	186,8	874
64,4	290	193,16	141,1	85,25	262	15,89	19,32	1,304	0,124	2,29	1,87	107,2	91,5	225,6	1394	188,8	865
64,8	284	196,16	134,5	86,0	256	16,35	18,49	1,335	0,179	2,315	1,97	111,0	90	227,2	1378	190,8	854
69,1	231	223,16	317	87,3	252	17,77	15,93	1,596	0,233	2,642	2,35	125,1	82,5	229,6	1368	193,7	841
69,25	228	233,16	276			18,78	14,48	1,762	0,356	2,934	2,40	126,4	80,5	231,5	1345	197,3	822
71,4	205	237,16	255			20,43	19,00	1,906	0,675	3,738	2,75			233,9	1321	198,4	816
76,1	165	293,16	162,4					1,988	0,960	3,81	2,87			236,4	1298		
77,33	158	298,16	155,5					2,060	1,15	3,97	2,88						
		298,16	148					2,111	1,26	4,021	2,98						
								2,116	1,36								
								2,145	1,55								
								2,159	1,77								
								2,171	2,02								
								2,174	1,95								

Продолжение табл. 16.12

Кислород		Метан		Окись углерода		Пропан		Пропилен		Сероводород		Хлористый водород		Этан		Этилен	
T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η
54,4	873	111,2	98	73,2	224	83,5	1353	88,7	1446	191,0	525	160,8	566	172,8	175	183,8	135
54,5	863	125,9	90	75,2	209	86,1	1154	89,8	1273	198,3	506	166,7	546	186,0	137	204,6	115
54,6	821	134,2	82	77,8	186	86,6	988	90,1	1240	198,2	489	171,7	506	201,0	114	226,4	92
54,9	772	154,6	67	82,8	165	88,1	866	94,3	784	201,2	468	177,0	493	215,4	97	252,2	72
56,4	717	167,1	63,5	90,1	146	89,8	738	96,0	537	206,1	461	183,2	473	230,0	90	273,1	64
57,1	639	168,4	62,5	99,6	116	93,1	609	102,6	368	209,8	435	188,2	457	231,6	99		
57,4	638			111,6	103	96,8	459	106,9	273					243,4	82		
59,7	631			120,6	66	101,6	368	111,1	215					247,6	76		
61,7	621					106,7	257	119,0	155					270,0	67		
63,5	476					107,8	249							273,1	63		
68,9	377													288,9	55		
72,3	323																
77,4	273																
80,0	250																
90,1	190																

16.4. ВЯЗКОСТЬ ВОДЯНОГО ПАРА

Таблица 16.13

Вязкость η водяного пара в зависимости от температуры и давления, 10^{-7} кг/(м·сек) [1]

Температура T, °C	Давление, ата								
	Насыщения	1	20	40	60	80	100	150	200
100	124	124	—	—	—	—	—	—	—
120	133	132	—	—	—	—	—	—	—
140	142	140	—	—	—	—	—	—	—
160	152	148	—	—	—	—	—	—	—
180	163	155	—	—	—	—	—	—	—
200	175	163	—	—	—	—	—	—	—
220	188	171	184	—	—	—	—	—	—
240	201	179	190	—	—	—	—	—	—
260	217	186	196	211	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 16.13

Температура T, °C	Давление, ата								
	Насыщения	1	20	40	60	80	100	150	200
280	235	194	203	217	230	—	—	—	—
300	257	202	210	223	236	250	—	—	—
320	282	209	217	230	242	255	268	—	—
340	318	217	225	236	249	261	272	318	—
360	365	225	232	243	254	266	278	308	—
380	—	232	240	250	261	272	283	311	361
400	—	240	247	257	268	279	290	316	354
420	—	247	254	264	275	284	295	322	354
440	—	254	262	271	282	291	302	329	358
460	—	262	269	279	288	298	308	335	363
480	—	269	277	285	294	304	315	342	370
500	—	277	284	292	301	311	322	349	380

16.5. КОНСТАНТЫ СЕЗЕРЛЕНДА

Таблица 16.14

Значения константы Сезерленда C [1—2]

Газ	C	Интервал температур, °C	Газ	C	Интервал температур, °C	Газ	C	Интервал температур, °C
Азот	109,9	25—280	н-Гексан	436,1	121—307	Пропадиен	320	98—265
	104,7	20—825	Декалин	330	20—100	Пропан	278	20—250
Азота закись	260	25—280	Диэтиламин	404	122—300		290	25—280
Азота окись	128	20—276	Диэтилцинк	357	100—350	Пропилен	321,6	20—120
Аммиак	503	20—300	Дифенилметан	400	176—362	н-Пропиловый спирт	515,6	122—273
Аргон	142	20—827	Изопентан	368	20—120	Ртуть	942	220—610
Ацетилен	198,2	20—120	Изобутан	368	20—120	Сернистый газ	306	300—825
Ацетон	541,5	119—306	Изобутилен	339	20—120	Сероводород	331	0—100
Бензол	447,5	130—313	Изопропиловый спирт	459,9	119—308	Сероуглерод	469,6	114—310
Бром	533	190—600	Иод	568	105—523	Тиофен	407	20—245
Бромистый водород	375	0—100	Иодистый водород	390	0—100	Толуол	370	60—250
Бромная ртуть	657	219—582	Иодная ртуть	717	282—512	Фосфористый водород	290	0—100
н-Бутан	377,4	20—120	Калий	1053	506—667			
α-Бутилен	328,9	20—120	Кислород	126,6	20—280	Углерода двуокись	254	25—280
β-Бутилен	362,1	20—120		125	15—630		213	300—824
Воздух	106,8	20—280	Криптон	188	0—100	Углерода окись	101,2	22—277
	111	16—825	Ксенон	252	0—100	Углерод четыреххлористый	335	50—250
Водород	73	20—250	Меллитолит	136,3	100—200		360,4	129—315
	86	100—300	Метан	162	20—600	Хлор	351	20—250
	105	200—250	Метилацетат	501,8	143—307	Хлористый водород	350	0—250
	234	713—822	Метилбромид	379	20—120	Хлороформ	373	121—308
Водяной пар	673	100—350	Метиловый спирт	465,9	111—312	Цезий	530	0—100
Гелий	83	100—200	Метилтиофен	400	50—250	Цианистый водород	901	20—330
	95	200—250	Метиленхлорид	426	22—309	Цинк	676	600—680
	173	662—816	Метилхлорид	441	20—308	Цинк четыреххлористый	432	107—522
н-Гептан	446	100—252	Метилэфир	345	20—120	Цинк четырехбромистый	525	106—678
			Мышьяковистый водород	300—	0—100	Циклопропан	372	20—120
			Неон	61	20—100	Циклогексан	300,9	122—306
				70	100—200	Этан	252	20—250
				82	200—250	Этилацетат	504	128—314
				128	686—827	Этилен	225	20—250
			н-Октан	276	100—250			
			н-Окстан	337	100—250			
			н-Пентан	362,8	122—306			

16.6. ВЯЗКОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ И НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Таблица 16.15

Вязкость η простых веществ. 10^{-6} кг/(м·сек) [2]

t, °C	η	t, °C	η
Ag		Br_2	
1167	3,08	0	1,253
1200	2,98	5	1,178
Al		10	1,107
302	1,662	15	1,045
451	1,371	20	0,992
600	1,000	25	0,941
601	0,996	30	0,855

Продолжение табл. 16.15

t, °C	η	t, °C	η
Br_2		Cu	
40	0,817	1085	3,36
45	0,760	1100	3,33
50	0,746	1150	3,22
55	0,715	1200	3,12
60	0,686	97,5% Fe; 2,6% C	
Cd			
349	1,44	1350	2,65
406	1,34	1400	2,25
466	1,27	97% Fe; 3% C	
505	1,18	1300	2,600
550	1,15	1350	2,375
603	1,10	1400	2,025

t, °C	η
96,5% Fe; 3,5% C	
1250	2,90
1300	2,40
1350	2,00
1400	1,75
96% Fe; 4% C	
1250	2,10
1300	1,75
1350	1,55
1400	1,45
Hg	
−20	1,866
−10	1,761
0	1,663
10	1,615
20	1,554
30	1,499
40	1,450
50	1,407
60	1,367
70	1,331
80	1,298
90	1,268
100	1,240
110	1,214
120	1,191
130	1,169
140	1,149
150	1,130
200	1,052
250	0,995
300	0,950
340	0,921
K	
100	0,466
150	0,392
200	0,324
Na	
100	0,814
132	0,742
183	0,635
P	
43,2	1,73
45,05	1,70
48,1	1,64
50,5	1,60
53,65	1,55
60,2	1,45
69,7	1,32
79,9	1,21
Pb	
300	2,649
400	1,315
450	2,057
500	1,850
550	1,681
600	1,540

t, °C	η
Pb	
650	1,438
700	1,356
750	1,29
800	1,23
850	1,18
S*	
123	10,94
136,5	8,66
149,5	7,09
156,3	7,19
158,2	7,09
159,2	9,48
159,5	14,46
160,0	22,83
160,3	77,32
166	$0,5 \cdot 10^3$
171	$4,5 \cdot 10^3$
184	$16 \cdot 10^3$
190,5	$19,7 \cdot 10^3$
197,5	$21,3 \cdot 10^3$
200	$21,5 \cdot 10^3$
210	$20,6 \cdot 10^3$
217	$19,1 \cdot 10^3$
220	$18,6 \cdot 10^3$
Sb	
650	1,50
700	1,26
750	1,16
800	1,08
850	1,05
Sn	
240	1,91
260	1,82
280	1,74
300	1,67
350	1,51
400	1,38
450	1,27
500	1,18
550	1,11
600	1,05
650	0,99
700	0,94
750	0,91
800	0,87
Zn	
450	3,168
500	2,779
550	2,476
600	2,233
650	2,033
700	1,865

* Значения η до 160,5°С относятся для серы, по ее объемной доле, остальные — для объемной.

Таблица 16.16

Вязкость η неорганических соединений, 10^{-3} кг/(м·сек) [2]

t, °C	η	t, °C	η
AgBr		460	1,596
609	1,803	480	1,476
649	1,661	500	1,380
688	1,487	520	1,301
770	1,217	540	1,239
808	1,192	550	1,211
AgCl			
603	1,608	KOH	
632	1,466	400	2,3
669	1,372	450	1,7
734	1,186	500	1,3
AgI		550	1,0
605	3,026	600	0,8
630	2,748	$LiNO_3$	
698	2,375	260	6,477
730	2,123	270	6,260
827	1,556	291	6,476
$BiCl_3$		300	6,068
260	28,0	310	4,696
270	29,5	322	4,318
280	27,0	$LiNO_3$	
290	25,0	330	4,240
300	30,0	354	3,630
320	20,5	380	9,490
340	18,0	420	2,054
$CaCl_2$		$MgCl_2$	
800	4,040	808	4,120
$HgBr_2$		N_2H_4	
240	331	5	1,21
247	2,97	10	1,12
255	1,07	15	1,04
KBr		20	0,97
745	1,48	25	0,91
775	1,34	N_2O_4	
805	1,19	0,72	0,5220
KCl		5,09	0,4954
790	1,42	9,15	0,4720
835	1,21	16,36	0,4401
920	0,99	Na_3AlF_6	
1035	0,71	1000	2,800
$K_2Cr_2O_7$		NaBr	
400	13,16	762	1,42
410	12,41	766	1,35
420	11,71	780	1,28
430	11,05	NaCl	
440	10,42	825	1,452
450	9,80	850	1,275
460	9,20	875	1,138
470	8,62	900	1,017
480	8,06	925	0,912
490	7,52	950	0,820
500	6,99	975	0,752
510	6,49	1000	0,704
KNO_3		315	2,916
350	2,728	320	2,826
360	2,572	340	2,527
380	2,312	360	2,283
400	2,094	380	2,077
420	1,905	400	1,895
440	1,738	420	1,741

Продолжение табл. 16.16

t, °C	η	t, °C	η
$NaNO_3$		452	5,38
440	1,616	472	4,70
460	1,518	492	4,07
NaOH		$PbCl_2$	
360	4,0	498	5,53
400	2,8	518	4,66
450	2,6	538	4,02
500	1,8	558	3,59
550	1,5	578	3,28
$NaPO_3$		598	3,06
650	1250	608	2,95
700	700	$SnCl_2$	
750	440	30	0,806
800	300	40	0,725
850	210	50	0,658
$PbBr_2$		UF_4	
372	10,2	70	0,91
392	8,06	80	0,86
412	6,07	90	0,76
432	5,13		

16.7. КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ВЯЗКОСТЬ ВОДЫ

Таблица 16.17

Кинематическая вязкость ν воды, 10^{-6} м²/сек, при $P = 1$ атм [4]

t, °C	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60
ν	1,7921	1,5138	1,3097	1,1309	1,2018	0,8974	0,7982	0,6547	0,5577	0,4658

16. 8. ВЯЗКОСТЬ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Таблица 16.18

Вязкость η метанола (метилового спирта CH_4O), 10^{-4} кг/(м·сек) [5]

t, °C	−100	−90	−80	−70	−60	−50	−40	−30	−20	−10	0	20	30	40	50	60	70
η	16	8,8	5,7	4,02	2,98	2,26	1,75	1,39	1,16	0,970	0,817	0,578	0,509	0,446	0,393	0,347	0,306
t, °C	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240
η	0,271	0,240	0,214	0,190	0,170	0,152	0,136	0,121	0,109	0,098	0,0885	0,0794	0,0716	0,0646	0,0582	0,0528	0,0480

Таблица 16.19

Вязкость η этанола (этилового спирта C_2H_6O), 10^{-4} кг/(м·сек) [5]

t, °C	−98,1	−90	−80	−70	−60	−50	−40	−30	−20	−10	0	5	10
η	44,0	28,5	18,1	12,5	8,7	6,4	4,79	3,65	2,78	2,23	1,773	1,623	1,486
t, °C	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
η	1,332	1,200	1,086	1,005	0,914	0,834	0,764	0,702	0,644	0,592	0,551	0,504	0,0471

Таблица 16.20

Вязкость η пропанола-1 (*н*-пропилового спирта C_3H_8O), 10^{-3} *кг/(м·сек)* [5]

t, °C	−70	−60	−50	−40	−30	−20	−10	0	10	20	30	40	50	60
η	34,6	31,6	20,2	13,5	9,70	6,90	5,10	3,85	2,89	2,20	1,72	1,38	0,92	0,635

t, °C	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
η	0,535	0,457	0,392	0,337	0,288	0,247	0,211	0,183	0,160	0,143	0,128	0,114	0,102

Таблица 16.21

Вязкость η пропанола (изопропилового спирта C_3H_8O), 10^{-3} *кг/(м·сек)* [2]

t, °C	−60	−50	−40	−30	−20	−10	0	10	15	20	30	40	50	60	70	80
η	66,1	37,6	23,2	14,9	10,1	6,8	4,6	3,26	2,86	2,39	1,77	1,35	1,03	0,80	0,66	0,52

Таблица 16.22

Вязкость η *н*-бутанола (бутилового спирта $C_4H_{10}O$), 10^{-3} *кг/(м·сек)* [5]

t, °C	−60	−40	−30	−20	−10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
η	34,7	22,4	14,6	10,3	7,4	5,19	3,87	2,95	2,28	1,78	1,41	1,14	0,93	0,76	0,63	0,54	0,46

Таблица 16.23

Вязкость η глицерина ($C_3H_8O_3$), 10^{-3} *кг/(м·сек)* [6]

t, °C	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
η	12100	7030	3950	1480	600	330	189	102	59	35	21	13	5,2	1,8	1,0	0,45	0,22

Таблица 16.24

Вязкость η диэтилового эфира ($C_4H_{10}O$), 10^{-9} *кг/(м·сек)* [5]

t, °C	−120	−110	−100	−90	−80	−70	−60	−50	−40	−30
η	4,25	2,64	1,71	1,24	0,97	0,79	0,65	0,55	0,470	0,410

t, °C	−20	−10	0	10	20	30	40	60	80	100
η	0,364	0,328	0,298	0,268	0,243	0,220	0,199	0,166	0,140	0,118

Таблица 16.25

Вязкость η анилина (C_6H_7N), 10^{-3} *кг/(м·сек)* [5]

t, °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
η	10,2	6,5	4,40	3,12	2,30	1,80	1,50	1,28	1,10	0,94	0,80	0,69	0,59

Таблица 16.26

Вязкость η нитробензола ($C_6H_5NO_2$), 10^{-3} *кг/(м·сек)* [5]

t, °C	0	10	20	30	40	50	60	80	100
η	3,09	2,46	2,01	1,69	1,44	1,24	1,09	0,87	0,70

Таблица 16.27

Вязкость η этилацетата ($C_4H_8O_2$), 10^{-3} *кг/(м·сек)* [5]

t, °C	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	230	240	247
η	0,477	0,380	0,306	0,250	0,212	0,177	0,149	0,125	0,104	0,086	0,068	0,039	0,048	0,036

Таблица 16.28

Вязкость η уксусной кислоты ($C_2H_4O_2$), 10^{-3} *кг/(м·сек)* [6]

t, °C	30	40	50	60	80	100	120	130
η	0,79	0,69	0,62	0,55	0,430	0,377	0,320	0,297

16.9. ВЯЗКОСТЬ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Таблица 16.29

Вязкость η тетракремнийоксиэтилана [$(CH_3C_2H_4O)_2 \cdot Si$], 10^{-4} *(кг·сек)/м²* [6]

t, °C	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
η	15680	6090	2650	2290	1030	1030	766	617	505	415	356	300	255	225	200	180	166
t, °C	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
η	154	143	132	212	114	107	97	88	80	74	62	62	59	56	54	51	48	46

Таблица 16.30

Вязкость η силикона (диэтилполисилоксана), 10^{-4} *(кг·сек)/м²* [6]

t, °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
η	2010	1360	901	750	600	475	395	332	285	245	215	196	169	152	137	124
t, °C	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	
η	113	104	96	88	82	76	71	66	62	58	55	52	49	46	44	

Таблица 16.31

16.10. ВЯЗКОСТЬ УГЛЕВОДОРОДОВ

Вязкость η циклических углеводородов, 10^{-3} *кг/(м·сек)* [2, 6]

Формула	Название	Температура, °C											
		—20	—10	0	10	20	30	40	50	60	90	100	110
C_5H_{10}	Циклопентан	0,72	0,631	0,560	0,491	0,439	0,393	0,354	0,323	—	—	—	—
C_6H_{12}	Метилциклопентан	0,86	0,745	0,648	0,569	0,505	0,450	0,404	0,365	0,330	—	—	—
C_6H_{12}	Циклогексан	—	—	—	1,180	0,979	0,826	0,704	0,608	0,531	0,411		—
C_7H_{14}	Этилциклопентан	0,96	0,820	0,725	0,637	0,565	0,506	0,456	0,412	0,376	0,32	0,27	—
C_7H_{14}	Метилциклогексан	1,41	1,175	0,991	0,847	0,734	0,639	0,562	0,500	0,446	0,36	0,30	—
C_8H_{16}	Пропилциклопентан	1,28	1,049	0,886	0,772	0,679	0,603	0,538	0,486	0,444	0,38	0,33	0,30
C_8H_{16}	Этилциклогексан	1,68	1,356	1,142	0,976	0,843	0,737	0,651	0,581	0,523	0,43	0,37	0,34
C_9H_{18}	Гексилциклопентан	—	—	—	—	9,63	7,28	5,56	4,43	3,60	2,46	1,84	1,58
C_9H_{18}	Пропилциклогексан	—	—	—	—	—	8,91	6,89	5,21	4,15	2,74	1,87	1,57

Таблица 16.32

Вязкость η ароматических углеводородов, 10^{-3} кг/(м·сек) [2,5]

Формула	Название	Температура, °С											
		−20	−10	0	10	20	30	40	60	80	100	120	140
C_6H_6	Бензол	—	—	—	0,755	0,640	0,559	0,489	0,389	0,318	0,261*	0,230*	0,169*
C_7H_8	Толуол	0,991	0,863	0,770	0,667	0,584	0,517	0,464	0,381	0,318	0,269		—
C_8H_{10}	Этилбензол	1,170	1,021	0,873	0,757	0,671	0,596	0,530	0,438	0,363	0,368	0,265	
C_8H_{10}	о-Ксилол	1,447	1,252	1,055	0,917	0,804	0,707	0,623	0,500	0,417	0,345	0,294	—
C_8H_{10}	м-Ксилол	—		0,905	0,699	0,616	0,548	0,490	0,403	0,340	0,290	0,250	
C_8H_{10}	п-Ксилол		—	—	—	0,648	0,571	0,514	0,416	0,354	0,293	0,250	—
$C_{12}H_{18}$	Гексилбензол	5,17	3,66	2,66	1,98	1,63	1,362	1,162	0,909	0,712	0,574	0,47	0,36
$C_{16}H_{26}$	Децилбензол	16,0	0,81	6,72	4,94	3,80	3,42	2,46	1,730	1,275	0,977	0,77	0,56
$C_{20}H_{34}$	Тетрадецилбензол	—	—	—	10,63	7,65	5,66	4,43	2,90	2,06	1,507	1,14	0,79

* При давлении насыщенного пара выше нормальной точки кипения.

Таблица 16.33

Вязкость η предельных углеводородов, 10^{-3} кг/(м·сек) [1]

Формула	Название	Температура, °С													
		−40	−30	−20	0	10	20	40	60	80	100	120	200	250	300
C_4H_{10}	Бутан	0,63	0,555	0,252	0,207*	0,191*	0,174*	0,140*	—	—	—	—	—	—	—
C_4H_{10}	Изобутан	—	0,302	0,267	0,214*	0,190*	0,170*	0,146*	—	—	—	—	—	—	—
C_5H_{12}	Пентан	0,448	0,474	0,341	0,283	0,259	0,240	—	—	—	—	—	—	—	—
C_5H_{12}	Изопентан (2-метилбутан)	—	0,56	0,353	0,277	0,246	0,224	—	—	—	—	—	—	—	—
C_5H_{12}	Неопентан (2,2-диметилпропан)	—	—	—	0,327	0,260*	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C_6H_{14}	Гексан	1,62	0,742	0,479	0,381	0,313	0,307	0,253	0,222	—	—	—	—	—	—
C_6H_{14}	Изогексан (2-метилпентан)	—	—	—	0,370	0,331	0,296	0,246	0,206	—	—	—	—	—	—
C_7H_{16}	Гептан	3,85	1,18	0,689	0,526	0,406	0,417	0,339	0,283	0,241	0,209*		—	—	—
C_7H_{16}	Изогептан (2-метилгексан)	—	—	—	0,476	0,424	0,379	0,309	0,257	0,216	—	—		—	—
C_8H_{18}	Октан	—	1,89	0,907	0,714	0,622	0,546	0,435	0,360	0,298	0,270	0,220	—	—	—
C_9H_{20}	Нонан	—	2,99	1,40	0,968	0,827	0,714	0,560	0,445	0,366	0,302	0,264	0,213		—
$C_{10}H_{22}$	Декан	—	—	1,95	1,27	1,07	0,907	0,701	0,552	0,448	0,379	0,314	0,240	—	—
$C_{11}H_{24}$	Ундекан	—	—	2,779	1,742	1,425	1,182	0,871	0,671	0,536	0,437	0,365	0,286		—
$C_{12}H_{26}$	Додекан	—	—	—	2,264	1,897	1,492	1,054	0,803	0,632	0,510	0,334	0,231	—	—
$C_{13}H_{28}$	Тридекан	—	—	—	2,962	2,339	1,878	1,312	0,969	0,751	0,598	0,380	0,272	—	—
$C_{14}H_{30}$	Тетрадекан	—	—	—	—	2,96	2,322	1,560	1,130	0,868	0,685	0,431	0,294	0,207	—
$C_{15}H_{32}$	Пентадекан	—	—	—		3,663	2,841	1,873	1,355	1,010	0,786	0,483	0,326	0,251	—
$C_{16}H_{34}$	Гексадекан	—	—	—	—	—	3,451	2,232	1,569	1,161	0,892	0,532	0,349	0,242	—
$C_{17}H_{36}$	Гептадекан	—	—	—		—	4,203	2,652	1,829	1,340	1,014	0,598	0,392	0,277	0,203
$C_{18}H_{38}$	Октадекан	—	—		—	—	—	3,400	2,060	1,484	0,952	—	—		—
$C_{19}H_{40}$	Нонадекан	—	—	—	—	—	—	3,588	2,379	1,693	1,719	0,168	0,327	0,24	
$C_{20}H_{42}$	Эйкозан	—	—		—	—		4,072	2,665	1,880	1,469	1,094	0,405	0,353	0,25

* При давлении насыщенного пара выше нормальной точки кипения.

16.11. ВЯЗКОСТЬ НУКЛИДОВ И ИХ СОЕДИНЕНИЙ

Таблица 16.34

Вязкость η нуклидов и их соединений, 10^{-7} кг/(м·сек)

$^{10}BF_3$	t, °C	20	0	−20	−40	−60	−80	−100											
	η	165,40	155,35	144,80	134,15	123,15	112,00	101,45											
$^{11}BF_3$	t, °C	20	0	−20	−40	−60	−80	−100											
	η	166,60	156,50	145,85	135,10	124,00	112,70	102,05											
$^{14}NH_3$	t, °C	20	0	−20	−40	−60													
	η	98,50	91,85	84,60	77,60	70,72													
$^{15}NH_3$	t, °C	20	0	−20	−40	−60													
	η	100,75	93,95	86,50	79,35	72,30													
$^{14}N^{14}O$	t, °C	20	0	−20	−40	−60	−80	−100	−120	−140	−160								
	η	189,90	179,25	168,10	156,70	144,80	132,40	119,66	106,40	93,00	78,80								
$^{15}N^{16}O$	t, °C	20	0	−20	−40	−60	−80	−100	−120	−140	−160								
	η	192,85	182,25	170,70	159,10	147,10	134,40	121,50	108,00	94,45	80,00								
^{20}Ne	t, °C	21,6	18,0	−10,3	−50,5	−60,8	−90,2	−102,3	−110,3	−122,2	−130,2	−150,0	−150,6	−156,8	−161,5	−174,3	−179,0	−190,8	
	η	311,7	309,6	268,7	258,0	253,3	225,8	215,6	209,5	206,8	190,3	168,2	164,8	164,5	159,6	145,3	140,1	129,3	
^{22}Ne	t, °C	23,3	19,0	20,0	17,5	−20,3	−33,3	−39,2	−75,2	−100,6	−119,6	−146,7	−150,0	−154,2	−156,0	−160,0	−177,3	−181,5	−195,8
	η	327,8	324,4	326,2	323,5	294,2	283,6	260,1	249,4	227,6	210,3	182,4	178,7	174,8	173,0	168,2	148,4	143,6	125,0
$^{36}N_2$	t, °K	293,5	292,7	292,0	291,2	291,0	291,0	272,5	205,5	199,2	199,0	198,1	160,0	124,5	82,2	79,3	79,2	77,5	
	η	179,9	179,3	179,0	178,3	178,1	178,2	154,7	134,6	131,5	131,5	130,7	103,1	67,3	58,9	57,0	56,8	55,6	
$^{14}N_2$	t, °K	297,4	292,7	289,0	285,0	219,2	211,0	203,7	168,8	116,0	81,6	77,5							
	η	177,3	175,0	173,7	171,8	147,8	135,5	131,4	112,1	80,2	56,7	54,6							
^{3}He	t, °C	22,1	21,6	18,0	17,6	−20,0	−53,5	−59,0	−66,0	−93,4	−121,7	−123,7	−147,0	−159,4	−160,0	−174,6	−179,1	−195,8	
	η	171,6	171,2	170,0	169,8	154,4	140,3	139,6	134,2	123,3	110,6	109,7	98,0	91,6	91,7	83,6	81,2	71,7	
D_2	t, °C	25,0	24,1	20,0	−29,1	−44,1	−75,0	−107,1	−154,3	−183,0	−195,8								
	η	125,2	124,7	123,6	109,8	104,8	95,8	83,3	66,1	54,1	48,3								
H_2	t, °C	25,5	24,3	20,0	−35,0	−73,1	96,5	−116,3	−139,6	−162,1	−183,0	−195,8							
	η	90,9	89,7	88,8	77,0	68,4	62,7	57,4	51,8	45,3	39,1	35,2							

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубев И. Ф. Вязкость газов и газовых смесей. М., Физматгиз, 1959.
2. Справочник химика. М.—Л., «Химия», 1966.
3. Кэй Д., Лэби Т. Справочник физика-экспериментатора. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1949.
4. Кэй Д., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз, 1962.
5. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.
6. Менабде Н. Е. Коэффициенты вязкости изотопов водорода (H_2, D_2), азота (Ne^{20}, Ne^{22}) и гелия (He^3) в температурном интервале от −195 до +25°С. — «Атомная энергия», 1965, т. 19, № 5, с. 453.
7. Менабде Н. Е. Влияние изотопного замещения на вязкость газов. — «Атомная энергия», 1968, т. 25, № 1, с. 42.
8. Менабде Н. Е. Коэффициент вязкости N_2^{14}—N_2^{15} в интервале температур 78—300°С. — «Атомная энергия», 1964, т. 17, № 4, с. 307.

ГЛАВА 17

ДИФФУЗИЯ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

Диффузия — процесс выравнивания концентрации частиц атомов, молекул, ионов, электронов в среде. При наличии градиента концентрации n частиц в веществе возникает поток этих частиц $\mathbf{j}$, выравнивающий их концентрации. Поток связан с коэффициентом диффузии D посредством закона Фика:

$$\mathbf{j} = -D\,\mathrm{grad}\,n. \qquad (17.1)$$

Это соотношение справедливо, когда размеры системы в направлении градиента много больше длины свободного пробега частиц в среде, а изменение концентрации на расстоянии длины свободного пробега много меньше характерного значения концентрации частиц n. Кроме того, предполагается отсутствие внешних полей, градиентов температуры и давления.

17.1. ДИФФУЗИЯ В ГАЗАХ

Диффузия частиц в газах определяется парными соударениями пробной частицы с атомами или молекулами газа. Поэтому вплоть до очень высоких давлений* коэффициент диффузии обратно пропорционален плотности частиц газа и выражается через характеристику парного соударения пробной частицы и частицы газа — диффузионное сечение рассеяния σ^*.

Согласно элементарной кинетической теории газов, выражение для коэффициента диффузии малой примеси в газе, состоящем из одного сорта частиц, а также для коэффициента самодиффузии имеет вид

$$D = \langle v \rangle \lambda / 3, \qquad (17.2)$$

где $\langle v \rangle$ — средняя относительная скорость соударения частиц примеси и частиц газа, $\langle v \rangle = \sqrt{27/\mu}$; T — температура газа; μ — приведенная масса сталкивающихся частиц; $\lambda = 1/n\sigma^*$ — длина пробега пробных частиц в газе; n — плотность числа частиц газа. Соотношение (17.2) является точным, если σ^* не зависит от скорости сталкивающихся частиц. В противном случае понятие длины пробега теряет определенность, и указанное соотношение справедливо для эффективных величин. Принято приводить значение коэффициента диффузии не при постоянной плотности частиц, а при постоянном давлении. В этом случае, учитывая уравнение газового состояния $P = nkT$, получаем зависимость $D = D_0(T/273)^{1.5}$, где D_0 — коэффициент диффузии при нормальных условиях. Это соотношение справедливо при тех же условиях, что и соотношение (17.2).

Коэффициент самодиффузии газов

В табл. 17.1 представлены значения коэффициентов самодиффузии D_0 некоторых газов при нормальных условиях ($T = 273$ К, $P = 1$ *атм*). Для интервала температур, для которого температурную зависимость коэффициента самодиффузии можно аппроксимировать степенной функцией

$$D(T) = D_0\,(T/273)^{a}, \qquad (17.3)$$

приведены значения показателя a.

Таблица 17.1

Параметры зависимости (17.3) [1,2]

Газ	D_0, *см²/сек*	a	Температурный интервал, К	Газ	D_0, *см²/сек*
He	1,62	1,71	14—296	H_2	1,28
Ne	0,462	—	—	CO	0,175
Ar	0,156	1,92	77—353	HCl	0,125
Kr	0,08	—	—	HBr	0,079
Xe	0,048	—	—		
N_2	0,17	1,9	77—353	CO_2	0,097
O_2	0,18	1,92	77—353	CH_4	0,206
HT_4	0,0465	1,6	144—296	H_2O (пары)	0,277

* Область давлений, где указанная зависимость выполняется с достаточно высокой точностью (погрешность 2—5%), зависит от температуры. Вблизи критического давления точность существенно падает.

Таблица 17.2

Коэффициенты самодиффузии газов при высоких температурах, $см^2/сек$, при $P = 1$ *атм* [1]. Данные получены теоретически, с использованием потенциала межатомного взаимодействия, восстановленного из экспериментов по рассеянию атомных пучков

Газ	Температура, 10^3 °K																				
	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	8	9	10	11	12	13	14	15
He	13,3	26,9	40,7	70,3	98,6	133	167	207	250	299	370	407	407	506	738	898	1070	1260	1460	1670	1890
Ne	3,93	7,76	12,7	18,5	25,2	32,6	41,1	50,4	60,7	72,0	83,6	95,5	110	139	172	207	244	284	325	368	414
Ar	1,51	3,00	5,03	7,60	10,4	13,9	17,8	22,1	26,8	31,9	37,4	43,3	49,5	62,8	77,4	93,2	111	129	148	169	190
Kr	0,853	1,72	2,83	4,34	5,67	7,38	9,32	11,4	13,8	16,4	19,2	22,2	25,6	32,6	40,7	49,6	59,6	70,2	81,5	93,7	107
Xe	0,502	1,01	1,65	2,43	3,32	4,32	5,42	6,64	7,97	9,43	10,9	12,6	14,4	18,2	22,5	27,2	32,4	37,7	43,4	49,4	55,7
N_2	1,50	3,08	5,05	7,48	10,4	13,8	17,6	21,9	26,6	31,8	37,3	43,2	49,6	61,8	78,9	96,6	113	113	153	174	197

Коэффициенты взаимной диффузии в газах

В двухкомпонентной смеси при отсутствии внешних полей, химических реакций, а также градиентов температуры и давления потоки j_1 и j_2 частиц первого и второго сортов выражаются соотношениями:

$$\left.\begin{aligned} j_1 &= -nD_{12}\,\mathrm{grad}\,x_1; \\ j_2 &= -nD_{21}\,\mathrm{grad}\,x_2, \end{aligned}\right\} \qquad (17.4)$$

где n — полная плотность числа частиц; x_1 и x_2 — мольные доли частиц первого и второго сортов. Эти уравнения справедливы в системе отсчета, в которой газ как целое покоится ($j_1 + j_2 = 0$). Поскольку, кроме этого, $x_1 + x_2 = 1$, то $D_{12} = D_{21}$.

Коэффициент диффузии D_{AB} частиц произвольного сорта в смеси двух газов A и B определяется соотноше-

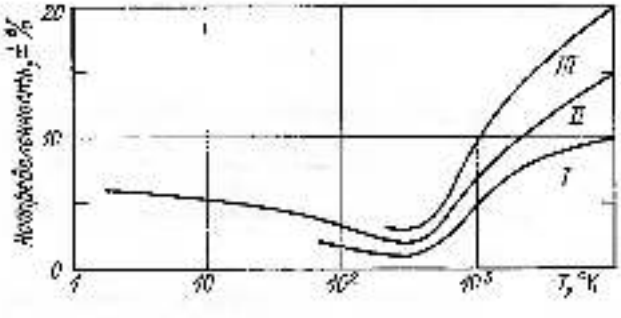


Рис. 17.1. Неопределенности данных, представленных в табл. 17.3, в зависимости от температуры.

Таблица 17.3

Неопределенность значения коэффициента диффузии, %, для систем трех групп

Группа	Система	Температура, °К: 1,75	65	273	500	10^3	10^4
I	He—Ne, —Ar, —Kr, Xe; Ne—Ar, —Kr, Xe; Ar—Kr, Ar—Xe; Kr—Xe; H_2—N_2	—	2	1	2	5	10
II	^{3}He—^{4}He; He—H_2, —N_2, —CO, —O_2, —воздух, —CO_2; H_2—Ne, —Ar, —Kr, —D_2, CO, —воздух, —CO_2; N_2—Ar, —CO, —CO_2	6	4	2	3	7	15
III	Ar—CH_4, —CO, —CO_2, —воздух, SF_6; H_2—Xe, —CH_4; —O_2, —SF_6; CH_4—He, —N_2, —O_2, —воздух, SF_6; N_2—Ne, —Kr, —Xe, —CH_4, O_2, SF_6; CO—Kr, —O_2, —воздух, CO_2, SF_6; O_2—Ar, —CO_2, —SF_6; CO_2—воздух, —N_2O, —SF_6; SF_6—He, —воздух	—	—	3	4	10	20

Таблица 17.4

Неопределенность значений коэффициента взаимной диффузии для систем IV группы

Система	Интервал температур, °К	Неопределенность, %
H_2O—N_2	252—373	±4
H_2O—O_2	282—1070	±7
H_2O—воздух	289—1070	±5—10
H_2O—CO_2	296—1040	±7—10
CO_2—Ne	195—625	±3—5
CO_2—C_3H_8	298—650	±3—6
H—H_2	~300 >1000	±5 ±30
H—N_2; O—N_2; O—O_2	~300 >1000	±10 ±25
H—He; H—Ar; O—He; O—Ar	~300 >1000	±15 ±30

гинск (закон Блэнка), справедливым с погрешностью до нескольких процентов:

$$1/D_{AB} = x_A/D_{1A} + x_B/D_{1B},$$

где D_{1A} и D_{1B} — коэффициенты взаимной диффузии пробной частицы в газах A и B при давлениях, равных суммарному давлению в рассматриваемой смеси.

Точность, с которой известны коэффициенты взаимной диффузии газов, существенно зависит от интервала температур, где измерялся эти коэффициенты, а также от сорта исследуемого газа. Представленные результаты измерений коэффициента взаимной диффузии различных пар газов разделены на четыре группы (табл. 17.3 и 17.4). Погрешность, с которой нанесены коэффициенты взаимной диффузии газов первых трех групп, видна из рис. 17.1, а для четвертой группы соответствующие сведения приведены в табл. 17.4.

В табл. 17.5 и 17.6 представлены параметры, входящие в эмпирические выражения для температурной зависимости коэффициентов взаимной диффузии [2]. Для систем, представленных в табл. 17.5, эта зависимость имеет вид

$$D = D_0 (T/273)^a \exp\left(-\frac{S}{T} - \frac{S'}{T^2}\right), \qquad (17.5)$$

где S, S' — эмпирические параметры, а экспоненциальный множитель может быть опущен без потери точности для температур выше 200 °К.

Для систем, представленных в табл. 17.6, эмпирическая зависимость имеет вид

$$D = D_0 (T/273)^a \exp(-S/T), \qquad (17.6)$$

причем при $T \geq 20S$ экспоненциальный множитель можно заменить единицей.

Таблица 17.5

Параметры выражения (17.5), действительные в температурном интервале T_1 — 10^3 °К

Система	D_0, см²/сек	a	S, °К	S', °К	T_1, °К	Группа
^{3}He—^{4}He	1,55	1,501	—0,0030	1,894	1,74	II
He—Ne	0,295	1,500	1,87	—	65	I
He—Ar	0,635	1,552	1,71	—	77	I
He—Kr	0,503	1,600	—32,65	2096	77	I
He—Xe	0,394	1,641	—68,67	5416	109	I
He—H_2	1,32	1,510	—	—	90	II
He—N_2	0,613	1,524	—	—	77	II
He—CO	0,613	1,594	—	—	77	II
Ne—Ar	0,278	1,546	1,82	1170	93	I
Ne—Kr	0,242	1,555	20,4	—	112	I
Ne—Xe	0,197	1,584	10,1	—	169	I
Ar—Kr	0,14	1,536	47,3	—	169	I
Ar—Xe	0,122	1,563	59,9	—	169	I
Ar—N_2	0,19	1,519	39,8	—	242	II
Kr—Xe	0,0812	1,609	52,7	—	169	I
Kr—H_2	0,464	1,561	25,4	—	77	II
H_2—D_2	0,59	1,500	6,092	38,10	14	II
H_2—N_2	0,66	1,548	—2,80	1067	65	I
H_2—CO	0,66	1,649	—2,80	1077	65	II
N_2—CO	0,175	1,576	36,2	3825	78	II

Таблица 17.6

Параметры эмпирической зависимости (17.6)

Система	D_0, см²/сек	a	S, °K	Температурный интервал, °K	Группа
He—CH_4	0,57	1,750	—	298—10^4	III
He—O_2	0,45	1,710	—	244—10^4	II
He—воздух	0,62	1,729	—	244—10^4	II
He—CO_2	0,52	1,720	—	200—630	II
He—SF_6	0,35	1,627	—	290—10^4	III
Ne—H_2	0,99	1,731	—	90—10^4	II
Ne—N_2	0,28	1,743	—	293—10^4	III
Ne—CO	0,22	1,776	—	195—625	—
Ar—CH_4	0,179	1,785	—	307—10^4	III
Ar—N_2	0,17	1,752	—	244—10^4	II
Ar—CO	0,17	1,752	—	244—10^4	III
Ar—O_2	0,167	1,736	—	243—10^4	III
Ar—воздух	0,165	1,749	—	244—10^4	III
Ar—CO_2	0,177	1,646	89,1	276—1800	III
Ar—SF_6	0,114	1,506	146,4	328—10^4	III
Kr—N_2	0,13	1,765	—	248—10^4	III
Kr—CO	0,13	1,706	—	248—10^4	III
Xe—H_2	0,54	1,712	16,8	242—10^4	III
Xe—N_2	0,106	1,789	—	242—10^4	III
H_2—CH_4	0,62	1,765	—	293—10^4	III
H_2—O_2	0,70	1,732	—	252—10^4	III
H_2—воздух	0,66	1,750	—	252—10^4	II
H_2—CO_2	0,68	1,730	11,7	200—650	II
H_2—SF_6	0,52	1,570	102,5	298—10^4	III
CH_4—N_2	0,2	1,750	—	298—10^4	III
CH_4—O_2	0,22	1,695	44,2	291—10^4	III
CH_4—воздух	0,186	1,747	—	298—10^4	III
CH_4—SF_6	0,119	1,037	69,2	298—10^4	III
N_2—O_2	0,182	1,794	—	285—10^4	III
N_2—H_2O	0,204	2,072	—	282—373	IV
N_2—CO_2	0,208	1,570	113,6	288—1800	II
N_2—SF_6	0,122	1,580	119,4	328—10^4	III
CO—O_2	0,175	1,724	—	285—10^4	III
CO—воздух	0,182	1,730	—	285—10^4	III
CO—CO_2	0,142	1,803	—	282—475	III
CO—SF_6	0,129	1,584	130,4	297—10^4	III
O_2—H_2O	0,207	2,072	—	282—460	IV
	0,264	1,682	—	400—1070	IV
O_2—CO_2	0,174	1,661	61,3	287—1083	III
O_2—SF_6	0,138	1,522	129,0	297—10^4	III

Продолжение табл. 17.6

Система	D_0, см²/сек	a	S, °K	Температурный интервал, °K	Группа
Воздух—H_2O	0,205	2,072	—	282—450	IV
Воздух—H_2O	0,26	1,632	—	450—1070	IV
Воздух—CO_2	0,207	1,590	109,1	280—1800	IV
Воздух—SF_6	0,126	1,576	121,1	328—10^4	IV
H_2O—CO_2	0,41	1,500	307,9	296—1640	IV
CO_2—N_2O	0,096	1,666	—	195—600	III
CO_2—C_2H_4	0,074	1,606	—	298—550	IV
CO_2—SF_6	0,069	1,886	—	328—472	III
H—He	2,35	1,732	—	276—10^4	IV
H—Ar	0,112	1,597	—	275—10^4	IV
H—H_2	0,184	1,798	—	190—10^4	IV
N—N_2	0,29	1,771	—	280—10^4	IV
O—He	0,84	1,749	—	280—10^4	IV
O—Ar	0,23	1,841	—	280—10^4	IV
O—N_2	0,28	1,774	—	280—10^4	IV
O—O_2	0,29	1,774	—	280—10^4	IV

Таблица 17.7

Коэффициент диффузии метастабильных атомов инертных газов в собственном газе при давлении 1 *мм рт. ст.*, *см*²/*сек* [3]*

Атом	Температура, °K					
	90	40	77	150	300	350
He (^3S)	60	100	160	260	460	710
He (^1S)	46	75	120	210	370	570
Ne ($^3P_2$)	19	33	56	—	—	—
Ar ($^3P_2$)	8	13	20	34	64	—
Kr ($^3P_2$)	5	12	12	20	38	51
Xe ($^3P_2$)	3	5	8	13	22	38

* Погрешность данных не превышает ± 5—10%.

Диффузия заряженных частиц в газе. Амбиполярная диффузия

В слабоионизованной плазме, где степень ионизации $n_e/n_a \ll (T_e/\mathrm{Ry})$ (n_e, n_a — плотности электронов и нейтральных частиц соответственно; T_e — температура электронов; Ry — 13,6 *эв* — атомный масштаб энергии), диффузия заряженных частиц (электронов и ионов) определяется в основном зарядами — столкновениями этих частиц с нейтральными частицами (атомами и молекулами). При этом в случае максвелловского распределения заряженных частиц по скоростям коэффициент диффузии электронов (ионов) связан с их подвижностью K, а соответственно и с электропроводностью плазмы σ, соотношением Эйнштейна*:

$$D = \frac{KkT}{e} = \frac{kT\sigma}{e^2 n_e} \qquad (17.7)$$

(*k* — постоянная Больцмана; *T* — температура плазмы; *e* — заряд электрона), которое позволяет определить коэффициент диффузии электронов на основании данных по электропроводности слабоионизованной плазмы.

Если характерный размер, на котором заметно изменяется плотность заряженных частиц в плазме, много больше радиуса Дебая

$$r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{8\pi n_e e^2}},$$

плазма является квазинейтральной, т. е. плотность положительных и отрицательных зарядов равны. При этом имеет место амбиполярная диффузия с коэффициентом диффузии D_a, единым для электронов и ионов и выражающимся через коэффициент диффузии атомов в том же газе D_0:

$$D_a = D_0 (1 + T_e/T_0). \qquad (17.8)$$

* Когда распределение заряженных частиц по энергии отличается от максвелловского, соотношение (17.7) выполняется приближенно с погрешностью 10—15%.

Таблица 17.8

Коэффициент диффузии ионов, $см^2/сек$, в чужом газе при нормальных условиях ($P = 1$ *атм*, $T = 273°K$)

Ион	Основной газ									
	He	Ne	Ar	Kr	Xe	H_2	N_2	O_2	CO	CO_2
Li^+	0,45	0,22	0,103	0,091	0,062	0,29	0,103	0,108	0,099	0,092
Na^+	0,39	0,15	0,066	0,049	0,036	0,26	0,069	0,071	0,066	0,059
K^+	0,37	0,14	0,056	0,040	0,030	0,26	0,061	0,062	0,058	0,074
Rb^+	0,37	0,12	0,048	0,031	0,022	0,26	0,053	0,054	0,05	0,037
Cs^+	0,36	0,12	0,045	0,029	0,020	0,25	0,051	0,052	0,053	0,035
NO^+	0,38	0,15	0,061	0,046	0,033	0,26	0,065	0,067	0,069	0,048
O_2^+	0,38	0,15	0,060	0,045	0,032	0,26	0,063	—	0,060	0,045
N_2^+	0,38	0,15	0,059	0,047	0,034	0,26	—	0,067	0,063	0,049
Ne^+	0,39	—	0,060	0,052	0,039	0,27	0,073	0,074	0,070	0,054
Ar^+	0,37	0,14	—	0,040	0,030	0,26	0,061	0,062	0,056	0,044
Kr^+	0,37	0,12	0,049	—	0,022	0,26	0,053	0,054	0,05	0,037
Xe^+	0,36	0,12	0,045	0,029	—	0,25	0,051	0,052	0,023	0,035
He_2^+	0,44	0,21	0,098	0,076	0,059	0,26	0,098	0,103	0,094	0,078
Ne_2^+	0,37	0,14	0,056	0,040	0,030	0,26	0,061	0,062	0,058	0,044
Ar_2^+	0,37	0,12	0,049	0,031	0,023	0,26	0,054	0,054	0,051	0,038
Xe_2^+	0,36	0,12	0,043	0,026	0,017	0,25	0,049	0,048	0,046	0,033
F_2^+	0,37	0,14	0,056	0,040	0,031	0,25	0,062	0,062	0,058	0,045

Здесь T_i и T_e — температура ионов и электронов соответственно. Соотношение (17.8) справедливо с той же точностью, с какой выполняется соотношение Эйнштейна (17.7).

Коэффициент диффузии ионов в чужом газе с хорошей точностью (погрешность 10—15%) может быть выражен через поляризуемость β основного газа и приведенную массу иона и молекулы основного газа [4]: $\mu = \frac{M_i M_r}{M_i + M_r}$ (M_i — масса иона; M_r — масса молекулы основного газа):

$$D_i = \frac{0,0001}{\sqrt{\mu\beta}} T_i, \qquad (17.9)$$

где T_i — температура ионов, °K; β — поляризуемость в атомных единицах (атомная единица поляризуемости эквивалентна $1,5 \cdot 10^{-24}$ $см^3$), а μ — *а.е.м.*

В табл. 17.8 представлены значения коэффициента диффузии различных ионов в некоторых газах при $T_i = 273°K$ и $P = 1$ *атм* [4]. Коэффициент диффузии ионов в собственном газе выражается с неопределенностью 5—10% через сечение резонансной перезарядки иона на атоме, когда температуры ионов и атомов близки [4]:

$$D = \frac{0,341\sqrt{T/M}}{n\sigma^{*}_{рез}(2,24\sqrt{2T/M})}, \qquad (17.10)$$

где T — температура газа, °K; M — масса атомов (ионов), а $\sigma^{*}_{рез}(2,24\sqrt{2T/M})$ — сечение резонансной перезарядки иона на атоме при скорости соударения $2,24\sqrt{2T/M}$, $см^2$; n — плотность числа частиц газа, $см^{-3}$.

В табл. 17.9 представлены значения коэффициента диффузии некоторых ионов в собственном газе, вычисленные на основании выражения (17.10).

Таблица 17.9

Коэффициент диффузии ионов в собственном газе, $см^2/сек$ ($n = 2,7 \cdot 10^{19}$ $см^{-3}$) [4]

T_i, °K	He^+	Ne^+	Ar^+	Kr^+	Xe^+	Hg^+	Rb^+	Cs^+
77	0,086	0,041	0,013	—	—	—	—	—
195	0,194	0,077	0,0009	—	—	—	—	—
300	0,26	0,109	0,041	0,029	0,016		—	—
350	—	—	—	—	—	0,0078	—	—
630	—	—	—	—	—	—	0,0009	0,005
1400	—	—		—	—	—	—	0,0077

17.2. ДИФФУЗИЯ В ЖИДКОСТЯХ

Диффузия в жидкостях обусловлена процессами многочастичного взаимодействия пробной частицы с частицами жидкости. Поэтому теоретическое определение коэффициентов диффузии в жидкостях весьма затруднено, и единственным источником полезной информации является эксперимент. Исключение составляет коэффициент диффузии больших молекул в растворителе с малой молекулярной массой, который определяется формулой Эйнштейна—Стокса:

$$D_{12} = kT/(6\pi\eta r), \qquad (17.11)$$

где r — радиус большой молекулы, форма которой аппроксимируется сферой; ν — динамическая вязкость жидкости. В уравнении (17.11), справедливой для многих систем, величина r остается неопределенным параметром, который известен с точностью до множителя 2.

Коэффициенты диффузии для многих веществ в различных растворителях хорошо аппроксимируются эмпирической формулой [5]*

$$D_{12} = K_1 K_2, \qquad (17.12)$$

где K_1 — коэффициент, не зависящий от свойств растворителя, и K_2 — коэффициент, не зависящий от свойств растворенного вещества. Коэффициенты K_1 и K_2 зависят от температуры, однако если известно значение D_{12} при температуре T_1, можно определить $D_{12}(T_2)$ из соотношения

$$D_{12}(T_2) = D_{12}(T_1)\frac{T_2}{T_1}\cdot\frac{\nu_2(T_1)}{\nu_2(T_2)}, \qquad (17.13)$$

где $\nu_2(T_2)$, $\nu_2(T_1)$ — динамическая вязкость растворителя при температурах T_2 и T_1. В табл. 17.10 представлены значения K_2 для некоторых растворенных веществ, а в табл. 17.11 — K_1 для некоторых растворителей.

Таблица 17.10

Значения K_2 для различных растворенных веществ [5]

Растворенное вещество	t, °C	K_2, 10^{-3} (см/сек)^2/г	Растворенное вещество	t, °C	K_2, 10^{-3} (см/сек)^2/г
Аллиловый спирт	15	2,328	Пиридин	20	2,723
Анилин	15	2,176	Пропиловый спирт	15	2,243
Ацетон	15	3,546			
Бензальдегид	15	2,364	Пропионовая кислота	15	3,008
Бензол	25	3,460			
Бромбензол	15	2,403	Тетрахлорметан	25	3,578
Бромэтан	15	4,025			
Бутиловый спирт	15	2,040	Трихлорметан	15	3,328
Вода	25	2,601	Толуол	25	3,087
1,2-Дибромэтан	15	2,913	Уксусная кислота	25	2,312
Диэтиловый эфир	15	3,833	Фенол	5	1,660
Изоамиловый спирт	15	2,282	Фурфурол	15	2,178
Иодэтан	7,5	3,912	Хлоральгидрат	15	2,033
Метиловый спирт	15	2,661	Хлорбензол	15	2,591
Муравьиная кислота	6	4,159	Этиловый спирт	15	2,456
Нитробензол	15	2,322			

Таблица 17.11

Значение K_1 для различных растворителей [5]

Растворитель	t, °C	K_1, 10^{-3} см/сек·г/г	Растворитель	t, °C	K_1, 10^{-3} см/сек·г/г
Бензол	15	5,925	Тетрахлорметан	25	4,239
Бромбензол	25	5,104			
Вода	25	4,151	Толуол	25	6,169
Метиловый спирт	15	6,746	Хлорбензол	25	5,676
			Этиловый спирт	25	3,831

Для сильно разбавленных растворов электролитов коэффициент диффузии

$$D_{12} = \frac{2RT}{[1/\lambda_+ + 1/\lambda_-]\,\mathcal{F}^2}, \qquad (17.14)$$

где $R = 8{,}315$ дж/(град·моль) — газовая постоянная; T — температура, °K; λ_+, λ_- — проводимости отрицательных и положительных ионов в пределе нулевых концентраций, $a \cdot$ а-экв/(см^2 · в); $\mathcal{F} = 96500$ к/г-экв — число Фарадея. Предельные значения проводимостей λ_+^0 и λ_-^0 в воде при $t = 25$°C представлены в табл. 17.12. В этом случае выражение (17.14) имеет вид

$$D_{12} = \frac{0{,}536\cdot 10^{-5}}{1/\lambda_+ + 1/\lambda_-}\ \text{см}^2/\text{сек}.$$

Значения коэффициентов диффузии некоторых веществ, растворенных в воде, приведены в табл. 17.13 и 17.14.

Таблица 17.12

Предельные значения ионной проводимости в воде при 25°C, a-а-экв/(см^2·в) [5]

Катион	λ_+^0	Анион	λ_-^0
H^+	349,8	OH^-	197,6
Li^+	38,7	Cl^-	76,3
Na^+	50,1	Br^-	78,3
K^+	73,5	I^-	76,8
NH_4^+	73,4	NO_3^-	71,4
Ag^+	61,9	ClO_4^-	68,0
Tl^+	74,7	HCO_3^-	44,5
$^1/_2\ Mg^{2+}$	53,1	HCO_2^-	54,6
$^1/_2\ Ca^{2+}$	59,5	$CH_3CO_2^-$	40,9
$^1/_2\ Sr^{2+}$	60,5	$ClCH_2CO_2^-$	39,8
$^1/_2\ Ba^{2+}$	63,6	$CNCH_2CO_2^-$	41,8
$^1/_2\ Cu^{2+}$	54	$CH_3CH_2CO_2^-$	36,8
$^1/_2\ Zn^{2+}$	53	$CH_2(CH_2)_2(CO_2)^-$	32,6
$^1/_3\ La^{3+}$	69,5	$C_6H_5CO_2^-$	32,3
$^1/_3\ CO(NH_3)_6^{3+}$	102	$HC_2O_4^-$	40,2
		$^1/_2\ C_2O_4^{2-}$	74,2
		$^1/_2\ SO_4^{2-}$	80
		$^1/_3\ Fe(CN)_6^{3-}$	101
		$^1/_4\ Fe(CN)_6^{4-}$	111

* Всюду ниже, если это не оговорено особо, речь идет о диффузии вещества, концентрация которого в растворе мала.

Таблица 17.13

Коэффициенты диффузии неорганических веществ, растворенных в воде [1]

Растворенное вещество	Концентрация, моль/л	t, °C	D, 10^5 см²/сек
Br_2	0,00105	25	1,26
	0,00173	25	1,24
	0,00183	25	1,236
	0,00193	25	1,23
	0,00230	25	1,22
	0,00360	25	1,202
	0,00429	25	1,190
	0,00531	25	1,18
CO_2	0	18	1,46
$CaCl_2$	0,29	9	0,79
	0,37	9	1,09
	1,5	9	0,81
$CdSO_4$	0	16,8	0,35
	0,5	16,8	0,34
	1,0	16,8	0,33
	1,5	16,8	0,44
	2,0	16,8	0,43
	3,0	16,8	0,44
	3,5	16,8	0,54
	4,5	16,8	0,36
	5,5	16,8	0,4
	6,5	16,8	0,45
	7,0	16,8	0,46
Cl_2	0,1	12	1,4
	0,1	16,3	1,3
$CuCl_2$	0,0062	18	0,7
	0,0127	11	0,73
$CuCl_2$	1,5	10	0,6
$CuSO_4$	0,1	17	0,45
	0,5	17	0,34
	0,10	17	0,27
D_2O	0	25	2,5
H_2	0	18	3,6
HCl	0	10	2,2
	0	25	3,1
	0,02	10	2,1
	0,02	25	3,0
	0,05	10	2,0
	0,05	25	2,9
	0,2	10	2,1
	0,2	25	3,0
	0,35	10	2,1
	0,35	25	3,1
	0,45	0	1,6
	1,0	25	3,6
	2,0	0	1,8
	2,0	11	2,5

Продолжение табл. 17.13

Растворенное вещество	Концентрация, моль/л	t, °C	D, 10^5 см²/сек
HCl	5,0	0	2,2
	6,5	11	3,1
	8,0	0	2,7
	9,0	11,5	3,4
HNO_3	0,84	5,5	1,7
	3,0	6,0	1,6
	3,3	7	2,4
	20	9	1,3
H_2O	0,011	20	0,89
	0,09	20	1,05
	0,106	20	1,06
KBr	1,0	10	1,2
K_2CO_3	3,0	10	0,70
KCl	0,00125	25	1,96
	0,00194	25	1,95
	0,00325	25	1,95
	0,00585	25	1,94
	0,00704	25	1,93
	0,00980	25	1,92
	0,02	25	1,94
	0,1	25	1,89
	0,5	25	1,82
	0,	18,5	1,7
	0,05	18,5	1,56
	0,10	18,5	1,54
	0,20	18,5	1,63
	0,50	18,5	1,55
	1,00	18,5	1,61
	1,5	18,5	1,67
	2,00	18,5	1,73
KI	0,01	10	1,3
	0,01	18	1,7
	0,10	10	1,24
	0,10	18	1,61
	1,0	10	1,21
	1,0	18	1,59
	5,5	10	1,37
	5,5	18	1,8
KNO_3	0,05	18	1,45
	0,20	18	1,39
	0,40	18	1,35
	0,80	18	1,25
	1,0	18	1,24
	2,0	18	1,15
	2,5	18	1,17
KOH	0,1	13,5	2,0
	0,9	13,5	2,10
	3,9	13,5	2,82
K_2SO_4	0,02	19,6	1,27
	0,05	19,6	1,12
	0,28	19,6	1,0
	0,95	19,6	0,92

Растворенное вещество	Концентрация, моль/л	t, °C	D, 10^{-5} см²/сек
LiBr	2,3 4,4	10 10	0,93 1,01
LiCl	0,01 0,01 1,0 1,0 4,2 4,2	9 18 9 18 9 18	0,88 1,16 0,81 1,06 0,84 0,11
LiI	1,3	10	0,93
$MgSO_4$	0,5 1,0 3,0 4,6	15,5 15,5 15,5 15,5	0,54 0,51 0,59 0,73
N_2	0	18	1,63
NH_3	0,663 2,55	4 4,5	1,21 1,23
NaBr	2,9	10	1,0
Na_2CO_3	2,4	10	0,45
NaCl	0,06 0,40 1,00 2,0 3,0 4,0 5,0	18,5 18,5 18,5 18,5 18,5 18,5 18,5	1,26 1,2 1,24 1,29 1,30 1,43 1,40
NaI	1,0 2,0	10 10	0,95 1,04
$NaNO_3$	0,6 3,0 5,0 6,0	13 10,5 10,5 13	1,04 0,88 0,96 0,90
NO	0	10	1,54
I_2	0,05	25	1,25
O_2	0	25	2,60
NaOH	0,02 0,10 0,96 3,9	12 12 12 12	1,3 1,29 1,21 1,14
Na_2SO_4	1,4	10	0,70
$NaCH_3COO$	0,2	12	0,71
$Ni(NO_3)_2$	0,0368 0,0226 0,068	18 18 18	0,667 0,822 0,95

Растворенное вещество	Концентрация, моль/л	t, °C	D, 10^{-5} см²/сек
$Pb(NO_3)_2$	0,22 0,82	12 12	0,82 0,76
$ZnSO_4$	0,025 0,050 0,55 2,95	19,5 19,5 19,5 19,5	0,58 0,54 0,12 0,38
$Zn(CH_3COO)_2$	2,0 2,0	0 18	0,139 0,243

Таблица 17.14

Коэффициент диффузии органических соединений в водных растворах [6]

Растворенное вещество	t, °C	Концентрация, моль/л	D, 10^{-5} см²/сек
Аллантоин	20	0	0,67
Арабиноза	20	0	0,70
Ацетамид	20	0	1,05
Ацетонитрил	15	0	1,26
Гидрохинон	20	0	0,78
Глицерин	10	0,125	0,63
Глюкоза	15	0	0,92
Кислота винная	16	0,01	0,61
» уксусная	12,5	0	0,91
Кофеин	10	0	0,42
Лактоза	20	0	0,46
Мальтоза	20	0	0,425
»	10	0	0,322
Маннит	20	0	0,605
Мочевина	12	0	0,99
Никотин	20	0	0,53
Пентаэритрит	20	0	0,69
Пирогаллол	15	0	0,56
Рафиноза	20	0,05	0,36
Резорцин	20	0	0,77
Сахароза	12	0	0,35
Серосфорол	16	0	1,43
Спирт аллиловый	15	0	0,90
» бутиловый	15	0	0,77
» изоамиловый	15	0	0,69
» метиловый	16	0	1,28
» пропиловый	15	0	0,87
» этиловый	15	0	1,00
Уретан	15	0	0,87

Таблица 17.15

Коэффициент диффузии различных веществ в метиловом спирте (концентрация раствора 1%, t — 16° С) [6]

Растворенное вещество	$D \cdot 10^{-7}$, см²/сек	Растворенное вещество	$D \cdot 10^{-7}$, см²/сек
Аллиловый спирт	1,60	трихлоруксусная	1,45
Анилин	1,49	фталевая	1,30
Антипирин	1,50	хлорбензойная	1,29
Ацетилдифениламин	0,98	хлоруксусная	1,62
Ацетоуксусный эфир	2,04	м-Нитробензальдегид	1,24
Бензальдегид	1,66	Нитрофенол	1,38
Бромэтилен	1,41	Пиридин	1,58
Бромбензол	1,75	Сахар	1,29
Бромнитрофенол	1,43	2, 4, 6-Трибромфенол	1,12
3-Бромпропанол	2,22	2,4,6-Тринитрофенол	1,32
Бромфенол	1,34	2, 4, 6-Трихлорфенол	1,21
Ванилин	1,00	Уретан	1,41
Гидрохинон	1,21	Фенетол	1,40
Дибензиламин	0,86	Фенилацетат	1,62
о-Дибромбензол	1,60	Фенол	1,40
Дибромнафталин	1,33	Фосфонафталин	0,78
Диоксан	1,68	Фурфурол	1,70
м-Динитробензол	1,56	Хлоралгидрат	1,16
Динитронафталин	1,32	Хлорбензол	1,34
2, 4-Динитрофенол	1,40	Хлорбромэтан	2,50
1, 1-Дихлоргидрин	1,36	1-Хлортидрин	1,30
Дихлорнафталин	1,52	Хлорнитробензол	1,68
Изобутиловый спирт	1,34	Хлороформ	2,07
Иодбензол	1,65	Хлорфенол	1,32
Иодоформ	1,83	Четыреххлористый углерод	1,70
3-Иодпропанол	1,72	Этилен бромистый	2,40
Кислоты:		» иодистый	2,16
бензойная	1,35	Этилен бромистый	1,95
дихлоруксусная	1,36	» иодистый	1,56
иодпропионовая	1,36	Этилнитрат	2,20
молочная	1,36		
пропионовая	1,62		
трибромуксусная	1,23		

Таблица 17.16

Коэффициент диффузии веществ в бензоле (концентрация раствора 1%, t — 15°С) [6]

Растворенное вещество	$D \cdot 10^{-7}$, см²/сек	Растворенное вещество	$D \cdot 10^{-7}$, см²/сек
Альдегид салициловый	1,78	о-Дибромбензол	1,37
Ацетилдифениламин	0,90	Дибромнафталин	1,25
Бензальдегид	1,73	м-Динитробензол	1,54
Бром (0,1 М, 12°С)	2,00	Динитронафталин	1,21
Бромэтилен	1,41	о-Дихлорбензол	1,90
Бромбензол	1,86	Дихлорнафталин	1,40
α-Бромнафталин	1,30	Иод (0,05М, 20°С)	1,96
Бромнитробензол	1,33	Иодбензол (<1%, 8°С)	1,35
Бромоформ (16°С)	1,62	Иодоформ	1,38
Бромфенол	1,34	Кислота бензойная	1,36
Гексахлорбензол (<1%, 8°С)	1,02	» фталевая	1,37
		» хлоруксусная	1,48
		Метилсалицилат	1,50

Продолжение табл. 17.16

Растворенное вещество	$D \cdot 10^{-7}$, см²/сек	Растворенное вещество	$D \cdot 10^{-7}$, см²/сек
Нафталин (<1%, 8°С)	1,19	1, 2, 3-Трихлорпропан	1,72
Нитробензол	1,84	Фенантрен (<1%, 8°С)	0,95
α-Нитронафталин	1,30	Фенол (5°С)	1,27
Спирт изоамиловый	1,48	Хинон	1,69
» пропиловый	1,60	Хлоранилин	1,56
1, 2, 4, 5-Тетрахлорбензол (<1%, 8°С)	1,24	Хлорбензол	1,42
Тринитротолуол	1,39	α-Хлорнафталин	1,20
2, 4, 6-Тринитрофенол	1,39	Хлорнитробензол	1,70
1, 2, 4-Трихлорбензол (<1%, 8°С)	1,34	Хлороформ	2,11
		Хлорфенол	1,42
		Этилен бромистый	1,97
		» иодистый	1,40
		Эфир этиловый	2,21

Таблица 17.17

Коэффициент диффузии веществ в различных растворителях [6]

Растворитель	Растворенное вещество	Концентрация, моль/л	t, °С	$D \cdot 10^{-7}$, см²/сек
Анилин	Иод	0,1	20	1,13
Ацетон	Бромоформ	0	20	2,73
Бромоформ	Ацетон	0,25	20	0,272
»	Бензол	1	20	1,09
»	Метанол	0,5	20	1,93
»	Спирт этиловый	0,5	20	0,976
»	» пропиловый	1	20	0,77
»	» амиловый	1	20	0,516
»	Эфир этиловый	0,25	20	0,342
Гептан	Бромбензол	0	7	2,60
Гептан	Иод	0,1	20	2,07
Декалин	Бромбензол	0	7	0,47
»	α-Бромнафталин	0	7	0,34
Кислота уксусная	Иод	0	7	1,51
То же	Бромбензол	0,1	20	1,68
» »	Иод	0,1	10	3,60
Сероуглерод	Бром	0	19	3,40
»	Фенол	0	19	0,20
Спирт изоамиловый	»	0	19	0,20
Спирт этиловый	Азобензол	0,2	20	0,74
» »	Акридин	0,04	20	0,27
» »	Спирт бензиловый	1	20	0,95
» »	Спирт амиловый	1	20	0,76
» »	Адаталь	1	20	1,13
» »	Ацетанилид	0	20	0,67
» »	Ацетонил	0	20	0,558
» »	Бромнафталин	0,5	20	0,740
» »	Бромоформ	0,5	20	0,976
» »	Брусин	0,062	20	0,28
» »	Гидрохинон	0	20	0,488
» »	Глицерин	0	20	0,632
» »	Иод	0,1	8	0,90
» »	Иодбензол	0,25	20	0,97
» »	Камфара	0,5	20	0,694
» »	Пиридин	0,5	20	1,11
» »	Резорцин	0	20	0,451
» »	Салигенин	0	20	0,608

Продолжение табл. 17.17

Растворитель	Растворенное вещество	Концентрация раствора, г/л	t, °C	D, 10^{-5} см²/сек
Спирт этиловый	Кислота стеариновая	0,2	20	0,59
» »	Фенол	0,1	20	0,89
» »	Хлорал	1	20	0,614
» »	Хлороформ	1	20	1,25
Эфир этиловый	Бромбензол	0	7	3,25
» »	Бромоформ	0	17	3,30
» »	Нитробензол	0	8	3,24
» »	Фенол	0	19	3,60
Тетралин	Бромбензол	0	7	0,49
»	α-Бромнафталин	0	7	0,36
Тетрахлорэтан	Тетрабромэтан	0,06	50	0,94
Толуол	Бромбензол	0	7	1,59
»	Иод	0,1	20	1,00
Углерод четырехлористый	»	0,1	20	1,36
Хлороформ	»	0,06	10	1,95
»	Фенол	0	10	1,60
Циклогексан	Бромбензол	0	7	1,14
Этилацетат	Иод	0,1	20	2,15
Этилбензол	Бромбензол	0	7	1,44
Эфир дибензиловый	α-Бромнафталин	0	7	0,149

Таблица 17.18

Коэффициент диффузии веществ в расплавленных солях [6]

Диффундирующее вещество	Среда	t, °C	D, 10^{-5} см²/сек
$AgNO_3$	KNO_3	360	4,50
$AgNO_3$	KNO_3	300	4,86
$AgNO_3$	$NaNO_3$	380	4,57
$AgNO_3$	$NaNO_3$	360	5,06
AgBr	KBr	780	4,92
AgCl	KCl	720	4,63
AgCl	KCl	780	5,10
AgCl	KCl, LiCl	480	0,61
AgCl	KCl, LiCl	740	6,61
$Ba(NO_3)_2$	KNO_3	370	2,06
$Ba(NO_3)_2$	$NaNO_3$	310	3,71
KB	KNO_3	360	3,01
KCl	KNO_3	360	2,96
$PbCl_2$	KCl, LiCl	590	2,06
$PbCl_2$	KCl, LiCl	720	4,40
$NaNO_3$	KNO_3	360	5,22
$Sr(NO_3)_2$	KNO_3	360	2,81
$Sr(NO_3)_2$	$NaNO_3$	346	4,17
TlBr	KBr	770	4,28
TlCl	KCl, LiCl	520	3,10
TlCl	KCl	720	3,14
$TlNO_3$	KNO_3	346	3,17
$TlNO_3$	Na_2NO_3	360	4,31

Таблица 17.19

Коэффициент диффузии в амальгамах [4]

Металл	t, °C	D, 10^{-5} см²/сек	Металл	t, °C	D, 10^{-5} см²/сек
Tl	25	0,95	Zn	25	2,4
Na	25	0,86	Cd	25	2,0
K	25	0,71	Sn	25	2,1
Rb	7,5	0,53	Bi	25	1,6
Cs	25	0,64	Pb	25	2,1
Ag	16	1,11	Ba	7,8	0,07
Au	25	0,73	Sr	9,4	0,54
Tl	25	1,16	Ca	10,2	0,62

Таблица 17.20

Коэффициент диффузии в расплавленных металлах [4]

Диффундирующий металл	Среда диффузии	t, °C	D, 10^{-5} см²/сек	Диффундирующий металл	Среда диффузии	t, °C	D, 10^{-5} см²/сек
Mg	Al	700	7,54	Rh	Pb	500	3,52
Au	Pt	500	5,22	Pt	Pb	400	1,95
Si	Fe	1460	2,1	Ag	Sn	500	4,6
Si	Fe	1560	10,5	Au	Sn	500	5,37
Au	Pt	50	3,7	Pb	Sn	500	3,66

17.3. ДИФФУЗИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Основным источником информации о коэффициентах диффузии в твердом теле, так же как и в жидкости, является эксперимент. При этом, вследствие крайней чувствительности результатов измерений к чистоте исследуемого вещества и к температурным колебаниям, результаты различных измерений характеризуются разбросом в пределах порядка величины. Данные, представленные в таблицах, усреднены по нескольким измерениям, при этом, в силу произвольного способа усреднения, указанные данные справедливы по порядку величины.

Температурная зависимость коэффициента диффузии в твердом теле описывается простой полуэмпирической формулой

$$D = D_0 \exp(-Q/kT), \qquad (17.15)$$

где Q — энергия активации; D_0 — фактор диффузии. Соотношение (17.15) выполняется в широком диапазоне температур в пределах точности измерений коэффициента диффузии. Для веществ, имеющих кристаллическую структуру, коэффициент диффузии является тензором. Приведенные ниже данные являются обычно результатом усреднения этого тензора по направлениям. В отдельных случаях приводятся значения коэффициента диффузии в направлениях, параллельном ($D_\parallel$) и перпендикулярном ($D_\perp$) к главной оси кристалла. В табл. 17.21—17.31 представлены значения параметров, входящих в соотношение (17.15), а также интервал температуры, где проводились измерения.

Таблица 17.21

Параметры выражения (17.15) в различных диапазонах температур [7]

Металл	Температурный интервал, °С	D_0, см²/сек	Q, ккал/моль
Ag	450—900	0,91	45,6
Al	390—460	0,10	30,5
	450—650	1,71	34
Au	600—950	0,031	39,36
	850—1050	0,107	42,26
Co	770—1050	0,50	60,4
	1000—1300	0,9	62
Cu	500—1020	70,0	56,0
	700—900	120	60,3
α-Fe	900—1000	3,0	71
γ-Fe	1070—1350	1,05	67,8
	1407—1515	6,8	61,7
δ-Fe	700—1100	0,48	46,8
Ni	1042—1454	1,9	68
Pb	174—322	0,281	24,2
Pd	1050—1500	0,205	63,6
Pt	1250—1726	0,22	66,5
α-Pu	35—440	0,0045	23,8
α-Th	1100—1400	700	83,5
β-Th	1450—1550	10^8	99,7
Be, ⊥	550—1050	0,52	37,6
Be, ∥	550—1050	0,69	39,4
Ta	1250—2250	0,12	96,7
	1827—2527	2	110
α-U	580—650	0,002	40
β-U	700—755	0,0135	42
γ-U	800—1050	0,002	27
V	880—1356	0,36	73,05
	1356—1833	214	94,14

Продолжение табл. 17.21

Металл	Температурный интервал, °С	D_0, см²/сек	Q, ккал/моль
Sb, ⊥	500—630	0,10	35,8
Sb, ∥	500—630	56	48
Cd, ⊥	110—315	0,10	19,1
Cd, ∥	110—315	0,05	18,2
Mg, ⊥	468—635	1,5	32,5
Mg, ∥	468—635	1,0	32,2
α-Ti	690—850	$8,4\cdot10^{-3}$	29,3
β-Ti	895—1580	0,0016	36
α-Ti, ⊥	150—275	0,4	22,6
	200—415	0,59	24,9
α-Ti, ∥	200—410	0,06	22,0
α-Zr	300—700	$5\cdot10^{-3}$	22
	650—827	$5\cdot10^{-3}$	52
β-Zr	900—1500	0,0024	38
	900—1750		27,7
Cr	550—1250	10^{-4}	52,7
	1200—1600	0,28	73,8
Hf	1795—1995	0,0012	38,7
Li	—65÷250	0,24	13,2
Mo	1700—1950	2,77	111
	1850—2350	0,8	95
Na	65÷900	0,20	10
Nb	878—2400	1,1	96
α-Pu	500—610	0,029	18,5
Rb	—65÷250	0,28	9,4
W	1287—1463	$6,3\cdot10^{7}$	135,8
	2000—2700	0,51	120,6
	2600—3250	42,8	153,1
In, ⊥	44—144	3,7	18,7
In, ∥	44—144	2,7	18,7
β-Sn, ⊥	160—228	10,7	25,2
β-Sn, ∥	160—228	7,7	23,6
Cs	870—1080	47	61,4
	750—950	11	67,2

Таблица 17.22

Параметры выражения (17.15) для коэффициента самодиффузии в твердых диэлектриках [7]

Параметр	Ar	C (графит)	Ge	α-β белый	Xe
t, °С	155	1995—2547	730—910	0—30	—152÷—116
D_0, см²/сек	350	10	10,8	$1,07\cdot10^{-8}$	7,3
Q, ккал/моль	4,15	163	69,4	9,4	7,4

Таблица 17.23

Параметры выражения (17.15) для диффузии малой примеси в серебре

Примесь	T, °K	D_0, см²/сек	Q, ккал/моль
Fe	718—927	2,42	49,04
Co	—	104	59,9
Ni	750—950	21,9	54,8
Cu	700—950	1,23	46,1
Zn	640—925	0,54	41,7
Ge	—	0,084	36,5
Ru	794—945	180	65,8
Pd	735—950	9,67	50,75
Ag	450—900	0,81	45,6
Cd	592—937	0,44	41,7
In	592—937	0,41	40,6
Sn	592—937	0,25	39,3
Sb	468—942	0,17	38,3
Au	660—950	0,26	45,6
Hg	650—950	0,08	38,1
Tl	650—800	0,15	37,9
Pb	700—825	0,22	36,1

Таблица 17.24

Параметры выражения (17.15) для диффузии малой примеси в меди

Примесь	T, °K	D_0, см²/сек	Q, ккал/моль
Fe	719—1074	1,4	51,8
Co	701—1077	1,93	54,1
Ni	743—1076	2,7	56,5
Cu	500—1000	70	56
Zn	—	0,34	45,6
Ga	—	0,55	45,9
As	—	0,12	42,0
Pd	807—1056	1,71	54,37
Ag	—	0,63	45,5
Cd	—	0,93	45,07
Sb	603—1000	0,34	42,0
Au	700—1000	0,15	45,7
Hg	—	0,35	44
Tl	785—996	0,71	43,3

Таблица 17.25

Параметры выражения (17.15) для диффузии малой примеси в золоте

Примесь	T, °K	D_0, см²/сек	Q, ккал/моль
Fe	701—948	0,062	41,6
Co	702—948	0,068	41,6
Ni	702—948	0,034	42,0
Ag	700—1007	0,072	40,2
Au	704—1048	0,094	41,7
Pt	700—1055	7,6	60,9
Hg	499—1027	0,116	37,4

Таблица 17.26

Параметры выражения (17.15) для диффузии малой примеси в никеле [7]

Примесь	T, °C	D_0, см²/сек	Q, ккал/моль
Mg	800—970 1100—1300	$2,3\cdot10^{-4}$ 0,44	31,3 56
Al	800—970 1100—1300	1,1 1,87	59,5 64
Si	600—970 1100—1300	10,6 1,5	64,7 61,7
Ti	1100—1300	0,86	61,4
Cr	600—900 1100—1260	0,03 1,1	40,6 65,1
Mn	1100—1300	7,5	67,1
Fe	900—1500	0,8	61
Co	748—1192 1155—1373	0,76 1,11	64,7 64,9
Cu	1054—1359	0,57	61,7
Mo	1100—1300	3	68,9
W	1100—1300	11,1	76,8
Au	900—1100	2	65

Таблица 17.27

Параметры температурной зависимости коэффициента диффузии малой примеси в β-Ti, аппроксимируемой выражением

$$D = D_{0l}\exp(-Q_l/kT) + D_{0t}\exp(-Q_t/kT)^{*}$$

Примесь	T, °C	D_{0l}, см²/сек	Q_l, ккал/моль	D_{0t}, см²/сек	Q_t, ккал/моль
Ti	900—1640	2	29,8	1,9	59,6
P	945—1600	36,2	24,1	5	56,5
Sc	919—1250	21	32,7	34	—
V	900—1650	10	34,7	3,4	61,6
Cr	950—1640	74	36,6	14	65,5
Mn	940—1640	76	34,3	12	64,5
Fe	910—1640	80	30	15	60,7
Co	920—1640	120	30,9	16	61,3
Ni	940—1640	170	31,6	20	60
Nb	1030—1640	13	34,9	9,6	69,5
Mo	900—1640	7	36,9	3,6	66
Sn	953—1606	38	31,6	9,5	69,5
Ta	1000—1640	7,2	36	50	80

* При низких температурах преобладает первый член выражения, при высоких — второй.

Таблица 17.28

Параметры выражения (17.15) для взаимной диффузии металлов и сплавов [1]

Диффундирующий компонент	Диффузионная среда	Концентрация диффундирующего элемента, ат. %	t, °C	D_0, см²/сек	Q, ккал/моль
Ag	Al	1,26	466—573	1,1	32,6
	Au	9	850—1000	$2,9\cdot10^{-3}$	38,0
	Cr	3	720—800	$2,9\cdot10^{-3}$	37,2
	Pb	<0,12	220—285	$7,4\cdot10^{-2}$	16,2
Al	Cu	16—21	500—650	$7,1\cdot10^{-2}$	39,2
Au	Ag	100	216—601	$5,3\cdot10^{-4}$	29,8
		16,4	767—916	$1,1\cdot10^{-4}$	26,6
	Cu	2,4—3,5	400—970	$6,8\cdot10^{-5}$	22,5
	Pb	100 или 0,03—0,09	100—300	0,35	14,0
B	α-Fe	—	—	10^{3}	62,0
Bi	Pb	2,6	220—285	$1,83\cdot10^{-3}$	19,4
C	Fe	Карбонизация	800—1100	$1,67\cdot10^{-5}$	28,7
		1,1 вес. %	900—1250	0,486	36,6
		0,1—1 вес. %	750—1250	0,12÷0,07	32,6
	γ-Fe	—	—	$7,9\cdot10^{-2}$	18,1
		—	—	$2\cdot10^{-2}$	20,1
Cd	Ag	2,0	650—895	$4,9\cdot10^{-5}$	22,35
		—	—	0,44	41,7
	Cu	3	720—860	$3,04\cdot10^{-4}$	23,7
	Pb	1,6	167—252	$1,83\cdot10^{-3}$	15,4
Co	α-Fe	—	—	0,4	54
	γ-Fe	—	—	$1,2\cdot10^{6}$	104
	Сплав	—	—	90	80
Cr	α-Fe	—	—	$3\cdot10^{1}$	82
	γ-Fe	—	—	$1,8\cdot10^{5}$	97
	Сплав	—	—	10	75
Cs	W	1-й адсорбционный слой	27—427	0,2	14,0
		2-й адсорбционный слой	27—427	$1,64\cdot10^{-3}$	23,0
Cu	Ag	2,6	650—895	$6,9\cdot10^{-5}$	24,8
	Al	Эвтектика	440—540	2,3	34,9
		0,26 или 0,17	457—565	$6,4\cdot10^{-3}$	32,6
	Au	100	301—616	$1,06\cdot10^{-3}$	27,4
		25,6	443—740	$5,6\cdot10^{-4}$	27,4
	Ge	—	—	$1,9\cdot10^{-4}$	4,1
	Pt	13,9	1041—1461	$4,6\cdot10^{-3}$	55,7
	Латунь (46% Zn)	—	—	$3,8\cdot10^{-5}$	24,9
Fe	Au	18,3	753—1003	$1,16\cdot10^{-4}$	24,4
	20% Fe, Ni, C	—	—	$18\cdot10^{-0,02[C]}$*	(75÷6) [C]*
		—	—	$71\cdot10^{-0,63[C]}$	(75÷5) [C]
	Ni	—	—	$6,4\cdot10^{-5}$	51,0
	W	0,01	1027—2027	11,5	140,0
Ge	Ge	Самодиффузия	—	67	73,5
Hg	Cd	4	156—232	2,6	19,6
In	Ag	20	650—895	$7,3\cdot10^{-4}$	24,4
		—	—	0,41	40,3
Li	Ge	—	—	$2,5\cdot10^{-3}$	11,8
	Si	—	—	$2,3\cdot10^{-3}$	15,2
Mg	Al	Эвтектика	365—449	$1,6\cdot10^{-2}$	38,5
		5,5—11,0	395—577	0,12	28,6
Mn	Cu	8—11,4	400—850	$7,2\cdot10^{-5}$	23,2
Mo	W	Монокристалл	1533—2260	$6,3\cdot10^{-1}$	80,5
		Поликристалл	1533—2260	$5\cdot10^{-2}$	80,5
N	Fe	—	—	$3,1\cdot10^{-3}$	18,0
		—	—	$3\cdot10^{-3}$	16,2
		—	—	$6,6\cdot10^{-3}$	18,6
	Ti	—	—	$2,1\cdot10^{-2}$	22,5
	α-Ti	—	—	$1,2\cdot10^{-2}$	45,3
	β-Ti	—	—	0,35	33,8

* [C] — концентрация углерода, ат. %.

Диффундирующий элемент	Диффузионная среда	Концентрация диффундирующего элемента, ат. %	t, °C	D_0, см²/сек	Q, ккал/моль
Ni	Au	15,0	800—1023	$1,74\cdot10^{-3}$	31,2
	Cu	7,5—11,8	650—950	$6,5\cdot10^{-6}$	29,8
	Pt	14,9	1043—1401	$7,8\cdot10^{-5}$	43,1
O	β-Ti	—	—	1,6	48,2
Pd	Ag	20,2	444—917	$6,4\cdot10^{-6}$	20,2
	Au	17,1	727—970	$1,13\cdot10^{-5}$	21,9
	Cu	4,3—6,2	200—900	$1,6\cdot10^{-6}$	39,0
Pt	Au	20,1	740—995	$1,94\cdot10^{-5}$	39,0
	Cu	2,4—3,5	400—900	$1,0\cdot10^{-6}$	21,0
Sb	Ag	2,0	650—895	$5,3\cdot10^{-6}$	21,7
Si	Al	0,5	465—600	0,9	30,15
Sn	Ag	20	650—895	$7,8\cdot10^{-6}$	21,4
	Cu	3,9—5,6	400—850	$4,1\cdot10^{-3}$	21,2
β-Sn	Pb	2,0	215—285	4,0	28,2
Th	W	Диффузия на границе между зернами	1780—2227	1,13	94,0
		Объемная диффузия	2127	1,0	120
		Поверхностная диффузия	1380	0,47	66,4
Tl	Pb	2,0	220—283	$2,5\cdot10^{-2}$	19,4
U	W		1727	1,14	100,0
W	α-Fe	—		380	70
	γ-Fe	—	—	10^{3}	90
	Сталь	—		13	75
Y	W	—	1727	0,11	62
Zn	Zn	Самодиффузия в Zn чистотой 99,990%	—	0,22	14,3
		99,99%	—	0,38	14,6
	Al	0,64	215—555	12	27,8
	Cu	6,8—9,7	360—880	$3\cdot10^{-6}$	19,7
		3	720—860	$3,7\cdot10^{-6}$	22,0
		0—28,6	641—684	$3,2\cdot10^{-3}$	42,0
	β-Latyнь	—	—	0,024	22,8
Zr	W	—	1727	1,1	78,0

Таблица 17.29

Параметры соотношения (17.15) для диффузии металлов в солях [1]

Диффундирующий металл	Диффузионная среда	D_0, см²/сек	Q, ккал/моль
Au	NaCl	0,2	24,6
	KCl	11,0	30,0
Cu	NaCl	0,6	25,4
	KCl	55,0	30,4
Ni	NaCl	0,2	26,4

Таблица 17.30

Параметры соотношения (17.15) для диффузии иона Ag^+ в кристаллах [1]

Диффузионная среда	T, °K	D_0, см²/сек	Q, ккал/моль
α-AgI	454—774		2,26
α-CuI	680—753	$4,5\cdot10^{-3}$	6,76
α-CuS	585—1102	$8,27\cdot10^{-4}$	4,57
α-Cu_2Te	603—794	2,4	20,86
α-AgI	451—701	$1,68\cdot10^{-4}$	3,25
α-Ag_2S	447—694	$1,6\cdot10^{-3}$	3,18
α-Ag_2Se	421—675	$1,76\cdot10^{-4}$	2,94
α-Ag_2Te	426—678	$3,85\cdot10^{-3}$	2,66
α-$AgBr$	473—653	$5,85\cdot10^{-4}$	4,57
NaCl	<550	1,6	17,70
	>550	3,13	41,40
$PbCl_2$	439—749	7,7	36,8
PbJ_2	367—458	4,9—10,6	30,0
	528—589	10,6	39,4
PbS	733—1043	1,3	42,0
NaBr	—	60	47,5
α-Ag_2Se	—	$6,7\cdot10^{-4}$	20,04

Таблица 17.31

Коэффициенты диффузии ионов в кристаллах при различных температурах [1]

Диффундирующий ион	Диффузионная среда	T, °K	D, 10^{-9} см²/сек
Ag^+	α-AgI	454	17,7
		500	21,2
		551	28,7
		594	33,3
		651	40,1
		701	46,1
		744	48,5
	CuBr	518	51
	α-CuI	686	15,6
		722	22,5
		763	23,6
Cu^+	α-Cu_2S	503	1,85
		603	4,6
		726	9,4
	α-Cu_2Te	603	0,359
		740	1,96
		754	4,68
	Cu_3Sb	723	0,139
Li^+	AgCl	511	0,24
	α-AgI	753	37—41
	α-Ag_2S	443	0,4
	α-Ag_2S	503	4,1
		603	6,3
		693	16,5
Na^+	AgCl	723	0,116
Pb^{++}	AgBr	573	0,023
	$PbCl_2$	473	4,5
		523	11
		578	15
		653	23
		573	$2,1 \cdot 10^{-4}$
		673	$2,6 \cdot 10^{-3}$
Pb^{++}	$PbCl_2$	439	$1,7 \cdot 10^{-11}$
		498	$1,97 \cdot 10^{-9}$
		743	0,396
	PbI_2	387	$7,3 \cdot 10^{-11}$
		491	$1,35 \cdot 10^{-9}$
		638	$7,35 \cdot 10^{-9}$
Cl^-	AgI	473	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Se^{--}	Cu_2S	644	$1,1 \cdot 10^{-8}$
		967	$4,9 \cdot 10^{-8}$

Таблица 17.32

Коэффициенты взаимной диффузии твердых солей [1]

Диффундирующее вещество	Диффузионная среда	t, °C	D, 10^{-11} см²/сек
Ag (из $AgNO_3$)	Na-стекло	354	26,2
	Na-гернгут	364	14,8
Ag_4Sn	Cu_4Sn	450	231
$BaMoO_4$	$BaWO_4$	900	9,61
$BaWO_4$	$BaMoO_4$	950	3,47
$MgMoO_4$	$MgWO_4$	800	2,21
$MgWO_4$	$MgMoO_4$	900	1,36
$SrMoO_4$	$SrWO_4$	950	9,14
$SrWO_4$	$SrMoO_4$	950	3,01
$ZnMoO_4$	$ZnWO_4$	800	3,96
		850	6,26
$ZnWO_4$	$ZnMoO_4$	800	1,50
		850	5,89

Таблица 17.33

Параметры соотношения (17.15) для диффузии газов в твердых телах [1]

Диффундирующий газ	Диффузионная среда	t, °C	D_0, 10^{-6} см²/сек	Q, ккал/моль
H_2	SiO_2	200	3,5—13,7	10,1
		500	8,3—14,5	
He	SiO_2	20	3,5—7,9	5,5
		500	0,64—3,2	
	Пирекс	20	1,3	8,7
NH_3	Доломит*	500	5,5	
		—	0,0025	11,48

* Природный силикат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник химика. Т. 3. М., «Химия», 1964.
2. Matteo T. R., Mason E. A. J. Phys. Chem. Ref. 1972, v. 1, p. 3.
3. Полкина Л. А., Смирнов Б. М., Чибисов М. И. Диффузия метастабильных атомов инертных газов в собственном газе. «Ж. эксперим. и теор. физ.», 1969, т. 56, с. 340.
4. Смирнов Б. М. Атомные столкновения и элементарные процессы в плазме. М., Атомиздат, 1968.
5. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. Пер. с англ. Л., «Химия», 1971.
6. Bretszneijder S. Prediction of Transport and Other Physical Properties of Fluids. Warszawa, 1971.
7. Adda Y., Philibert J. La diffusion dans les solides. V. 2. Paris, Press Universitaires de France, 1966.

ГЛАВА 18

ЭФФЕКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ АТОМОВ И ИОНОВ

Понятие атомного и ионного радиусов в значительной мере условно. Межатомные расстояния и молекулярные диаметры всегда зависят от характера действующих сил в конкретном физическом процессе, по которому определяются «размеры» атомов. Эффективные размеры атомов и молекул могут быть вычислены по коэффициентам диффузии и вязкости, определены по расстояниям, на которые сближаются атомы в молекулах и кристаллах, по средним радиусам рассеяния молекулярных пучков и т. д. В табл. 18.1 значения, заимствованные из работы [1], представляют собой ионные радиусы, межатомные расстояния в кристаллических структурах с координационным числом 12; из работы [9] — расстояния максимальной плотности заряда в нейтральном атоме, и для ионов соответствующие расстояние отсчитано до точки, где радиальная плотность заряда падает до 10% своего максимального значения. Зарядность ионов указана в круглых скобках перед значением ионного радиуса.

Таблица 18.1

Атомные и ионные радиусы, Å

Атомный номер	Химический элемент	Атомный радиус	(Заряд иона) Ионный радиус
1	H	0,46[1]; 0,53[2]	(+1) 0,00; (−1) 1,36[1]; (−1) 2,02[2]
2	He	1,22[1]; 1,07[3]	
3	Li	1,55[1]; 1,51[2]	(+1)0,60[4]; (+1) 0,76[6]
4	Be	1,13[1]; 1,09[2]	(+2) 0,34[1]; (+2) 0,42[2]
5	B	0,91[1]; 0,84[2]	(+3) 0,20[1]; (+3) 0,32[2]
6	C	0,77[1]; 0,60[2]	(+4) 0,2[1]; (−4) 2,6[1]; (−4) 0,27[2];
7	N	0,71[1]; 0,67[2]	(−3)1,48[1]; (−3) 2,07[2]; (+5) 0,15[1]
8	O	0,66[2]	(−2) 1,36[1]; (−2) 1,40[2] (+6) 0,09[4]
9	F	0,53[2]	(−1) 1,29[2]; (+7) 0,19[4]
10	Ne	1,60[1]; 1,1[2]	
11	Na	1,89[1]; 2,05[2]	(+1) 0,98[1]
12	Mg	1,60[1]	(+2) 0,74[1]
13	Al	1,43[1]; 1,39[2]	(+3) 0,57[1]; (+3) 0,62[2]
14	Si	1,34[1]; 1,18[2]	(+4)0,39[1]; (+4)0,51[2]; (−4)2,71[5]
15	P	1,3[1]; 1,02[2]	(−3)1,86[1]; (−3)2,48[2]; (+5)0,35[1]
16	S	0,96[2]	(−2) 1,82[1]; (+6) 0,29[1]
17	Cl	0,80[2]	(−1) 1,81[1]; (+7) 0,26[1]
18	Ar	1,92[1]; 1,56[2]	
19	K	2,36[1]; 2,8[2]	(+1)1,33[1]
20	Ca	1,97[1]; 2,3[2]	(+2) 1,04[1]
21	Sc	1,64[1]; 2,0[2]	(+3) 0,83[1]
22	Ti	1,46[1]; 1,9[2]	(+2)0,78[1]; (+3)0,69[1]; (+4)0,64[1]
23	V	1,34[1]; 1,8[2]	(+2)0,72[1]; (+3)0,67[1]; (+4) 0,61[1]; (+5)0,4[1]
24	Cr	1,27[1]; 1,7[2]	(+2)0,83[1]; (+3)0,64[1]; (+6)0,35[1]
25	Mn	1,30[1]; 1,7[2]	(+2)0,91[1]; (+3)0,70[1]; (+4) 0,52[1]; (+7) 0,46[1]
26	Fe	1,26[1]; 1,6[2]	(+2)0,80[1]; (+3) 0,67[1]
27	Co	1,25[1]; 1,5[2]	(+2) 0,78[1]; (+3) 0,64[1]
28	Ni	1,24[1]; 1,4[2]	(+2)0,74[1]; (+3) 0,35[4]
29	Cu	1,28[1]; 1,4[2]	(+1)0,98[1]; (+2)0,80[1]
30	Zn	1,39[1]; 1,5[2]	(+2)0,83[1]
31	Ga	1,39[1];	(+3) 0,62[1]
32	Ge	1,39[1]	(+2)0,65[1]; (−4)0,44[1]; (−4) 2,72[5]
33	As	1,48[1]	(+3)0,69[1]; (+5)0,47[1]; (−3) 1,91[1]
34	Se	1,6[1]	(−2)1,93[1]; (+4)0,69[1]; (+6)0,30[1]
35	Br	1,05[2]	(−1) 1,96[1]; (+7) 0,39[1]
36	Kr	1,98[1]; 1,77[2]	
37	Rb	2,46[1]; 3,1[2]	(+1)1,49[1]
38	Sr	2,15[1]; 2,5[2]	(+2) 1,20[1]
39	Y	1,81[1]	(+3) 0,97[1]
40	Zr	1,60[1]	(+4) 0,82[1]
41	Nb	1,45[1]	(+4) 0,67[1]; (+5) 0,69[1]
42	Mo	1,39[1]	(+4) 0,68[1]; (+6) 0,65[1]
43	Tc	1,36[1]	
44	Ru	1,34[1]	(+4) 0,62[1]
45	Rh	1,34[1]	(+3) 0,75[1]; (+4) 0,65[1]
46	Pd	1,37[1]	(+4) 0,64[1]
47	Ag	1,44[1]	(+1) 1,13[1]; (+1) 1,22[2]
48	Cd	1,56[1]; 1,7[2]	(+2) 0,99[1]
49	In	1,66[1]	(+1) 1,33[1]; (+3) 0,92[1]

Продолжение табл. 18.1

Атомный номер	Химический элемент	Атомный радиус	(Заряд иона) Ионный радиус
50	Sn	1,58[1]; 1,46[2]	(−2)1,02[1]; (+4)0,67[1]; (+4) 0,80[2]
51	Sb	1,61[1]	(+3)0,90[1]; (+5)0,62[1]; (−3) 2,08[1]
52	Te	1,7[1]	(−2)2,11[1]; (+4)0,89[1]; (+6)0,56[1]
53	I	1,24[2]	(−1) 2,20[1]; (+7) 0,50[1]
54	Xe	2,18[1]; 1,99[2]	
55	Cs	2,68[1]; 3,4[2]	(+1) 1,65[1]
56	Ba	2,21[1]; 2,8[2]	(+2) 1,38[1]; (+2) 1,47[2]
57	La	1,87[1]	(+3) 1,04[1]; (+4) 0,90[1]
58	Ce	1,83[1]	(+3) 1,02[1]; (+4) 0,88[1]
59	Pr	1,82[1]	(+3) 1,00[1]; (+4)0,90[6]
60	Nd	1,82[1]	(+3) 0,99[1]
61	Pm	—	(+3) 0,98[1]
62	Sm	1,81[1]	(+3) 0,97[1]
63	Eu	2,02[1]	(+3) 0,97[1]
64	Gd	1,79[1]	(+3) 0,94[1]
65	Tb	1,77[1]	(+3) 0,89[1]; (+4) 0,84[6]
66	Dy	1,77[1]	(+3) 0,88[1]
67	Ho	1,76[1]	(+3) 0,86[1]
68	Er	1,70[1]	(+3) 0,85[1]
69	Tm	1,74[1]	(+3) 0,85[1]
70	Yb	1,93[1]	(+3) 0,81[1]
71	Lu	1,74[1]	(+3) 0,80[1]
72	Hf	1,59[1]	(+4) 0,82[1]
73	Ta	1,46[1]	(+5) 0,66[1]
74	W	1,40[1]	(+4) 0,68[1]; (+6)0,65[1]
75	Re	1,37[1]	(+6) 0,52[1]
76	Os	1,35[1]	(+4) 0,66[1]
77	Ir	1,36[1]	(+4) 0,65[1]
78	Pt	1,38[1]; 1,8[2]	(+4) 0,64[1]
79	Au	1,44[1]; 1,8[2]	(+1) 1,37[1]
80	Hg	1,60[1]; 1,8[2]	(+2) 1,12[1]
81	Tl	1,71[1]	(+1) 1,36[1]; (+3)1,05[1]
82	Pb	1,75[1]	(+2) 1,26[1]; (+4)0,76[1]
83	Bi	1,82[1]	(+3)1,20[1]; (+5)0,74[1]; (−3) 2,13[1]
87	Fr	2,80[1]	
88	Ra	2,35[1]	(+2) 1,44[1]
89	Ac	2,03[1]	(+3) 1,11[1]
90	Th	1,80[1]	(+3) 1,06[1]; (+4)0,95[1]
91	Pa	1,62[1]	(+3) 1,06[1]; (+4)0,91[1]
92	U	1,53[1]	(+3) 1,04[1]; (+4)0,89[1]
93	Np	1,50[1]	(+3) 1,02[1]; (+4)0,88[1]
94	Pu	1,62[1]	(+3) 1,01[1]; (+4)0,86[1]
95	Am	—	(+3) 1,00[1]; (+4)0,85[1]

Таблица 18.2

Диаметры молекул [2, 3]

Молекула	Диаметр молекулы, Å	Молекула	Диаметр молекулы, Å
H_2	2,5—2,77	NO	3,4
H_2O	3,60	N_2O	4,0
N_2	3,5	NH_3	3,0
O_2	2,94—3,56	CH_4	3,24—4,30
CO	3,12—3,70	Cl_2	3,55—5,66
CO_2	3,21—4,51		

Таблица 18.3

Радиусы многоатомных ионов в растворах [1]

Ион	Радиус, Å	Ион	Радиус, Å
H_3O^+	1,35	NO_3^-	1,89
CN^-	1,92	OH^-	1,53
ClO_4^-	2,36	SCN^-	1,95
$HCOO^-$	1,58	SH^-	2,09
MnO_4^-	2,40	SO_4^{2-}	2,30
NH_4^+	1,43		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Справочник** химика. Под ред. Б. П. Никольского. Т. 1. Изд. 3-е. Л., «Химия», 1971.
2. **Аллен К. У.** Астрофизические величины. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
3. **Кей Дж., Лаби Т.** Таблицы физических и химических величин. Пер. с англ. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз, 1962.
4. **Краткий** справочник по химии. Под ред. О. Д. Куриленко. Киев, «Наукова думка», 1965.
5. **Мелвин-Хьюз Э. А.** Физическая химия. Т. 1. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
6. **Дей М. К., Селбин Д.** Теоретическая неорганическая химия. Пер. с англ. М., «Химия», 1969.

IV. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

ГЛАВА 19

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

19.1. ВВЕДЕНИЕ

Высокая проводимость металлов связана с особенностью их электронного спектра, в котором непосредственно над заполненными уровнями находятся уровни свободные. На рис. 19.1 показаны различные схемы

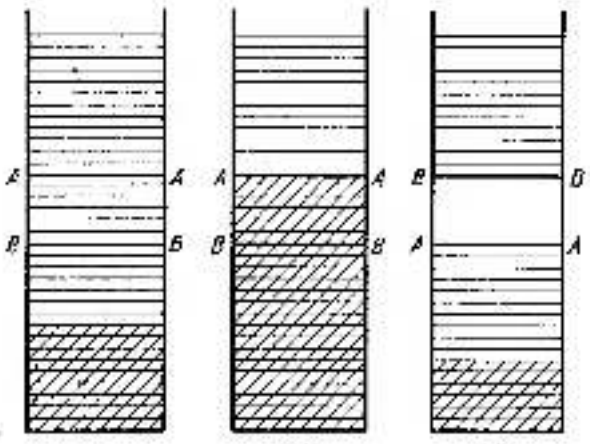


Рис. 19.1. Схема зон для металлов:

а, б — проводимость обусловлена неполным заполнением первой зоны; в — проводимость обусловлена перекрытием заполненной первой и второй зон [1]; АА — верхняя граница первой зоны; ББ — дно второй зоны. Горизонтальные линии — допустимые электронные уровни; штриховка — области занятых уровней.

энергетических зон, приводящие к проводимости металла за счет неполного заполнения нижней зоны или перекрытия зон.

Основные механизмы, приводящие к появлению конечного сопротивления металлов, таковы: 1) взаимодействие электронов с фононами; 2) столкновения электронов друг с другом; 3) взаимодействие электронов с примесными атомами и другими статическими дефектами кристаллической решетки. В магнитных металлах возможно также дополнительное взаимодействие электронов (например, со спиновыми волнами). Первые два из перечисленных механизмов имеют место в идеальном кристалле и обусловливают так называемое идеальное сопротивление, которое обращается в нуль при $T = 0$. Третий механизм является причиной остаточного сопротивления, которое может быть существенно различно для различных образцов одного и того же металла.

При достаточно высоких (по сравнению с температурой Дебая) температурах сопротивление определяется, как правило, фононным механизмом и увеличивается линейно с повышением температуры. В то же время целый ряд сплавов имеют весьма низкий или даже отрицательный температурный коэффициент сопротивления.

Сопротивление металла при плавлении возрастает, если его плотность уменьшается, и (в редких случаях) падает, если плотность металла при плавлении увеличивается.

При низких температурах поведение сопротивления металлов весьма сложно. У некоторых металлов и сплавов обнаруживается явление сверхпроводимости.

В этом разделе значительное место занимают металлы и сплавы, находящие широкое применение. В некоторых случаях для этих материалов приводятся также и неэлектрические свойства, связанные с их электротехническим применением. По той же причине включен в эту главу графит.

19.2. ЧИСТЫЕ МЕТАЛЛЫ

В табл. 19.1 представлены значения удельного сопротивления и температурного коэффициента сопротивления чистых металлов, а также, в некоторых случаях, отношение удельного сопротивления при температуре жидкого гелия к удельному сопротивлению при нормальных условиях, $\rho_{4,2K}/\rho_{273K}$, характеризующее достигнутую степень чистоты материала. В тех случаях, когда для данного металла приводятся более подробные данные, соответствующее указание дается в первом столбце таблицы. Металлы в таблице расположены в порядке возрастания массового числа.

В тех многочисленных случаях, когда данные различных авторов несколько отличались друг от друга, в таблицу включались только результаты, казущиеся наиболее достоверными.

Таблица 19.1

Удельное сопротивление чистых металлов

Металл	t, °C	$\rho \cdot 10^8$, Ом·м	$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dT}$, 10^{-3} К$^{-1}$	$\frac{\rho_{4,2\,K}}{\rho_{293\,K}}$	Литература
Литий	—197	1,31	—	—	[2]
	0	8,5	4,37	—	[4]
	99,3	12,7	—	—	[2]
	230 (ж.)	25,2	2,7	—	[2]
Бериллий (см. рис. 19.7 и табл. 19.2)	0	2,78	7,6	—	[4]
Графит (см. рис. 19.8, 19.9)	0	800			[2]
	100	830	—	—	[2]
	1000	870	—	—	[2]
	2000	1000	—	—	[2]
	2500	1100	—	—	[2]
Натрий (см. рис. 19.2 и табл. 19.3)	0	4,27	5,5	—	[4]
	20	4,2	5,0	—	[3]
	97,83(ж.)	6,75	—	—	[8]
	97,83(ж.)	9,60			[8]
Магний (см. табл. 19.2)	0	3,94	4,2	—	[4]
	20	4,4	4,2	—	[3]
Алюминий (см. рис. 19.10, 19.11)	—199	0,64		0,0065	[2, 4]
	—100	1,93	—	—	[2]
	0	2,50	4,67	—	[4]
	20	2,69	4,2	—	[3]
	100	3,86	—	—	[2]
	400	6,0	—	—	[2]
Калий (см. рис. 19.2 и табл. 19.3)	0	6,15	5,8	—	[3]
	64 (ж.)	13,46	—	—	[8]
	370 (ж.)	31,4	—	—	[8]
Кальций	0	3,6	4	—	[4]
	20	4,1	4,6	—	[3]
Титан	0	42	5,5	0,245	[4]
	20	55	3,5	—	[3]
Ванадий	0	18,2	—	—	[4]
	20	26	2,6	—	[3]
Хром	0	1,5			[4]
	20	18,9	5,86	—	[3]
Марганец	0(α)	710	0,17	—	[4]
	0(β)	91	1,4	—	[4]
Железо (см. рис. 19.12, 19.24)	—252,7	0,011	—	0,00126	[2]
	—206,3	0,652	—		[2]
	—192,5	0,844	—	—	[2]
	—100	5,92		—	[2]
	0(α)	8,71	6,57	—	[4]
	20	9,71	6,51	—	[3]
	100	16,61	6,8		[2]
	200	24,50	—	—	[2]
Кобальт	400	43,29	—	—	[2]
	0(α)	5,2	6,58	—	[4]
	20	6,24	6,04	—	[3]
	0—100	—	6,58	—	[2]

Продолжение табл. 19.1

Металл	t, °C	$\rho \cdot 10^8$, Ом·м	$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dT}$, 10^{-3} К$^{-1}$	$\frac{\rho_{4,2\,K}}{\rho_{293\,K}}$	Литература
Никель (см. рис. 19.13, 19.15, 19.27)	—182,5	1,44	—	—	[2]*
	78,2	4,31	—	—	[2]*
	0	6,141	6,00	—	[2]
	20	6,844	6,00	—	[2]
	100	10,327	4,3	—	[2]
	400	30,2	—	—	[2]*
Медь (см. рис. 19.16, 19.18, 19.23)	256,6	0,014	—	0,09	[2]
	—206,6	0,463	—	—	[2]
	150	0,567	—	—	[2]
	100	0,904	—	—	[2]
	0	1,55	4,33	—	[4]
	20	1,672	4,30	—	[3]
	100	2,28	—	—	[2]
	200	2,96	—	—	[2]
	500	5,08	—	—	[2]
	1000	9,42	—	—	[2]
	1500(ж.)	24,62	—	—	[2]
Цинк (см. табл. 19.2)	—183	1,02	—	0,2354	[2, 2, 4]
	—78	3,31	—	—	[2]
	0	5,45	4,2	—	[4]
	20	5,92	4,2	—	[3]
	92,5	8,0	—	—	[2]
	191,5	10,37	—	—	[2]
	300	13,25	—	—	[2]
	427(ж.)	37,3	—	—	[2]
	500	36,6	—	—	[2]
	600	34,9	—	—	[2]
	700	35,6	—	—	[2]
	800	35,6	—	—	[2]
	850	35,74	—	—	[2]
Теллур (см. табл. 19.2)	0	13,7	—	0,0025	[4]
	20(∥оси c)	54,3		—	[3]
	20(⊥оси c)	17,4	—	—	[3]
	20(∥оси b)	6,1		—	[3]
Молибден	0	26	—		[4]
	20	35		—	[3]
Рубидий	—190	2,5	—	—	[2]
	0	11,6	5,3	—	[4]
	35	13,4	—	—	[2]
	40(ж.)	19,6	—		[2]
Стронций	0(α)	20	5,0	—	[4]
Иттрий	20	22,76	—	—	[2]
	25	61,9	—	—	[19]
Цирконий	0	40,5	4,0	0,0421	[4]
Ниобий	0	23,3	2,28	—	[4]
	18	13,1	3,95		[3]
Молибден (см. табл. 19.11)	0	5,03	4,7	—	[4]
	127	19,36	—	—	[7]
	1127	44,6	—	—	[7]
	1727	66,6		—	[7]
	2327	91,8	—	—	[7]
Рутений	0	6,63	3,39	—	[9]
	25	7,427	—	—	[9]
	100	9,26		—	[9]

Продолжение табл. 19.1

Металл	T, °C	$\frac{T}{\Theta}$	$-\frac{d\rho}{\rho\,dT}\cdot 10^{-3}$, °C^{-1}	$\frac{\rho_{4,2K}}{\rho_{273K}}$	Литература
Родий	−100	0,70	—	—	[9]
	−78	3,1	—	—	[9]
	0	4,3	4,57	—	[9]
	25	4,9	—	—	[9]
	100	6,26	—	—	[9]
	200	8,2	—	—	[9]
	300	10,3	—	—	[9]
	400	12,5	—	—	[9]
	500	14,7	—	—	[9]
Палладий (см. табл. 19.7)	−258	0,09503	—	0,0105	[9]
	−78	7,096	—	—	[9]
	0	9,1	3,79	—	[9]
	100	14,0	—	—	[9]
	200	17,4	—	—	[9]
	400	24,3	—	—	[9]
	1400	49,5	—	—	[9]
Серебро (см. рис. 19.19 и табл. 19.10)	−258	0,00793	—	0,0054	[9]
	−78	1,01	—	—	[9]
	0	1,469	4,033	—	[9]
	100	2,0696	—	—	[9]
	200	2,6854	—	—	[9]
	400	3,979	—	—	[9]
Кадмий (см. табл. 19.2)	−252,9	0,17	—	$1,9\cdot10^{-4}$	[2, 4]
	−200	1,66	—	—	[2]
	−100	4,8	—	—	[2]
	0	6,73	4,26	—	[4]
	20	7,4	4,2	—	[3]
	100	9,62	—	—	[2]*
	300	16,50	—	—	[2]
	400(ж.)	33,70	—	—	[2]
	500	45,12	—	—	[2]
	700	55,78	—	—	[2]
Индий	0	8,2	5,1	0,0039	[4]
Олово (см. табл. 19.2)	−184	3,4	—	0,00079	[2, 4]
	−78	8,8	—	—	[2]
	0	10,4	4,63	—	[4]
	20	12,8	4,2	—	[3]
	91,45	16,2	—	—	[2]
	200	20,3	—	—	[2]
	225	22,0	—	—	[2]
	235(ж.)	47,6	—	—	[2]
	700	61,22	—	—	[2]
Сурьма (см. табл. 19.2)	−190	10,5	—	—	[2]
	0	32,1	5,1	—	[4]
	20	41,7	—	—	[2]
	600(ж.)	120	—	—	[2]
Теллур	19,6	$9\cdot10^{4}$	—	—	[2]
Цезий	−187	0,95	—	—	[2]
	0	19	5,0	—	[2, 4]
	20	21	4,8	—	[2]*
	27	22,2	—	—	[2]
	30(ж.)	36,6	—	—	[2]
Барий	0	36	6,1	—	[4]
	20	50	—	—	[3]

Продолжение табл. 19.

Металл	T, °C	$\frac{T}{\Theta}$	$-\frac{d\rho}{\rho\,dT}\cdot 10^{-3}$, °C^{-1}	$\frac{\rho_{4,2K}}{\rho_{273K}}$	Литература
Лантан	25(α)	56,8	—	—	[19]
	500(β)	98	—	—	[19]
	890(γ)	126	—	—	[19]
Церий	−249(α)	34	—	—	[19]
	25(γ)	75,3	—	—	[19]
	770(δ)	123	—	—	[19]
Празеодим	25(α)	68	—	—	[19]
	890(β)	137	—	—	[19]
Неодим	25(α)	64,3	—	—	[19]
	890(β)	137	—	—	[19]
Самарий	25(α)	68	—	—	[19]
Европий	25	81,3	—	—	[19]
Гадолиний	25(α)	140,3	—	—	[19]
Диспрозий	25	56		—	[19]
Гольмий	25	87		—	[19]
Эрбий	25	107		—	[19]
Тулий	25	79	—	—	[19]
Иттербий	25(α)	27	—	—	[19]
Лютеций	25	70	—	—	[19]
Гафний (см. табл. 19.2)	0	26,5	4,4	0,0947	[4]
Тантал	0	12,4	8,6	—	[4]
Вольфрам (см. табл. 19.2, 19.13, 19.15, 19.16)	−183 (ось [100])	0,802	—	—	[6]
	−183 (ось [111])	0,848	—	—	[6]
	−78,5 (ось [100])	3,22	—	—	[6]
	−78,5 (ось [111])	3,17	—	—	[6]
	0	4,89	4,63	—	[4]
	20	5,5	4,6	—	[3]
	600	16,85	—	—	[6]
	1000	31,74	—	—	[6]
	1500	51,4	—	—	[6]
	2000	72,19	—	—	[6]
	2500	94,13	—	—	[6]
	3000	117,2	—	—	[6]
	3500	131,4	—	—	[6]
Рений (см. табл. 19.14 – 19.16)	0	18,9	3,1	—	[4]
Осмий	0	8,75	4,2	—	[9]
	20	9,5	4,2	—	[3]
	26	9,66	—	—	[9]
	100	12,43	—	—	[9]

Металл	T, °C	λ, 10^{-3} вт/см·К	$\frac{1}{\lambda}\frac{d\lambda}{dT}$, 10^{-3} град$^{-1}$	$\frac{\lambda_{4,2К}}{\lambda_{273К}}$	Литература
Иридий	—192	1,373	—	—	[9]
	—78	4,232	—	—	[9]
	0	4,85	—	—	[9]
	20	5,3	4,9	—	[3]
	100	6,75		—	[9]
	200	8,71	—	—	[9]
	300	10,72	—	—	[9]
	400	12,76	—	—	[9]
	500	14,80	—	—	[9]
Цезий (см. табл. 19.16)	—258	0,0048		0,0063	[9]
	—78	0,7297	—	—	[9]
	0	0,81	3,927	—	[9, 4]
	100	13,65	—	—	[9]
	200	17,39		—	[9]
	400	24,50	—	—	[9]
	800	37,34		—	[9]
	1200	48,34	—	—	[9]
	1500	55,34		—	[9]
Золото	—258	0,014	—	0,0069	[9]
	—192	0,4904	—	—	[9]
	78	1,4392		—	[9]
	0	2,665	4,5	—	[9]
	100	2,8673	—	—	[9]
	200	3,735	—	—	[9]
	300	4,615	—	—	[9]
	400	5,534	—	—	[9]
	500	6,62	—	—	[9]
	1000	12,54	—	—	[9]
	1500(ж.)	37,0		—	[9]
Ртуть (см. табл. 19.2, 19.3)	—258	0,0158	0,009	—	[4]
	—183,5	6,97	—	—	[2]
	—50,3	12,3	—	—	[2]
	—45,5	21,2			[4]
	—39,2	25,5	—	—	[2]
	—36,1(ж.)	30,6		—	[2]
	0	34,7	—	—	[2]
	20	35,8	0,69	—	[2, 3]
	50	98,5	—	—	[2]
	100	103,25	—	—	[2]
	200	114,27	—	—	[2]
	300	127,0	—	—	[2]
	350	136,5	—	—	[2]

Металл	T, °C	λ, 10^{-3} вт/см·К	$\frac{1}{\lambda}\frac{d\lambda}{dT}$, 10^{-3} град$^{-1}$	$\frac{\lambda_{4,2К}}{\lambda_{273К}}$	Литература
Таллий	183	4,08	—	—	[2]*
	—78	11,8	—	—	[2]
	0	17,6	—	—	[2]
	0	15	5,2	—	[4, 3]
Свинец	—252,9	0,39	—	—	[2]
	—203	4,02	—	—	[2]
	—192,8	5,22	—	—	[2]
	—103	11,8	—	—	[2]
	0	19,3	4,22	—	[4]
	20	20,6	3,36	—	[3]
	100	27,8	—	—	[2]
	200	38,0	—	—	[2]
	300	50	—	—	[2]
	333(ж.)	95,0	—	—	[2]
	400	96,3	—	—	[2]
	600	107,2	—	—	[2]
	800	116,2	—	—	[2]
Висмут (см. табл. 19.2)	—200	54,8	—	—	[2]
	—100	75,6	—	—	[2]
	0	107	4,45	—	[4]
	20	116	4,2	—	[3]
	100	153,5		—	[2]
	200	214	—	—	[2]
	400(ж.)	126,9	—	—	[2]
	500	139,9		—	[2]
	700	150,6	—	—	[2]
Торий	0	10,1	3,3	0,017	[4]
	20	18,62	2,3	—	[3]
	20—1800	—	2,1	—	[2]
Уран (см. рис. 19.20 и табл. 19.19)	20	29	3,4	0,5445	[3]
Плутоний (см. рис. 19.21)	0	100	—2,97	—	[4]

* Работы [2]*, см. 899 г.

Таблица 19.2

Удельное сопротивление для анизотропных металлических кристаллов [4, 6]

Металл	t, °C	Кристаллическая структура	$\rho_{\parallel} \cdot 10^{6}$, ом·см	$\rho_{\perp} \cdot 10^{6}$, ом·см	$\frac{\rho_{\perp}}{\rho_{\parallel}}$
Бериллий	0	Гексагональная	3,58	3,49	0,88
Магний	0	»	3,5	4,22	1,21
Цинк	0	»	5,50	5,39	0,96
Галлий	20	Ромбическая	55,5	17,3	0,31
Мышьяк	0	Гексагональная	26	23,8	0,92
Кадмий	0	»	7,73	6,35	0,87
Олово	0	Тетрагональная	9,09	13,08	1,46
Сурьма	0	Ромбическая	26,3	36,0	1,37
Таллий	0	Гексагональная	32,7	32,0	0,98
Висмут	183	Кубическая	0,892 (ось [100])	0,843 (ось [111])	0,945
	—78,5	»	3,22 (ось [100])	3,17 (ось [111])	0,985
Ртуть	—45,5	Ромбическая	17,6	23,5	1,32
Висмут	0	»	127	99	0,78

Изменение сопротивления при плавлении

При плавлении проводимость большинства металлов падает; у тех металлов, объем которых увеличивается при плавлении (висмут, сурьма, галлий), проводимость возрастает [1] (см. рис. 19.2, табл. 19.3).

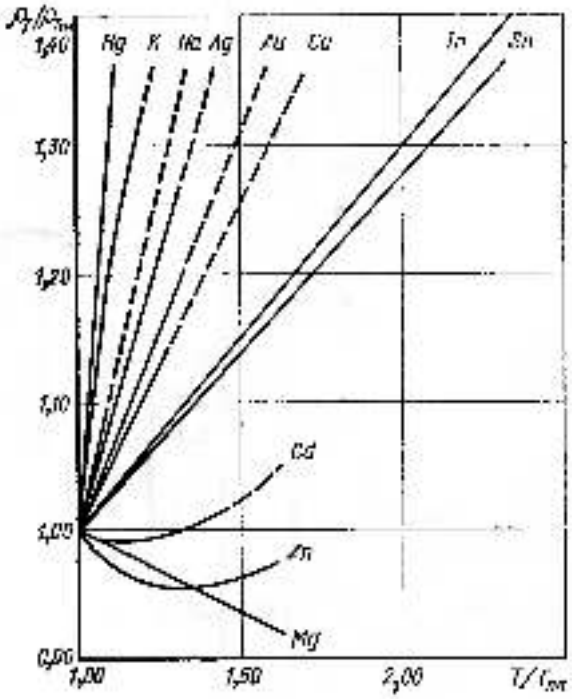


Рис. 19.2. Зависимость относительного удельного сопротивления различных жидких металлов $\rho_T/\rho_{T_{пл}}$ от $T/T_{пл}$ [4] (пунктир—экстраполяция).

Таблица 19.3

Изменение относительного сопротивления некоторых металлов при плавлении [4]

Металл	$T_{пл}$, °K	$\rho_{ж}/\rho_{тв}$
Литий	453	1,08
Натрий	370	1,16
Магний	924	1,64
Алюминий	934	1,52(1,64) [7]
Калий	337	1,16
Железо	1608	1,00
Медь	1357	2,07
Цинк	693	2,11
Галлий	303	0,47 [1]
Рубидий	312	1,41
Серебро	1234	1,9
Кадмий	594	1,49
Индий	388	2,12
Олово	505	2,11
Сурьма	904	0,71
Теллур	722	2,00
Цезий	303	1,06
Золото	1336	2,28
Ртуть	234	3,36
Свинец	601	1,98
Висмут	544	0,47

Проводимость жидких металлов

Натрий [8]

Удельное сопротивление твердого натрия в интервале температур от 20 до 97,83°C дается формулой

$$\rho = (4,477 + 0,19927t - 0,000017t^2)\cdot 10^{-6}\ \text{ом·см};$$

удельное сопротивление жидкого натрия

$$\rho = (6,995 + 0,03457t)\cdot 10^{-6}\ \text{ом·см}.$$

Здесь t — температура, °C.

Таблица 19.4

Удельное сопротивление натрия

T, °C	ρ, 10^{-8} ом·см	T, °C	ρ, 10^{-8} ом·см
−196	1,0	120	10,365
−75	2,6	140	11,055
0	4,477	180	12,435
20	4,870	200	13,125
40	5,314	260	15,196
60	5,780	300	16,575
80	6,279	360	18,645
97,83 (тв.)	6,750	400	20,025
97,83 (ж.)	9,600		

Калий, сплав натрий — калий

Таблица 19.5

Зависимость удельного сопротивления жидкого калия от температуры

T, °C	64	100	150	200	250	300	350
ρ, 10^{-8} ом·см	13,06	15,49	18,7	21,9	25,0	28,2	31,4

Таблица 19.6

Зависимость удельного сопротивления сплавов натрия и калия, 10^{-8} ом·см, от температуры

T, °C	Массовое содержание калия, %		
	25,5	78	90
100	41,61	45,03	
200	47,23	51,33	41,4
300	54,33	58,56	51,1
400	62,21	65,65	58,6
500	69,37	73,48	67,3
600	78,29	82,61	77,3
700	88,23	91,76	89,3
800	99,48	104,51	—

19.8. ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ПРОВОДИМОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Проводимость металлов, как правило, увеличивается при приложении к ним внешнего гидростатического давления. Коэффициент $\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dp}$ максимален у щелочных металлов, имеющих также и максимальную сжимаемость. Вместе с тем этот коэффициент очень сильно изменяется от элемента к элементу, а зависимость $\rho = f(p)$ в изученном интервале давлений (до 100—120 кбар) далеко не всегда монотонна. У ряда элементов на кривой $\rho = f(p)$ обнаруживаются скачки, используемые в физике высоких давлений в качестве реперных точек давления (см. табл. 19.7, рис. 19.3).

Таблица 19.7

Значения коэффициента $\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dp}$, 10^{-13} см²/кГ, для различных металлов при их гидростатическом сжатии

Металл	T, °K	Давление, кбар		
		0	10	30
Литий	303	−7,00	−7,52	−8,00
Бериллий	298	1,77	1,63	1,46
Натрий	303	56,8	23,6	4,04
Магний	298	5,40	4,67	3,81
Алюминий	301	4,29	4,06	3,6
Калий	303	134,4	30,0	0,88
Кальций	303	9,48	12,2	−20,7
Титан	296	1,19	1,19	1,02
Хром	298	22,2	17,3	8,90
Железо	303	2,42	2,25	1,90
Кобальт	297	0,96	0,90	0,80
Никель	298	1,77	1,82	1,73
Медь	303	1,52	1,60	2,42
Цинк ‖*	303	0,66	0,76	0,72
Цинк ⊥*	303	5,26	4,40	2,84
Рубидий**	303	154,0	14,1	−26,8
Стронций	303	45,6	−50,0	−118,8
Цирконий	299	0,32	0,33	0,22
Ниобий	297	1,40	1,37	1,30
Молибден	300	1,34	1,29	1,21
Родий	299	1,05	1,02	1,56
Палладий	299	2,10	2,04	1,93
Серебро	303	3,48	3,28	2,60
Индий	296	1,25	1,09	0,85
Олово ‖**	303	10,0	9,0	6,1
Олово ⊥**	303	9,24	8,26	5,61
Сурьма*	303	−9,84	−14,8	−2,80
Тантал**	303	7,2	1,2	13,6
Церий**	297	−4,1	—	1,6
Празеодим	297	1,36	1,20	1,02
Неодим	297	1,57	1,32	1,03
Тантал	300	1,62	1,62	1,55
Вольфрам	302	1,33	1,31	1,25
Иридий	298	1,39	1,37	1,33
Платина	296	1,92	1,86	1,79
Золото	303	3,02	2,84	2,44
Ртуть (ж.)**	300	23,1	17,0	
Ртуть (тв.)	303	—	—	12,0
Свинец	303	13,7	11,4	6,96
Висмут**	303	14,8	−18,5	—
Уран	293	4,88	4,36	2,10

* Монокристалл. Угол между главной осью и кристаллической осью образует 17° для ‖ и 87° для ⊥.

** Минимум $\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dT}$ при $p = 1,6 \cdot 10^4$ кГ/см².

* Для ‖ и ⊥ см. примечание к таблице 17 и 6а соответственно.

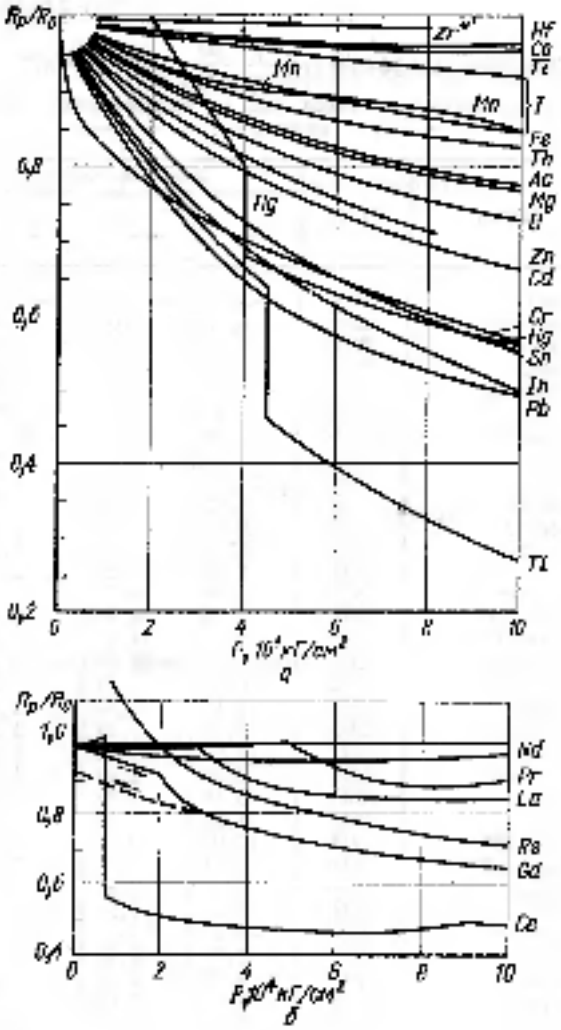
** Монокристалл. Угол между главной и кристаллической осями образует 48°. Минимум $\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dp}$ при $p = 21$ кбар.

** Сплав $\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dp}$ при $p = 1,7 \cdot 10^4$ кГ/см².

** Переход при $p = (5 \div 30)$ кбар; сопровождается скачком $\rho(p)/\rho(0)$ от 1,007 до 0,992.

** Аномалия при $p = 43,5$ кбар.

** Монокристалл. Угол между главной и кристаллической осями образует 78°. $\rho(p)/\rho(0)$ уменьшается от 1,15 до 1,04 при $p = 24,7$ кбар, затем увеличивается до 0,98 при $p = 38,2$ кбар.



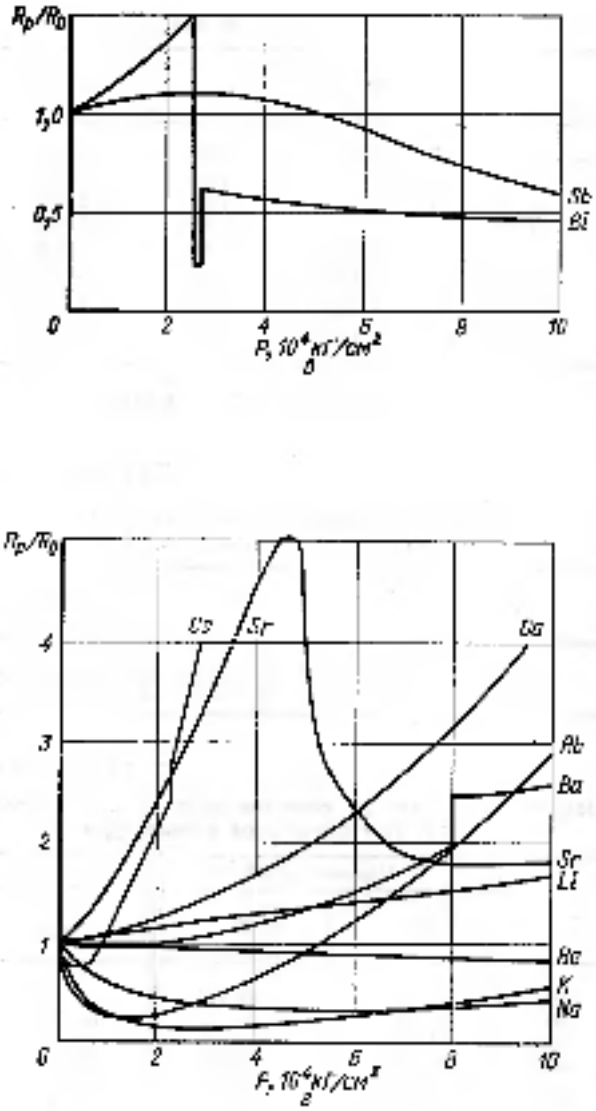


Рис. 19.3. Влияние давления на относительное сопротивление металлов [4].

19.4. СВЕРХПРОВОДНИКИ

Большинство веществ, обладающих свойством сверхпроводимости, является так называемыми сверхпроводниками первого рода или жесткими сверхпроводниками [10]. Слабое магнитное поле в них не проникает за исключением тонкого поверхностного слоя ~1000 Å. Когда магнитное поле превышает критическое значение (несколько сотых), оно скачком проникает внутрь образца, который теряет сверхпроводимость. Ток в сверхпроводниках первого рода течет лишь по тонкому поверхностному слою.

Для сверхпроводников второго рода характерно то, что магнитный поток проникает в них, образуя множество нитей, пронизывающих диамагнитную сверхпроводящую массу [11].

Для сверхпроводников первого рода в табл. 19.8 (для чистых металлов) и 19.9 (для сплавов и соединений) дается температура перехода в сверхпроводящее состояние. Сверхпроводники второго рода характеризуются прежде всего зависимостью максимальной плотности тока от магнитного поля (при T — 4,2° К). Эта зависимость кроме состава соединения определяется также и технологией его обработки. На рис. 19.4—19.6 представлен ряд таких зависимостей.

Критическая температура для хорошо изученных сверхпроводников второго рода составляет: Nb_3Sn 18,05° К; сплав Nb + 25% Zr 11° К; сплав Zr + Ti ~ 5° К.

Таблица 19.8

Относительное удельное сопротивление при низких температурах и температура перехода в сверхпроводящее состояние T_s для металлов-сверхпроводников [4]

Металл	T, °K	ρ/ρ_{273} °K	T_s, °K
Алюминий	77,7	0,1036	1,14
	20,4	0,0075	—
	4,2	0,0065	—
Титан	77,6	0,318	1,61
	20,5	0,218	—
	4,2	0,215	—
Ванадий	77,6	0,9674	4,3
	20,4	0,9540	—
Цинк	83,7	0,2351	0,79
	20,4	0,0097	—
	4,2	0,0016	—
Галлий	4,2	0,0025	1,07
Европий	77,7	0,1971	0,7
	20,5	0,0444	—
	4,2	0,0421	—
Ниобий	77,7	0,499	9,22
	20,3	0,386	—
Технеций *	—	—	8,22
Кадмий	82,5	0,2617	0,54
	20,4	0,0220	—
	4,2	$1,9\cdot10^{-4}$	—
Индий	77,8	0,2177	3,37
	20,5	0,1256	—
	4,2	0,0035	—
Олово	80	0,2196	3,09
	20,4	0,0120	—
	4,2	0,00079	—
Лантан	—	—	4,71
Гафний	78,19	0,2826	0,35
	20,3	0,1000	—
	4,2	0,0947	—
Тантал	77,6	0,2637	4,38
	20,4	0,0140	—
	77,6	0,2637	4,38
	20,4	0,0140	—
	4,5	0,0059	
Рений **	—	—	0,9
Ртуть	77,8	0,2820	4,12
	20,4	0,1642	—
	4,2	0,0020	—
Свинец	73,1	0,2321	7,26
	20,5	0,0201	—

Продолжение табл. 19.8

Металл	T, °K	ρ/ρ_{273} °K	T_s, °K
Вольфрам ***	—	—	4,2
Торий	77,5	0,245	1,32
	20,4	0,021	—
	4,2	0,017	—
Уран	77,5	0,6844	1,2
	20,4	0,5837	—
	4,2	0,5445	—

* По данным [20].
** По данным [2].
*** При p — 94,7 кбар [21].

Таблица 19.9

Температура перехода в сверхпроводящее состояние T_s для некоторых соединений — сверхпроводников первого рода [4]. Соединения расположены в порядке убывания T_s

Соединение	T_s, °K	Соединение	T_s, °K
NbN	15	Tl_3Hg_5	3,8
NbH	13	$PbTl_6$	3,8
NbC	10,5	W_2C	2,0—3,5
TaC	9,5	MoC	2,0—3,2
ZrN	9,5	VN	1,5—3,2
MoC	7,6—8,3	ZrB	3
Pb_2Na_2	7,2	Sn_3Au	2,5—2,75
Pb_3Au	7,0	Sn_4Au	2,6—2,75
Tl_3Bi_5	6,4	ZrC	2,3
Tl_7Sb_2	5,2	Au_2Bi	1,7
TaSi	4,4	CuS	1,6
WC	2,5—4,2	TiN	1,2
Sn_2Sb_3	4,0	TiC	1
SnSb	3,9		

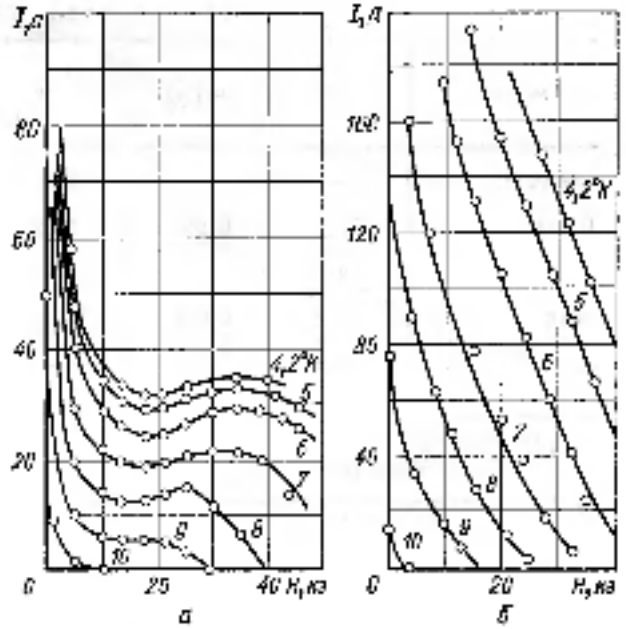


Рис. 19.4. Зависимость критических токов для холоднодеформированного (а) и термообработанного (б) образцов проволоки из сплава Nb + 25% Zr от напряженности магнитного поля и температуры [12].

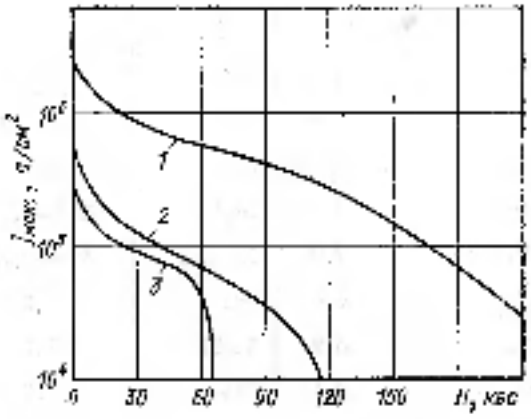


Рис. 19.5. Максимальная плотность тока $j_{кон}$ сверхпроводящих материалов как функция внешнего магнитного поля ($T = 4{,}2°$ К) [11]:

1 — соединение ниобий — олово; 2 — сплав ниобий — титан; 3 — сплав ниобий — цирконий.

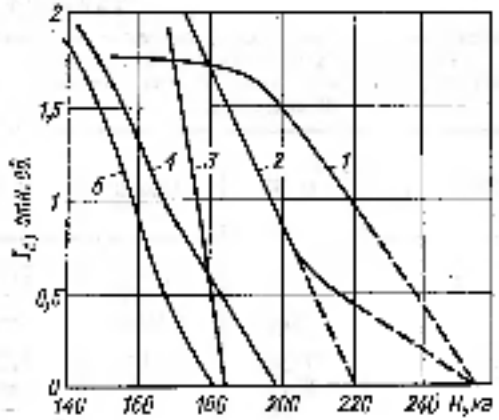


Рис. 19.6. Критические токи некоторых образцов соединений Nb_3Sn и V_3Ga [12]:

1 — Nb_3Sn монокристаллический образец, отжиг при 900°С в течение 30 ч; 2 — то же, при 800°С в течение 20 ч; 3 — V_3Ga, монокристалл, отжиг при 1200°С в течение 10 ч; 4 — V_3Ga, стержень, отжиг при 1150°С в течение 2 ч; 5 — то же, при 1440°С в течение 9 ч.

19.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ (РИС. 19.7—19.21)

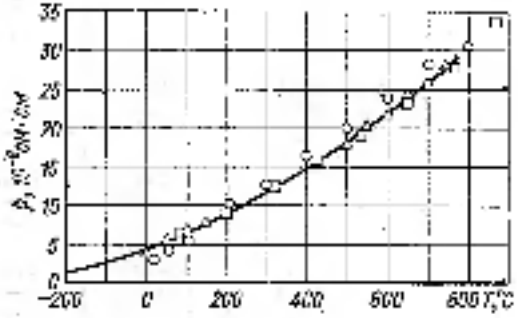


Рис. 19.7. Зависимость удельного сопротивления бериллия от температуры [16].

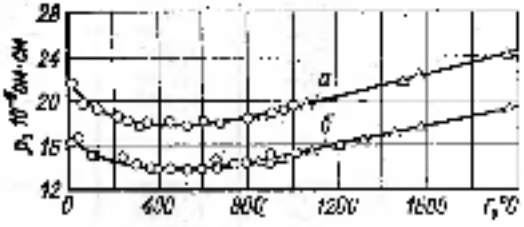


Рис. 19.8. Зависимость удельного сопротивления электродного графита от температуры [18] вдоль (а) и вдоль (б) направления прессования.

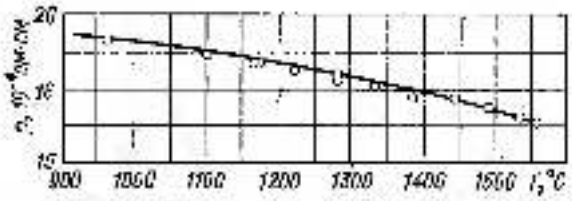


Рис. 19.9. Зависимость удельного сопротивления угольного материала из нефтяного кокса выше температуры плавления от температуры [18].

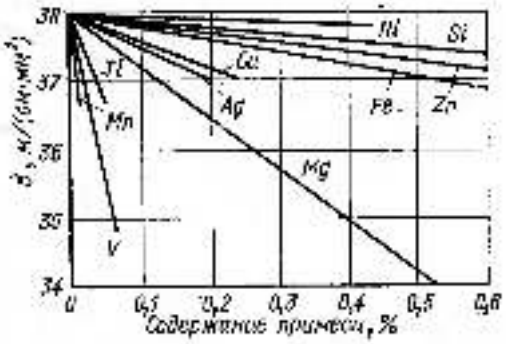


Рис. 19.10. Зависимость проводимости отожженного алюминия от содержания различных примесей [7].

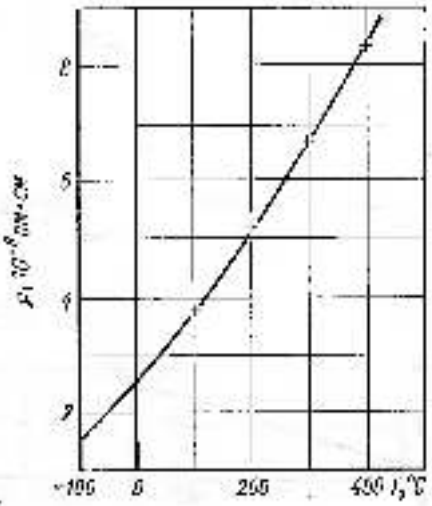


Рис. 19.11. Зависимость удельного сопротивления алюминия от температуры [7].

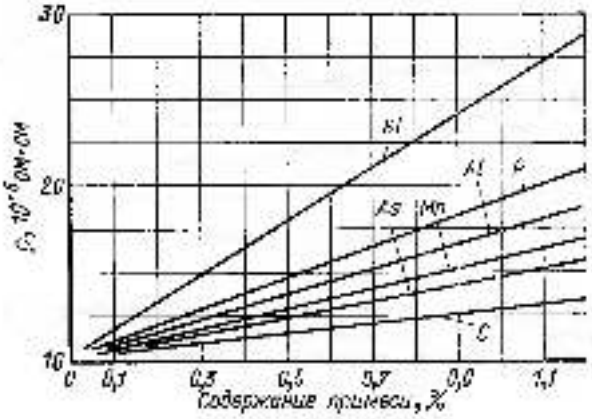


Рис. 19.12. Зависимость удельного сопротивления стали от содержания примесей [7].

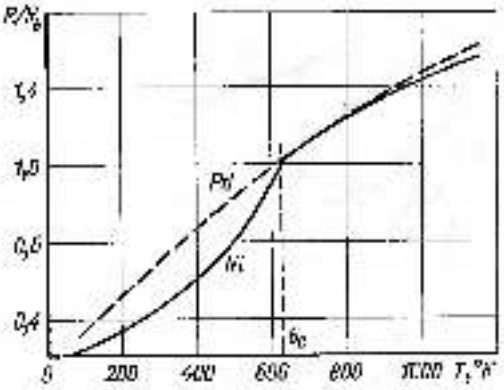


Рис. 19.13. Зависимость относительного сопротивления никеля и палладия от температуры. Сопротивление вычислялось по точке Кюри для никеля (631 °К) [4].

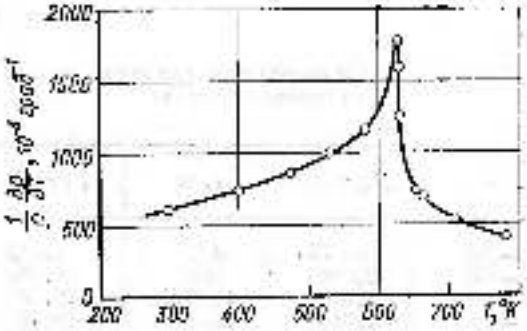


Рис. 19.14. Зависимость температурного коэффициента сопротивления никеля от температуры [4].

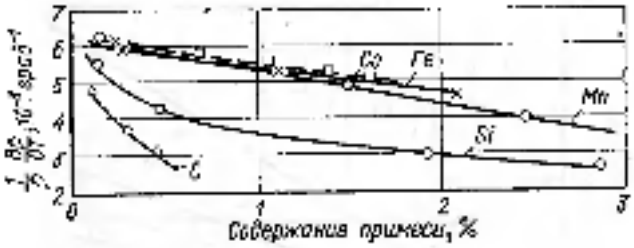


Рис. 19.15. Зависимость температурного коэффициента сопротивления электролитического никеля (содержащего 0,1% Mg) от содержания примесей [7].

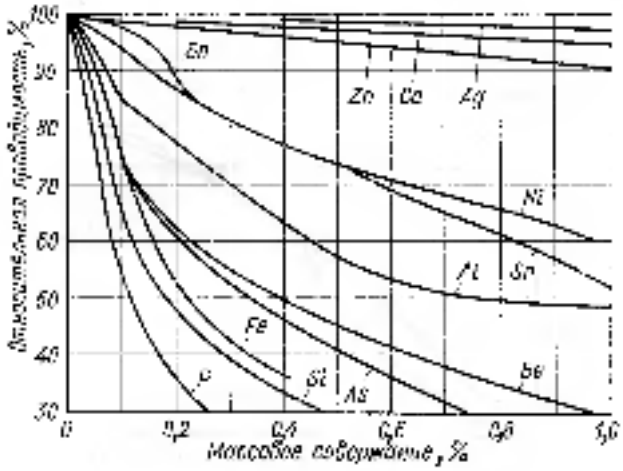


Рис. 19.16. Относительная проводимость бинарных медных сплавов как функция массового содержания второго компонента [7].

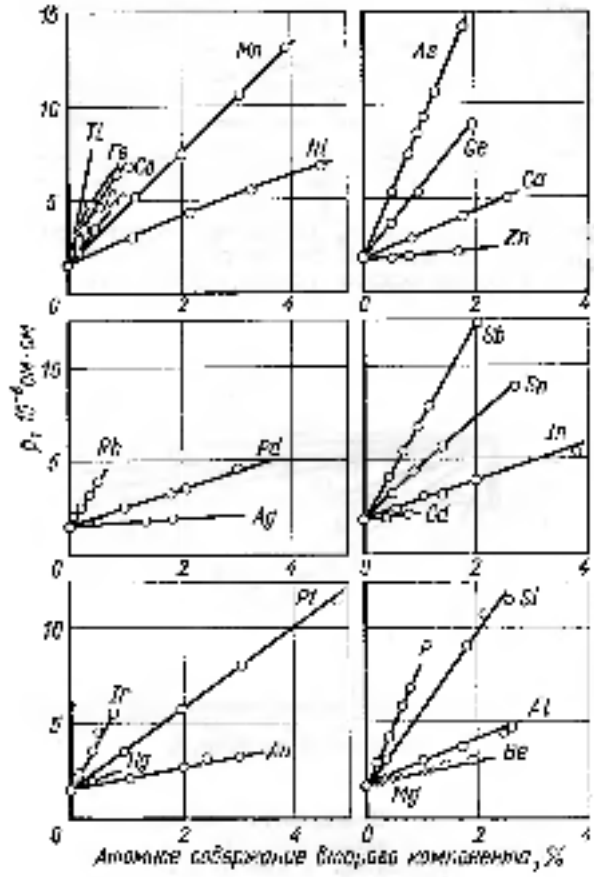


Рис. 19.17. Удельное сопротивление бинарных медных сплавов при 273° К как функция атомного содержания второго компонента [4].

Таблица 19.10

Зависимость удельного сопротивления серебра от температуры [9]

t, °C	$\rho \cdot 10^{-8}$ ом·см	T, °C	$\rho \cdot 10^{-8}$ ом·см
−258	0,00793	400	3,979
−192	0,304	500	4,651
−183	0,56	1030(ж.)	19,22
−78	1,04	1100	20,48
0	1,468	1200	21,67
100	2,0696	1300	22,79
200	2,6864	1400	23,80
300	3,321		

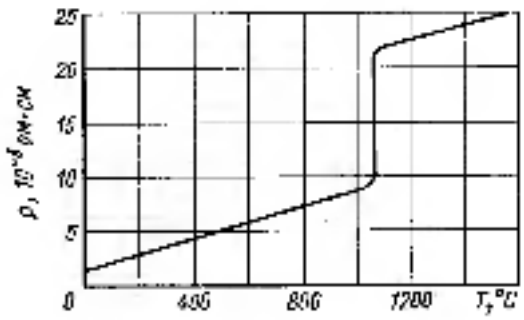


Рис. 19.18. Зависимость удельного сопротивления меди от температуры [7].

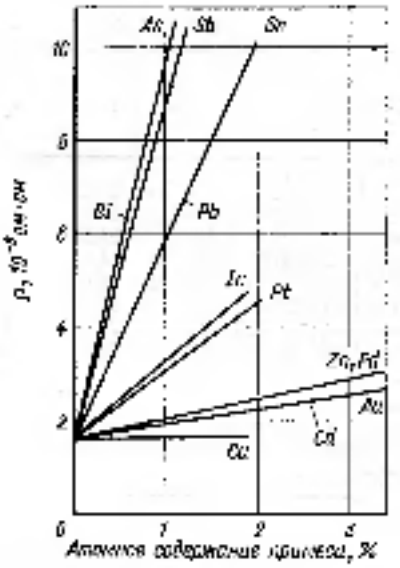


Рис. 19-19. Влияние примесей на удельное сопротивление серебра [7].

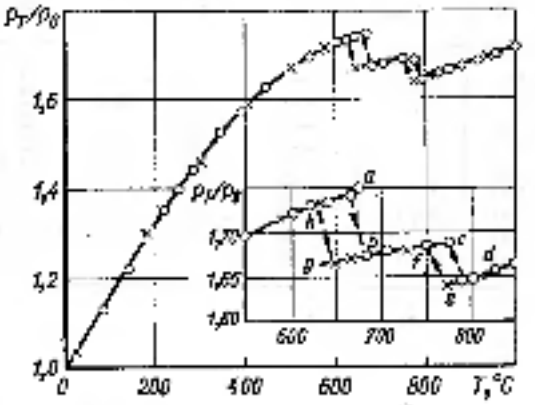


Рис. 19-20. Зависимость относительного удельного сопротивления урана от температуры [15].

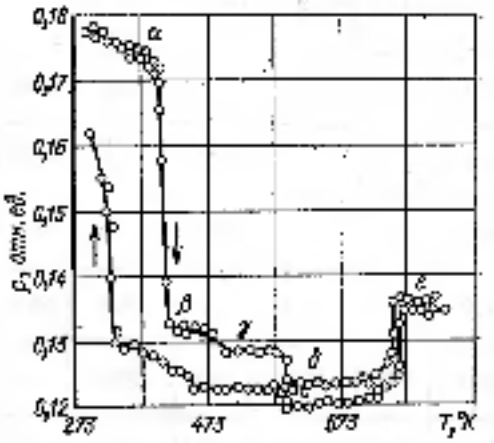


Рис. 19.21. Зависимость сопротивления плутония от температуры [4].

Таблица 19.11

Электрические свойства отрезка (длиной 1 *см* и диаметром 1 *см*) бесконечной молибденовой нити [7]*

Обозначения: R — сопротивление; W — мощность накала; U — напряжение; I — ток.

T, °K	R, 10^{-6} ом	W, *вт*	U, 10^{-3} *в*	I, *а*
273	6,85	—	—	—
300	7,36	—	—	—
400	10,36	—	—	—
1000	30,4	1,73	7,24	248,5
1200	36,0	4,5	12,9	349,0
1400	44,6	10,0	21,1	473,0
1600	52,4	19,8	32,2	614,0
1800	59,8	35,5	46,1	772,0
2000	69,6	54,3	64,8	936,0
2200	75,4	86,5	85,2	1130,0
2400	83,3	147,8	111,0	1330,0
2600	91,6	216,5	141,4	1547,0
2800	99,8	304,0	174,0	1745,0
2895	103,4	354,4	194,0	1875,0

* Нить бесконечна в смысле отсутствия проявления поляризации. При переходе к диаметру d (*см*) R делится на d^2, W умножается на d, U делится на $\sqrt{d}$, I умножается на $\sqrt{d^3}$.

Таблица 19.12

Электрические свойства отрезка (длиной 1 *см* и диаметром 1 *см*) бесконечной танталовой нити [7]*

Обозначения: T — истинная температура; R — сопротивление; W — мощность накала; I — ток; $I_н$ — ток эмиссии.

T, °K	R, 10^{-6} ом	W, *вт*	U, *в*	I, *а*	$I_н$, *а/см²*
300	17,65	—	—	—	—
1000	56,2	2,495	0,0118	211	—
1100	60,2	3,87	0,0152	254	—
1200	64,8	5,78	0,0190	299	—
1300	69,7	8,58	0,0244	352	—
1400	74,0	12,42	0,0304	406	—
1500	79,3	17,2	0,0368	469	—
1600	83,7	23,3	0,0438	526	$4,4\cdot10^{-8}$
1700	88,1	31,7	0,0527	602	$3,14\cdot10^{-7}$
1800	92,2	41,7	0,0617	676	$1,57\cdot10^{-6}$
1900	96,4	53,8	0,0716	751	$6,28\cdot10^{-6}$
2000	100,3	68,0	0,0821	818	$2,8\cdot10^{-5}$
2100	104,3	85,2	0,0936	910	$8,8\cdot10^{-5}$
2200	108,3	107,6	0,1072	1002	$2,7\cdot10^{-4}$
2300	112,4	132,9	0,1212	1095	$7,85\cdot10^{-4}$
2400	116,2	161,3	0,1367	1189	2,04
2500	120,1	196,2	0,1522	1288	4,4
2600	124,0	236,8	0,1699	1394	—
2700	127,6	282,8	0,1850	1502	—
2800	131,0	332,0	0,2064	1606	—
2900	134,5	387,0	0,2257	1715	—
3000	138,0	454,0	0,2479	1830	—
3100	142,0	526,0	0,2700	1948	—
3200	145,0	611,0	0,2940	2075	—
3260	147,0	674,0	0,3110	2164	—

* См. снизу в табл. 19.11.

Таблица 19.13

Свойства вольфрама (длиной 1 см и диаметром 1 см) бесконечной вольфрамовой нити [6.7]*

Обозначения: T_s — яркостная температура (остальные обозначения см. в табл. 19.12)

T, °K	T_s, °K	R, 10^{-3} ом	W, вт	U, 10^{-3} в	I, а	I_s, а/см²**
273	—	6,37	—	—	—	
293	—	6,95	—	—	—	—
300	—	7,20		—	—	—
400	—	10,20	0,0002	0,253	24,07	—
500	—	13,45	0,0005	0,64	47,62	—
600	—	16,85	0,0004	1,266	75,25	—
700	—	20,49	0,240	2,218	108,2	—
800	—	24,19	0,520	3,592	148,0	—
900	—	27,96	1,041	5,598	193,1	—
1000	966	31,74	1,851	7,749	244,1	$3,30\cdot10^{-10}$
1100	1056	35,55	3,222	10,71	301,0	$4,77\cdot10^{-10}$
1200	1145	39,46	5,210	14,34	363,4	$3,00\cdot10^{-11}$
1300	1240	43,40	8,060	18,70	430,9	$1,01\cdot10^{-9}$
1400	1330	47,37	12,01	23,85	503,5	$2,08\cdot10^{-8}$
1500	1420	51,40	17,33	29,85	580,6	$2,87\cdot10^{-7}$
1600	1509	55,46	24,32	36,73	662,2	$2,91\cdot10^{-6}$
1700	1597	59,58	33,28	44,52	747,3	$2,22\cdot10^{-5}$
1800	1684	63,74	44,64	53,25	836,0	$1,4\cdot10^{-4}$
1900	1771	67,92	58,46	63,02	927,4	$7,15\cdot10^{-4}$
2000	1857	72,19	75,37	73,75	1022	$3,15\cdot10^{-3}$
2100	1943	76,49	95,68	85,57	1119	$7,23\cdot10^{-3}$
2200	2026	80,80	119,6	98,40	1217	$4,17\cdot10^{-2}$
2300	2109	85,22	148,2	112,4	1319	$1,28\cdot10^{-1}$
2400	2192	89,67	181,2	127,6	1422	0,364
2500	2274	94,13	219,3	143,6	1526	0,935
2600	2356	98,66	263,0	161,1	1632	2,25
2700	2437	103,22	312,7	179,7	1741	5,12
2800	2516	107,85	368,9	199,5	1849	11,11
2900	2595	112,51	432,4	220,6	1961	22,95

Продолжение табл. 19.13

T, °K	T_s, °K	R, 10^{-3} ом	W, вт	U, 10^{-3} в	I, а	I_s, а/см²**
3000	2673	117,21	505,5	243,0	2072	44,4
3100	2750	121,96	583,0	266,7	2187	63,0
3200	2827	126,76	671,5	291,7	2301	150,2
3300	2903	131,60	770,7	318,3	2418	265,2
3400	2978	136,49	878,5	346,2	2537	440,0
3500	3052	141,42	999,0	375,7	2657	732,0
3600	—	146,40	1130	406,7	2777	1173
3666	3106	149,16	1202	423,4	2853	1505

* См. сноску в табл. 19.11.

** I_s пересчитано в таблице на единицу длины нити диаметром 1 см, а не поверхности.

Таблица 19.14

Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления $\rho^{-1}\,d\rho/dT$ ренио [17]

T, °C	ρ, 10^{-2} ом·см	$\rho^{-1}\,d\rho/dT$, 10^{-3} град⁻¹	T, °C	ρ, 10^{-2} ом·см	$\rho^{-1}\,d\rho/dT$, 10^{-3} град⁻¹
—253	0,015	—	900	72,5	3,13
—200	2,3	—	1100	80,5	2,94
—100	10	—	1300	87,0	2,78
0	17,5	—	1500	93,0	2,58
20	19,3	—	1700	98,5	2,44
100	25,4	3,95	1900	103,0	2,31
300	40,0	3,83	2100	106,5	2,17
500	52,0	3,58	2300	109,0	2,04
700	63,0	3,33			

Таблица 19.15

Зависимость удельного сопротивления ρ сплавов вольфрама и рения от температуры [17]

Содержание Re в сплаве, %												
4,75	T, °K	300	630	850	1020	1160	1270	1370	1465	1540	—
	ρ, 10^{-6} ом·см	10,4	20,4	27,3	32,4	36,7	40,0	43,2	45,9	48,5	—
23	T, °K	300	590	810	980	1120	1250	1360	1460	1540	1610
	ρ, 10^{-6} ом·см	24,2	34,0	42,0	47,0	51,6	54,6	57,4	59,8	62,6	64,4
27	T, °K	1400	1600	1800	2000	2400	2600	2800	3000	—	—
	ρ, 10^{-6} ом·см	67,3	73,9	79,9	86,7	91,1	96,8	102,8	109,2	—	—

Таблица 19.16

Зависимость удельного сопротивления ρ сплавов вольфрама и рения при 20°С от содержания Re [17]

Содержание Re в сплаве, %	0	1	5	6	7	10	20
ρ, 10^{-8} ом·см	5,7	7,7	9,7	12,7	14,0	16,8	25,0

Таблица 19.17

Зависимость удельного сопротивления ρ палладия от температуры [9]

T, °С	ρ, 10^{-8} ом·см	T, °С	ρ, 10^{-8} ом·см
—258	0,00906	500	27,4
—192	2,0131	600	30,4
—78	7,048	700	33,2
0	9,1	800	35,6
100	14,0	900	37,9
200	17,4	1000	40,0
300	21,0	1200	44,8
400	24,3	1400	49,3

Таблица 19.18

Зависимость удельного сопротивления платины от температуры [6, 9]

T, °С	ρ, 10^{-8} ом·см	T, °С	ρ, 10^{-8} ом·см
—258	0,0616	700	34,30
—192	2,0002	800	37,31
—78	6,7297	900	40,27
0	9,81	1000	42,07
100	13,66	1100	45,76
200	17,38	1200	48,34
300	21,00	1300	50,80
400	24,50	1400	53,15
500	27,88	1500	55,38
600	31,15		

Таблица 19.19

Зависимость относительного удельного сопротивления ρ/ρ₀ урана от температуры [16]*

T, °С	ρ/ρ₀	T, °С	ρ/ρ₀
0	1,00	684,1	1,6733
90	1,1307	714,6	1,6750
254,7	1,3906	750,2	1,6821
375	1,5212	776,5	1,6895
447,6	1,6218	800,8	1,6471
602,8	1,7195	852,2	1,6044
667,5	1,7413	959,5	1,6993
		1001,1	1,7189

* Удельное сопротивление отожженного электролитического урана при 0°С ρ = 29,4·10^{-8} ом·см [16].

19.6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Электротехнические сплавы применяются для изготовления обладающих сопротивлений, электротехнических приборов, реостатов, электроизмерительных приборов и термопар.

Таблица 19.20

Химический состав и назначение электротехнических сплавов [7,22]

Название сплава	Марка	Химический состав, %	Назначение
Алькель	ПМп/ОК2-2-1	Mn 1,8—2,2; Al 1,8—2,3; Si 0,65—2; Ni + Co — остальное	Для термопар
Хромель Т	ПХ 9,5	Cr 9—10; Ni + Co — остальное	» »
Хромель К	ПХ 9	Cr 8,5—9,5; Ni + Co — остальное	Для компенсационных проводов
Копель	МпМц 43-0,5	Ni + Co 42,5—44; Mn 0,1—1; Cu — остальное	Для термопар и компенсационных проводов
Константан	МнМц 40—1,5	Ni + Co 39—41; Mn 1—2; Cu — остальное	Для электротехнических целей

Наименование сплава	Марка	Химический состав, %	Назначение
Манганин	МнМт: 3-12 МнМс: АЖ3-12-0,3-0,3	Mn 11,5 — 13,5; Ni + Co 2,5 — 3,6 Ni 2,6—3,5. Mn 11,5—13,5. Al 0,2—0,4; Fe 0,2—0,6; Cu — остальное	Для измерительных приборов
Нихром	Х15Н60	Ni 55—61; Cr 15 — 18; Fe — остальное	Проволока и лента для нагревательных приборов до 1000 °С
	Х20Н80	Ni 75—78; Cr 20—23	То же до 1100 °С
	Х20Н80Т	Ni ≥ 75; Cr 19—23; Ti до 0,4	До 1100 °С
	Х20Н80ТЗ	Cr 19—23; Ti 2,0—2,9; Al 0,4—1,1; Ni—остальное	До 1100 °С
Хромоалюминиевый	Х13Ю4	Cr 12—15; Al 3,5 6,5; Fe — остальное	Для бытовых приборов и реостатов до 850 °С
	ОХ25Ю5	Cr 23—27; Al 4,5—6,5; Fe — остальное	Для нагревательных элементов больших электропечей до 1200 °С

Манганин — основной сплав для изготовления образцовых сопротивлений. Отличается малым (переходящим вблизи 20°С через 0) температурным коэффициентом сопротивления и малой термо-э. д. с. по отношению к меди. В зависимости от технологии термообработки изготовляется манганин марок ММ и МТ (рис. 19.22) (мягкий и твердый).

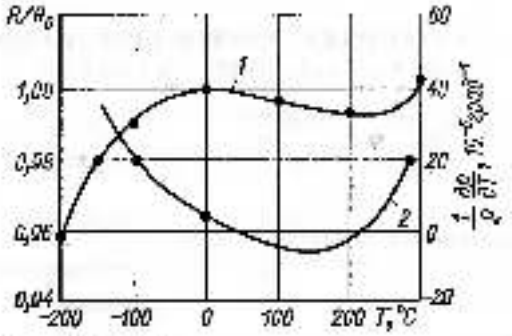


Рис. 19.22. Зависимость относительного сопротивления (1) и температурного коэффициента сопротивления (2) манганина от температуры [7].

Электрические свойства манганина при 20°С [7]

Плотность, г/см³	8,4
Удельное сопротивление, 10^{-6} ом·см	47—48
Температурный коэффициент удельного сопротивления	1,8—6,1·10^{-5}
Термо-э.д.с. относительно меди, мкв/град	1

Константан — медно-никелевый сплав, обладает способностью образовывать прочную оксидную пленку, что позволяет использовать его без специальной изоляции между витками вплоть до 400°С. По состоянию металл бывает мягкий (м.) и твердый (т.). Плотность константана — 8,9 г/см³, удельное сопротивление 45—52·10^{-6} ом·см (рис. 19.23).

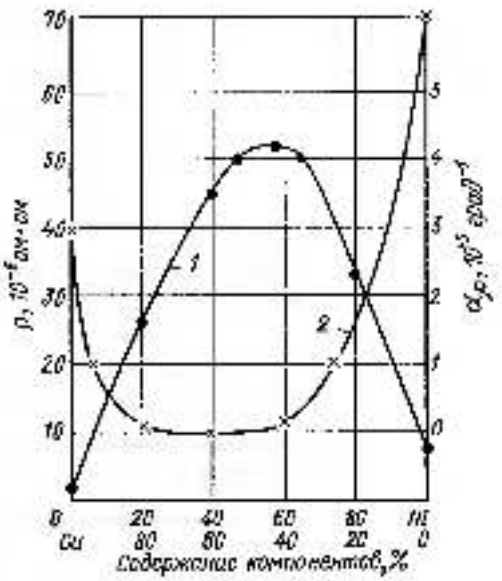


Рис. 19.23. Зависимости удельного сопротивления (1) и температурного коэффициента сопротивления (2) медно-никелевых сплавов от содержания компонентов [7].

Удельное сопротивление проволок из термопарных сплавов при температуре 20 °С, 10^{-6} ом·см

Хромель	66 ± 5
Алюмель	305 ± 46
Копель	465 ± 25

Таблица 19.21

Электрические и тепловые свойства жаростойких сплавов [7]

Сплав	$\rho \cdot 10^{-6}$ ом·см	$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt}$, $\frac{1}{°C}$	$\frac{E_{0-20°C}}{E_{0°C}}$	Рабочая пластичность, в (d = 0,4 мм)			
				1000°С	1100°С	1200°С	1300°С
Х15Н60	110	—	1,10	1000	200	30	
Х20Н80	111	—	1,05	—	400	100	20
Х20Н80Т	111	—	1,026	—	—	—	—
Х20Н80ТЮ	127	—	1,02	—	—	—	—
Х13Ю4	126	$16 \cdot 10^{-6}$	—	—	—	—	—
ОХ23Ю5	140	$5 \cdot 10^{-6}$					

19.7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ ЖЕЛЕЗА И МЕДИ

Таблица 19.22

Удельное сопротивление чугуна и составляющих его компонентов [14]

Серый (отливки) чугун	Чугун			Компоненты чугуна			
	Серый	Ковкий	Высокопрочный	Феррит	Перлит	Цементит	Графит
$\rho, 10^{-6}$ ом·см	80–140	50 ± 20	70 ± 20	10,4	20	140	150–300

Таблица 19.23

Удельное сопротивление нержавеющих сталей [13]

Марка стали	08Х18	3Х17	12Х18Н9 12Х18Н9Т 1Х18Н9Т	Х23Н18	Х18Н12С2	Х18Н12М2	Х18С2М
$\rho, 10^{-6}$ ом·см	5,7	6,6	7,5	8,0	10,2	9,5	7,5

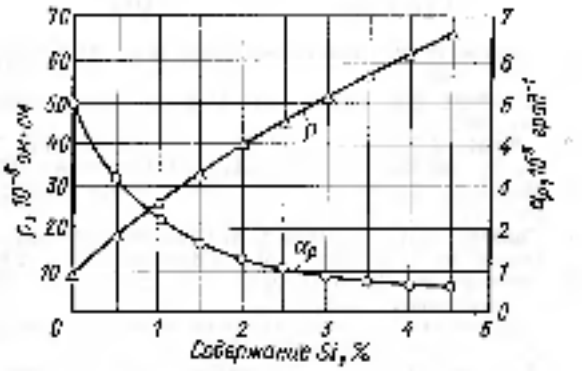


Рис. 19.24. Зависимость удельного сопротивления и температурного коэффициента сопротивления от содержания кремния в электротехнической стали [7].

Таблица 19.24

Проводимость проводниковых бронз [7,22]

Сплав	Состояние	Проводимость, % по отношению к меди
Кадмиевая бронза (0,9% Cd*)	Отожженная	95
	Твердотянутая	83–90
Бронза оловянистая (0,6% Cd, 0,6% Sn)	Отожженная	65–60
	Твердотянутая	50–55
Бронза алюминиевая (2,5% Al, 2% Sn)	Отожженная	15–18
	Твердотянутая	15–18
Бериллиевая бронза (2,25% Be)	Отожженная	17
	Состаренная при 350°С	30
Бронза фосфористая (7% Sn, 0,1% P)	Отожженная	10–15
	Твердотянутая	10–15
Медь хромистая (0,5% Cr)	Состаренная	80–85

* Остальное у всех бронз — медь.

Таблица 19.25

Электрические свойства латуней различных марок [7]

Сплав	Марка, химический состав, % (медь — остальное)	$\rho, 10^{-6}$ ом·см	$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt}, 10^{-3}$ $\frac{1}{°C}$
Томпак	Л-96, Zn 4	4,3	2,7
Латунь	Л-62, Zn 38	7,1	1,7
Латунь железисто-марганцовистая	ЛЖМц 59-1,1 Fe 1, Mn 0,8 Zn 39	8,9	1,8
Латунь марганцовистая	ЛМц 58-2 Mn 2; Zn 40	21,2	1,3
Латунь свинцовистая	ЛС 59-1 Pb 1; Zn 40	6,6	1,7

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жданов Г. С.** Физика твердого тела. М., Изд-во МГУ, 1962.
2. **Handbook** of Chemistry and Physics. Thirty Sixth ed. 1955.
3. "**Metals** Reference book". E. J. Smithells. 2nd Ed. V. 2. London, 1955. London, Butterworth, 1955.
4. **Handbuch** der Physik. Bd XIX. Berlin — Göttingen—Heidelberg, 1956.
5. **Голованов В. А., Ульянов Э. Х.** Свойства благородных металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1964.
6. **Сиггелас К. Дж. Вольфрам.** Пер. с англ. М., Металлургиздат, 1959.
7. **Справочник** по электротехническим материалам. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
8. **Алабышев А. Ф.** и др. Натрий и калий. (Получение, свойства и применение.) Под ред. А. Ф. Алабышева. Л., Госхимиздат, 1959.
9. **Кунцлер Дж.** и др. Сверхпроводящие магниты. «Успехи физ. наук», 1965, т. 86, вып. 1.
10. **Симсон У., Крейг П., Стрингер М.** Успехи в создании сверхпроводящих магнитов.— «Успехи физ. наук», 1967, т. 13, вып. 4.
11. **Кремлев М. Г.** Сверхпроводящие магниты.— «Успехи физ. наук», 1965, т. 86, вып. 1.
12. **Дубров Н. Ф., Лапкин Н. И.** Электротехнические стали. Госиздат по черной и цветной металлургии. М., 1963.
13. **Краткий** справочник металлиста. Под ред. проф. А. М. Малова. М., «Машиностроение», 1965.
14. **Металловедение** и термическая обработка. Под ред. акад. П. Т. Гуцова. М., «Металлургия», 1966.
15. **Стерлин Я. М.** Металлургия урана. М., Госатомиздат, 1962.
16. **Дарвин Дж., Бадцери Дж.** Бериллий. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
17. **Савицкий Е. М., Тылкина М. Л., Поварова К. Б.** Сплавы рения. М., «Наука», 1965.
18. **Техника** высоких температур. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1956.
19. **Свойства** и применение редкоземельных металлов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
20. «Phys. Rev.», 1961, v. 23, p. 1567.
21. «Philos Mag.», 1952, v. 44, p. 1251.
22. **Готлиб И. Г., Березин В. Б., Хайкин А. М.** Электротехнические материалы. М., «Энергия», 1969.

ГЛАВА 20

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

20.1. ВВЕДЕНИЕ

Диэлектриками являются нейтральные газы, а также жидкости и твердые тела, характеризующиеся полностью заполненной электронами валентной зоной и полностью свободной зоной проводимости. Если термического возбуждения электронов на уровни зоны проводимости не происходит, то такие вещества ведут себя как изоляторы. При малой энергетической щели ΔE или при большей температуре эти вещества ведут себя как полупроводники. Диэлектрики и полупроводники, в отличие от металлических проводников, экспоненциально уменьшают объемное сопротивление при повышении температуры.

Носителями тока в диэлектриках, находящихся в обычных условиях, чаще всего являются ионы, реже электроны (n- и p-проводимость). В жидких диэлектриках вклад в проводимость вносят ионы обоих знаков, а в твердых чаще всего преобладает миграция ионов одного знака (катионная или анионная унипольярная проводимость). Проводимость газов при обычной температуре зависит от степени их ионизации заряженными частицами или ультрафиолетовыми лучами, не является характеристикой самого вещества и составляет 10^{-12}—10^{-20} *ом*$^{-1}$·*см*$^{-1}$.

Пробой диэлектриков носит либо тепловой, либо электрический — лавинный характер. Механизм теплового пробоя — постепенный разогрев участка диэлектрика, падение его сопротивления и термическое разрушение. Развитие теплового пробоя в зависимости от перенапряжения изменяется от нескольких секунд до сотых долей секунды. Электрический пробой имеет электронно-лавинный процесс и происходит за 10^{-6}—10^{-7} *сек*. Пробивность и пробивное напряжение диэлектриков сильно зависят от чистоты и структуры вещества. Если у металлов технической чистоты проводимость составляет 80—99% проводимости идеального монокристалла, то у диэлектриков пробивное напряжение и изоляционные свойства составляют обычно не более 10% установленных для совершенных образцов.

Наиболее стабильны по отношению к времени диэлектрическая проницаемость ε. Диэлектрическая проницаемость связана с тремя эффектами. *Электронная поляризация* — смещение электронных орбит происходит за время $\tau \approx 10^{-16}$ *сек* и дает основной вклад в ε в случае симметричных неполярных молекул. *Ионная поляризация* (у ионных кристаллов) — смещение ионов, составляющих остов кристалла или молекулы: $\tau \approx 10^{-13}$ *сек*. *Дипольная или ориентационная поляризация* связана с наличием в электрическом поле молекул, имеющих дипольный момент. Эта поляризация приводит к гораздо большим значениям, однако время, необходимое для ориентации молекул, составляет 10^{-10}—10^{-2} *сек* и сильно зависит от свойств, температуры и агрегатного состояния вещества. У веществ, молекулы которых обладают дипольным моментом, ε может сильно зависеть от частоты.

В диэлектрике, помещенном в переменное электрическое поле, часть энергии поля переходит в тепловую. Тепловые потери пропорциональны тангенсу угла диэлектрических потерь (4): $P_{(пот)} = \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot U^2$, где U — действующее значение синусоидального напряжения; ω — круговая частота; C — емкость участка цепи; $\operatorname{tg} \delta = I_{акт} / I_{реактив}$ — отношение активного и реактивного токов на участке цепи.

Диэлектрические потери у веществ, обладающих дипольным моментом, часто оказываются гораздо выше, чем у неполярных диэлектриков. Однако целый ряд полярных диэлектриков сочетает высокие значения ε и относительно небольшое значение $\operatorname{tg} \delta$.

20.2. ПРОВОДИМОСТЬ, ПРОБИВНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ И ТАНГЕНС УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

В табл. 20.1 содержатся сведения об электрических свойствах различных диэлектриков. Сведения об удельном сопротивлении и пробивном напряжении почти всегда относятся к применяемым на практике образцам материалов. В особо чистых условиях эксперимента удается получить гораздо более высокие значения пробивных напряжений, однако они получены лишь для небольшого числа материалов [2, 20].

Таблица 20.1

Удельное сопротивление ρ, пробивное напряжение $E_{пр}$, диэлектрическая проницаемость ε и тангенс угла диэлектрических потерь (tg δ) [1,2,4,8—9,21]

Вещество	Химический состав	T, °C	ρ, Ом·см	$E_{пр}$, кВ/см	ε	tg δ
		а) Твердые неорганические вещества				
Алюминия окись	Al_2O_3	20 300 800 1100	10^{16} $3\cdot10^{13}$ $3{,}5\cdot10^{8}$ $1\cdot10^{8}$	— — — —	10 — — —	$5\cdot10^{-3}$ (10^{6} гц) $15\cdot10^{-4}$ (10^{10} гц) — —
Асбест (хризотиловый)	$3MgO\cdot2SiO_2\cdot2H_2O$	20	10^{10}—10^{12}	—	·	—
Асбестоцемент	30%; цемент 46%; асбест 8%; тальк	20	10^{10}—10^{11}	2—3 (20— 150°C)	—	—
Бериллия окись	BeO	600 1100 2100	$1\cdot10^{5}$ $6\cdot10^{5}$ 10^{6}	—	7,5	$3\cdot10^{-4}$ ($2\cdot10^{6}$ гц)
Бора нитрид	BN	2000	$1{,}9\cdot10^{9}$		—	—
Калий бромистый	KBr	25 300 500 700	· $0{,}5\cdot10^{9}$ $3\cdot10^{8}$ 10^{6}	$0{,}85\cdot10^{6}$	4,9	
Калий хлористый	KCl	25 300 600 700	— $0{,}5\cdot10^{9}$ $3\cdot10^{8}$ 10^{7}	$1{,}2\cdot10^{5}$	4,68	—
Кварц плавленый	SiO_2	20 400 600 1000	10^{15} 10^{10} 10^{8} 10^{6}	$6{,}5\cdot10^{4}$ — — —	3,75 3,73 3,75 —	Меньше 0,001 90 500°C
Керамика конденсаторная	Кристаллическая основа					
ТК-20	$ZrTiO_4$	20	10^{13}—10^{14}	32	28—30	2,5—3,5·10^{-4}
ТК-20-80	$ZrTiO_4$	20	10^{13}—10^{14}	—	30—32	3,5—6·10^{-4}
Т-80	TiO_2	20	10^{13}—10^{14}	27	78—88	4—5,5·10^{-4}
Т-150	$CaTiO_3$	20	10^{13}—10^{14}	22	150—160	2—4·10^{-4}
Т-900	$(SrBa)\ TiO_3$	20	10^{13}—10^{14}	24	900—1000	5—10·10^{-4}
СМ-1	$(BaTiO_3)_{0,8}\cdot(BaZrO_3)_{0,05}$	20	10^{13}—10^{14}	13	2700—3000	1—2·10^{-2}

Вещество	Химический состав	T, °C	ρ, Ом·см	$E'_{пр}$, МВ/м	ε	tg δ
Магния оксид	MgO	650 2100	$2\cdot10^{6}$ $4{,}5\cdot10^{9}$	— —	— —	— —
Мрамор	$CaCO_3$ или $CaCO_3\cdot MgCO_3$	20	10^{6}—10^{10}	2,5	8—10	0,005—0,001
Натрий бромистый	$NaBr$	25 300 500 700	— $3\cdot10^{3}$ $2\cdot10^{3}$ $9\cdot10^{3}$	$0{,}86\cdot10^{6}$ — — —	6,1 — — —	— — — —
Натрий хлористый	$NaCl$	25 300 500 700	— 10^{6} $3\cdot10^{6}$ 10^{4}	$1{,}56\cdot10^{6}$ — — —	5,9 — — —	— — — —
Слюда мусковит	$6SiO_2\cdot3Al_2O_3\cdot K_2O\cdot2H_2O$	20	10^{14}	10^{6}—10^{8} (листо-ренит)	6,6—7,5	0,0002—0,0008
Слюда флогопит	$6SiO_2\cdot Al_2O_3\cdot6MgO\cdot K_2O\cdot2H_2O$	20	10^{13}—10^{14}	200 (технич.)	5,5	0,0025—0,01
Стеатит (высокочастотный)	тальк—основа; 10% $BaCO_3$; ~ 7% глина	20 100	10^{10} $5\cdot10^{13}$	20—25 —	6—6,5 —	0,002 —
Стекло 3С-5	68% SiO_2; 20% B_2O_3; 4% Na_2O; 5% K_2O; 3% Al_2O_3	200	$4\cdot10^{6}$	—	—	—
Стекло боросиликатное № 24	51,5% SiO_2 12,9 B_2O_3; 48% BaO; 2,8 ZnO; 3% Al_2O_3; 1,6% — другие оксиды	20 200	— $3\cdot10^{13}$	— —	8,4 —	0,0009 0,0009
Стекло пирекс натриевый	80% SiO_2; 12% B_2O_3; 4,5% Na_2O; 0,5% MgO; 2,0% Al_2O_3; 1% — другие оксиды	20 200	— $2\cdot10^{6}$	— —	5,3 —	0,0085 0,01
Стекло пирекс калиевый	80% SiO_2; 13% B_2O_3; 5,5% K_2O; 0,5% MgO; 1% — другие оксиды	20 200	— $8\cdot10^{11}$	— —	5,7 —	0,0016 —

Вещество	Химический состав	T, °C	ρ, ом·см	$E^*_{пр}$, кв/мм	$\varepsilon^{пр}$	tg δ
Стекло титановое	14,5% SiO_2; 12,5% R_2O_3; 2% NaO; 44% BaO; 5% Al_2O_3; 24% TiO_2	20 200	— $1\cdot10^{13}$	— —	11,8 —	0,0012 0,0012
Тальк	$3MgO\cdot4SiO_2\cdot H_2O$	20	10^{8}—10^{9}	1	4—5	—
Торий двуокись	ThO_2	20 550 1200	$4\cdot10^{13}$ $2,6\cdot10^{8}$ $1,6\cdot10^{1}$	— — —	12 — —	$1,5\cdot10^{-3}$ — —
Цирконий двуокись	ZrO_2	385 700 1200 2000	$1\cdot10^{7}$ $2,2\cdot10^{5}$ $5,6\cdot10^{2}$ 10	— — — —	— — — —	— — — —
б) Твердые органические вещества						
Антрацен		17	—	—	3,40	—
Винипласт	Полихлорвинил без пластификатора	20	10^{13}—10^{15}	45	3,1—3,5	0,025—0,04
Воск (пчелиный)	см. [4]	20	6—12·10^{13}	25—30	2,8—2,9	0,02—0,03
Гетинакс	Бакелизированная бумага	20	10^{10}—10^{11}	16—25	7—8	0,045—0,1
Дифенил	$C_{12}H_{10}$	17	—	—	2,57	—
Дрекслина, дуб	Воздушно-сухое состояние γ = 0,57 г/см³	20	$8\cdot10^{10}$	3—5,5	—	—
Сосна	γ = 0,56 г/см³	20	$8\cdot10^{13}$	2,4—4,5	—	—

Вещество	Химическая система	T, °C	ρ, ом·см	$E_{пр}$, кВ/мм	ε^{**}	tg δ
Канифоль	Основа — абиетиновая кислота $C_{20}H_{30}O_2$ и ее изомеры	20	10^{16}—10^{17}	10—15	3	<0,05
Каучук (натуральный)	Полимер изопрена $(C_5H_8)_n$	20	$5\cdot10^{16}$—10^{17}	—	2,3—2,4	0,001—0,005
Нафталин		25	—	—	2,65	—
Парафин	Смесь твердых предельных углеводородов C_nH_{2n+2}	20	10^{15}—10^{17}	20—30	1,9—2,2	$3,7\cdot10^{-4}$
Поливинилхлорид (поливинилхлорид)	см. [4]	20	10^{14}—10^{16}	14—20	3—5	0,03—0,05
Полиметилметакрилат (орг. стекло)	Полимер метакриловой кислоты $CH_2{=}C\begin{matrix}CH_3\\COOH\end{matrix}$	20	10^{14}—10^{17}	18—55	3,5—4,5 (50 гц) 2,7—3,2 (10^6 гц)	0,04—0,06 (50 гц) 0,02—0,03 (10^6 гц)
Полистирол	—CH_2CH(C₆H₅)—CH_2— полимер	20	10^{15}—10^{16}	20—35	2,45—2,65	0,0001—0,0003
Политетрафторэтилен (тефлон)	—CF_2—CF_2— полимер	20	10^{15}—10^{16}	20—30	2	0,0002
Полиэтилен	—CH_2—CH_2— полимер	20	10^{15}—10^{17}	18—20	2,3	0,0002
Резина электроизоляционная		20	10^{14}—10^{15}	20—40 (кратковременно)	2,5—5	0,01—0,03

Материал	Химический состав	T, °C	ρ, ом·см	$E_{пр}$, кВ/мм	ε	tg δ
Гетинакс бумажно-слоистый	—	20	10^{14}	20	4	0,008—0,01
Смола эпоксидная	Сополимер двухатомных фенолов и эпихлоргидрина	20	10^{13}—10^{14}	16	3,7	0,019
Текстолит	Ткань, пропитанная фенолформальдегидной смолой	20	10^{9}—10^{10}	3,5—6	8	0,07 и более
Стеклотекстолит	Стеклоткань, пропитанная фенолформальдегидной смолой	20	10^{12}	10—12	—	0,05—0,06
Фенопласт (пресс-порошок К-211-3)	Резольная смола + молотое стекло и кварц	20	10^{14}	12	7	0,01
К-211-4	Резольная смола + молотое стекло, кварц и древесная мука	20	10^{13}	12	6	0,02
К-211-34	Близок к К-211-4	20	10^{14}	12	—	0,01
Церезин	Смесь твердых алифатических углеводородов от $C_{22}H_{46}$ до $C_{33}H_{68}$	20	10^{16}	15	2,1—2,3	$0,2 \cdot 10^{-3}$
Шеллак	Основа — эфиры алейритовой ($C_{16}H_{32}O_5$) и шеллоловой ($C_{16}H_{30}O_6$) кислот	20	10^{13}—10^{14}	20—30	3,6	0,01
Эбонит	Каучук + до 40% связанной серы	20	10^{14}—10^{15}	—	2,7—3,0	0,01—0,015
Янтарь	Ископаемая смола	20	до 10^{19}	—	2,8	0,01

Вещество	Химический состав	T, °C	μ, ом·см	$\varepsilon^*_{пр}$, кВ/см	ε^*	tg δ
			б) Жидкости [6,4]			
Азот (ж.)	N_2	198,4	—	—	1,445	—
Аммиак (ж.)	NH_3	−77,7	$1,3\cdot10^6$	—	25,0	—
Аргон (ж.)	Ar	−184,4	—		1,516	—
Ацетон	$(CH_3)_2CO$	−15 25	$1,1\cdot10^1$ —	— -	— 20,74	— —
Бензол	C_6H_6	20 25	$1\cdot10^{14}$ —	— -	— 2,2747	— —
Бром	Br_2	−17,2	$1,3\cdot10^{13}$	—	3,22	—
Вода (тщательно в вакууме)	H_2O	0 10 18 34 60	$1,68\cdot10^6$ $2,85\cdot10^6$ $4,41\cdot10^6$ $9,02\cdot10^6$ $18,9\cdot10^6$	— — — —	— — 78,3(25°) 34,6(206°) 10,1(364°)	— — — — -
Вода (дистиллированная)	H_2O	20—25	$1—4\cdot10^5$	—		-
Водород (ж.)	H_2	−252,8	—	—	1,225	—
Водород хлористый (ж.)	HCl	−96 −10,2	$1\cdot10^5$ —	— -	— 11,8	— —

* Значения в пр. 206 и 364° С на линии насыщения.

Вещество	Химический состав	T, °C	ρ, ом·см	$E_{пр}$, кВ/мм	ε	tg δ
Гексан	$CH_3(CH_2)_4CH_3$	18	$1\cdot10^{13}$	—	—	—
Гелий (ж.)	He	−269,0	—	—	1,048	—
Глицерин	$CH_2OH(CH_2OH)_2$	25	$6,4\cdot10^{6}$	—	42,1	—
Кислород (ж.)	O_2	−182,9	—	—	1,403	—
Кислота муравьиная	HCOOH	18	$5,6\cdot10^{3}$	—	57,9	—
Кислота олеиновая	$C_{17}H_{33}COOH$	15 21,9	$2\cdot10^{10}$ —	— —	— 2,43	— —
Кислота серная	H_2SO_4	25	$1\cdot10^{2}$	—	—	—
Кислота уксусная	CH_3COOH	25	$1,1\cdot10^{6}$	—	6,19	—
Масло касторовое (рициновое)	см. [4]	20 100	$6\cdot10^{10}$—$5\cdot10^{10}$ —	14—16 —	4—4,5 3,5—4,0	0,01—0,03 0,2—0,8
Масло кремнийорганическое	Метилполисилоксаны	20	10^{12}—10^{15}	20—42,5	2,5—3,5	0,0002—0,0005
Масло конденсаторное	Синтетическое трансформаторное	20	10^{14}	20	2,1—2,3	0,002—0,005
Масло трансформаторное	Смесь углеводородов	20 90	10^{14}—10^{15} 10^{14}—10^{15}	20—25	2,1—2,2	0,01—0,0002
Сероводород (ж.)	H_2S	−61,8	$1\cdot10^{11}$	—	8,01	—
Сероуглерод	CS_2	25	—	—	2,625	—
Спирт метиловый	CH_3OH	20	$5,8\cdot10^{5}$	—	37,92(10^{5})	—
Спирт этиловый	CH_3CH_2OH	0	$1,6\cdot10^{7}$	—	—	—
		18	$6,4\cdot10^{6}$	—	26,4(10^{5})	—
		25	$1,3\cdot10^{6}$	—	—	—

Вещество	Химический состав	T, °C	ρ, ом·см	$E'_{пр}$	ε[1]	tg δ
Толуол	$C_6H_5CH_3$	19,5	$<1\cdot10^{14}$	—	2,155(0)	—
Фтор (ж.)	F_2	−0,87	·	—	1,517	—
Хлор (ж.)	Cl_2	−70	$1\cdot10^{15}$	—	2,048	—
Этиленгликоль	$C_2H_6O_2$	—	·	—	38,7	—
Эфир диэтиловый	$(C_2H_5)_2O$	25	$4\cdot10^{13}$	—	4,22	—
		б) газы				
Азот	N_2	0	—	1,0	1,00058	—
Аргон	Ar	0		0,96	1,000554	—
Вода (пар)	H_2O	110	—	·	1,0126	—
Водород	H_2	0	—	0,6	1,00027	—
Воздух	Смесь	0	—	1,0	1,00067	—
Гелий	He	0	—	0,9	1,000068	—
Дихлордифторметан (фреон-12)	CF_2Cl_2		—	2,4 ÷ 2,6	1,00353	—
Кислород	O_2	0	—	0,9	1,000532	—
Криптон	Kr	25	·	—	1,000168	—
Неон	Ne	0	—	0,15	1,000127	—
Ртуть	Hg	400		—	1,00074	—
Сера гексафторид (элегаз)	SF_6	25	—	2,3 ÷ 2,5	1,002049	—
Углерода диоксид (углекислый газ)	CO_2	0	·	0,9	1,00099	—

* Пробивное напряжение для газов дано по отношению к воздуху; для воздуха $E_{пр}$ = 30 кв/см при δ=1 см и p = 760 мм рт. ст.
** Значения ε для газов относятся к p = 760 мм рт. ст.

20.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Слюда [4, 9]

Промышленное значение имеют природные разновидности: мусковит ($K_2O\cdot3Al_2O_3\cdot6SiO_2\cdot2H_2O$) и флогопит ($K_2O\cdot6MgO\cdot Al_2O_3\cdot6SiO_2\cdot2H_2O$), а также фторфлогопит (с заменой группы OH ионами фтора), получаемый искусственным путем. Электрические свойства фторфлогопита $\rho = 10^{17} \div 10^{18}$ *ом·см*, $tg\,\delta < 0{,}0001$ при 10^6 *гц*. Электрические характеристики природной слюды сильно зависят от ее чистоты.

Пробивное напряжение тонких (10 *мкм*) листочков мусковита при температуре −200 ÷ +200°C достигает 10^6 *в/мм* (рис. 20.1), у флогопита — $7\cdot10^5$ *в/мм*. Пробивное напряжение конденсаторной слюды не ниже:

20—25 *мкм* — 1500 *в*; 36—45 *мкм* — 2500 *в*;
26—35 *мкм* — 2000 *в*; 46 *мкм* — 3000 *в*.

Удельное сопротивление конденсаторной слюды $\rho \geq 10^{13}$ *ом·см*, $\varepsilon = 6 \div 7{,}5$; $tg\,\delta < 0{,}0006$ при 10^6 *гц*.

Слюда начинает испускать при температуре 500 ÷ 600° C.

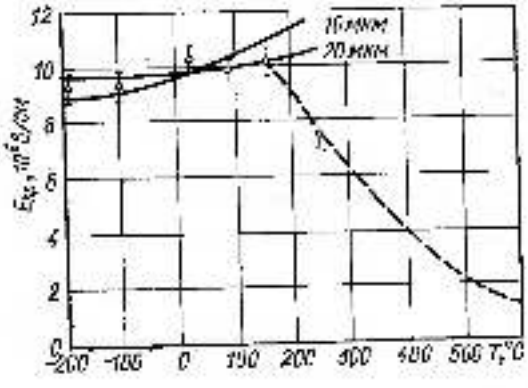


Рис. 20.1. Зависимость пробивного напряжения мусковита от температуры [2]:

сплошная линия — серия для разных толщин образцов; пунктир — серия на образцах; точки — эксперимент.

Стекло, кварц [3, 4]

В состав стекол входят стеклообразующие оксиды (SiO_2, B_2O_3, P_2O_5, As_2O_3), оксиды главных (Na_2O, K_2O, Li_2O, CaO, MgO), а также оксиды промежуточного типа (Al_2O_3, ZnO, PbO, TiO_2). Механизм проводимости стекла обусловлен перемещением слабо связанных ионов, особого ионов натрия. Постоянные стекла обладают худшими электрическими характеристиками, чем отожженные (рис. 20.2, 20.3).

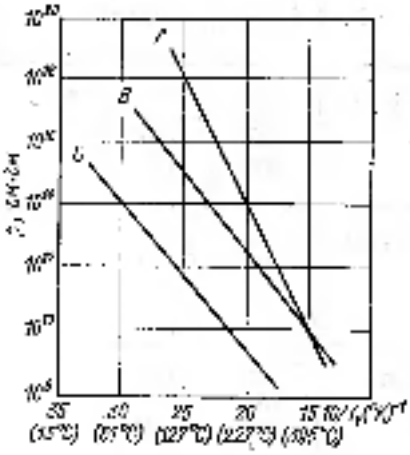


Рис. 20.2. Зависимость удельного сопротивления кварца от температуры [22]:

А — плавленый кварц; Б — прессованный порошок; В — кристалл, С — кристалл, Т — плавленый кварц.

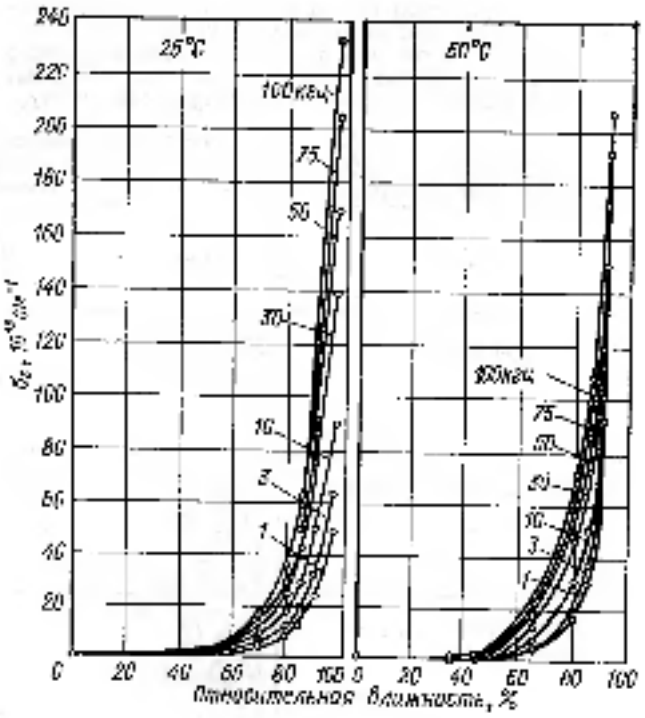


Рис. 20.3. Зависимость поверхностной проводимости σ_s боросиликатного стекла от относительной влажности окружающего воздуха и частоты [3].

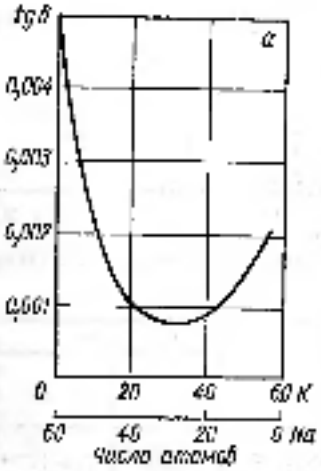
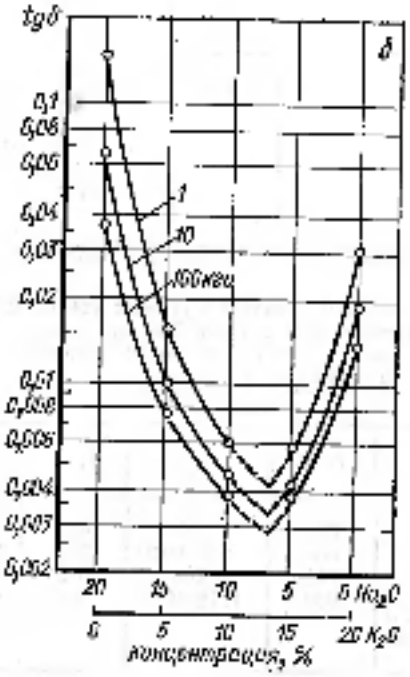


Рис. 20.4. Зависимость tg δ от состава:

а — для Li-содержащего стекла (40% B_2O_3, содержит Na_2O и Li_2O); б — для свинцово-калиевого-силикатного стекла (60% SiO_2, остальное K_2O и PbO) [1, 3].



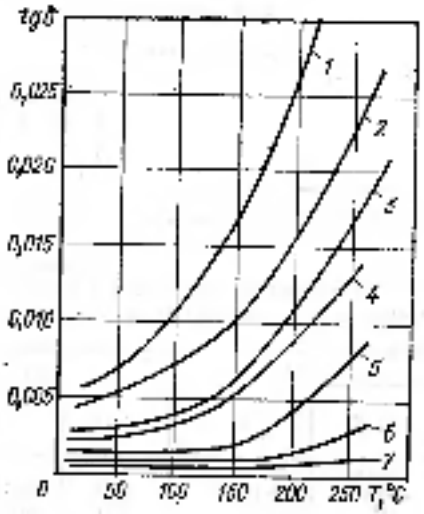


Рис. 20.5. Зависимость tg δ различных стекол от температуры:

1 — стекло № 46; 2 — стекло № 23; 3 — натровый пирекс; 4 — кварц; 5 — алюмоборосиликатный пирекс; 6 — калиевый пирекс; 7 — кварц [1].

Диэлектрическая проницаемость стекол сильно зависит от их состава, увеличиваясь с увеличением содержания тяжелых окислов от $\varepsilon = 3{,}75$ для кварцевого стекла до $\varepsilon = 16{,}2$ для стекла, содержащего 80% PbO; $tg\,\delta$ всех стекол возрастает с температурой; температурный коэффициент ε (ТКЕ) технических стекол изменяется от 30 до $500 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$. Минимальное и наименее зависящее от частоты значение $tg\,\delta$ имеет кварц [$(1-2) \times 10^{-4}$ от 1 до 300 *Мгц*] (рис. 20.4, 20.5).

Таблица 20.2

Свойства электровакуумных стекол [6, 21]

Обозначения: T_p — температура размягчения; α — коэффициент расширения; ρ — удельное сопротивление; ε — диэлектрическая проницаемость; $tg\,\delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь.

Стекло	Химический состав, %	T_p, °C	$\alpha \cdot 10^{-7}$	T, °C	ρ, *ом·см*	ε	$tg\,\delta \cdot 10^{-4}$
С5-1 (кварцевое)	SiO_2 >99,5	>1300	5—6	150 300 500 800	10^{17} 10^{13} 10^{10} 10^{7}	3,75	1—2
1115* (7740 корнинг) (пирекс)	SiO_2 79,6 B_2O_3 15 Al_2O_3 2 Na_2O 3 K_2O 1,5	600	33,4	25 100 200	10^{11} $5 \cdot 10^{11}$ $5 \cdot 10^{9}$	4,1—4,6	130—45
С 37—2* (7070 корнинг) (молибденовое)	SiO_2 70 B_2O_3 27 Na_2O 1,4 K_2O 1 Li_2O 0,6	608	37	25 250 350	10^{17} $2 \cdot 10^{11}$ $2 \cdot 10^{7}$	4,0	6
С 39-1* (С 9, англ.) (вольфрамовое)	SiO_2 73 B_2O_3 10,5 PbO 6 Na_2O 8 K_2O 1,5	630	30,5	150 300	10^{11} $10^{7,5}$	4,2	13
С 49-1 (ЗС5 Na) (7050 корнинг) (молибденовое)	SiO_2 67,6 B_2O_3 20,3 Al_2O_3 2,5 Na_2O 8,7	580	46,0	25 250 350	10^{16} $10^{9,0}$ $10^{7,2}$	4,9	33
С89 1 (0080 корнинг) (платиновое)	SiO_2 71,9 CaO 5,0 MgO 3,5 BaO 2 Na_2O 16,1 K_2O 1	560	89	25 250 350	$10^{12,1}$ $10^{8,4}$ $10^{6,1}$	7,2	50

* Значения ρ, ε и $tg\,\delta$ даны по зарубежным данным, указанным в первом столбце таблицы в скобках.

Таблица 20.3

Газопроницаемость τ электровакуумных стекол [21]*

Газопроницаемость дается в *см*^{3} газа, приведенного к 0°С и 760 *мм рт. ст.*, прошедшего через стеклянную перегородку площадью 1 *см*^{2} и толщиной 1 *мм* за 1 *сек* при разности давлений 1 *мм рт. ст.*

Кварцевое стекло: С5*

Гелий		Водород		Азот		Аргон		Пары	
T, °C	τ	T, °C	τ	T, °C	τ	T, °C	τ	T, °C	τ
—78 0 100 200 400 800	$2 \cdot 10^{-13}$ $6 \cdot 10^{-12}$ $6 \cdot 10^{-11}$ $2 \cdot 10^{-10}$ 10^{-9} $5 \cdot 10^{-9}$	200 300 400 500 700 900	$2 \cdot 10^{-12}$ 10^{-11} $3{,}7 \cdot 10^{-11}$ $1{,}25 \cdot 10^{-10}$ $2{,}52 \cdot 10^{-10}$ $6{,}4 \cdot 10^{-10}$	500 600 700 900	$1{,}4 \cdot 10^{-11}$ $2{,}8 \cdot 10^{-11}$ $4{,}2 \cdot 10^{-11}$ $1{,}18 \cdot 10^{-10}$	600 700 800 900	$6{,}5 \cdot 10^{-12}$ $1{,}32 \cdot 10^{-11}$ $4{,}3 \cdot 10^{-11}$ $1{,}19 \cdot 10^{-10}$	800 900	$1{,}6 \cdot 10^{-12}$ $5{,}8 \cdot 10^{-11}$

Газопроницаемость для гелия

Пирекс*		С 39 — 2* (1720 кирпич)		С 88 — 1* (1030 кирпич)	
t, °C	x	t, °C	x	t, °C	x
—78 0 100 200	10^{-13} $6\cdot10^{-14}$ 10^{-13} 10^{-10}	100 200 400	-10^{-13} $5\cdot10^{-14}$ $3\cdot10^{-13}$	25 100 200 400	$6\cdot10^{-13}$ $2\cdot10^{-14}$ $5\cdot10^{-14}$ $1{,}5\cdot10^{-13}$

* Данные относятся к зарубежным аналогам.

Керамика [4, 5, 7, 9]

Керамика — поликристаллическое соединение окислов, иногда с примесью аморфной фазы (фарфор).

Наиболее высокими механическими, термическими и электроизоляционными свойствами обладают изделия из чистых окислов: Al_2O_3, BeO, MgO. Примесь SiO_2 уменьшает термостойкость и увеличивает проводимость керамических изделий при высоких температурах.

Электротехническая керамика подразделяется на низковольтную, высоковольтную, термостойкую и высокочастотную.

Низковольтный фарфор содержит значительное количество стекло щелочных металлов Na_2O_3 и K_2O, увеличивающих его проводимость и tgδ и уменьшающих прочность на растяжение.

Высоковольтный steatит обладает повышенными механическими и электрическими характеристиками.

Конденсаторная керамика (см. табл. 20.1) отличается повышенной диэлектрической проницаемостью и определенной от зависимости от температуры (*ТКЕ*). Широко применяется керамика на основе $ZrTiO_4$, TiO_2, $CaZrO_3$ и $CaTiO_3$; используется также сегнетоэлектрическая керамика на основе титанатов бария и стронция с ε до 3000. Электрические свойства конденсаторных керамик приведены на рис. 20.6—20.8.

Таблица 20.4

Состав и свойства электротехнической керамики [4]

Керамика	Состав, %	T, °C	ρ_v, Ом·см	tg δ	$E_{пр}$, кВ/мм	ε
Электротехнический фарфор	SiO_2 68—72 Al_2O_3 22—24 Na_2O — K_2O 3,5—6	20 100 200 300	10^{14}—10^{15} 10^{12}—10^{13} 10^{7}—10^{9} 10^{4}—10^{7}	0,035 (50 Гц, 20 °C)	20—28	6—7
Высоковольтный steatит	SiO_2 59 Al_2O_3 3 MgO 27 BaO 10 Na_2O + K_2O 0,2	100 300	$5\cdot10^{14}$ $5\cdot10^{9}$	0,0002(20 °C) 0,003(100 °C)	20—25	6—6,5

Таблица 20.5

Значения *ТКЕ* ($dε/dT$) для различных температурных интервалов и материалов диэлектрика [7]

Группы ТКЕ	Материал диэлектрика	*ТКЕ*, 10^{-6} град$^{-1}$, для интервалов температур, °C		
		От —60 до +20	От +20 до +85	От +85 до +150
М 47	ТК-20	—70	—63	—32
М-75	ТК-20-80	—116	80	66
М-200	Т-80	—720	630	580
М-700	Н 70	—713	640	605
М-1300	Т-150	—1600	1320	1050
Н-40	Т-900	см. рис. 20. 6		
Н-70	СМ 1	см. рис. 20. 6		

Таблица 20.6

Маркировка конденсаторов по *ТКЕ* [7]

$dε/dT$ (*ТКЕ*), 10^{-6} град$^{-1}$	Обозначение на корпусе	Цвет корпуса	Цвет маркировочной точки
+120·10^{-6}	П-120	Синий	—
+33·10^{-6}	П-33	Серый	—
—33·10^{-6}	М-33	Голубой	Коричневый
—47·10^{-6}	М 47	»	—
—75·10^{-6}	М-75	»	Красный
—150·10^{-6}	М 150	Красный	Оранжевый
—220·10^{-6}	М-220	»	Желтый
—330·10^{-6}	М-330	»	Зеленый
—470·10^{-6}	М-470	»	Синий
—750·10^{-6}	М-750	»	—
—1500·10^{-6}	М-1500	Зеленый	—
±30%* (от —60 до +85 °C)	Н-30	Оранжевый	Зеленый
—50%*	Н-50	»	Синий
—70%*	Н-70	»	—
—90%*	Н-90	»	Белый

* Допустимое отклонение номинальной емкости.

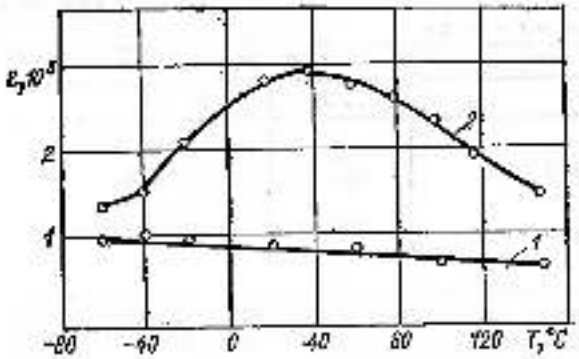


Рис. 20.6. Зависимость ε для сегнетокерамических материалов от температуры, f = 1000 Гц [7]:
1 — Т-150 (Н60); 2 — СМ-1 (Н90).

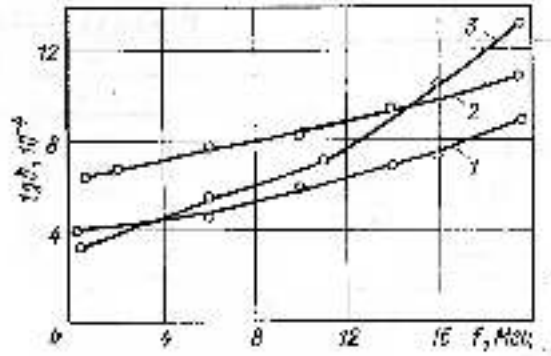


Рис. 20.8. Зависимость tg δ от частоты (T = 20 °С):
1 — ТК-20; 2 — Т-80; 3 — Т-150 [7].

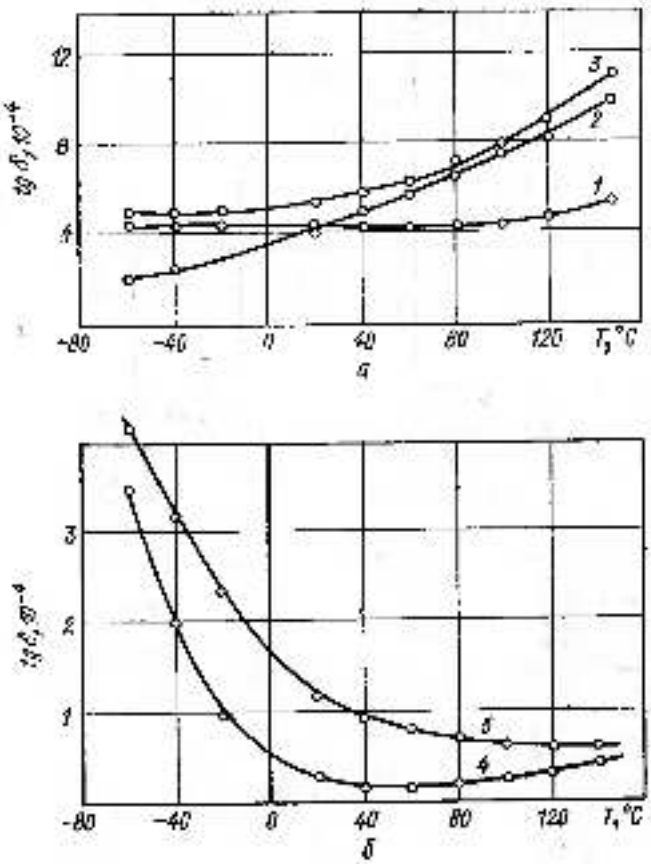


Рис. 20.7. Зависимость tg δ для конденсаторной керамики от температуры [7]:
а — f = 1 + 8 МГц; б — f = 1000 Гц; 1 — Т-150; 2 — ТК-20; 3 — Т-80; 4 — Т-100; 5 — СМ-1.

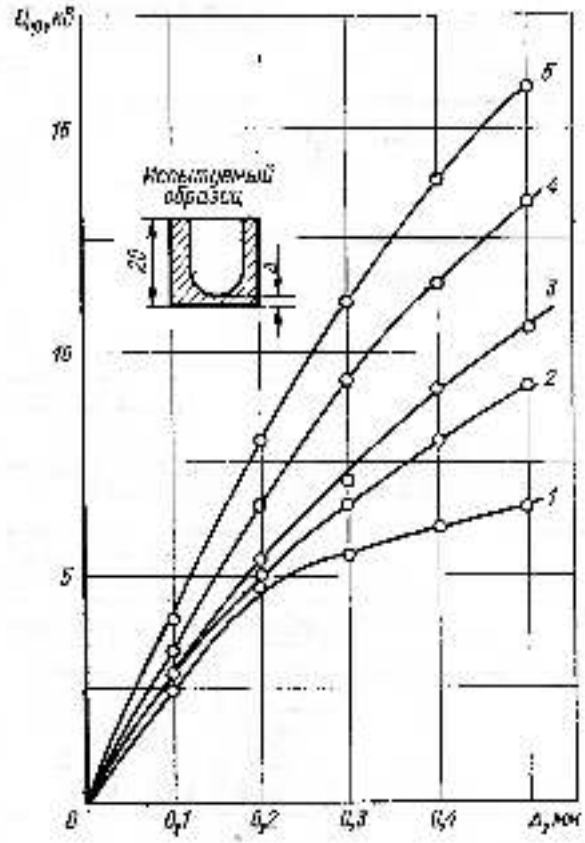


Рис. 20.9. Зависимость пробивного напряжения от толщины диэлектрика для конденсаторной керамики [7]:
1 — СМ-1; 2 — Т-500; 3 — Т-150; 4 — Т-80; 5 — ТК-20.

Таблица 20-7

Электрические свойства

Свойство	Полиэтилен	Полиэтилен терефталат (лавсан) (фторопласт-4)	Полиметилметакрилат	Полистирол	Полиметилметакрилат (орг. стекло)	Эпоксидная смола
Теплостойкость, °С	100	260	60—70	65—95	68—85	140
ρ, ом·см	10^{16}—10^{20}	10^{13}—10^{18}	10^{12}—10^{16}	10^{13}—10^{15}	10^{14}—10^{16}	10^{13}—10^{14}
ε ($f = 10^6$ гц)	2,3	2	3—5	2,45—2,65	3,5—4,5	3,7
$\operatorname{tg}\delta$ ($f = 10^6$ гц)	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	0,03—0,08	$(1—3) \cdot 10^{-4}$	0,14—0,06	0,019
$E_{пр}$, кв/мм	18—20	20—30	12—20	20—35	18—35	18

Электроизоляционные масла

В качестве электрических изоляторов применяются природные нефтяные масла (трансформаторное, конденсаторное, кабельное) и растительное касторовое (рициновое) масло.

Таблица 20.8

Свойства электроизоляционных масел [4]

Свойство	Трансформаторное масло	Касторовое масло (рициновое)
ε	2,1—2,3	4,0—4,4
$\operatorname{tg}\delta$	0,002—0,005	0,01—0,03
ρ, ом·см	10^{14}—10^{17}	$5 \cdot 10^{10}$—$5 \cdot 10^{12}$
$E_{пр}$, кв/мм	20	14—16

На рис. 20.10 представлена зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от содержания в нем воды.

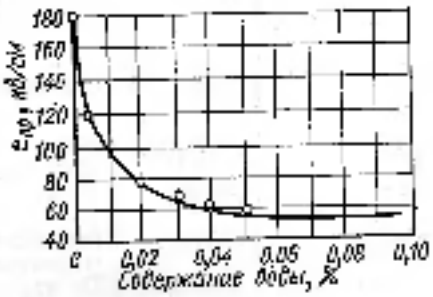


Рис. 20.10. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от содержания воды [19].

20-4. СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ

Сегнетоэлектрики обладают спонтанной электрической поляризованностью при отсутствии внешнего поля. Они характеризуются очень высоким значением ε, сильно зависящим от температуры и приложенного напряжения, и наличием диэлектрического гистерезиса.

Таблица 20.9

Состав и свойства протонных сегнетоэлектриков [10, 11]

Свойство	Сегнетова соль*	Дигидрофосфат калия	Дигидрофосфат аммония	Дигидроарсенат калия	Дигидроарсенат аммония	Триглицинсульфат** (ТГС)	Триглицинселенат**
Состав	$NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$	KH_2PO_4	$NH_4H_2PO_4$	KH_2AsO_4	$NH_4H_2AsO_4$	$(CH_2NH_2COOH)_3H_2SO_4 \cdot 2H_2O$	$(CH_2NH_2COOH)_3H_2SeO_4$
Точка Курие, T_C, °К	$T_{C1} = 258$ $T_{C2} = 255,5$	123	147,9	96,6	216,1	473	320—323
Точка плавления, °С	58	252,6	190	288	300	—	—
Плотность, г/см³	1,775	2,34	2,311	2,86	1,803	—	—
Спонтанная поляризованность, мкк/см²	0,25 (при 0°С)	4,7	4,8	—	—	0,35	
Кристаллическая структура	При $T_{C1} < T < T_{C2}$ моноклинная При $T_{C2} < T < T_{C1}$ ромбическая	Тетрагональная	—	Тетрагональная	—	Тригональная	Моноклинная

* Максимальные значения в пределах от 600 ($T = T_{C1}$) до 4000 ($T = T_{C2}$), $\operatorname{tg}\delta = 0,05$ ($T_{C1} < T < T_{C2}$), $\varepsilon = 0,02$ ($T_{C1} < T < T_{C2}$). Частота колебаний $f = 5 \cdot 10^6$ гц.

** Коэрцитивное поле $E_C = 1,6$ кв/см.

*** $\varepsilon = 1000$ при $T = T_C$.

Таблица 20.10

Состав и свойства беспротонных сегнетоэлектриков кислородно-октаэдрического типа [10]

Название	Химический состав	Кристаллическая структура	Постоянные решетки, Å	Температура фазового перехода, °C	ε
Бария титанат	$BaTiO_3$	Перовскит (тетрагональная)	$a = b = 3,98$ $c = 4,025$	+120	При 20°C ε = 1000 ÷ 2000 в точке Кюри (120°C) ε = (8÷10)·10⁴
Лития танталат	$LiTaO_3$	Ильменит	$a = 5,49$ $\alpha = 56°30'$	> 450	
Натрия ниобат	$NaNbO_3$	Перовскит (тетрагональная)	$a = 2 \times 3,921$ $b = 4 \times 3,868$ $c = 2 \times 3,921$ $\beta = 90°40'$	+640, 518, 480, 300	Антисегнетоэлектрик; при 20°C ε = 250, при 360°C ε = 1000
Свинца гафнат	$PbHfO_3$	Перовскит	$a = 4,136$ $c/a = 0,991$	+215, 163	Антисегнетоэлектрик: при 20°C ε = 100, при 215°C ε = 570
Свинца ниобат	$PbNb_2O_6$	Кубическая типа пирохлора		570	при 20°C ε = 280, при 570°C ε = 750
Свинца танталат	$PbTaO_3$	То же		260	при 20°C ε = 300÷400 при 260°C ε = 1100
Свинца титанат	$PbTiO_3$	Перовскит (тетрагональная)	$a = 3,896$ $c = 4,144$	+500	при 20°C ε = 230, при 500°C ε = 3500
Свинца цирконат	$PbZrO_3$	То же	$a = 4,160$ $c = 4,100$	+235	Антисегнетоэлектрик: при 20°C ε = 260, при 235°C ε = 3750
Стронция титанат	$SrTiO_3$	Перовскит (кубическая)	$a = b = c = 3,896$	−250	

Сегнетоэлектрики подразделяются на протонные (сегнетова соль, дигидрофосфат калия, дигидроарсенаты калия и аммония и др.) и беспротонные (титанат бария, титанат свинца, цирконат свинца и др.).

На рис. 20.11 и 20.12 показана зависимость ε от температуры для сегнетовой соли и дигидрофосфата калия.

Большое практическое значение имеют смешанные сегнетоэлектрические кристаллы, отличающиеся малыми tgδ и высокими удельными сопротивлениями. Смешение двух сходных сегнетоэлектриков дает обычно сегнетоэлектрик с точкой Кюри, расположенной между точками Кюри компонентов, а смешение сегнетоэлектрика

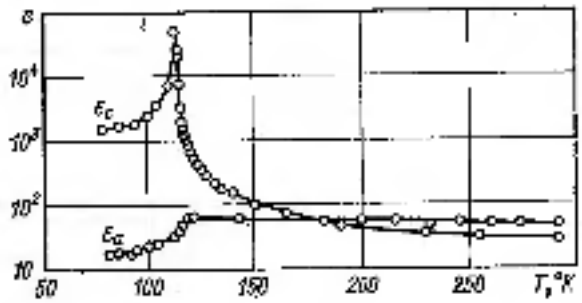


Рис. 20.12. Зависимость диэлектрической проницаемости дигидрофосфата калия от температуры (ε_a — измерения вдоль оси a, ε_c — измерения вдоль оси c) [11].

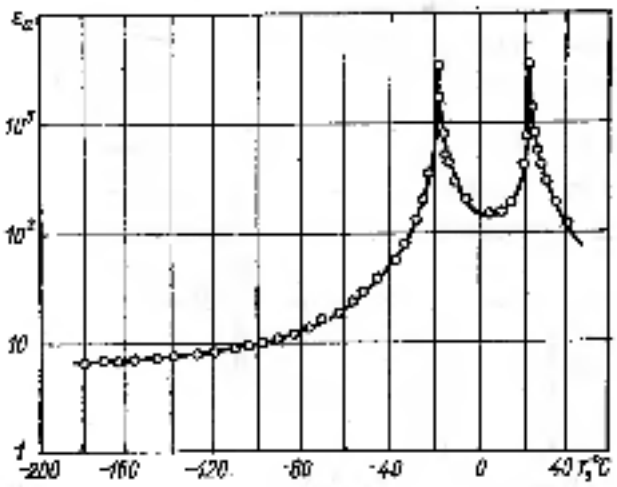


Рис. 20.11. Зависимость диэлектрической проницаемости ε_a в слабых полях для кристаллов сегнетовой соли ($f = 10^6$ гц) от температуры (измерения вдоль оси a) [11].

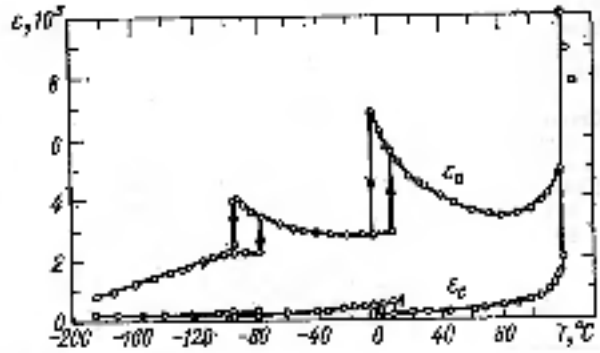


Рис. 20.13. Зависимость диэлектрической проницаемости монокристалла титаната бария от температуры (ε_a — измерения вдоль оси a, ε_c — измерения вдоль оси c) [4].

в сегнетоэлектриком приводит к выравниванию температурной кривой ε. Наиболее подробно изучены системы: $BaTiO_3$ — $SrTiO_3$; $BaTiO_3$ — $CaTiO_3$ и $BaTiO_3$ — $SrTiO_3$—$CaTiO_3$ (см. рис. 20.15—20.16).

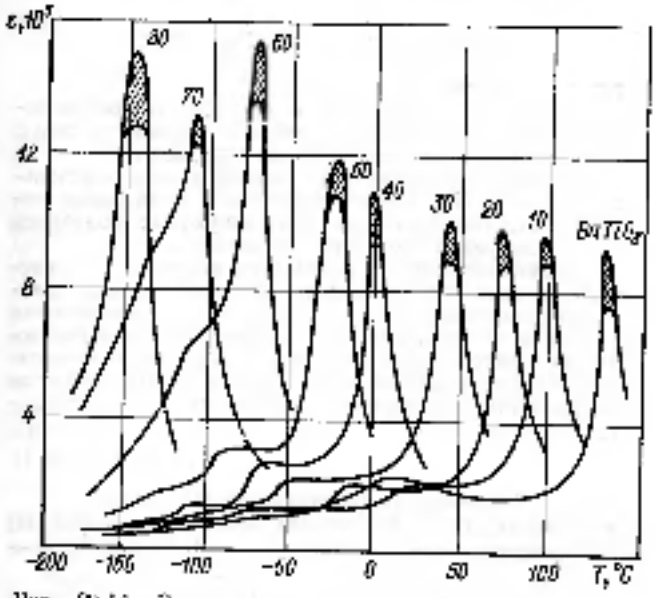


Рис. 20.14. Зависимость диэлектрической проницаемости растворов $BaTiO_3$ — $SrTiO_3$ от температуры [4]. (Числа — содержание $SrTiO_3$, %.)

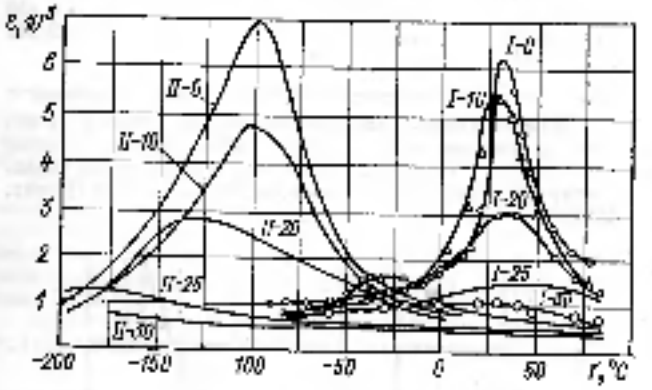


Рис. 20.16. Зависимость диэлектрической проницаемости тройных растворов $BaTiO_3$ — $SrTiO_3$ — $CaTiO_3$ от температуры [4]:

I — отношение $BaTiO_3$: $SrTiO_3$ 3 : 1; II — отношение $BaTiO_3$: $SrTiO_3$ 1 : 1. Числа у кривых — массовое содержание $CaTiO_3$, % [10].

20.5. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКИ

Существуют *прямой* и *обратный* пьезоэлектрические эффекты.

Прямым пьезоэлектрическим эффектом называют эффект образования электростатических зарядов на поверхности диэлектрика и электрическую поляризацию внутри него, которые происходят в результате механического напряжения. В линейном приближении зависимость поляризованности P_i от однородного механического напряжения $T(K)$ может быть представлена в виде

$$P_i = d_{ik} T(k),$$

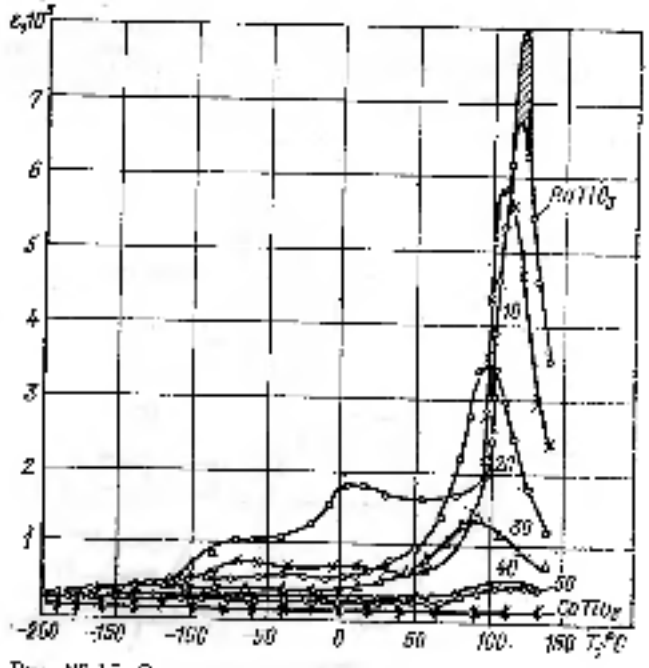


Рис. 20.15. Зависимость диэлектрической проницаемости растворов $BaTiO_3$ — $CaTiO_3$ от температуры [4]. Числа — содержание $CaTiO_3$, %.

где d_{ik} — коэффициенты пропорциональности, называемые *пьезоэлектрическими модулями*.

Обратный пьезоэлектрический эффект заключается в возникновении механического напряжения в кристалле под действием приложенного к нему электрического поля.

Ниже описаны свойства пьезоэлектрических монокристаллов, широко применяемых в технике.

Монокристаллы. Кристаллический кварц является широко распространенным в природе минералом; при температуре ниже 573° С (температура α ⇄ β-превращения и фазового перехода второго рода) он кристаллизуется в тригонально-тетраэдрическом классе гексагональной системы и встречается в природе в двух модификациях: *правой* и *левой* (рис. 20.17)

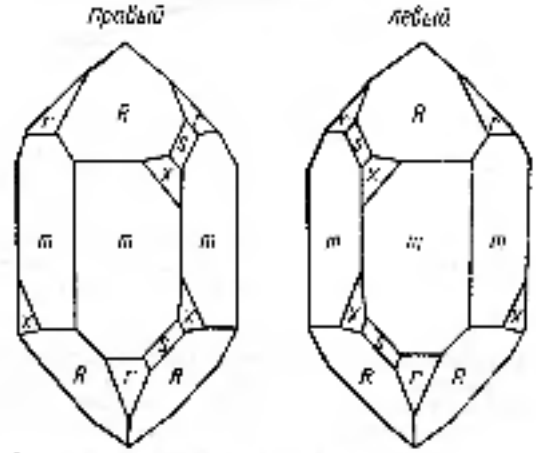


Рис. 20.17. Идеальные формы кристаллов кварца [12].

В настоящее время наряду с природными используются искусственные кристаллы кварца.

Пьезоэлектрические постоянные кварца. По условиям симметрии кристалла α-кварца имеется три независимых пьезоэлектрических модуля: $d_{11} = 6{,}94 \cdot 10^{-8}$; $d_{12} = -6{,}94 \cdot 10^{-8}$ и $d_{14} = -2{,}18 \cdot 10^{-8}$ ед. СГСЭ [14].

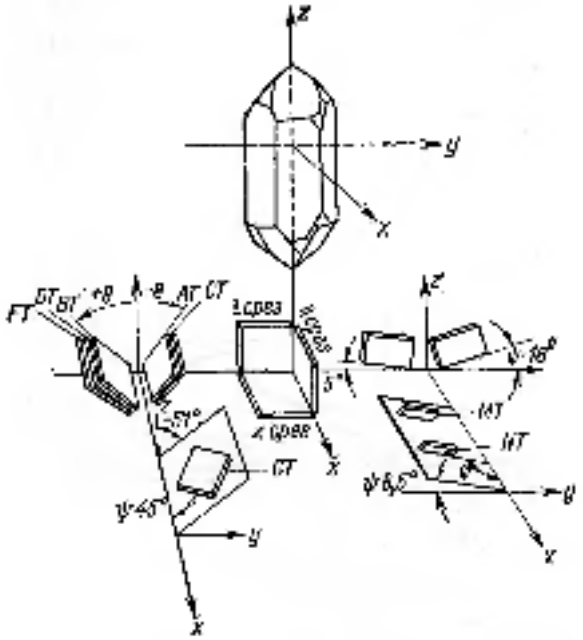


Рис. 20.18. Ориентации типовых срезов относительно осей кристалла кварца [12].

Первые два модуля соответствуют деформации растяжения — сжатия вдоль осей X и Y (рис. 20.18); третий (d_{14}) характеризует пьезоэлектрический эффект при деформации сдвига в плоскостях Z_{yx} и Z_{xy} а также при скручивающих усилиях. Зависимость пьезоэлектрических модулей d_{11} и d_{14} от температуры см. на рис. 20.19.

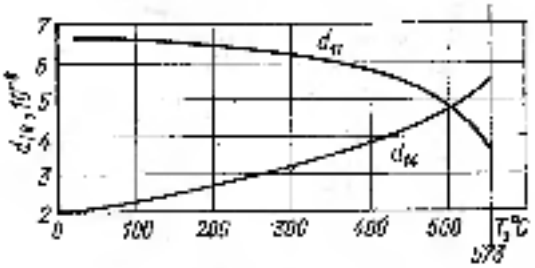


Рис. 20.19. Зависимость пьезоэлектрических модулей d_{11} и d_{14} для α-кварца от температуры (адиабатические значения) [12].

Упругие постоянные кварца. Для малых деформаций и напряжений с достаточной точностью выполняется обобщенный закон Гука, устанавливающий линейную зависимость между деформациями и напряжениями:

$$\varepsilon_{ij} = s_{ijkl}\sigma_{kl}, \quad i, j, k = 1, 2, 3,$$

где ε_{ij} — компоненты тензора деформации; σ_{kl} — компоненты тензора напряжений; s_{ijkl} — компоненты тензора гибкости.

В свою очередь, напряжения могут быть выражены через деформации:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}\varepsilon_{kl}, \quad i, j, k, l = 1, 2, 3,$$

где c_{ijkl} — тензор упругости.

Упругие свойства α-кварца описываются семью независимыми компонентами тензора гибкости и семью компонентами (модулями) тензора упругости.

Пьезоэлектрические свойства кварца широко используются в технике для стабилизации и фильтрации радиочастот, генерирования ультразвуковых колебаний и для измерения механических величин.

Пьезоэлектрические резонаторы вырезают из кристалла кварца параллельно или перпендикулярно кристаллографическим осям, а также под определенными углами к ним (см. рис. 20.18). Для получения необходимых электрических характеристик и малого температурного коэффициента резонансной частоты требуется высокая точность ориентации относительно кристаллографических осей.

Таблица 20.11

Динамический (адиабатический) модуль упругости c_{ij} (20 °C) и константы гибкости s_{ij} α-кварца [13]

c_{ij}, 10^{11} дин/см²	s_{ij}, 10^{-12} см²/дин	c_{ij}, 10^{11} дин/см²	s_{ij}, 10^{-12} см²/дин
$c_{11} = 8{,}674$	$s_{11} = 1{,}277$	$c_{13} = 1{,}191$	$s_{15} = -0{,}122$
$c_{33} = 10{,}72$	$s_{33} = 0{,}966$	$c_{12} = -1{,}791$	$s_{14} = 0{,}450$
$c_{44} = 5{,}794$	$s_{44} = 2{,}009$	$c_{66} = 3{,}989$	$s_{66} = 2{,}012$
$c_{42} = 0{,}655$	$s_{12} = -0{,}176$		

Диэлектрические постоянные кварца. Диэлектрические постоянные кварца описываются двумя главными значениями ε — вдоль оптической оси (ε_3) и перпендикулярно к ней (ε_1): $\varepsilon_3 = 4{,}66$; $\varepsilon_1 = 4{,}65$ [14] (рис. 20.20).

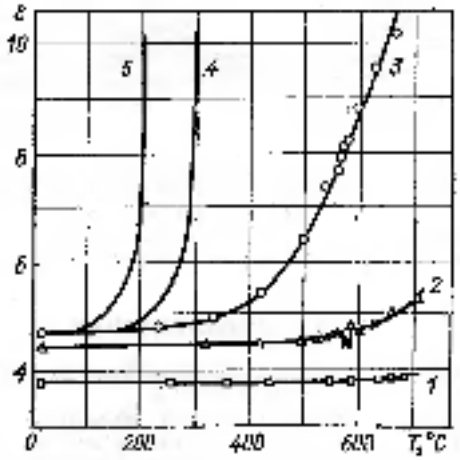


Рис. 20.21. Зависимость диэлектрической проницаемости кристаллического и плавленого кварца от температуры:

1 — для плавленого кварца; 2, 3 — ε_{11} и ε_{33} монокристалла соответственно; 4, 5 — данные, полученные Стюартом [15] для ε_{33} при частотах 90 и 1 кГц соответственно [16].

Таблица 20.12

Типовые срезы кварцевых резонаторов [12]

Срез	Углы пренебреж. эрад			Частотный коэффициент, мм·Мгц	Диапазон частот (Мгц) и область применения
	φ	θ	ψ		
X	90	0	0	2870	Генераторы ультразвуковых частот
Y	0	0	0	1964	
BT	0	49°[1]	0	2580	3—12
AT	0	−35°15′[2]*	0	1700	0,25—3[3]
CT	0	−38°35′	0	3080	0,1—0,4
T	0	−52	0	2000	0,07—0,5
T	0	51°07′	+45	3292	0,1—0,3
MT	90	+34	+6°30′	2700	0,05—0,2
T	90	+38	+6°30′	2834[4]	0,004—0,06 } Фильтры и генераторы
θ	90	0	0	2720	0,05—0,15 }
15°	90	0	+5	2815	
−18°30′	90	0	−18°30′	2551	0,05—0,3 — фильтры

[1] В зависимости от технических требований угол θ берется от +46 до +60°.
[2] В указанном диапазоне частот угол θ варьируется от 34°30′ до 37°30′.
[3] При использовании гармоник среза — AT употребляется до 40 Мгц и более.
[4] Частотный коэффициент зависит от отношения ширины пластины к ее длине.

Сегнетова соль. Сегнетова соль является двойной натриево-калиевой солью винноокаменной кислоты с четырьмя молекулами кристаллизационной воды: $NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$.

Сегнетова соль кристаллизуется в ромботетраэдрическом классе ромбической системы. Теоретически возможно существование правых и левых кристаллов сегнетовой соли; однако получаемые из отходов винодолия кристаллы сегнетовой соли бывают только правыми (рис. 20.21).

Сегнетова соль имеет следующие физические свойства [12]: молекулярная масса 282 г; плотность 1,77 г/см³; верхняя точка Кюри +22,5° С; нижняя точка Кюри −−18° С.

По условиям симметрии сегнетова соль имеет три независимых пьезоэлектрических модуля: $d_{14} = 2,4 \times 10^{-8}$ ед. СГСЭ; $d_{25} = 1,6 \cdot 10^{-8}$ ед. СГСЭ; $d_{36} = 3,5 \times 10^{-8}$ ед. СГСЭ.

Зависимость пьезоэлектрических модулей d_{14}, d_{25} и d_{36} сегнетовой соли от температуры представлена на рис. 20.22.

Наибольшее распространение имеют резонаторы 45°-го X-среза (рис. 20.21); они используются для получения продольных колебаний.

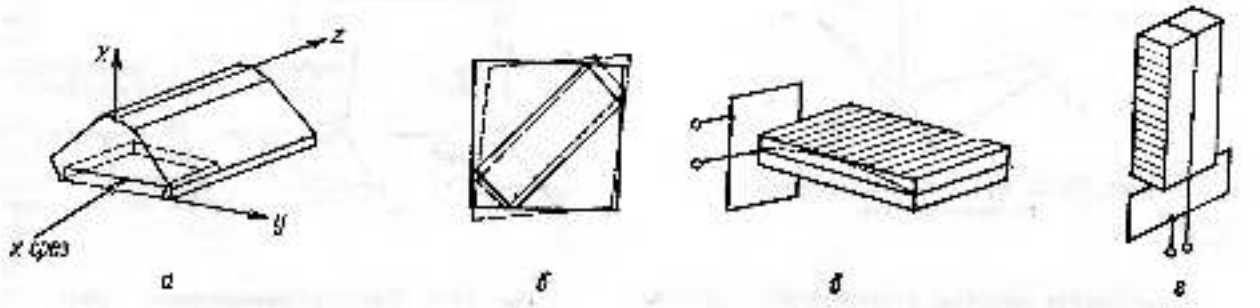


Рис. 20.21. Кристалл сегнетовой соли и различные виды пьезоэлементов [12].

Для использования в звукоспределяющей аппаратуре пластинки 45°-го X-среза склеивают вместе для образования биморфного элемента (рис. 20.21,б). В звукоизлучателях используются также биморфные элементы из двух тонких пластинок X-среза, работающие в режиме крутильных колебаний (рис. 20.21,г).

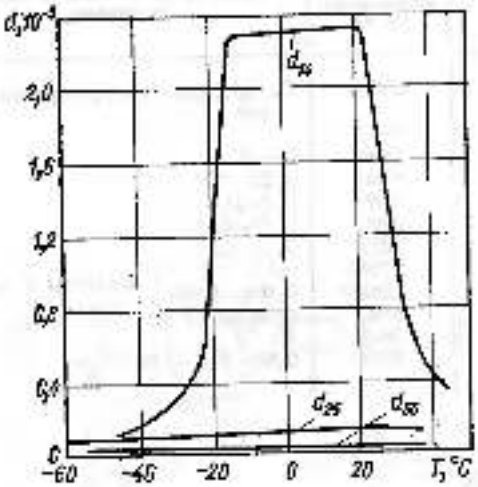


Рис. 20.22. Зависимость пьезоэлектрических модулей d_{14}, d_{25} и d_{36} сегнетовой соли от температуры [12].

Дигидрофосфат аммония. Дигидрофосфат аммония $NH_4H_2PO_4$ кристаллизуется в тетрагональной системе. Кристаллы его представляют собой комбинацию тетрагональной дипирамиды и призмы (см. рис. 20.23).

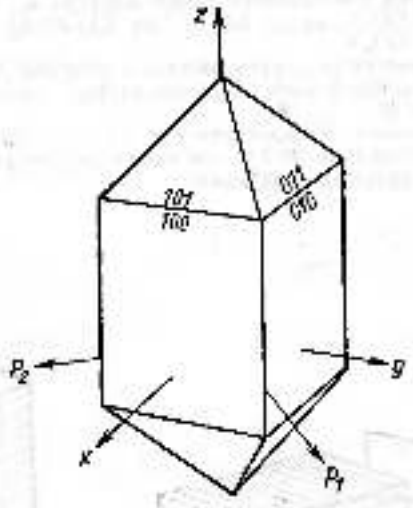


Рис. 20.23. Кристалл дигидрофосфата аммония [12]

Дигидрофосфат аммония характеризуется следующими свойствами [12]: точка плавления 190° С; плотность 2,311 г/см; точка Кюри — 135,5° С; пьезоэлектрический модуль $d_{36} = 1,48 \cdot 10^{-8}$ ед. СГСЭ; пьезоэлектрический модуль $d_{14} = 5 \cdot 10^{-8}$ ед. СГСЭ.

Температурная зависимость пьезоэлектрического модуля d_{36} дигидрофосфата аммония приведена на рис. 20.24.

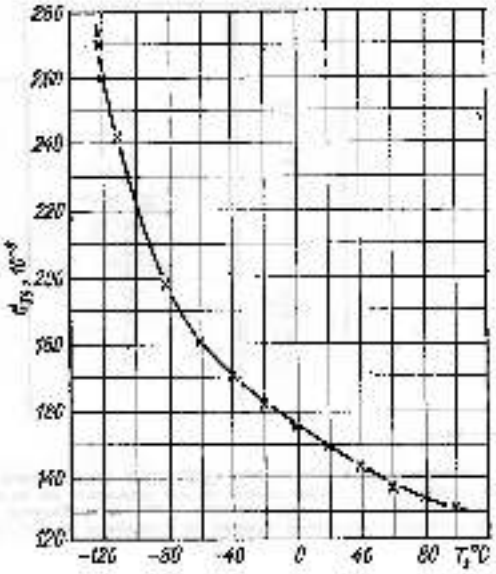


Рис. 20.24. Зависимость пьезоэлектрического модуля d_{36} дигидрофосфата аммония от температуры [12].

Кристаллы дигидрофосфата аммония получаются и обрабатываются так же, как и кристаллы сегнетовой соли. Наиболее широко применяются срезы, перпендикулярные к оси Z.

Виннокислый калий. Виннокислый калий (условное обозначение ВК) кристаллизуется в моноклинной системе (рис. 20.25). Единственным элементом симметрии

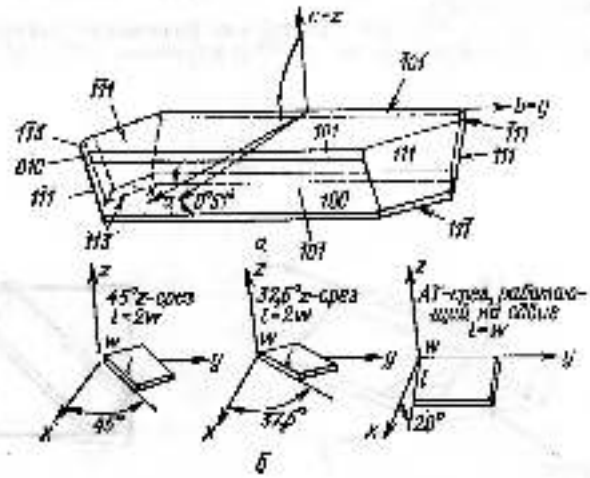


Рис. 20.25. Кристалл виннокислого калия:
а — идеальная форма; б — срезы с нулевым температурным коэффициентом частоты [12].

Таблица 20.13

Физические свойства виннокислого калия [12]

Пьезоэлектрические модули, 10^{-8} ед. СГСЭ	Модуль упругости 10^{-12} см²/дин	Диэлектрические постоянные	Коэффициенты линейного расширения 10^{-6} град⁻¹
d_{14} — −25,0	s_{11} — +2,24	ε_{11} — 6,44	α_{11} — +12,0
d_{21} — +6,5	s_{12} — −0,08	ε_{22} — 5,80	α_{22} — +44,8
d_{31} — −2,2	s_{13} — −1,64	ε_{33} — 6,49	α_{33} — +32,0
d_{32} — +8,5	s_{14} — −0,64	—	α_{13} — −12,0
d_{33} — +10,4	s_{22} — +3,37	—	—
d_{34} — −22,5	s_{23} — −1,05	—	—
d_{36} — +29,4	s_{24} — −0,57	—	—
d_{36} — −66,0	s_{33} — +3,96	—	—
—	s_{34} — +0,90	—	—
—	s_{44} — +11,9	—	—
—	s_{46} — +0,57	—	—
—	s_{56} — +8,15	—	—
—	s_{66} — +10,41	—	—

кристалла виннокислого калия является ось двойной симметрии b. Как следствие этого, кристалл его имеет четыре значения диэлектрической проницаемости, восемь пьезоэлектрических модулей и 18 модулей упругости.

Низкая симметрия кристаллов виннокислого калия создает широкую возможность (на базе большого числа упругих постоянных) получения срезов с низкими температурными коэффициентами частоты (см. рис. 20.25).

Этилен-диамин-тартрат. Кристаллы этилен-диаминной соли винной кислоты (условное обозначение ЭДТ) кристаллизуются в моноклинной системе (рис. 20.26,а). Химический состав этилен-диамин-тартрата $C_6H_{12}N_2O_6$. Кристалл этилен-диамин-тартрата имеет восемь независимых пьезоэлектрических модулей. Значения двух из них равны соответственно $d_{31} = 3,4 \times 10^{-7}$ ед. СГСЭ, $d_{21} = -3,1 \cdot 10^{-7}$ ед. СГСЭ [12].

Наиболее употребительные срезы резонаторов с малым температурным коэффициентом резонансной частоты показаны на рис. 20.26,б.

Пьезоэлектрическая керамика. Пьезоэлектрические и другие свойства пьезокерамики титаната бария и его производных приведены в табл. 20.14. Зависимость пьезоэлектрического модуля d_{31} и диэлектрической проницаемости ε от температуры керамики $(Ba_{0,5}Ca_{0,05}Pb_{0,12})$ TiO_3 показана на рис. 20.27.

Обозначения основных величин, приведенные ниже, следующие: ρ — плотность (объемная масса); $E(\mu)$ — модуль упругости (модуль Юнга); ε — диэлектрическая проницаемость; $\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь; Q — добротность; f — частота; $\Delta f/f_0$ — уход резонансной частоты в указанном интервале температур; $c_{ур}$ — скорость звука; d — пьезоэлектрический модуль; d_{33} — пьезоэлектрический модуль продольных колебаний; d_{31} — пьезоэлектрический модуль радиальных колебаний; d/ε, $d/\sqrt{\varepsilon}$ — характеристики эффективности в режиме приема; $dE_0\eta\sqrt{\varepsilon}$, $dE_0/\varepsilon\operatorname{tg}\delta$ — характеристики эффективности в режиме излучения; σ_c — предел прочности на изгиб; σ_c — предел прочности на сжатие; σ_p — предел прочности на растяжение; K — коэффициент электромеханической связи; θ — точка Кюри; ТКЧ — температурный коэффициент резонансной частоты.

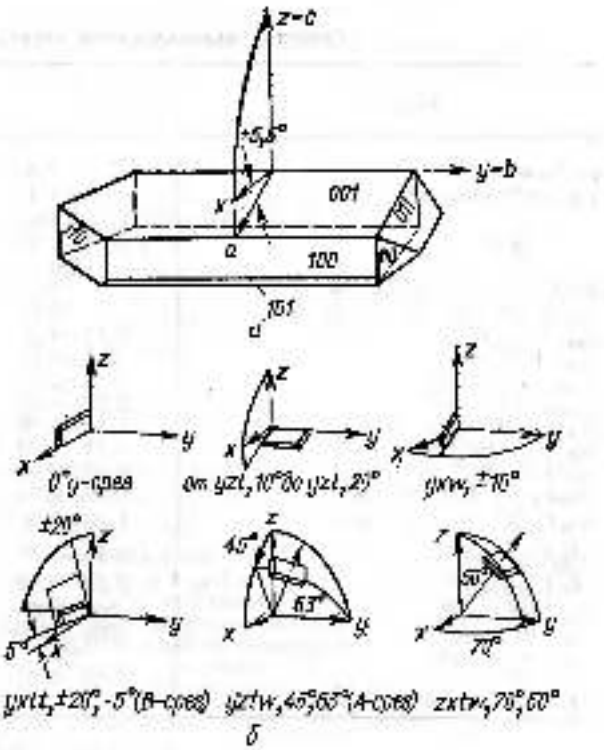


Рис. 20.26. Кристалл этилен-диамин-тартрата:
а — правильная форма; б — срезы с нулевым температурным коэффициентом резонансной частоты [12].

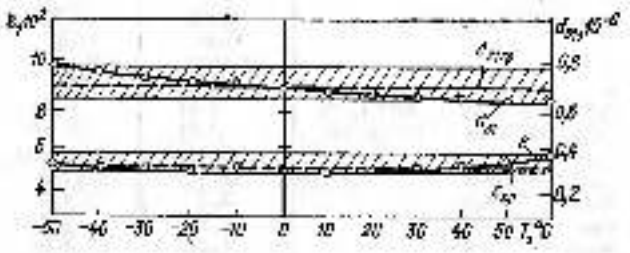


Рис. 20.27. Зависимость пьезоэлектрического модуля d_{31} и диэлектрической проницаемости ε от температуры керамики $(Ba_{0,5}Ca_{0,05}Pb_{0,12})$ TiO_3 [17].

Цирконат-титанат свинца (ЦТС) и его производные. К числу наиболее эффективных керамических сегнетоэлектриков относятся пьезокерамические материалы системы ЦТС, представляющие собой твердые растворы цирконата свинца $PbZrO_3$ в титанате свинца $PbTiO_3$ с малыми добавками некоторых трех- и пятивалентных элементов и частичным замещением свинца стронцием.

Пьезоэлектрические и другие свойства материалов ЦТС приведены в табл. 20.15.

Таблица 20.14

Свойства пьезокераминки титаната бария и его производных [17, 18]

Величина	$BaTiO_3$	$(BaCa)TiO_3$ (отжиг: $CaTiO_3$ 5–7%)	$(Ba_{0,5}Sr_{0,08}Pb_{0,12})\times$ $\times TiO_3$	$(BaCa)TiO_3$ + Co
ρ, $г/см^3$	5,3–5,8	5,1–5,75	4,8–5,4	6,4
E_{10}, 10^{10} $дин/см^2$	1,6–1,1	1,08–1,16	1,0–1,22	1,07–1,2
ε	1100–1800	670–1200	300–600	1000–1200
$tg\,\delta$	$3\cdot10^{-3}$–$3\cdot10^{-2}$	$(1,0–1,5)\cdot10^{-2}$	$3\cdot10^{-3}$–$1\cdot10^{-2}$	$(1,0–1,5)\cdot10^{-2}$
Q	400	600	1200	—
$\Delta f/f_0$ (от 0 до 40°C), %	7	3,6	0,2	1,7
$\Delta f/f_0$ (от 0 до 60°C), %	8,5	12	1,2	5,8
c_{33}, 10^{10} $см/сек$	4,16–4,3	4,45	4,8–5,3	4,46–4,6
d_{33}, 10^{-8} $см/в$	2,5–6,0	1,6–2,1	1,4–2,5	3,5
d_{31}, 10^{-8} $см/в$	1,3–2,6	0,85–1,74	0,4–1,6	1,1–1,35
d_{33}/ε, 10^{-8} $см/в$	2,27–3,33	1,75–2,4	1,2–4,7	2,9–3,5
d_{31}/ε, 10^{-8} $см/в$	1,18–1,39	1,41–1,45	1,33–2,5	1,1
$d_{33}/\sqrt{\varepsilon}$, 10^{-8} $см/в$	0,75–1,41	0,61	0,81–1,02	1,1
$d_{31}/\sqrt{\varepsilon}$, 10^{-8} $см/в$	0,30–0,59	0,36–0,5	0,23–0,61	0,36–0,39
$(d_{33}E_{10})^2$, 10^{10} $дин/см^2$	6,25–43,4	1,02–4,1	1,96–9,3	14–17,6
$(d_{31}E_{10})^2$, 10^{10} $дин/см^2$	1,00–7,5	2,96–5,8	0,16–2,5	1,4–2,5
$d_{33}^2E_{10}/\varepsilon\,tg\,\delta$	0,79–1,9	0,28–0,43	1,27–2,2	0,6–1,3
$d_{31}E_{10}/\varepsilon\,tg\,\delta$	0,13–0,51	0,14–0,19	0,18–0,46	0,12–0,13
σ_n, 10^5 $г/см^2$	600–800	650	—	750
σ_c, 10^8 $г/см^2$	3000–4500	3500	3000–5500	3300
ε_p, 10^3 $г/см^3$	250	300	. .	325
K	0,16–0,37	0,325	0,17–0,25	—
ТКЧ, 10^{-6} $град^{-1}$	—	-	37–66	—

Таблица 20.15

Свойства материалов ЦТС [17, 18]

А — $Pb_{0,95}Sr_{0,05}(Zr_{0,53}Ti_{0,47})O_3$ + 1% Ta_2O_5;

Б — $Pb_{0,97}Sr_{0,03}(Zr_{0,53}Ti_{0,47})O_3$ + 1% Nb_2O_5

Величина	*А*	*Б*
ρ, $г/см^3$	7,3	7,3
E_{10}, 10^{10} $дин/см^2$	0,62	0,72
ε	1100	1760
$tg\,\delta$	$2\cdot10^{-2}$	$2,2\cdot10^{-2}$
Q	70	70
$\Delta f/f_0$ (от 0 до + 40°C), %	0,24	0,44
$\Delta f/f_0$ (от 0 до −40°C), %	0,94	0,44
c_{33}, 10^5 $см/сек$	3,5–4,0	3,6–4,0
d_{33}, 10^{-8} $см/в$	8,5	10,9
d_{31}, 10^{-8} $см/в$	3,7	4,7
d_{33}/ε, 10^{-8} $см/в$	7,7	6,2
d_{31}/ε, 10^{-8} $см/в$	1,23	2,67
$d_{33}/\sqrt{\varepsilon}$, 10^{-8} $см/в$	2,56	2,6
$d_{31}/\sqrt{\varepsilon}$, 10^{-8} $см/в$	1,12	1,12
$(d_{33}E_{10})^2$, 10^{10} $дин/см^2$	27,5	61,5
$(d_{31}E_{10})^2$, 10^{10} $дин/см^2$	5,2	11,5
$d_{33}^2E_{10}/\varepsilon\,tg\,\delta$	2,04	2,2
$d_{31}^2E_{10}/\varepsilon\,tg\,\delta$	0,38	0,41
K	0,45	0,42
ТКЧ, 10^{-6}	60	101
t, °C	330	305

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жданов Г. С.** Физика твердого тела. М., Изд-во МГУ, 1962.
2. **Франц В.** Пробой диэлектриков. Пер. с англ. М. Изд-во иностр. лит., 1961.
3. **Берис Дж. Б., Шульман Дж. Г.** Прогресс в области диэлектриков. Т. 1, 2. Пер. с англ. М., Госэнергоиздат, 1961.
4. **Справочник** по электротехническим материалам. Электроизоляционные материалы. Ч. 1. М.—Л., Госэнергоиздат, 1965.
5. **Кинджери В. Д.** Измерения при высоких температурах. Пер. с англ. М., Металлургиздат, 1960.
6. **Любимов М. Л.** Спаи металла со стеклом. М., «Энергия», 1966.
7. **Гребенский П. О., Терентьева Г. Н.** Миниатюрные керамические конденсаторы. М.—Л., «Энергия», 1966.
8. **Техника** высоких температур. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
9. **Корицкий Ю. В.** Электротехническое материаловедение. М., «Энергия», 1968.
10. **Справочник** по электротехническим материалам. Т. 2. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
11. **Мопп Ф., Ширане Д.** Сегнетоэлектрические кристаллы. Пер. с англ. М., «Мир», 1965.
12. **Справочник** по электротехническим материалам. Под общ. ред. К. А. Андрианова, Н. П. Богородицкого, Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова и Б. М. Тареева. Т. II. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
13. Bechman R. "Phys. Rev.", 1956, v. 110, p. 1060.
14. **Скагин А. Г., Ярославский М. И.** Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы. М., «Энергия», 1970.
15. Stuart M. R. "J. Appl. Phys.", 1955, v. 26, N 12, p. 1259.
16. **Зубов В. Г., Фирсова М. М., Молокова Т. М.** «Кристаллография», 1973, т. 8, с. 112.
17. **Гловацкий Н. А.** Пьезокерамика. М., «Энергия», 1967.
18. **Глозман И. А.** Пьезокерамические материалы в электронной технике. М.—Л., «Энергия», 1965.

19. Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Электротехнические материалы. М., Госэнергоиздат, 1961.
20. Справочник по электротехническим материалам. Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. Т. 1. М., «Энергия», 1974.
21. Эспе В. Технология электровакуумных материалов. Пер. с нем. Т. 2. М., «Энергия», 1968.

ГЛАВА 21

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

21.1. ВВЕДЕНИЕ

Вещества, в которых при $T = 0$ К верхняя из заполненных электронами энергетических зон (валентная зона) и нижняя из незаполненных электронами энергетических зон (зона проводимости) не перекрываются, называются *полупроводниками* или *диэлектриками*. Граница между двумя весьма условна — в полупроводниках энергетический зазор между зоной проводимости и валентной зоной не очень велик, что приводит к появлению в зонах заметного числа свободных носителей заряда при $T > 0$ К.

Обычно к полупроводникам относят вещества с удельным сопротивлением $\rho \lesssim 10^{10}$ *ом·см* (при $T = 290$ К). Поскольку в металлах $\rho = 10^{-6} \div 10^{-4}$ *ом·см*, то удельное сопротивление полупроводников находится в интервале $10^{-3} \lesssim \rho \lesssim 10^{10}$ *ом·см*.

Для веществ этого класса характерны рост проводимости с температурой, когда (по сравнению с металлами) концентрация носителей тока, высокая чувствительность электрических свойств по отношению к воздействию излучений и наличию примесей, а также нелинейное поведение контактов.

Ширина запрещенной зоны. Ширина запрещенной зоны E_g представляет собой энергетический зазор между абсолютным максимумом валентной зоны и абсолютным минимумом зоны проводимости*.

Определяется она по изменению сопротивления с ростом температуры или оптическими методами (край полосы поглощения, длинноволновая граница фотопроводимости). Значение E_g зависит от температуры и давления; эта зависимость определяется коэффициентами $\alpha_T = dE_g/dT$ и $\alpha_P = dE_g/dP$ (коэффициенты изменения ширины запрещенной зоны с изменением температуры и давления соответственно).

Эффект Холла. В полупроводнике, помещенном в магнитное поле, перпендикулярное протекающему по нему току, возбуждается электрическое поле, направленное перпендикулярно току и магнитному полю. Это так называемый *эффект Холла*, описываемый соотношением

$$E_H = RjH,$$

где E_H — напряженность холловского электрического поля; j — плотность тока; H — напряженность магнитного поля; R — постоянная Холла. В случае носителей одного сорта (в концентрации n) для изотропной зоны

$$R = \pm r/ne, \quad 1 \leqslant r \leqslant 2.$$

Здесь R измеряется в *см³/к*, n — в *см⁻³*, $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *к*; r — числовой множитель (так называемый холл-фактор), значение которого определяется механизмом релаксации импульса носителей. Знак R связан со знаком заряда носителей ($R < 0$ в образцах n-типа, $R > 0$ в образцах p-типа).

При наличии двух сортов носителей (например, электронов и дырок) R зависит от напряженности магнитного поля:

$$R = \frac{R_n \sigma_n^2 \left(1 + \sigma_p^2 H^2 R_p^2\right) + R_p \sigma_p^2 \left(1 + \sigma_n^2 H^2 R_n^2\right)}{(\sigma_n + \sigma_p)^2 + \sigma_n \sigma_p (R_n + R_p) H^2}.$$

Здесь $\sigma_n = ne\mu_n$, $\sigma_p = pe\mu_p$, $R_n = -1/ne$, $R_p = 1/pe$. При $H \to \infty$ $R \to 1/e(p - n)$, если $p \neq n$, и $R = (1/ne)[\mu_p - \mu_n/(\mu_p + \mu_n)]$, если $p = n = n_i$.

Подвижность носителей и проводимость. Дрейфовая подвижность $\mu = v_{др}/E$, где $v_{др}$ — дрейфовая скорость носителя, E — электрическое поле. Дрейфовая подвижность носителей определяется прямыми опытами по измерению времени распространения инжектируемого импульса основных носителей в образце.

Удельная проводимость в связи с дрейфовыми подвижностями μ_n и μ_p и концентрациями электронов n и дырок p определяется

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p).$$

Измерение эффекта Холла позволяет определить холловскую подвижность $\mu_H = |R\sigma|$, связанную с дрейфовой подвижностью соотношением $\mu_H = \mu r$.

Время жизни носителей. Время жизни τ — время, характеризующее экспоненциальный спад неравновесной концентрации носителей в результате их рекомбинации. Существуют следующие механизмы рекомбинации: излучательный (энергия рекомбинирующей пары электрон — дырка излучается в виде фотона), фононный (энергия пары передается решетке), ударный (энергия пары передается третьей частице).

Чаще всего имеет место не прямая рекомбинация, а процесс идет через рекомбинационные центры (примеси, дефекты).

Теоретическая оценка времени излучательной рекомбинации τ_R дает верхний предел τ.

Поверхностная рекомбинация. Помимо рекомбинации в объеме носители могут рекомбинировать на поверхности полупроводника. Скорость поверхностной рекомбинации s определяется как скорость потока частиц из объема к поверхности, необходимого для поддержания на ней избыточного числа неравновесных носителей. Значение s сильно зависит от способа обработки поверхности. Так, для Ge при травлении поверхности в кипящей H_2O_2 $s \sim 10$ *см/сек*, а при шлифовке $s \sim 10^6$ *см/сек* и более. Обычно $s = 10^2 \div 10^4$ *см/сек*.

Длина диффузии. Длина диффузии L_D — расстояние, характеризующее пространственный спад неравновесной концентрации носителей по упругеевского значению. Значение L_D определяется соотношением $L_D = \sqrt{D\tau}$, где D — коэффициент диффузии, τ — время жизни. Коэффициент диффузии и подвижность связаны соотношением Эйнштейна $D = \frac{kT}{e}\mu$ (в невырожденном полупроводнике). Максимальная длина диффузии

*Это определение не относится к материалам с инвертированной зонной структурой типа HgTe (см., например, работу [64]).

Таблица 21.1

Время рекомбинации τ и время релаксационной рекомбинации τ_R для некоторых полупроводников [162]. Концентрация носителей близка к собственной, $T = 300$ К.

Материал	Si	Ge	InSb	InAs	PbS	PbSe	PbTe
τ_R, сек	1	0.3	$3\cdot10^{-7}$	10^{-6}	10^{-6}	$3\cdot10^{-6}$	$2\cdot10^{-6}$
τ, сек	$2\cdot10^{-3}$	$5\cdot10^{-3}$	$3\cdot10^{-3}$	10^{-7}	10^{-6}		—

характеризует степень совершенства и чистоты кристалла. При $T = 300°$ К $L_D = 0.5$ см в Ge, $L_D = 0.4$ см в Si и $L_D = 10^{-5} \div 10^{-6}$ см в InSb [162].

Структура зон и эффективные массы. Эффективная масса носителя m^* характеризует его движение в кристаллической решетке. Обратная эффективная масса $(m^*)^{-1}$ — тензорная величина, определяемая зависимостью энергии носителя E от его волнового вектора $\mathbf{k}$:

$$(m^*_{ij})^{-1} = \frac{1}{\hbar^2}\left|\frac{\partial^2 E(\mathbf{k})}{\partial k_i\, \partial k_j}\right|.$$

Обычно достаточно знать вид $E(\mathbf{k})$ лишь вблизи экстремальных точек — минимумов или максимумов энергии. Изоэнергетические поверхности вблизи экстремумов представляют часто в виде эллипсоидов (с эффективными массами, например, для шестивальных подзон валентной зоны m_{p_1}, m_{p_2} и т. д.) или эллипсоидов (с эффективными массами для зоны проводимости $m_{\parallel}$, $m_{\perp}$, $m_{\parallel 1}$, $m_{\perp 1}$)[1].

Для анализа различных экспериментальных данных часто получается скалярной величиной эффективной массы плотности состояний (m_{dn} и m_{dp} для электронов и дырок соответственно), которая в случае эллипсоидальных изоэнергетических поверхностей выходит из соотношения

$$m_{dn} = N^{2/3}(m_{\parallel}\, m_{\perp}\, m_{\perp 1})^{1/3},$$

где N — число экстремумов зоны.

В случае энергетических зон, имеющих вырожденные сферические поверхности постоянной энергии с эффективными массами m_{p1}, m_{p2} и т. д., эффективная масса плотности состояний определяется следующим образом:

$$m_{dp} = (m_{p1}^{3/2} + m_{p2}^{3/2} + \ldots)^{2/3}.$$

Различают также циклотронную эффективную массу m_c и циклотронную эффективную массу m_z, определяемых соотношениями

$$\frac{1}{m_z} = \frac{1}{3}\left(\frac{1}{m_{\parallel}} + \frac{1}{m_{\perp 1}} + \frac{1}{m_{\perp 2}}\right)$$

(эллипсоидальные изоэнергетические поверхности),

$$m_c = \frac{\hbar}{2\pi}\frac{\partial S}{\partial E}$$

(S — площадь сечения изоэнергетической поверхности плоскостью, нормальной к магнитному полю).

Общие выражения для масс m_d, m_z, m_c см., например, в работе [89].

Прямым методом определения $E(\mathbf{k})$ и эффективных масс является циклотронный резонанс. Данные сведения о зонной структуре и эффективных массах дают измерения электронных магнетосопротивлений, эффект типа Публянова — де Гааза и магнетооптических эффектов.

Собственная концентрация носителей. Собственная концентрация носителей n_i соответствует идеально чистому материалу и вычисляется, если известна структура зон и эффективные массы, по формуле

$$n_i = 4.82\cdot10^{15}\, T^{3/2}\left(\frac{m_{dn}\, m_{dp}}{m_0^2}\right)^{3/4} \exp\left(-\frac{E_g - \alpha_T T}{kT}\right).$$

Здесь m_{dn}, m_{dp} — эффективные массы плотности состояний электронов и дырок соответственно; m_0 — масса свободного электрона; k — постоянная Больцмана; α_T — коэффициент температурной зависимости ширины запрещенной зоны.

Обычно n_i определяют экспериментально по данным измерений эффекта Холла и проводимости в соответствующем интервале температур.

Температура Дебая. Температура Дебая T_D определяется через граничную частоту ω_m колебаний решетки с помощью соотношения

$$kT_D = \hbar\omega_m.$$

Различным ветвям колебаний соответствуют различные температуры Дебая. Значение T_D, определяемое по тепловым измерениям, является усредненным по различным (существенным при температуре измерений) ветвям колебаний. Более детальную информацию дают, например, измерения упругих констант.

Предельные частоты оптических фононов. Предельные частоты ω_l, ω_t оптических фононов — частоты соответствующих (продольных и поперечных) оптических колебаний решетки с длиной волны, значительно превышающими межатомное расстояние. Определяются из спектров поглощения и отражения инфракрасного излучения, а также с помощью нейтронной спектроскопии. В элементах (Si, Ge и др.) $\omega_l = \omega_t = \omega_0$.

Фактор спектроскопического расщепления. Фактор спектроскопического расщепления g определяется расщеплением энергетических уровней носителей в магнитном поле за счет их магнитного момента

$$E = \left(N + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega_H + \frac{1}{2}\, g\beta\omega_H, \quad N = 1, 2, \ldots,$$

где ω_H — циклотронная частота носителя в кристалле. Определяется из измерений осциллирующих эффектов в магнитном поле методом спин- и ядерного магнитного резонанса.

Диэлектрическая проницаемость. Значения диэлектрической проницаемости ε_0 и ε_∞ получают из статических и высокочастотных (или оптических) измерений соответственно.

Коэффициент термо-э. д. с. Коэффициент термо-э. д. с. — э. д. с., возникающая на концах образца при разности температур между горячим и холодным концами в 1°.

В таблицах приводятся значения определенных выше величин E_g, кроме того, значения плотности ρ, температуры плавления $T_{пл}$ и удельной теплопроводности $\varkappa$, а также энергии ионизации доноров E_D и акцепторов E_A.

Везде, где не отмечено специально, приводятся значения E_g при 0° К, а ρ и $\varkappa$ — при 300° К.

В таблице в основном включены данные о полупроводниках с $E_g < 3$ эв. Свойства тройных и более сложных полупроводниковых соединений не приводятся[*]. Не приводятся также сведения о параметрах различных полупроводниковых эпитаксиальных[**]

[1] Часто $m_{\perp} = m_{\perp x}$, тогда употребляется обозначение $m_{\perp}$ ($= m_{\perp x} = m_{\perp y}$).

[*] О свойствах некоторых классов тройных соединений см. работы [16, 121, 123, 145].

[**] См. работу [43].

Таблица 21.2

Электрофизические свойства элементарных полупроводников

Элемент	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a и c, Å	Литература	r_a, Å	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	T_D, °К	Литература	ρ, $\frac{ом}{см\ 300°K}$	Литература	ε	Литература	α	Литература
B	Тетрагональная C_{4v}^{1}	a — 8,73 c — 5,03	[1] [1]	2,33	[169]	2300	[9]	—	—	—	—	12	[26]	10,1*	[28]
C (алмаз)	Кубическая O_h^7	a — 3,566	[1]	3,51	[123]	4800	[123]	2240*	[123]	5,5	[147]	—	—	5,7	[121]
P (серый)	Орторомбическая D_{2h}^{18}	a — 3,31 b — 4,38 c — 10,5	[1] [1] [1]	2,29	[9]	317	[242]	—	—	—	—	—	—	—	—
As (серый)	Тригональная D_{3d}^{5}	a—3,75 c—10,52	[1] [1]	2,73	[169]	1090** 500	[109] [242]	224	[9]	—	—	—	—	—	—
Se	Тригональная D_3^4, D_6^6	a—4,36 c—4,96	[117] [117]	1,60	[117]	490	[117]	⊥ 200 ∥ 500	[120]	0,029	[117]	—	—	⊥ 8** ∥ 13,5**	[117]
α-Sn	Кубическая O_h^7	a—6,46	[1]	5,77	[121]	[505]** (β-Sn)	[121]	230	[121]	0,67	[121]	—		—	—
Sb	Тригональная D_{3d}^{5}	a—4,49 c—11,25	[1] [1]	6,70	[141]	903,5	[9]	204	[141]	0,4 (100°K)	[147]	—	—	—	—
Te	Тригональная D_3^4, D_6^6	a—4,46 c—5,93	[123] [123]	6,23	[123]	723	[123]	⊥ 140 ∥ 290	[120] [120]	0,03	[147]	—	—	⊥ 25** ∥ 39**	[28] [28]
I	Орторомбическая D_{2h}^{18}	a—4,77 b—7,25 c—9,77	[1] [1] [1]	4,94	[189]	387	[100]	—	—	—	—	10,2	[9]	—	—

* λ — 1 мкм.

** $[\alpha_l \text{ или } b]\alpha_c = 0,165$ эв [123].

* ρ — 85,6 атм.

** $\perp$ — 30 мкм; $\perp$, $\parallel$ — перпендикулярно и параллельно оси c соответственно.

** Переходит в β-Sn при t — 286,9 °С.

Элемент	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, 10^{-4} $\frac{эв}{град}$	Литература	$\frac{dE_g}{dP}$, 10^{-6} $\frac{эв}{атм}$	Литература	m_n/m_0	Литература	m_p/m_0	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература
B	1,10 ($T>$ 1000° K) 1,7	[113] [123]	−3,5	[11]	·	—	—	—	0,7	[242]	1	[11]	50	[16]
C(алмаз)	5,4	[28]	−1,2	[28]	$<10^{-6}$	[242]	—	—	2,35 2,1	[15] [123]	1800 ($\sim T^{-3/2}$)	[11]	1400 ($\sim T^{-3/2}$)	[123] [13]
P (черный)	0,33	[36]	2,3	[36]	—	—	—	—	—	—	920 ($\sim T^{-3/2}$)	[123] [36]	360 ($\sim T^{-3/2}$)	[123] [36]
As (серый)	1,2	[123]	−5	[35]	—	—	$m_1=0,121$ $m_2=0,136$ $m_3=1,18$	[254] [254] [254]	$m_1=0,122$ $m_2=0,0805$ $m_3=1,04$	[254] [254] [254]	65	[123]	65	[123]
Sc	2,85 ?	[101] [84]	−9 −23,8	[123] [101]	−13	[123]	—	—	0,96	[123]	—	—	20 40—240	[11] [119]
α-Sn	0*	[171]	−0,5 0	[122] [123]	0	[123]	$0,094^{**}$	[122]	$m_d=0,26$	[122]	2500 ($\sim T^{-1,65}$) 10^4(78° K) 10^5 (4,2° K)	[11] [238]	2400 ($\sim T^{-3}$)	[11]
Sb	0,13	[123]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Te	0,32	[11]	−1,9***	[11]	−13 −16 −20	[191] [123] [120]	$m_\perp=0,037$*** $m_\parallel=0,059$	[120] [120]	$m_\perp=0,11$*** $m_\parallel=0,264$ $m_d=0,4$	[120] [120] [87]	1700 ($\sim T^{-3/2}$)	[16]	1200 ($\sim T^{-3/2}$)	[16]
I	1,3	[28]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* См. стр. 91-3.

** В единицах (100).

*** $\frac{dE_g}{dT}$, 10^{-4} эв/град: $-1,8$ ($T=4°$ K); $-0,4$ ($10°$ K $< T <$ 300° K); $-0,3$ (300° K $< T <$ 500° K) [120].

*** $g_\perp = 11,2$; $g_\parallel = 7,6$; $\perp$ и $\parallel$ — перпендикулярно и параллельно оси c соответственно [120].

**** Данные для узкой валентной зоны. В широкой валентной зоне $m_\parallel = 0,018 m_0$, $m_\perp = 0,26 m_0$; $\parallel$ и $\perp$ — параллельно и перпендикулярно оси c соответственно.

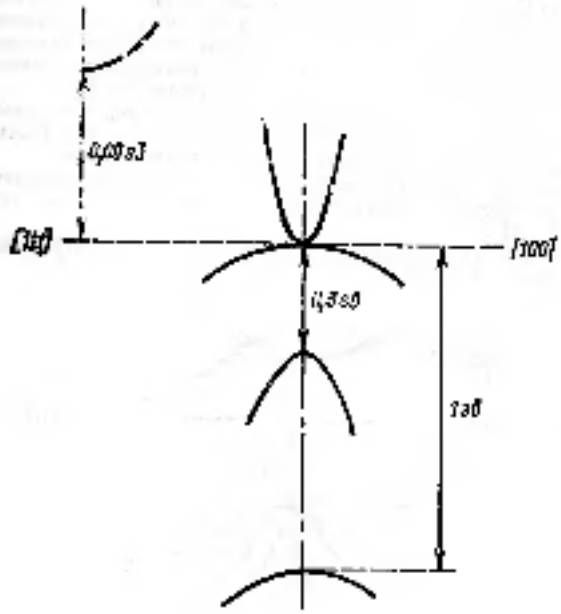


Рис. 21.1. Зонная структура α-Sn [171].

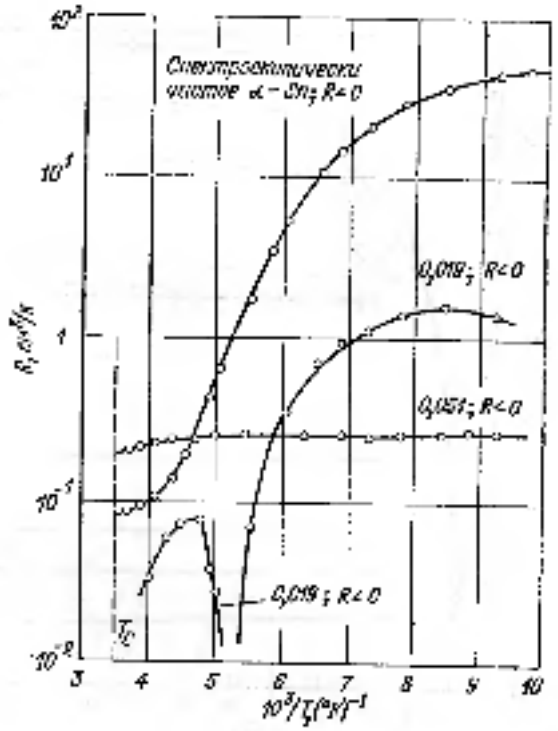


Рис. 21.3. Зависимость постоянной Холла R для α-Sn от температуры (числа у кривых — массовое содержание Al, %) [224].

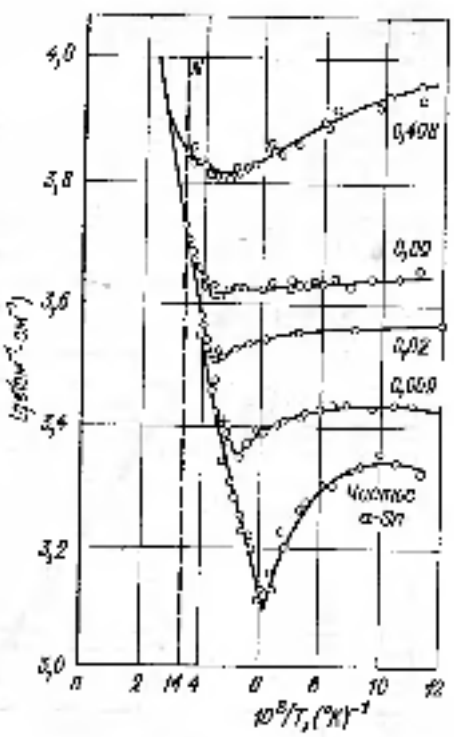


Рис. 21.2. Зависимость удельной проводимости σ для α-Sn, легированного алюминием, от температуры:

Числа у кривых — массовое содержание Al, %; ΔN — температура превращения α-Sn → β-Sn [16].

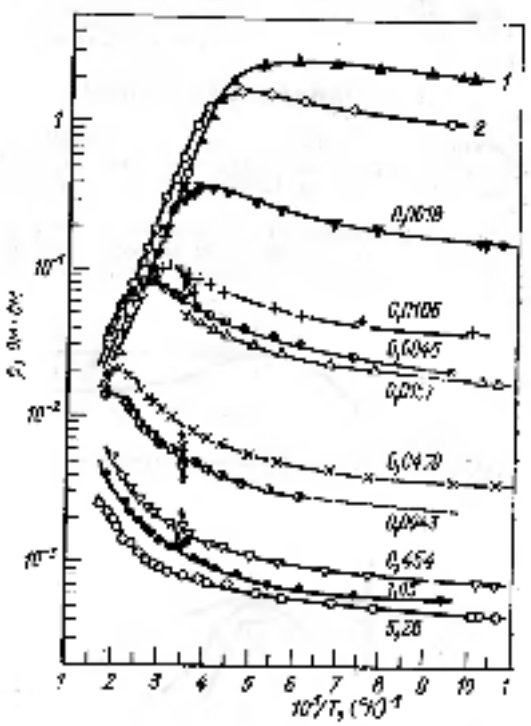


Рис. 21.4. Зависимость удельного сопротивления ρ в p-Te с примесью Sb от температуры [224]:

1 — тройная дислокация; 2 — линейная дислокация; числа у кривых — массовое содержание Sb, %.

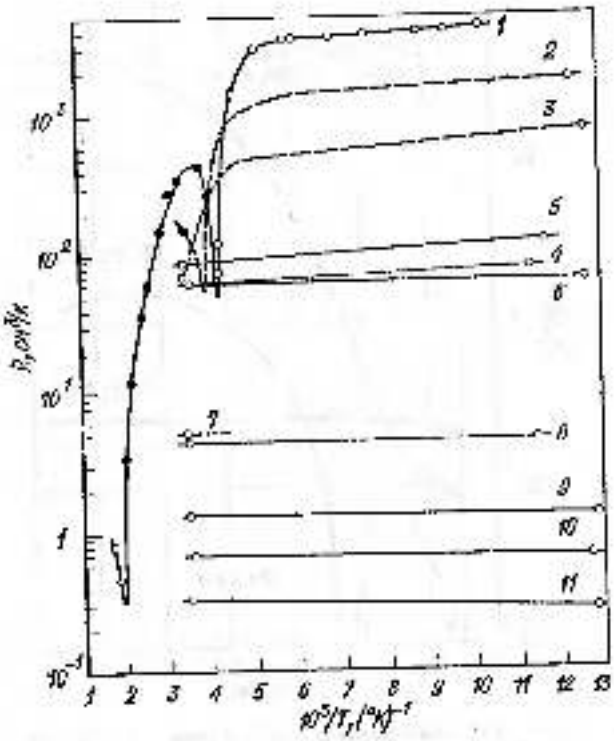


Рис. 21.5. Зависимость постоянной Холла R в Te [224] от температуры. Образцы те же, что и на рис. 21.4.

○ — положительный сигнал; ● — отрицательный. 1 — тройная дислокация; 2 — двойная дислокация. Атомные содержания Sb: № 3 — 0,0018; 4 — 0,009; 5 — 0,018; 6 — 0,027; 7 — 0,0538; 8 — 0,2448; 9 — 0,464; 10 — 1,03; 11 — 5,29.

21.3. КРЕМНИЙ И ГЕРМАНИЙ

Кремний и германий — широко используемые и наиболее исследованные полупроводники. Кристаллизуются в решетке алмаза. Имеют сложную зонную структуру.

В Si шесть эквивалентных абсолютных минимумов зоны проводимости расположены на осях [100] внутри зоны Бриллюэна. Вблизи каждого из этих минимумов изоэнергетические поверхности имеют вид эллипсоидов вращения (число эллипсоидов — 6).

В Ge восемь эквивалентных абсолютных минимумов зоны проводимости расположены на осях [111] на границе зоны Бриллюэна. Вблизи каждого из этих минимумов изоэнергетические поверхности — эллипсоиды вращения (эквивалентное число эллипсоидов — 4).

Валентные зоны Si и Ge расщеплены на три подзоны, две из которых вырождены в точке $k = 0$, а третья отщеплена спин-орбитальным взаимодействием.

Схемы энергетических зон Si и Ge в использованных в таблицах обозначениях представлены на рис. 21.6, 21.7.

Электрофизические свойства Si и Ge иллюстрируются рис. 21.8—21.32.

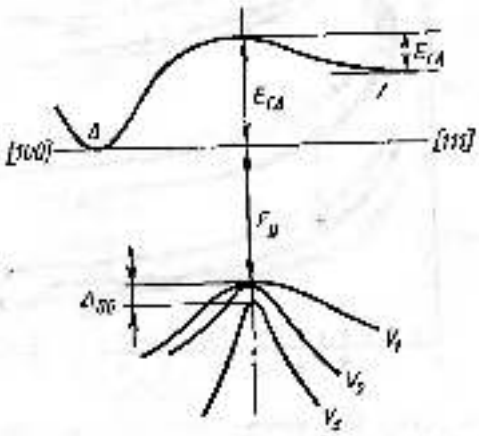


Рис. 21.6. Зонная структура Si [117].

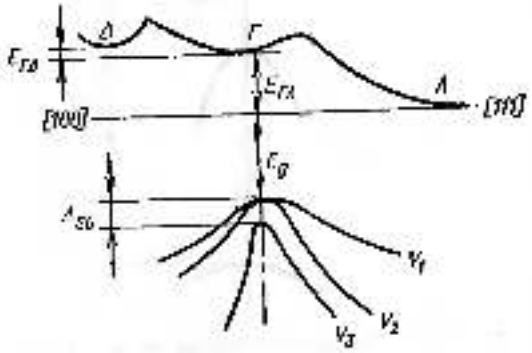


Рис. 21.7. Зонная структура Ge [117].

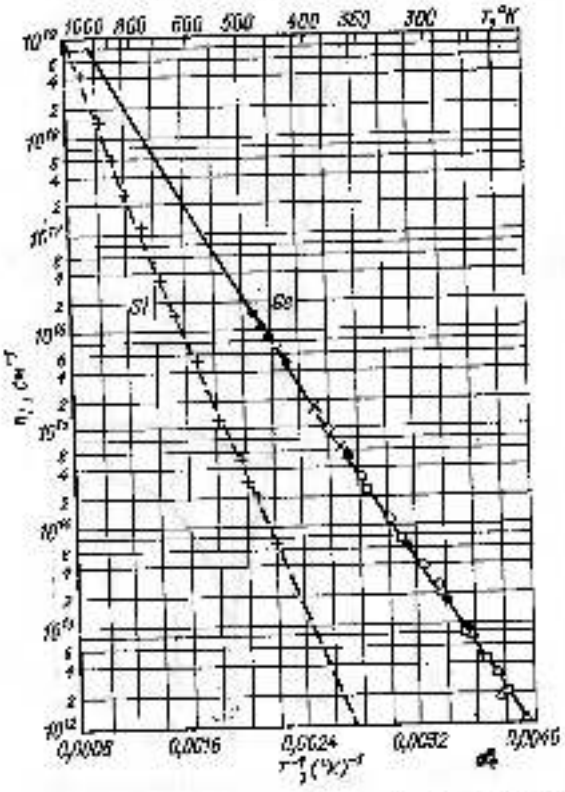


Рис. 21.8. Зависимость собственной концентрации n_i в Ge и Si от температуры [221].

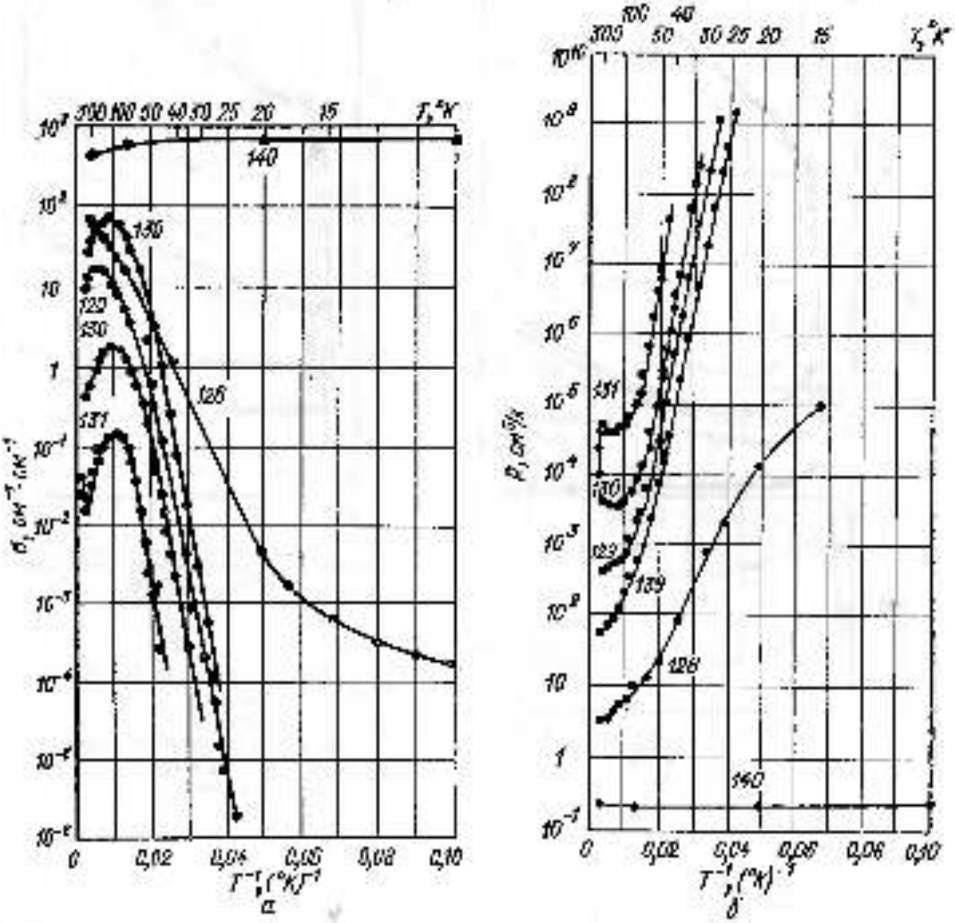
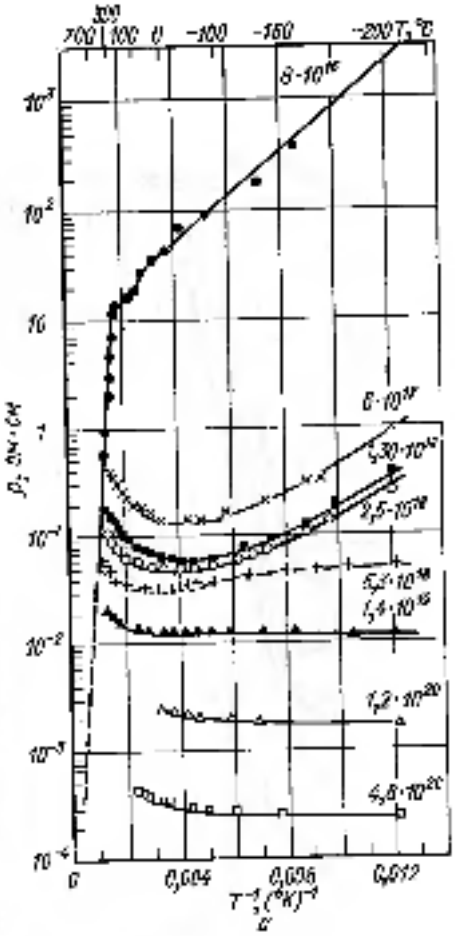


Рис. 21.9. Зависимость удельной проводимости σ n-Si с примесью As [117] (а) и постоянной Холла R в n-Si (б) от температуры

№ образца	Концентрация As, см⁻³	Концентрация акцепторов, см⁻³	№ образца	Концентрация As, см⁻³	Концентрация акцепторов, см⁻³
126	$5,2\cdot10^{14}$	—	131	$2,75\cdot10^{14}$	$1\cdot10^{14}$
129	$7,2\cdot10^{14}$	$1,5\cdot10^{14}$	139	$1,3\cdot10^{14}$	$4,2\cdot10^{13}$
130	$9,6\cdot10^{14}$	$5\cdot10^{14}$	140	$3,7\cdot10^{14}$	—



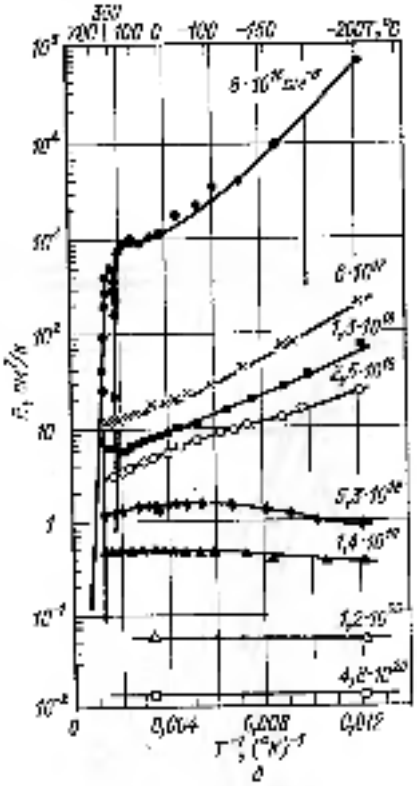


Рис. 21.10. Зависимость удельного сопротивления ρ в p-Si [222, 223] (а) и постоянной Холла R в p-Si (б) [223] от температуры при различной концентрации дырок в области насыщения.

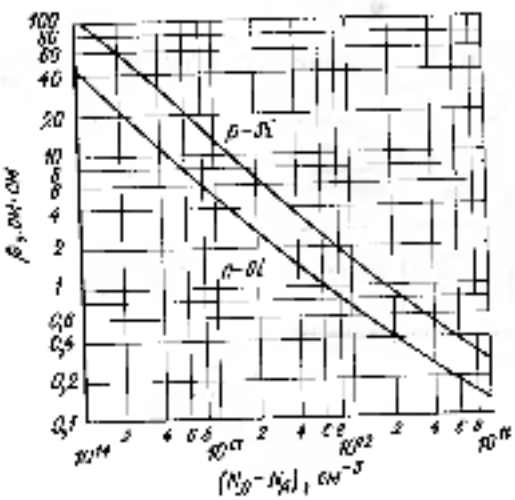


Рис. 21.11. Зависимость удельного сопротивления ρ в p- и n-Si от концентрации примесей [226].

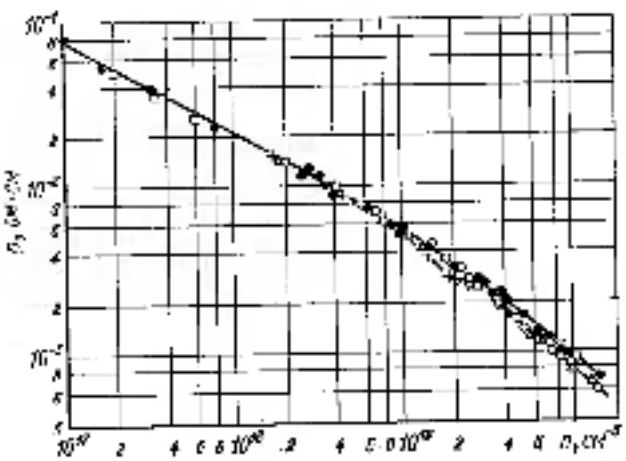


Рис. 21.12. Зависимость удельного сопротивления ρ в сильно легированном n-Si от концентрации носителей [226].

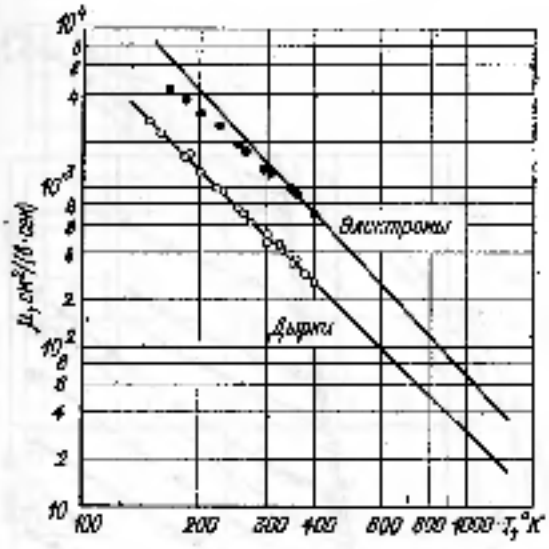


Рис. 21.13. Зависимость подвижности μ электронов и дырок в чистом Si от температуры [222].

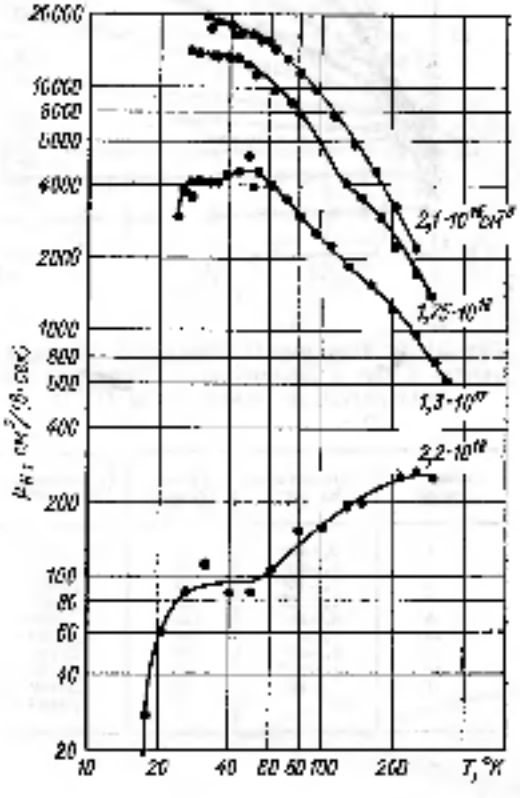


Рис. 21.14. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов в n-Si от температуры [222] при различной концентрации примеси As.

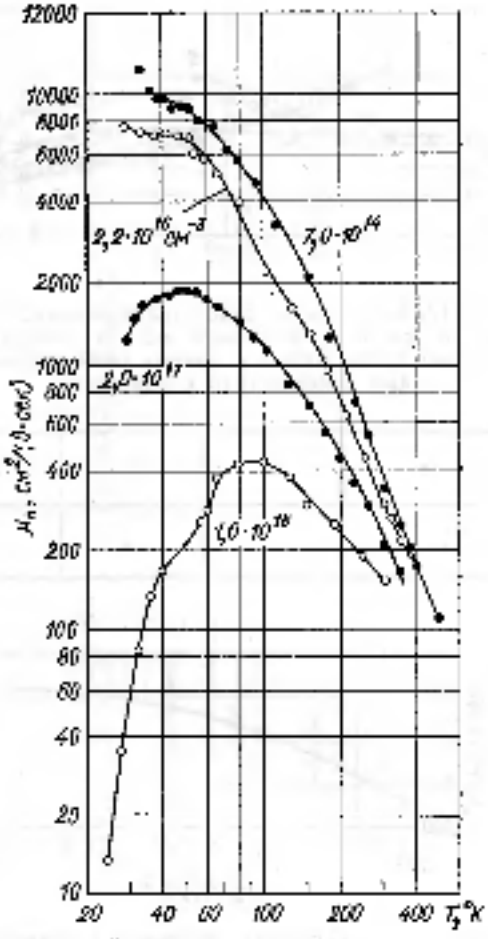


Рис. 21.15. Зависимость холловской подвижности μ_H дырок в p-Si от температуры при различной концентрации примеси B [222].

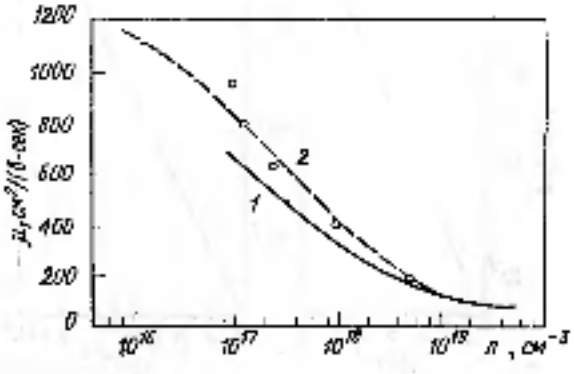


Рис. 21.16. Зависимость дрейфовой (1) и холловской (2) подвижностей электронов μ в n-Si от концентрации электронов n [10].

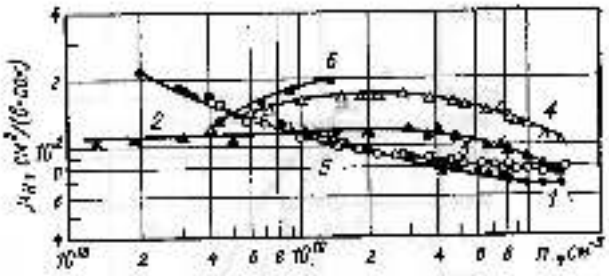


Рис. 21.17. Зависимость холловской подвижности электронов в силно легированном n-Si от концентрации электронов [225]. Цифры у кривых соответствуют разным температурам и примесям:

T, °K	As	P	Sb
300 78	1 2	3 4	5 6

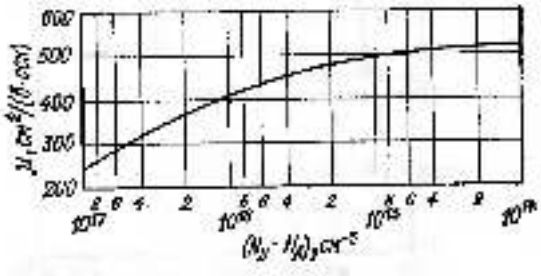


Рис. 21.18. Зависимость дрейфовой подвижности дырок μ в Si при температуре 300° K от концентрации [226].

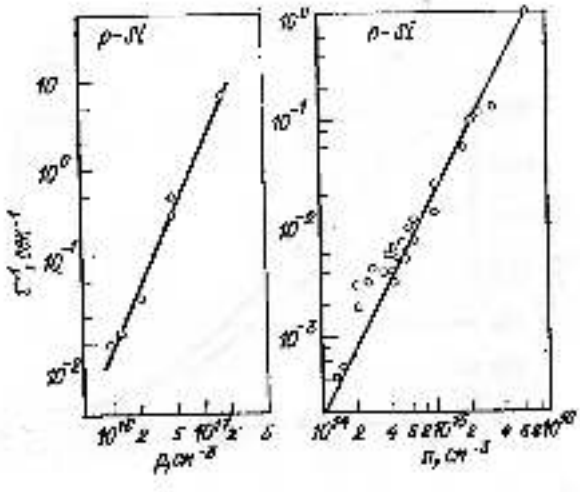


Рис. 21.19. Зависимость времени жизни неосновных носителей в Si от концентрации основных носителей при наличии ловушек ($T = 300°$ K) [10].

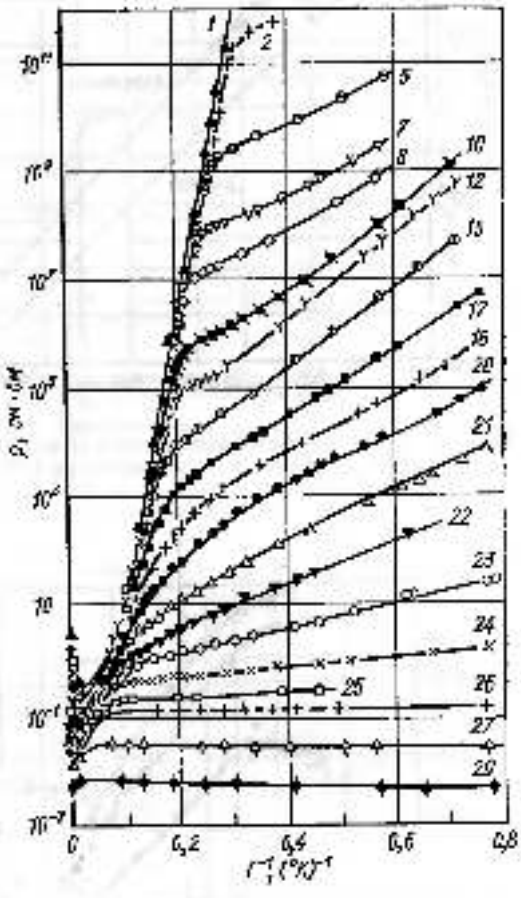


Рис. 21.20. Зависимость удельного сопротивления n-Ge с примесью Sb при низкой температуре от температуры [117]:

Номер образца	Концентрация Sb, см⁻³	Номер образца	Концентрация Sb, см⁻³
1	5,3·10¹⁴	18	5,5·10¹⁵
2	6,8·10¹⁴	20	5,6·10¹⁵
5	1,5·10¹⁵	21	5,5·10¹⁵
7	2,3·10¹⁵	22	6,4·10¹⁵
8	3,6·10¹⁵	23	7,4·10¹⁵
10	5,3·10¹⁵	24	8,4·10¹⁵
12	8,5·10¹⁵	25	1,2·10¹⁶
13	1,8·10¹⁶	26	1,8·10¹⁶
17	2,4·10¹⁶	27	2,7·10¹⁶
		29	8,5·10¹⁷

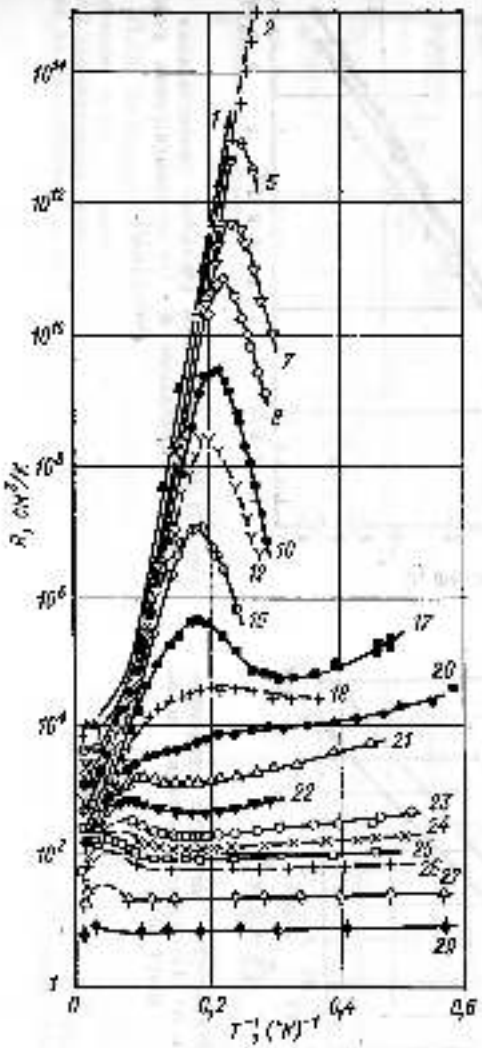
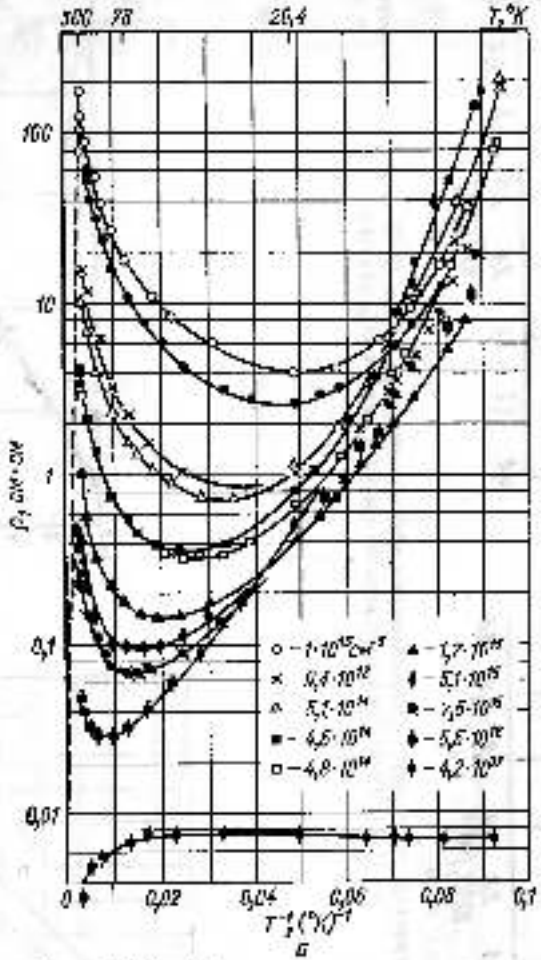


Рис. 21.21. Зависимость постоянной Холла R в n-Ge, с примесью Sb при низкой температуре от температуры [117] (обозначения см. в подписи к рис. 21.20).



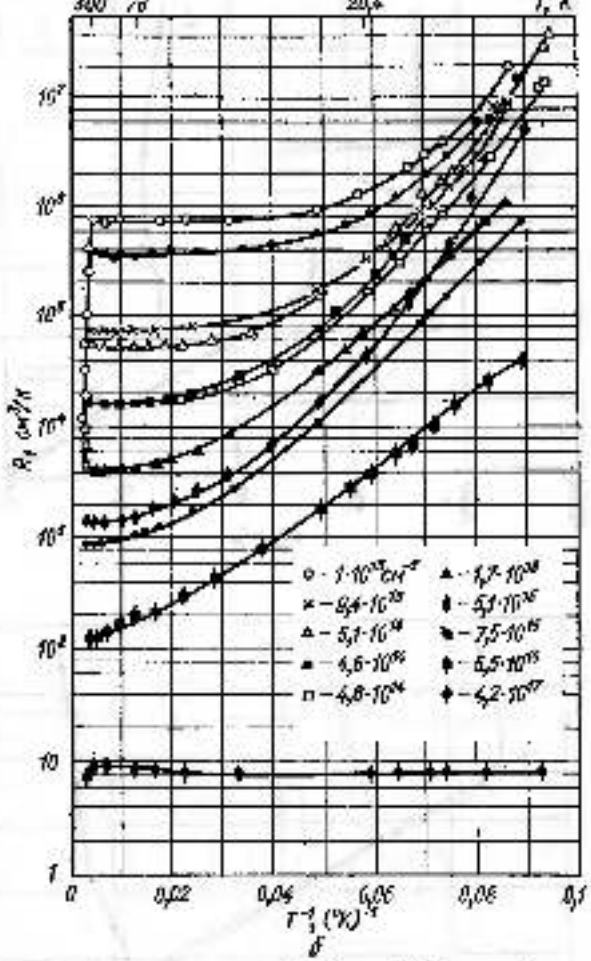


Рис. 21.22. Зависимость удельного сопротивления $\rho(a)$ и постоянной Холла $R(б)$ в n-Ge от температуры при различной эффективной концентрации доноров $N_D - N_A$, см$^{-3}$ [924].

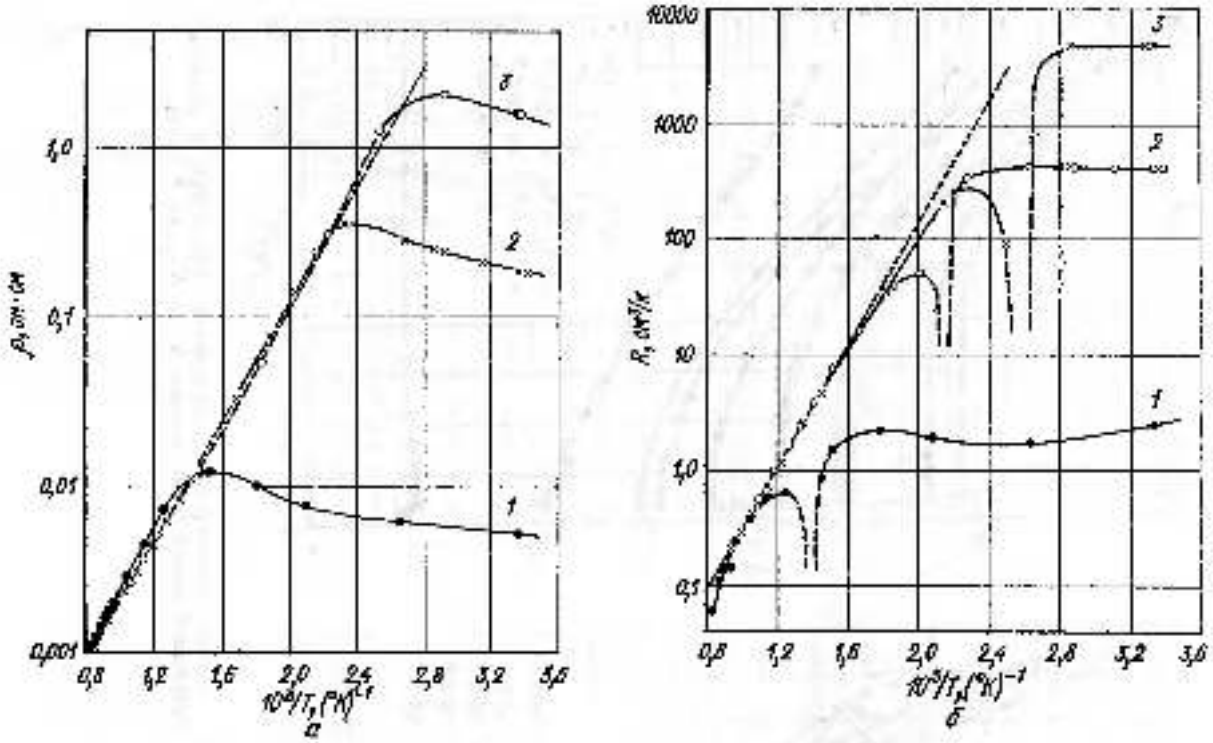


Рис. 21.23. Зависимость удельного сопротивления ρ (а) и постоянной Холла R_H (б) в p-Ge от температуры [234]. (Измерения проведены на одних и тех же образцах.)

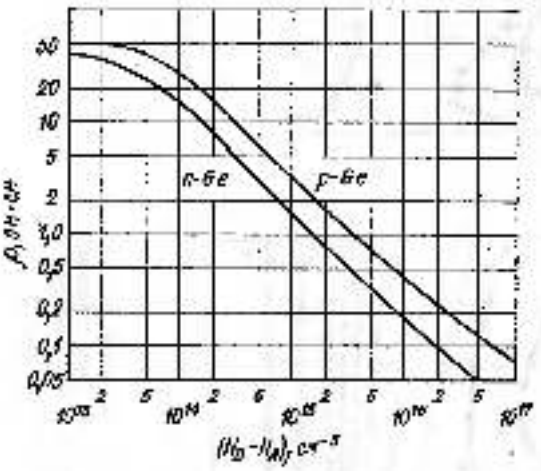


Рис. 21.24. Зависимость удельного сопротивления ρ в p- и n - Ge от концентрации носителей [234].

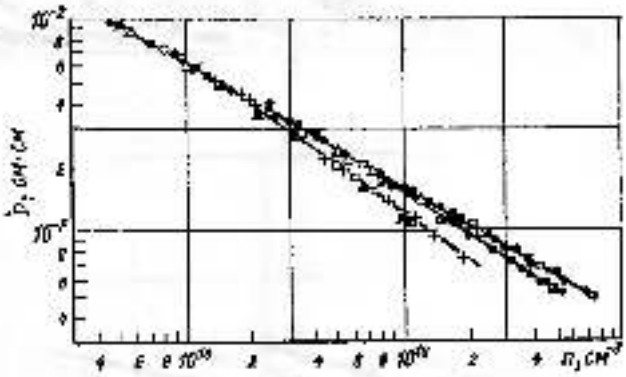


Рис. 21.25. Зависимость удельного сопротивления ρ в сильнолегированном n - Ge от концентрации электронов [225].

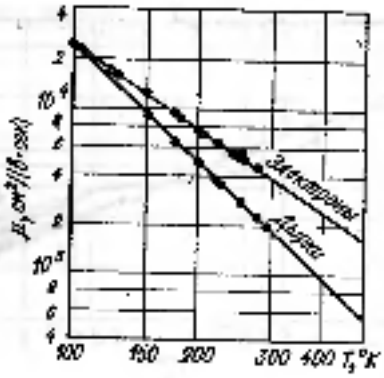


Рис. 21.26. Зависимость подвижностей электронов и дырок в чистом Ge от температуры [222].

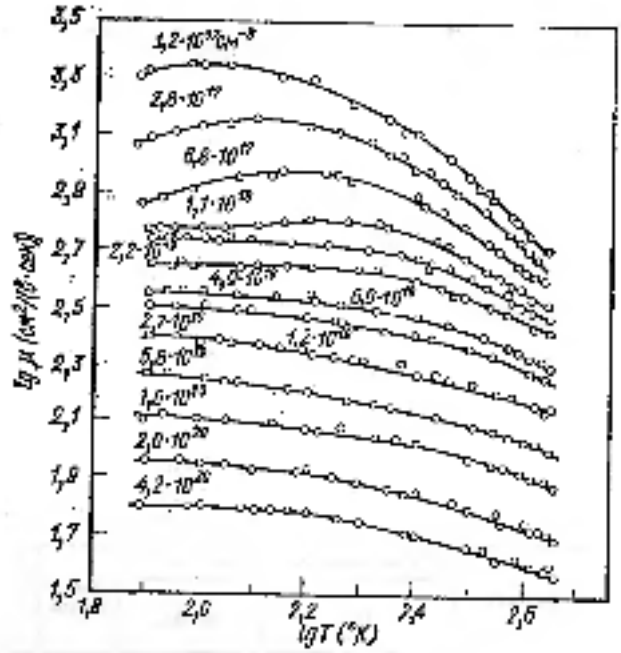
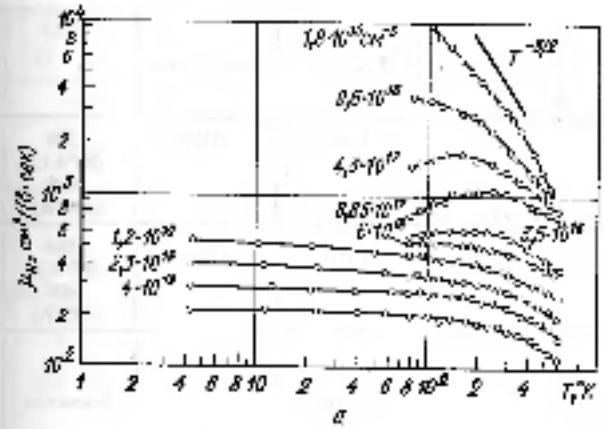


Рис. 21.28. Зависимость подвижности дырок p-Ge от температуры [225] при различной концентрации акцепторов (Ga).



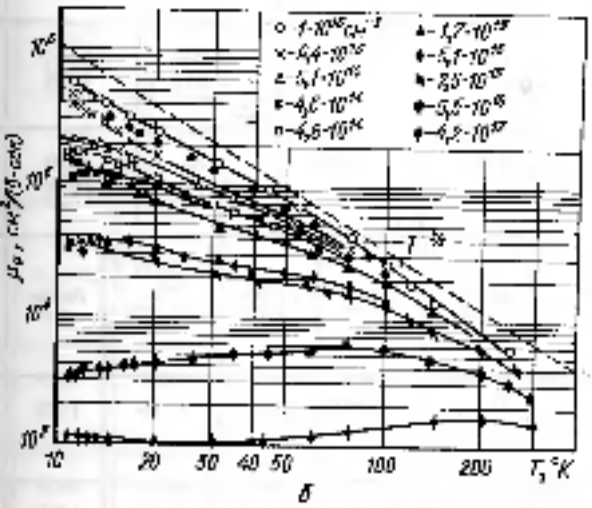


Рис. 21.27. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов n-Ge от температуры [223, 224] при различной концентрации доноров: а — указана концентрация Sb, б — образцы те же, что и на рис. 21.22.

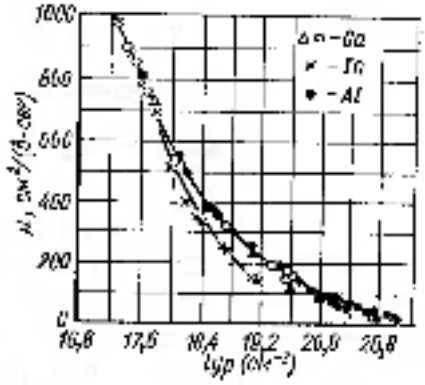


Рис. 21.29. Зависимость подвижности дырок в p-Ge при $T = 300°$ K от концентрации дырок с различной легирующей примесью [225].

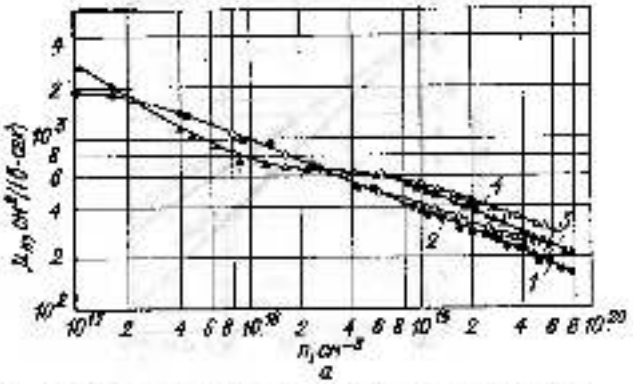


Рис. 21.30. Зависимость холловской подвижности μ электронов в n-Ge от концентрации электронов в сильнолегированных образцах (а) [225] и при $T=300$ °К (б).

Электрофизические свойства

Элемент	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, Å	Литература	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	T_D, °К
Si	Кубическая O_h^7	$a=5.431$	[123]	2,33	[123]	1690	[123]	539 (80°К); 689 (300°К)
Ge	Кубическая O_h^7	$a=5,657$	[123]	5,32	[123]	1210	[123]	353 (80°К); 406 (300°К)

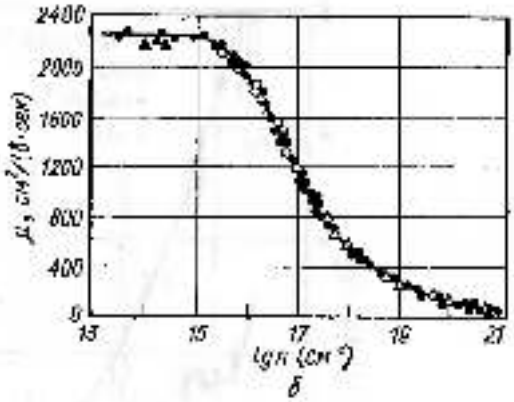
Элемент	E_g, эв	Литература	E_{F3}, эв	Литература	E_{F4}, эв	Литература	Δ_{so}, эв	Литература
Si	1,16	[84; 123]	2,3	[84]	1.5	[84]	0,035 0,044	[117] [123]
Ge	0,744	[84; 123]	0,65 0,15	[123] [84]	0.02	[123]	0,28 0,30	[117] [123]

Элемент	m_n/m_0	Литература	$\frac{m_{dn}}{m_0}$	Литература	$\frac{m_{pl}}{m_0}$	Литература	$\frac{m_{pl}}{m_0}$	Литература	$\frac{m_{pl}}{m_0}$	Литература
Si	$m_{\parallel}=0,9163$ $m_{\perp}=0,1905$	[84] [84]	0,33	[117]	0,26	[117]	0,52**	[123]	0,16	[123]
Ge	$m_{\parallel}=1,588$ $m_{\perp}=0,0815$	[84] [84]	0,22	[117]	0,12	[117]	0,34**	[123]	0,043	[123]

* m_n, см²/(см·эв·сек): 0,5 ($T=300$°К); 18 ($T=50$ К); 17 ($T=80$°К); 12 ($T=100$°К) — [182].
** $\lambda=1,06$ мкм.
*** $\lambda=2$ мкм.

[227]: Номера кривых соответствуют разным температурам и примесям.

T, °K	A*	p
78 300	3 1	4 2



кремния и германия

Таблица 21.3

Литература	α, $\frac{см}{см \cdot дин/см^2}$	Литература	B_{ac}, эв	Литература	ε_s	Литература	ε_∞	Литература
[117] [117]	1,3**	[117]	0,053	[123]	11,7	[28]	12,7*** 13,7***	[28] [117]
[117] [117]	0,63**	[147]	0,107	[123]	16	[28]	16,5**	[28]

$\frac{dE_v}{dP}$, 10^{-4} $\frac{эв}{дин/см^2}$	Литература	$\frac{dE_{LA}}{dP}$, 10^{-4} $\frac{эв}{дин/см^2}$	Литература	$\frac{dC_K}{dP}$, 10^{-4} $\frac{эв}{дин/см^2}$	Литература	$\frac{dE_{TA}}{dP}$, 10^{-4} $\frac{эв}{дин/см^2}$	Литература	$\frac{dC_{TA}}{dP}$, 10^{-4} $\frac{эв}{дин/см^2}$	Литература
—4	[123]	—	[123]	—1,5	[123]	·	—	—	—
—4	[123]	—4	[123]	-15	[123]	7	[123]	—(12—14)	[123]

m_{dn}, m_0	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	n_i, $\frac{1}{см^{-3}}$	Литература	ρ_i, ом·см	Литература
0,25	[123]	1300(300°K) ($\sim T^{-2,6}$)	[123] [117]	500(300°K) ($\sim T^{-2,5}$)	[123] [117]	$1,4 \cdot 10^{10}$	[11]	$2,3 \cdot 10^5$	[11]
0,08	[123]	3600(300°K) ($\sim T^{-2,3}$)	[123] [28]	1820(300°K) ($\sim T^{-1,67}$)	[123] [28]	$2,4 \cdot 10^{13}$	[11]	47	[11]

* α, см/(см·дин/см²): 1 (T = 300°K); 5,5 (T = 50°K); 11 (T = 20°K); 80 (T = 10°K); 0,5 (T = 2°K) [133].
** $\lambda = \varepsilon_s - \varepsilon_\infty$.
*** Si $m_{dp} = 0,26m_0$, в Ge $m_{dp} = 0,35m_0$ [11].

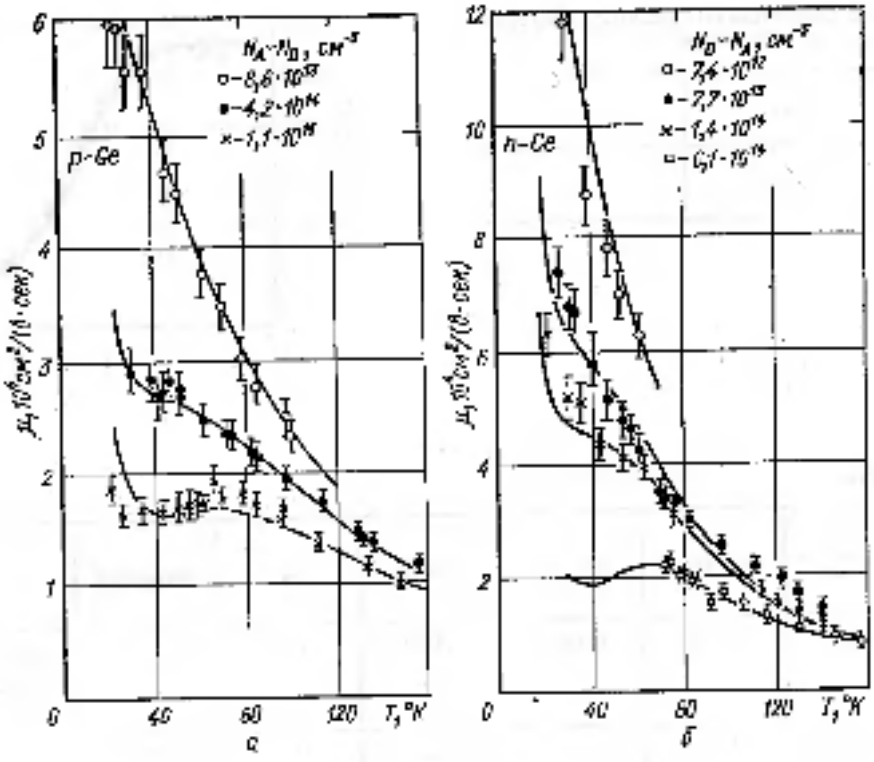


Рис. 21.31. Зависимость дрейфовой подвижности μ неосновных носителей в Ge от температуры [922].

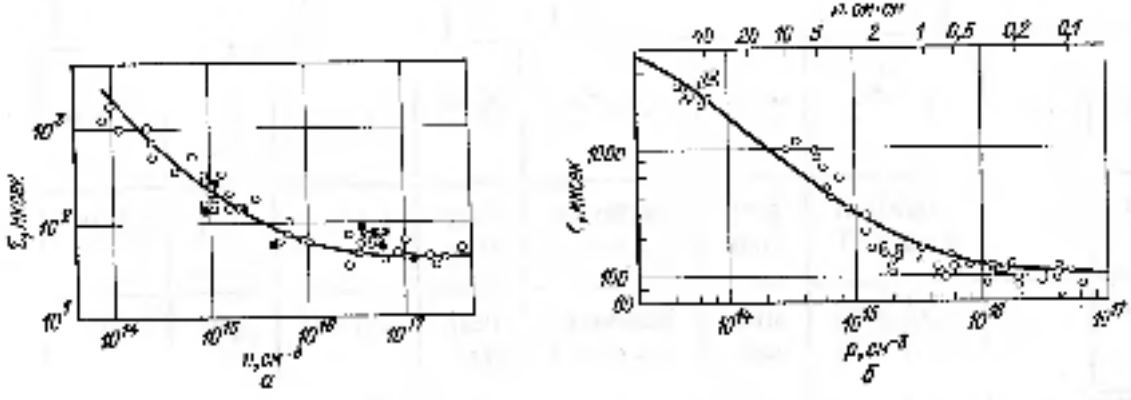


Рис. 21.32. Зависимость времени жизни τ дырок в n-Ge от концентрации электронов n (а) и времени жизни электронов в p-Ge от концентрации дырок p (б) [237].

Таблица 21.4

Свойства примесей в германии [117]

Примесь	Al	As	Au	B	Br	Cu
Тип*	A	D	A	A	D	A
E_c^{**}, эв	0,057	0,049	0,35; 0,67	0,046	0,068	0,24; 0,72
Примесь	Fe	Ga	In	Li	O	P
Тип*	A	A	A	D	D	D
E_v^{**}, эв	0,4; 0,60	0,066	0,16	0,033	0,06—0,06	0,044
Примесь	S	Sb	Tl	Zn		
Тип*	D	D	A	A		
E_v^{**}, эв	0,28; 0,37	0,039	0,26	0,31; 0,66		

* D — донор, A — акцептор.
** Для доноров энергия ионизации E_c исчисляется от дна зоны проводимости, для акцепторов — от края валентной зоны.

Таблица 21.5

Свойства примесей в германии [117, 123]

Примесь	Al	Ag	As	Au	B	Br
Тип*	A	A	D	A**	A	A
E_c^{**}, эв	0,0102	0,13; 0,5; 0,7	0,0127	0,16; 0,59; 0,75	0,0104	0,07
Примесь	Bi	Cd	Cr	Cu	Cs	Fe
Тип*	C	A	A**	A	A	A
E_v^{**}, эв	0,012	0,05; 0,16	0,09; 0,25; 0,48	0,07; 0,12	0,4; 0,33; 0,53	0,36; 0,52

Продолжение табл. 21.5

Примесь	Ga	In	Li	Mn	Ni	O
Тип*	A	A	D	A	D	D
E_c^{**}, эв	0,0108	0,0112	0,0093	0,16; 0,42	0,22; 0,49	0,01
Примесь	P	Pb	S	Sb	Se	Te
Тип*	D	A	D	D	D	D
E_v^{**}, эв	0,012	0,04; 0,20; 0,67	0,16	0,0096	0,014; 0,28	0,11; 0,30
Примесь	Tl			Zn		
Тип*	A			A		
E_v^{**}, эв	0,01			0,03; 0,09		

* D — донор, A — акцептор.
** Энергия ионизации E_c или E_v исчисляется от дна зоны проводимости, для акцепторов — от края валентной зоны.
*** Имеется второй уровень 0,24 эв для Au, 0,7 эв для Cu.

21.4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Соединения типа $A^{I}B^{I}$ — $A^{I}B^{VII}$

Полупроводниковые соединения $A^{I}B^{I}$. Известны для полупроводниковых соединений этого типа: NaAu и CsAu, для которых E_g равно соответственно 0,15 и 0,5—2,0 эв [242].

Полупроводниковые соединения $A^{I}B^{V}$. При взаимодействии щелочных металлов с элементами V группы образуются соединения двух типов: $A^{I}B^{V}$ и $A_3^{I}B^{V}$.

Тип проводимости определяется нарушением стехиометрии. Избыток щелочного металла создает донорные, а элементы V группы — акцепторные уровни. Растворимость примесей в этих соединениях мала. Соединения рассматриваемого типа при их сплавах используются в качестве фотокатодов [61].

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A^{I}B^{V}$

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{m^*}{m_0}$	Литература	$\frac{\mu^*}{\mu_0}$	Литература	Тип проводимости	Литература
	Тип	a, b, c, Å													
Li_3Sb*	Кубическая O_h^5	$a=6,56$	[1]	—		1423–1573	[16]	1,25	[16]	—	—	—	—	p	[16]
NaSb	Моноклинная C_{2h}^6	$a=6,80$ $b=6,34$ $c=12,48$	[16, 242]	—	—	738	[16]	0,82	[16]	—	—	—	—	p	[16]
Na_3Sb	Гексагональная D_{6h}^4	$a=5,38$ $b=9,5$	[1] [1]	2,67	[123]	1130	[123]	1,1	[81, 123]	—		—	—	p	[16]
KSb	Моноклинная C_{2h}^5	$a=7,18$ $b=6,97$ $c=13,46$	[242] [242] [242]	—	—	878	[16]	0,9	[16]	—	—		—	—	—
K_3Sb	Гексагональная D_{6h}^4	$a=6,03$ $b=10,69$	[1] [1]	2,35	[123]	1085	[123]	1,1	[10, 123]	—		—	—	n	[16]
Rb_3Sb	Кубическая	—	[81]	—	—	—	—	1,0	[10]	—		—	—	p	[81]
CsSb	—	—	—	—	—	—	—	0,8	[10]	500 ($\sim T^{-3/2}$)	[16]	100	[16]	—	—
Cs_3Sb	Кубическая O_h^7	$a=9,147$	[1]	—	—	—	—	1,6	[6, 123]	500 ($\sim T^{-3/2}$)	[16]	10	[10]	p	[16]
$CsBi_2$	—	—	—	—	—	—	—	1,65	[97]	—		—	—	—	—
Cs_3Tl	Кубическая O_h^7	$a=9,300$	[242]	—	—	—	—	0,56	[16]	—		350	[249]	n	[16]

* Данные относятся к β-Li_3Sb [242]; низкая другая модификация Li_3Sb с гексагональным типом решетки D_{6h}^4, $a=4,71$ Å; $c=b=5,3196$ Å; $E_g=0,6\div0,8$ эв (500°K) [242].

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A_2^I B^{VI}$

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	$\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{\text{см}^2}{\text{в·сек}}$	Литература	$\frac{\text{см}^2}{\text{в·сек}}$	Литература	Примечание	Литература
CuO	Моноклинная C_{2h}^6	$a = 4,662$ $b = 3,417$ $c = 5,118$	[242] [242] [242]	—		—	—	—	—	0,26	[242]	—	—	—	—
Cu_2O	Кубическая O_h^4	$a = 4,26$	[1]	6,1	[123]	1506	[16]	~1,5 2,0 2,17	[249] [123] [19]	—		100 80 ($T^{-0,67}$)	[123] [16]	$\frac{dE_g}{dT} = 2 \times$ $\times 10^{-4} \frac{эв}{град}$ $\varepsilon = 8,75$ $\sigma = 700 \frac{мкв}{град}$ p-тип $\varepsilon_c = 7,5$	[10] [179] [16] [10] [23]
Cu_2S	Ромбическая C_{2h}^{15}	$a = 11,8$ $b = 27,26$ $c = ?$	[1] [1] [1]	5,6	[216]	1373	[216]	1,85	[94]	30	[242]	—	—	p-тип	[16]
Cu_2Se	Кубическая T_d^2	$a = 5,84$	[1]	6,8	[216]	1390	[216]	1,25	[94]		—	750	[16]	p-тип	[16]
Cu_2Te	Гексагональная D_{6h}^1	$a = 4,2$ $c = 7,2$	[1] [1]	7,34	[216]	~1173	[216]	1,0	[88]	200	[40]	300 ($T^{-3/2}$)	[88]	—	—
α-Ag_2S	Кубическая O_h^5		[74]	—		—	—	0,6 (300°К)	[74]	—	—	—	—	При $T < 453$°К переходит в β-Ag_2S: $m_n = 0,24\ m_0$, $\sigma = 10^5$ ом·см ($T = 200$ °К)	[74]
β-Ag_2S	Ромбическая C_{2h}^5	$a = 9,47$ $b = 6,92$ $c = 8,28$	[1] [1] [1]	7,33	[216]	1111	[16]	1,3 (0°К) 1,0 (300°К) 1,2 (0°К)	[16] [123]	50 63 (100°К)	[16] [123]	19 (100°К)	[123]	$m_{dp} = 0,55\ m_0$ $m_{dn} = 7,8\ m_0$ n-тип	[16] [15] [16]

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	$\frac{\tau}{\text{см}^2}$	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	n_p, см	Литература	$\frac{\mu_p}{\text{см}^2}$ / в·сек	Литература	$\frac{\mu_n}{\text{см}^2}$ / в·сек	Литература	Примечания	Литература
α-Ag_2Te	Кубическая O_h^5	a = 6,57	[1]	8,5	[216]	1226	[216]	0,17	[16]	4000	[16]			При $T < 423$°K переходит в β-Ag_2Te	[16]
β-Ag_2Te	Моноклинная C_{2h}^3	a = 6,57 b = 8,14 c = 8,10	[1] [1] [1]	-	-	При $T > 423$°K переходит в α-Ag_2Te	[16]	0,064	[102]	8400 См. рис. 21.33	[102]	1400	[102]	$m_{dn} = 0,4\ m_0$ $dE_g/dT = -0,86 \times 10^{-4}$ эв/град $\hbar\omega_v = 0,015$ эв	[15] [102] [98]
β-Ag_2Se*	Ромбическая Теграго гональная	— a = 7,06 c = 4,98	[16, 123] [242] [242]	—	—	1170 ($T_{пл}$ α-Ag_2Se)	[16]	0,075	[15]	2000	[16, 123]	505	[123]	При $T > 406$°K переходит в α-Ag_2Se $m_p = 0,04\ m_0$ $m_n = 0,2\ m_0$ n-тип	[16] [123] [256] [16]
Na_2Se	Кубическая O_h^5	a = 6,813	[242]		—		—	2,0—2,4	[242]	—	—	—	—	—	—
Na_2Te	—	—	—	-	—	1226	[216]	2,3	[72]	—	—	—	—	—	—
K_2Se	Кубическая O_h^5	a = 7,692	[242]	—	—	—	—	1,8—2,0	[242]	—	—	—	—	—	—

* $\sigma = 10 \cdot 10^{-4}$ ом/см·град при $T = 300$°K, $n = 10^{18}$ см$^{-3}$; $\sigma = 6 \cdot 10$ ом$^{-1}$·см$^{-1}$ ($T = 320$°K) [106].

Таблица 21.8

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A^{I}B^{VII}$

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, Å	Литература	$\frac{\rho}{г/см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{\mu_n}{см^2/в\cdot сек}$	Литература	$\frac{\mu_p}{см^2/в\cdot сек}$	Литература	Примечание	Литература
CuBr	Кубическая T_d^2	5,68	[1]	4,72	[121]	777	[121]	2,9	[16]	30	[16, 190]	—		$\varkappa = 0,013 \frac{вт}{см\cdot град}$	[121]
CuI	Кубическая O_h^5	6,053; 6,15	[242] [242]	5,63	[242]	676	[242]	2,8	[242]	—	—	—		$m_{p_1} = 0,52\ m_0$; $m_{p_2} = 1,25\ m_0$	[62]
AgCl	Кубическая O_h^5	5,54	[1]	5,58	[216]	728	[216]	4,1 3,0	[11] [242]	См. рис. 21.31 70 (200°K) 45 000 (12°K)	[11] [110]	40 (200°K)	[11]	$T_D = 260°K$ $m_n = 0,36\ m_0$ $\frac{dE_g}{dT} = -10,2 \times 10^{-4} \frac{эв}{град}$	[187] [110] [10]
AgBr	Кубическая O_h^5	5,77	[1]	6,47	[216]	702	[216]	2,0	[78]	240 4000 $6\cdot10^5$ (1,7°K)	[10] [123] [92]	$1,5\cdot10^5$ (1,7°K)	[92]	$T_D = 210$ K $m_n^* = 0,25\ m_0$	[187] [123]
AgI	Кубическая T_d^2	6,47	[1]	5,67	[121]	825	[121]	2,8	[10]	50	[16]	-	—	$T_D = 119°K$	[121]

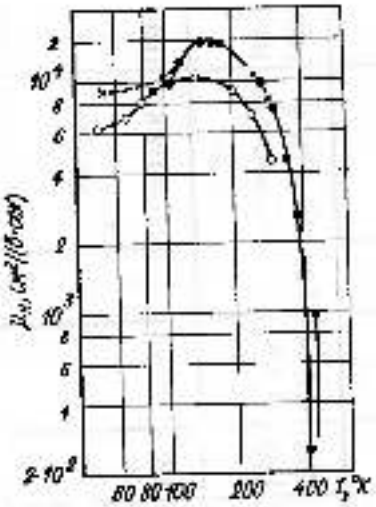


Рис. 21.33. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов в Ag_2Te от температуры [123]:

○, ×, — — исходные кристаллы; ● — тонкие слои толщиной 1250 Å со сферолитной структурой, напылённые на подложку при температуре 320°С.

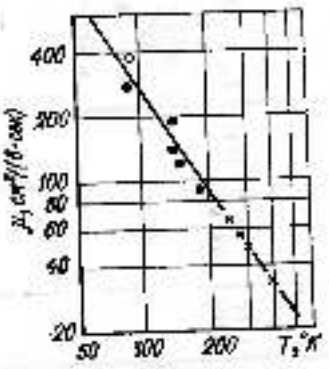


Рис. 21.34. Зависимость подвижности электронов в AgCl от температуры [10]:

○ — данные измерений холловской подвижности; ● — данные измерений дрейфовой подвижности; × — данные, полученные по эффекту «отжигания».

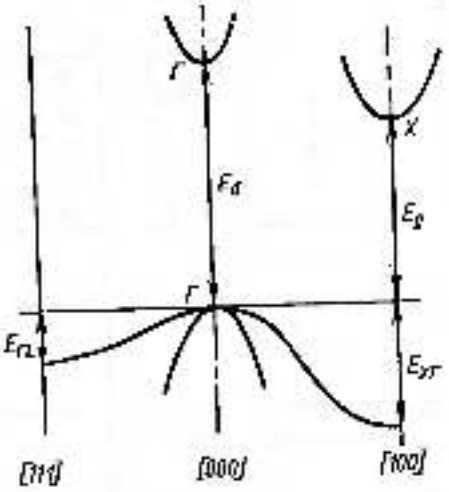


Рис. 21.35. Зонная структура Mg_2Si, Mg_2Ge, Mg_2Sn [123, 129, 130, 246] ($E_{\Gamma L}$ = 0,5 эв, E_{XT} = 2,3 эв):

Х, эв	Mg_2Si	Mg_2Ge	Mg_2Sn
E_g	0,77	0,69; 0,57	0,36
E_d	3,01	1,46	1,03

Соединения типа $A^{III}B^{IV}$ — $A^{II}B^{VI}$

Полупроводниковые соединения типа $A_2^{II}B^{IV}$

Среди полупроводников этой группы наиболее изучены соединения типа Mg_2X. Зонная структура этих соединений имеет вид, показанный на рис. 21.35: $E_{\Gamma L}$ = 0,5÷0,8 эв, E_{XT} = 2,3 эв для всех полупроводников этого типа [129, 130]

Таблица 21.9

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A_2^{II}B^{IV}$

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, $10^{-4}\frac{эв}{град}$	Литература	$\mu_n = \frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература
Mg_2Si	Кубическая O_h^5	a=6,34	[123]	1375	[123]	1,95	[123]	0,77	[123]	−6,4	[131]	400 ($\sim T^{-2,5}$) при $T > 160$°K	[123]
Mg_2Ge	Кубическая O_h^5	a=6,38	[123]	1385	[123]	3,087	[123]	0,57 0,69	[67] [246]	−1,8 −6,5	[67] [247]	500 ($\sim T^{-3}$)	[123, 242]
Mg_2Sn	Кубическая O_h^5	a=6,76	[123]	1051	[123]	3,592	[123]	0,28—0,34 0,35	[244] [123, 245]	−3,2 −4,2 −3,5 (85°K < T < 300°K)	[245] [123] [244]	320 ($T^{-2,2}$)	[123]

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	a, b, c Å	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_\infty}$	Литература	ε_∞	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$	$\kappa = \frac{вт}{см \cdot град}$	Литература	$\mu_n = \frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература
Mg_2Pb	Кубическая G_k^5	a—6,80	[123]	923	[123]	—	—	6,1	[123]	—	—	—	—	—
Ca_2Si	Ромбическая D_{2h}^{16}	a—7,667 b—4,799 c—0,002	[242] [242] [242]	1182	[6]	—	—	1,9	[16, 249]	—	—	—		—
Ca_2Ge	Ромбическая D_{2h}^{16}	a—7,734 b—4,834 c—9,009	[242] [242] [242]	—	—	—	—	1,6	[242]		—	—		
Ca_2Sn	Ромбическая D_{2h}^{16}	—	[242]	1396	[6]	—	—	0,9	[16, 249]	—	—	—		
Ca_2Pb	Ромбическая D_{2h}^{16}	a—8,072 b—5,100 c—9,647	[242] [242] [242]	1382	[71]		—	6,46	[16, 249]	—	—	—	—	—

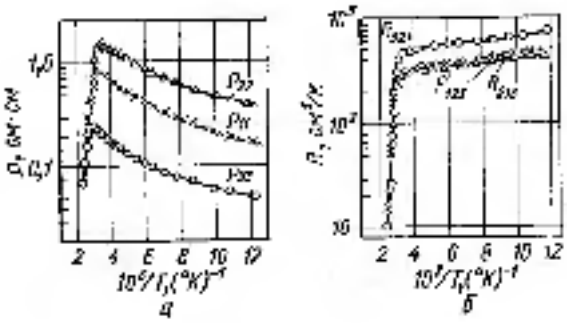
Соединение	$\mu_p = \frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	m_p/m_0	Литература	m_n/m_0	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	Примечание	Литература
Mg_2Si	70	[123]	0,87	[10]	m_d/m_0—0,46	[75]	417 (300°K) 542 (20°K)	[24] [24]	κ—0,06 $\frac{вт}{см \cdot град}$ μ=600 ÷ 2000 $\frac{см^2}{в \cdot град}$	[243] [16]
Mg_2Ge	100	[123]	0,31	[10]	m_d/m_0—0,16	[55]	363 (300° K) 366 (5° K)	[261] [261]	κ—0,1 $\frac{вт}{см \cdot град}$	[132]
Mg_2Sn	200 ($T^{-2,2}$)	[1, 123]	m_d—1,3m_0 m_p—0,1 m_0 1,28	[245] [10]	m_d/m_0—1,2 m_c/m_0—0,16 $m_\parallel/m_0$—0,8 $m_\perp/m_0$—0,3	[245] [133]	240 (300° K) 336 (5° K)	[262] [262]	ε_0—23,75 ε_∞—15,5 $\frac{dE_g}{dp}$—4,4·10⁻⁸ n_i=2,7·10¹² $\frac{1}{см^3}$ κ—0,1 $\frac{вт}{см \cdot град}$	[219] [219] [123] [11] [132]

Полупроводниковые соединения типа $A^{II}B^{V}$

Из соединений этого типа наиболее изучены ZnSb и CdSb, а также их твердые растворы, представляющие интерес при создании термоэлектрических устройств. ZnSb и CdSb кристаллизуются в орторомбической структуре (D_{2h}^{15}), приводящей к сильной анизотропии их механических и электрических свойств. Зонная структура

ненрязвя [18, 117]. Минимум зоны проводимости расположен в центре зоны Бриллюэна (при $k = 0$). Вблизи него поверхность постоянной энергии близка к эллипсоиду вращения с большой осью, направленной вдоль оси c. Экстремум валентной зоны расположен в точке $k \neq 0$. Обзор свойств соединений $A^{II}B^{V}$ см. в работе [241].

Рис. 21.36—21.39 иллюстрируют электрофизические свойства некоторых соединений рассматриваемого типа.



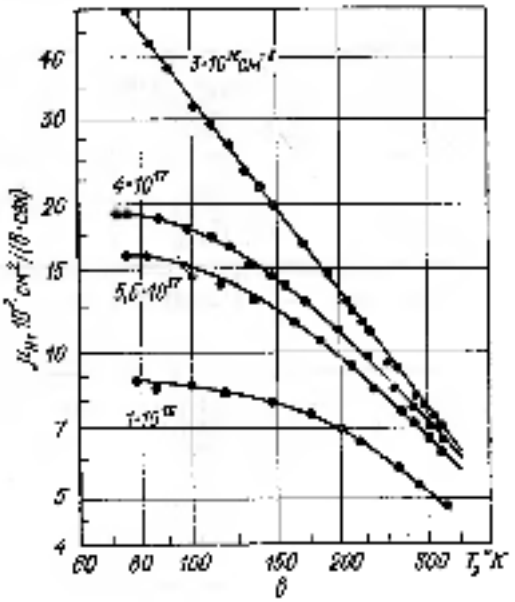


Рис. 21.36. Зависимость от температуры удельного сопротивления ρ (*а*) и постоянной Холла R (*б*) для трех основных направлений в *p*-ZnSb [241] и зависимость холловской подвижности μ_H дырок в *p*-ZnSb (*в*) [217].

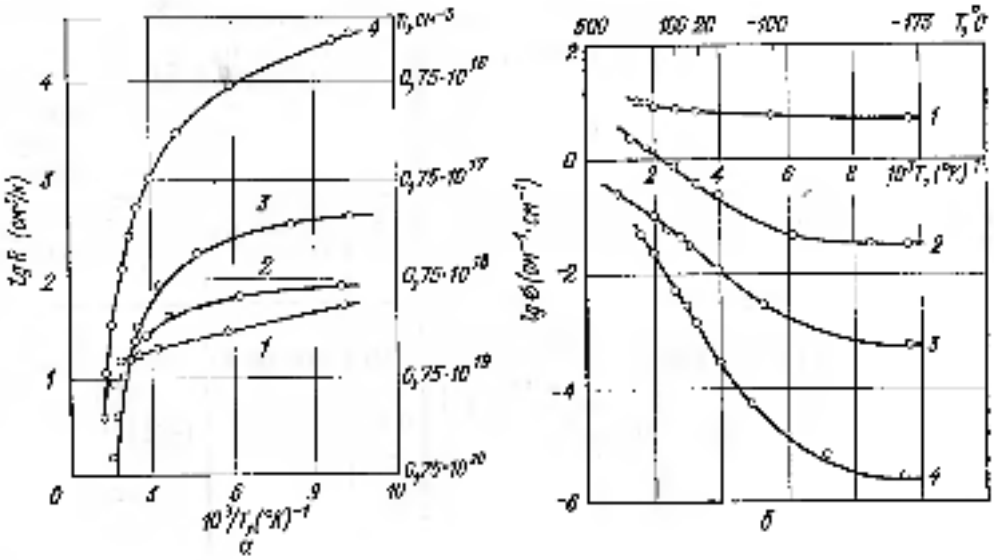


Рис. 21.37. Зависимость от температуры постоянной Холла R (*а*) и удельной проводимости σ (*б*) в Mg_3Sb_2. Образцы с различной степенью отклонения от стехиометрии (*1—4*) [16].

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A^{II}B^{V}$

Таблица 31.10

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	ρ, г/см³	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	Тип проводимости	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, 10^{-4} $\frac{эв}{град}$	Литература	μ, $\frac{см}{сек \cdot в/см}$	Литература
Be_3Sb_2	—	—	—		—	—	—	—	—	0,67	[242]	—	—		—
Mg_3Sb_2	Тригональная D_{3d}^{3}	$a = 4,54$ $c = 7,23$	[1] [1]	4,09	[123]	1500	[123]	—	—	0,82	[161]	—	—	—	—
Ca_3Sb_2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,4	[16]	—	—	—	—
ZnP_2	Тетрагональная D_4^{8*}	$a = 5,07$ $c = 18,65$	[241] [241]	3,47—3,55	[248]	—	—	p	[248]	2,45	[248]	—	—	—	—
Zn_3P_2	Тетрагональная D_{4h}^{15}	$a = 8,1$ $c = 11,45$	[2] [2]	4,54	[16]	1450	[248]	n, p	[16]	1,15	[16]	—	—	—	—
$ZnAs_2$	Моноклинная* C_{2h}^{5}	$a = 7,72$ $b = 7,99$ $c = 36,28$	[1] [1] [146]	5	[248]	1041	[133]	p	[133]	0,92	[16]	—	—	—	—
Zn_3As_2	Тетрагональная D_{4h}^{16*}	$a = 8,32$ $c = 11,76$	[1] [1]	5,58	[123]	1288	[133]	p	[133]	1,0	[10]	—	—	0,09	[246]
ZnSb	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$a = 6,22$ $b = 7,74$ $c = 8,12$	[117] [117] [117]	6,38	[117]	819	[117]	p	[133]	0,5 (300°К) 0,69 (77°К) 0,61 (4,2°К)	[103] [103] [103]	—	—	0,01	[117]
Zn_3Sb_2	—	—	—	—	—	839	[16]	p	[16]	0,2	[16]	—	—	$4,3 \cdot 10^{-2}$	[242]
Zn_4Sb_3	Моноклинная	$a = 10,74$ $b = 12,20$ $c = 8,20$	[16] [241]	—	—	830	[242]	p	[16]	1,2	[16]	—	—	—	—

Соединение	Кристаллическая структура: тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	$\frac{D}{г/см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	Тип проводимости	Литература	ε_g, эв	Литература	$\frac{\partial \varepsilon_g}{\partial T}$, $10^{-4}\ \frac{эв}{град}$	Литература	$\varkappa$, $\frac{вт}{см\ град}$	Литература
CdP_2	Тетрагональная: D_4^9	$a = 6,28$ $c = 19,70$	[241] [241]	4,18	[246]	—	—	—	—	1,04 2,02	[242] [248]	—	—	—	—
CdP_4	Моноклинная C_{2h}^5	$a = 5,27$ $b = 5,19$ $c = 7,68$	[111] [111] [111]	3,98	[246]			p	[246]	1,0	[111]	—	—	—	—
Cd_3P_2	Тетрагональная D_{4h}^{15}	$a = 8,75$ $c = 12,22$	[1] [1]	5,60	[123]	970	[123]	n	[248]	0,56	[64]	—	—	—	—
$CdAs_2$	Тетрагональная: D_4^{10}	$a = 7,963$ $c = 4,676$	[16] [241]	—	—	894	[133]	n	[133]	1,14 1,0	[16] [15]	—	—	0,41	[248]
Cd_3As_2	Тетрагональная: D_{4h}^{15}*	$a = 8,95$ $c = 12,28$	[1] [1]	6,26	[123]	994	[133]	n	[133]	0,14 0,13	[76] [123]	−5,8	[76]	0,43 (100°K)	[134]
CdSb	Орторомбическая D_{2h}^{15}	$a = 6,47$ $b = 8,24$ $c = 8,53$	[117] [117] [117]	6,92	[117]	729	[133]	p**	[117]	0,5 0,56	[117] [117]	6,4	[117]	0,011	[117]
Cd_2Sb_2	Моноклинная***	$a = 7,20$ $b = 3,51$ $c = 6,16$	[1] [1] [1]	—		723	[242]	p	[16]	0,3 0,7	[242] [16]		—	—	—
Cd_3Sb_2	Тригональная D_{3d}^{5}	$a = 22,45$ $c = 13,01$	[241] [241]	—	—	733	[242]	p**	[16]	1,26	[16]	—	—	$(0,94—1,0)\times$ $\times 10^{-2}$	[242]

* Существует также модификация C_{2h}^{6} ($a = 8,93$ Å, $b = 7,29$ Å, $c = 7,65$ Å) [241].

** Существует также модификация C_{2h}^{6} ($a = 8,26$ Å, $b = 7,06$ Å, $c = 8,08$ Å) [241].

*** Существует также модификация D_{2h}^{20} ($a = 11,75$ Å, $c = 21,66$ Å) [241].

**** Существуют также модификации D_{2h}^{20} и C_{4v}^{12} ($a = 10,80$ Å, $c = 23,47$ Å) [241].

***** Наличие ряда примесей приводит к проводимости n типа [16, 117].

****** Существует также модификация C_{4h} ($a = 11,03$ Å, $c = 11,55$ Å) [241].

Соединение	$T_{пл}$, °K	Литература	m_g/m_0	Литература	m_c/m_0	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	Сравнение	Литература
Be_3Sb_2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mg_3Sb	—	—	$m_g = 3,1\ m_0$	[15]	—	—	20	[16]	100 ($\sim T^{-3/2}$) 62	[16] [123]	$\alpha = 600$ *мкв/град*	[16]
Ca_3Sb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Zn_3P_2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Zn_3P_2	—	—	—	—	—	—	—	—	10	[248]	—	—
$ZnAs_2$	—	—	0,345	[248]	2,45	[248]	$\mu_n/\mu_p = 1,6$ $p_n/p_p = 4$	[242] [248]	50	[16] [133]	—	—
Zn_3As_2	—	—	1,7	[16]	0,65	[16]	10 $(T/300)^{-1,7}$	[136]	10 17 ($\sim T^{-1,64}$)	[136] [16]	—	—
ZnSb	225	[117]	$m_\parallel = 0,175\ m_0$ $m_\perp = 0,146\ m_0$	[117] [153] [117]	0,53 $m_d = 0,42\ m_0$	[18] [217]	10 60 ($\sim T^{-2,3}$)	[123] [16]	700 ($\sim T^{-3/2}$)	[50]	$\alpha = 800$ *мкв/град* $n_i = 10^{18}$ *см*$^{-3}$ p-полупроводник	[117] [18]
Zn_2Sb_3	—	—	—	—	—	—	—	—	200	[16]	Имеется несколько модификаций	[16]
Zn_4Sb_3		—	—	—	~0,1	[242]	—	—	880	[16]	$\alpha = 157$ *мкв/град*	[16]

Соединение	T_c, °K	Литература	m_n/m_0	Литература	m_p/m_0	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	Примечания	Литература
CdP_3	-	-	—	-		—		-	—	-	—	-
CdP_4	—	—	—	—	—	—	150	[111]	—	—		—
Cd_3P_2	—	-	0,09 0,06 0,057	[77] [186] [208]	—	—	3000 ($\sim T^{-1,1}$) 14 000	[64] [208]	—	—	α (300°K) ~ ~150 *мкв/град* α (60°K) ~ ~ 50 *мкв/град* ρ (300°K) ≈ 3× ×10^{-7} *ом·см*	[208]
$CdAs_2$	—	—	$m_{\parallel} = 0,15\ m_0$ $m_{\perp} = 0,69\ m_0$ $m_d = 0,37\ m_0$	[133]	$m_{\parallel} = 0,094\ m_0$ $m_{\perp} = 0,346\ m_0$ $m_d = 0,22\ m_0$	[133] [120] [120]	] оси *a* 100] оси *c* 400 300	[133] [133] [123]	400	[123]	—	—
Cd_3As_2	—	—	$m_d = 0,046\ m_0$ $m_1 = 0,012\ m_0$ $m_2 = 0,2\ m_0$	[52] [137] [137]	0,12	[242]	16 000 30 000 (100°K) 60 000 (1,6°K) $\mu_1 = 13\,500$ $\mu_2 = 2\,500$	[16] [134] [134] [137] [137]	400	[16]	Зона проводимости состоит из двух полосок с энергетическим зазором $\Delta E = 0,4$ *эв* $\Delta E = 0,15—4,5 \times$ ×$10^{-3}\ T$ *эв*	[137] [136]
CdSb	180	[117]	$m_{\parallel} = 0,14\ m_0$ $m_{\perp} = 0,150\ m_0$	[133] [117]	$m_p = (0,1 \div$ $\div 0,2)\ m_0$ $m_p = (0,3 \div$ $\div 0,36)\ m_0$	[135] [242]	$\mu_a = 2,1 \times$ ×$10^6\ T^{-1,5}$ $\mu_b = 1,7 \times$ ×$10^6 \cdot T^{-1,5}$ $\mu_c = 2,2 \times$ ×$10^6 \cdot T^{-1,5}$ *a, b, c* — кристаллографические направления 300 350 600 (297)°K	[91] [91] [91] [135] [123] [242]	$\mu_a = 7,15 \cdot 10^6 \times$ ×$T^{-1,4}$ $\mu_b = 1,13 \cdot 10^6 \times$ ×$T^{-1,1}$ $\mu_c = 8,57 \cdot 10^6 \times$ ×$T^{-1,3}$ 900—2000 ($\sim$ $\sim T^{-3/2}$)	[91] [91] [91] [117]	Чистые образцы *p*-типа. При легировании удается получить *n*-тип α — 800 *мкв/град*	[117]
Cd_3Sb_2	-	—	-	—		—	—	—	120	[242]	—	—
Cd_4Sb_3	—	—	—	—	—	—	—	—	900	[242]	—	—

* Подвижности дырки в тяжелых кристаллах.

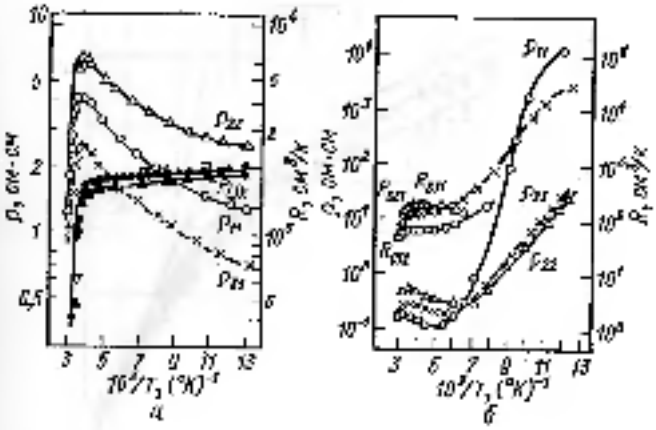


Рис. 21.38. Зависимость от температуры постоянной Холла R и удельного сопротивления ρ для трех основных направлений в p-GaSb и n-GaSb (легирующая примесь Ga) (б) [241].

Рис. 21.39. Зависимость удельной проводимости σ в Cd_3Sb_2 от температуры [16].

Полупроводниковые соединения типа $A^{II}B^{VI}$

Все соединения этого типа являются фазами переменного состава. Полиморфизм и политипизм, свойственные многим из них, приводят к сильной зависимости структурно чувствительных свойств от условий выращивания кристаллов и термической обработки.

Наиболее изученные полупроводники кристаллизуются в решетках типа сфалерита (T_d^2) или вюрцита (C_{6v}^4) и имеют прямую зонную структуру (экстремумы зоны проводимости и валентной зоны расположены в точке $k = 0$). Кристаллы кубической структуры (сфалерит) центросимметричны; одна из подзон их валентной зоны отщеплена за счет спин-орбитального взаимодействия Δ_{so} (рис. 21.40). Кристаллы гексагональной структуры (вюрцит) слабо анизотропны (этой анизотропией часто пренебрегают); наличие дополнительного взаимодействия Δ_{cr} (кристаллическое поле некубического кристалла) при-

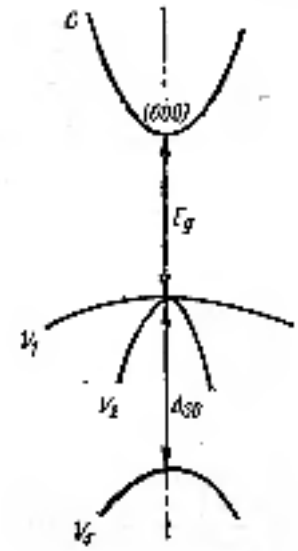


Рис. 21.40. Зонная структура полупроводников типа $A^{II}B^{VI}$ (сфалерит) [138].

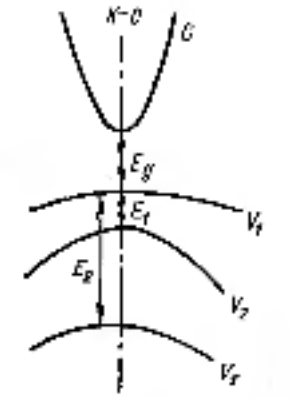


Рис. 21.41. Зонная структура полупроводников типа $A^{II}B^{VI}$ (вюрцит) [138].

водит к расщеплению валентной зоны на три подзоны (рис. 21.41). Экспериментально определяемые оптическими методами значения расщепления E_1 и E_2 связаны с Δ_{so} и Δ_{cr} соотношениями [138]

$$E_{1,2} = \frac{1}{2}(\Delta_{so} + \Delta_{cr}) \mp \left[\frac{1}{4}(\Delta_{so} + \Delta_{cr})^2 - \frac{2}{3}\Delta_{so}\Delta_{cr}\right]^{1/2}.$$

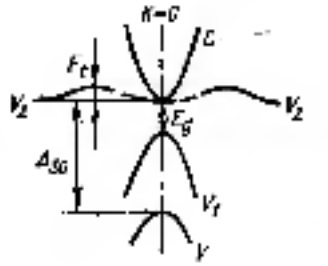


Рис. 21.42. Зонная структура HgSe и HgTe [138, 199, 200].

HgSe и HgTe имеют сложную зонную структуру с перекрывающимися зонами (рис. 21.42). Энергия перекрытия E_g — 0,001 эв [189, 200] (по другим данным E_g = 0,02 эв (HgTe); E_g = 0,07 эв (HgSe) [138], E_g = 0,015 эв (HgSe) [112]).

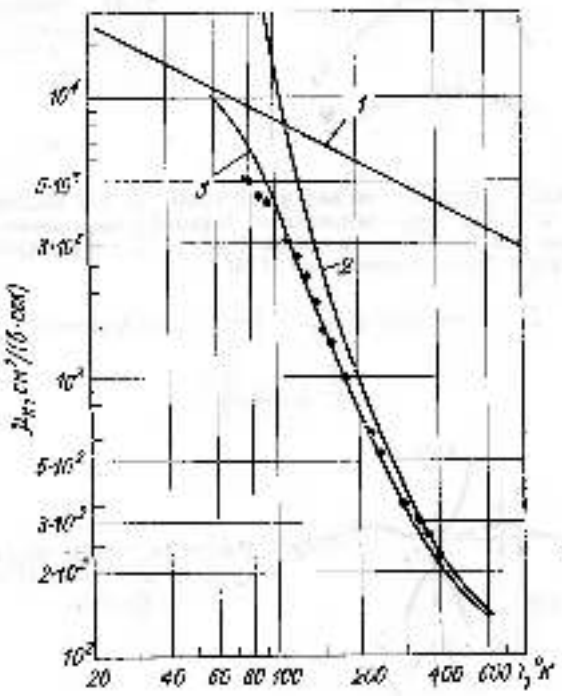
Таблица 21.11

Параметры валентной зоны соединений типа $A^{II}B^{VI}$ [138]

Тип структуры и соединение	Δ_{so}, эв	Δ_{cr}, эв	E_{g1}, эв	E_{g2}, эв
Сфалерит				
CdTe	0,8; 0,9	—	—	—
HgSe	0,45*	—	—	—
HgTe	1,1	—		—
ZnS	0,072	—	—	—
ZnSe	0,43	—		—
ZnTe	0,9		—	—
Вюрцит				
CdS	0,066	0,027	0,015	0,026
CdSe	0,42	0,041	0,078	0,438
ZnO	—	—	0,007**	0,052**
ZnS	0,092	0,065	0,029	0,117

* По данным [106] Δ_{so} = 0,25 эв.
** По данным [199].

Электрофизические свойства ряда соединений рассматриваемого типа представлены на рис. 21.43—21.50.



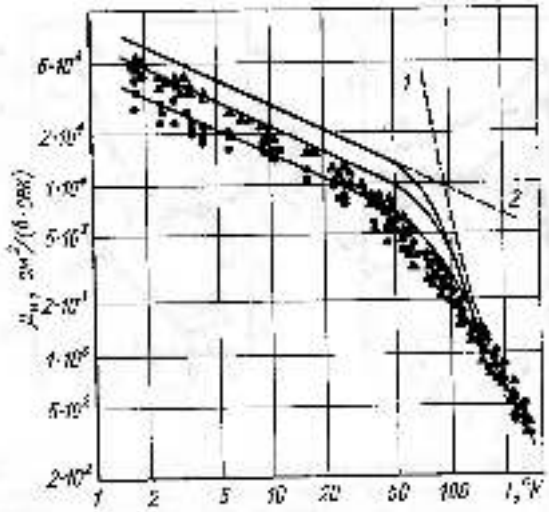


Рис. 21.44. Зависимость холловской подвижности μ_H фотовозбужденных электронов в CdS от температуры [138]:

▲ — тонкие, к-тип; ● — тонкие, n-тип; сплошные линии — теоретические кривые, рассчитанные для случая совместного действия рассеяния на оптических фононах (1) и ионизированных примесях (2).

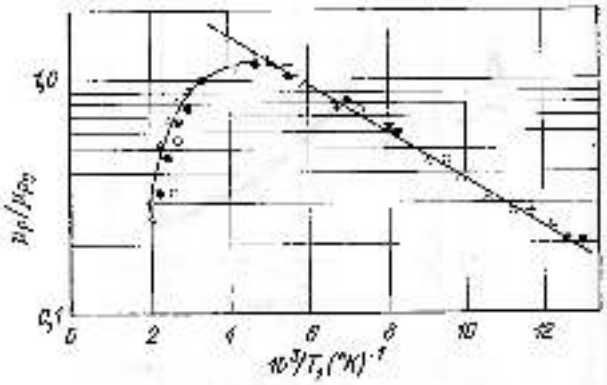


Рис. 21.45. Зависимость дрейфовой подвижности μ_p дырок в CdS, отнесенной к подвижности дырок μ_{p0} при температуре 20° С, от температуры [138]. Точки — данные различных авторов.

Рис. 21.43. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов в легированном n-CdS от температуры [138]:

● — эксперимент; сплошные линии — теоретические зависимости холловской подвижности μ_H с собственным образцом для случая высокотемпературного рассеяния (1), рассеяния на оптических фононах (2) и совместного действия. Сбоя механизмов рассеяния (3).

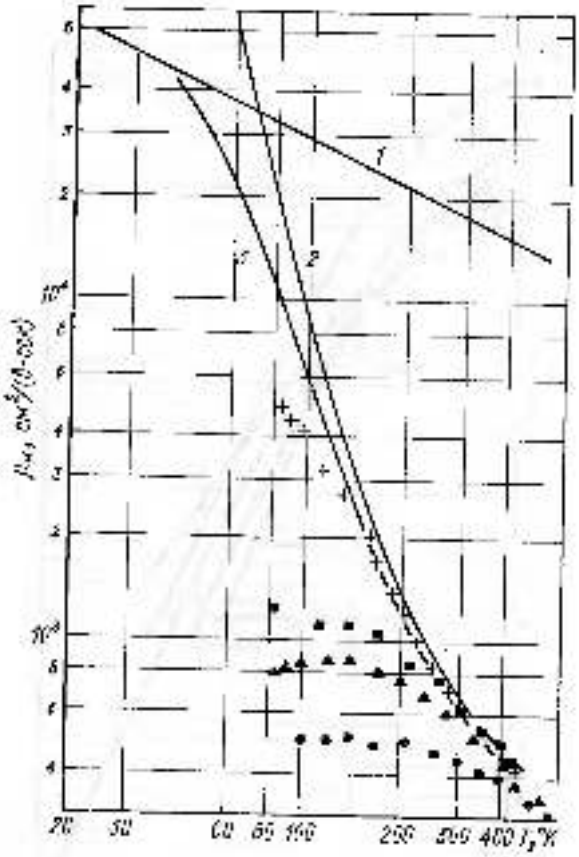


Рис. 21.46. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов в n-CdSe от температуры [138]:

концентрация доноров (Sn), см$^{-3}$: + — $1\cdot10^{18}$ (исходный образец); ■ — $1,6\cdot10^{18}$; ▲ — $2,5\cdot10^{18}$; ● — $2,0\cdot10^{18}$; сплошные кривые — теоретические зависимости для случаев нейтрального рассеяния (1), рассеяния на оптических фононах (2) и совместного действия обоих механизмов рассеяния (3).

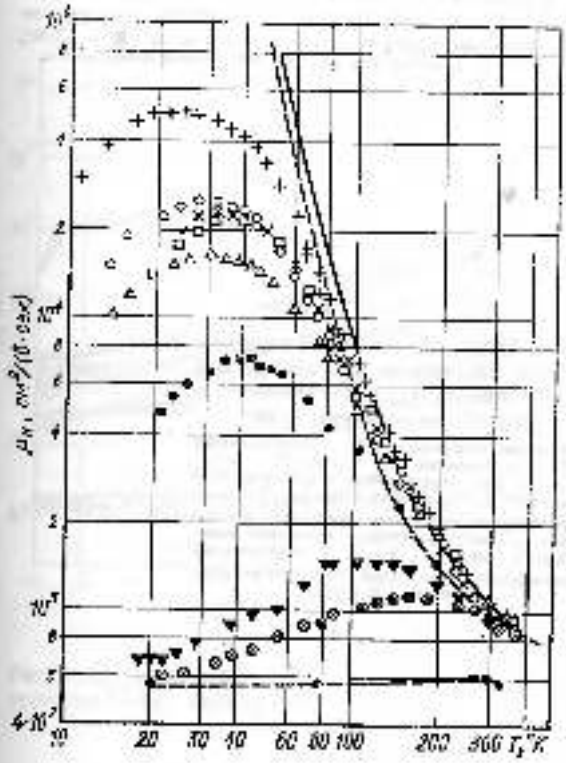


Рис. 21.47. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов в n-CdTe от температуры [138]:

+, ○, ×, □, △ — нелегированные образцы, прошедшие ионную бомбардировку; ○ — образец, отожженный в полном вакууме; ▼, ▽, ● — образцы, легированные Cl, Cu и Ga; сплошные кривые — теоретические зависимости для случаев рассеяния на оптических колебаниях с учетом температурной зависимости оптической диэлектрической проницаемости; пунктир — без учета этой зависимости.

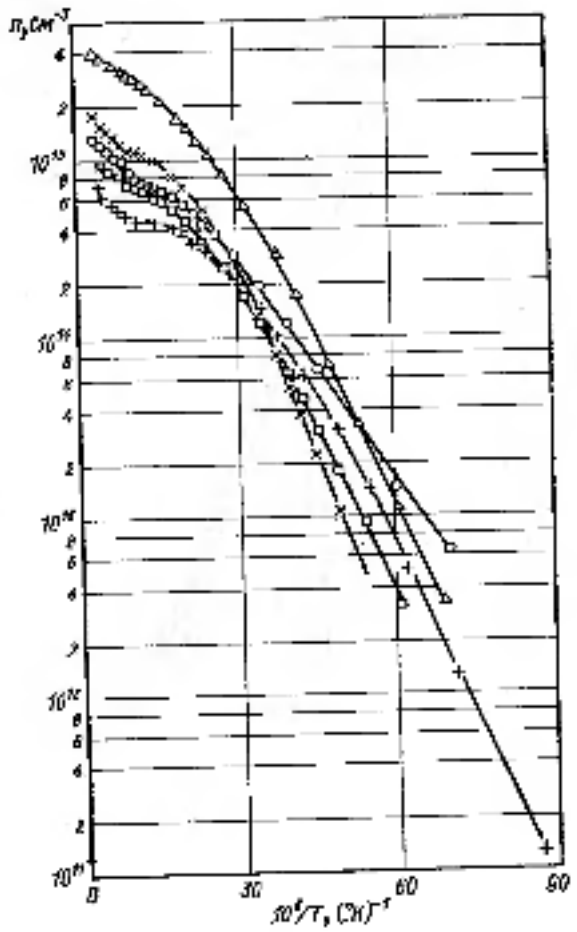


Рис. 21.48. Зависимость концентрации электронов n n-CdTe от температуры [136]. Обозначения см. рис. 21.47.

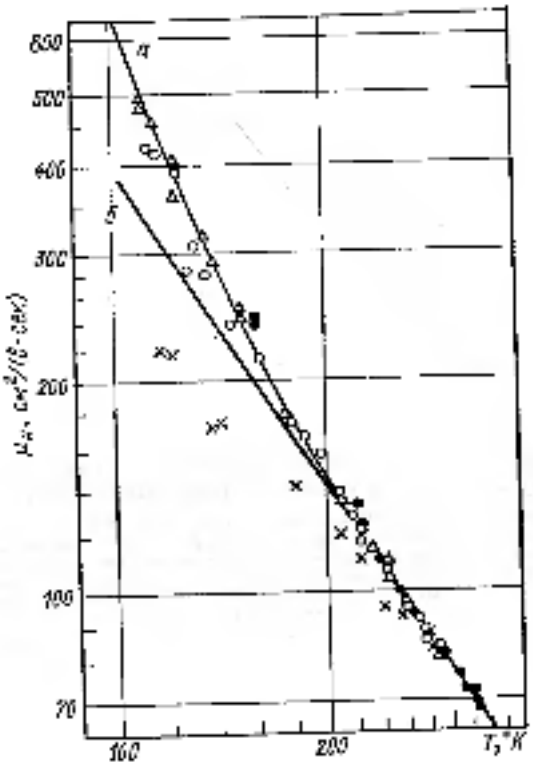


Рис. 21.49. Зависимость холловской подвижности дырок в p-CdTe от температуры [136].

Кривые a и б рассчитаны соответственно по формулам $\mu_H = \infty$ (кр. (2/8/Y)—11. $\mu_H = 0 \cdot 10^{-1} T^{-3/2}$ удельное сопротивление образца при T = 953 °K, см·гс: ● — 2,2·10⁻³; ○ — 1,5·10⁻³; × — 1,9·10⁻³; △ — 2,8·10⁻³.

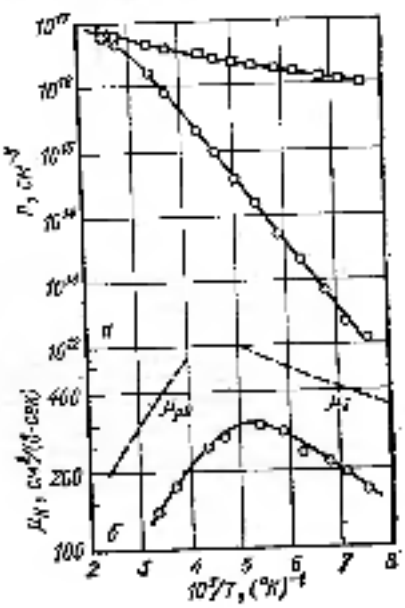


Рис. 21.50. Зависимость концентрации электронов (а) и холловской подвижности μ_H электронов (б) в ZnS от температуры [138]:

а — гексагональный ZnS, легированный Al и отожженный при 1050 °K; б — кубический ZnS, легированный I и отожженный при 940° K. Штриховая линия (μ_{ac}) — теоретическая зависимость для случая рассеяния на полярных оптических колебаниях, пунктир (μ_i) — теоретическая зависимость для случая рассеяния на ионизированных примесях.

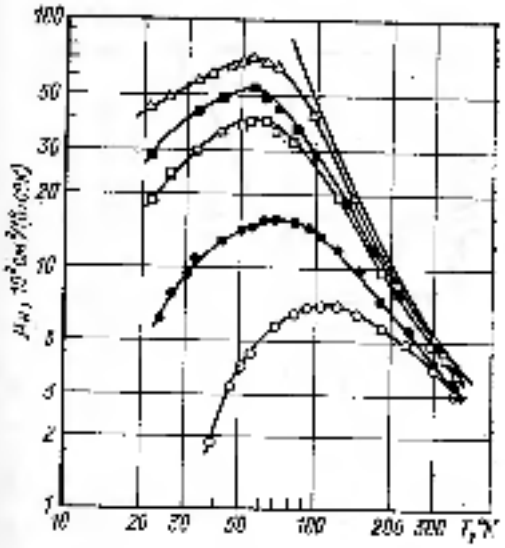


Рис. 21.51. Зависимость холловской подвижности для n-ZnSe от температуры [136] при различной концентрации доноров N_D и акцепторов N_A, 10^{16} см$^{-3}$:

△ — $N_D = 0{,}98$, $N_A = 0{,}03$; ■ — $N_D = 1{,}8$, $N_A = 0{,}56$; □ — $N_D = 1{,}25$; $N_A = 0{,}74$; ● — $N_D = 8{,}7$, $N_A = 0{,}5$; ○ — $N_D = 7{,}4$, $N_A = 3{,}4$.

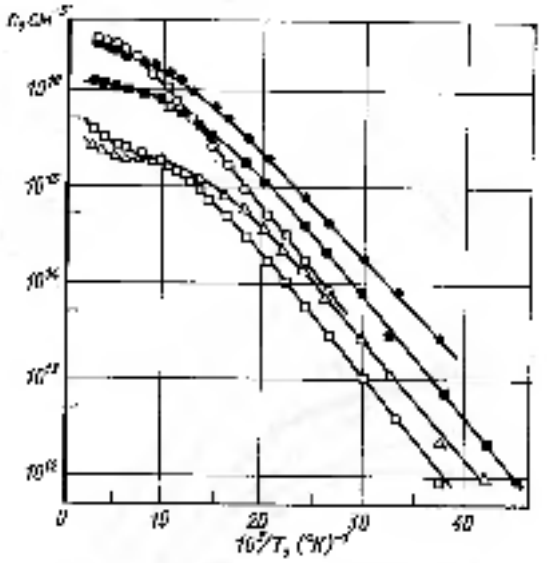
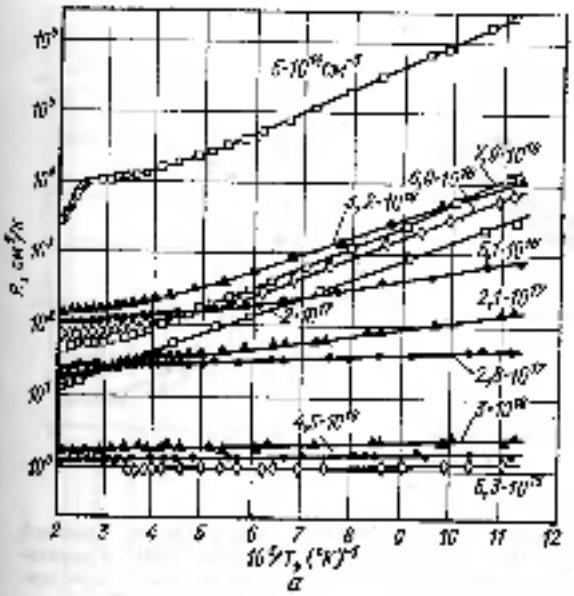


Рис. 21.52. Зависимость концентрации n электронов в n-ZnSe от температуры [136]. Обозначения см. рис. 21.51.



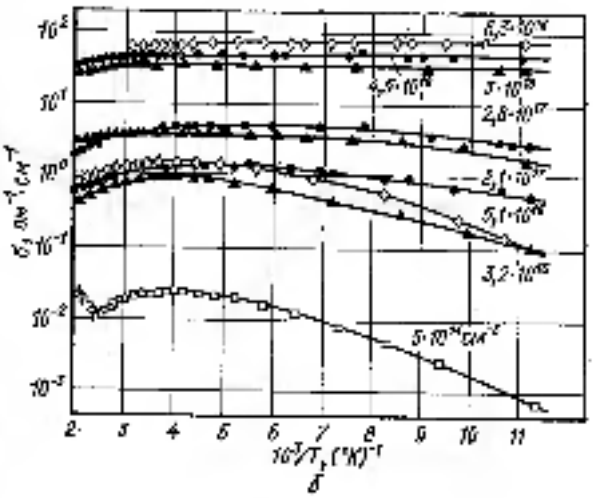
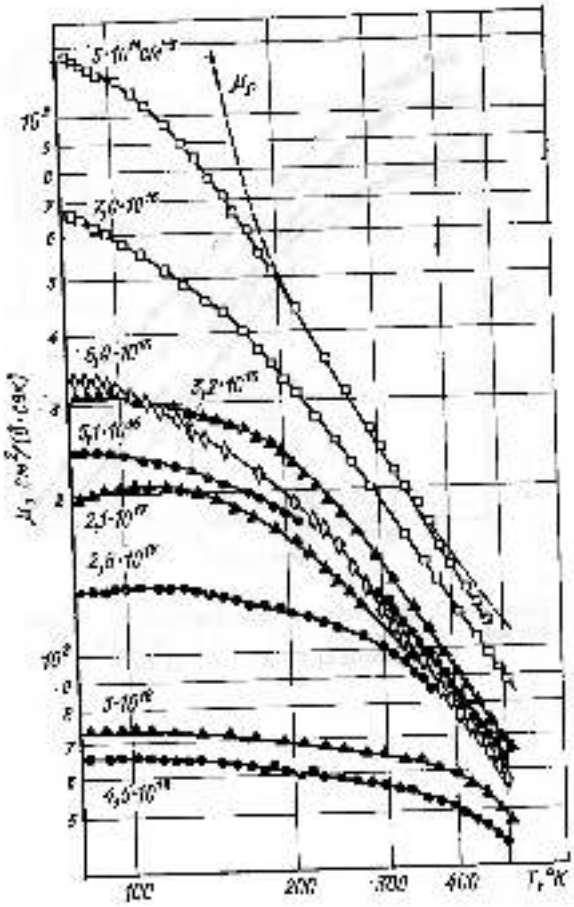


Рис. 21.53. Зависимость постоянной Холла (а) и удельной проводимости (б) для p-ZnTe от температуры [235]. Легирующие примеси: ○ — Cs; □ — Te; ▲ — P; ● — Li; числа у кривых — концентрация носителей при T = 300 °K, см$^{-3}$.



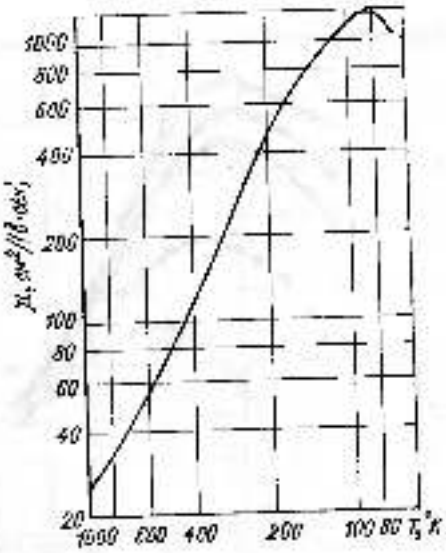


Рис. 21.53. Зависимость подвижности μ для ZnO от температуры [10].

Рис. 21.54. Зависимость подвижности μ и μ_c ZrTe от температуры [235].

Обозначения см. в подписи к рис. 21.50; пунктирная кривая — теоретическая зависимость.

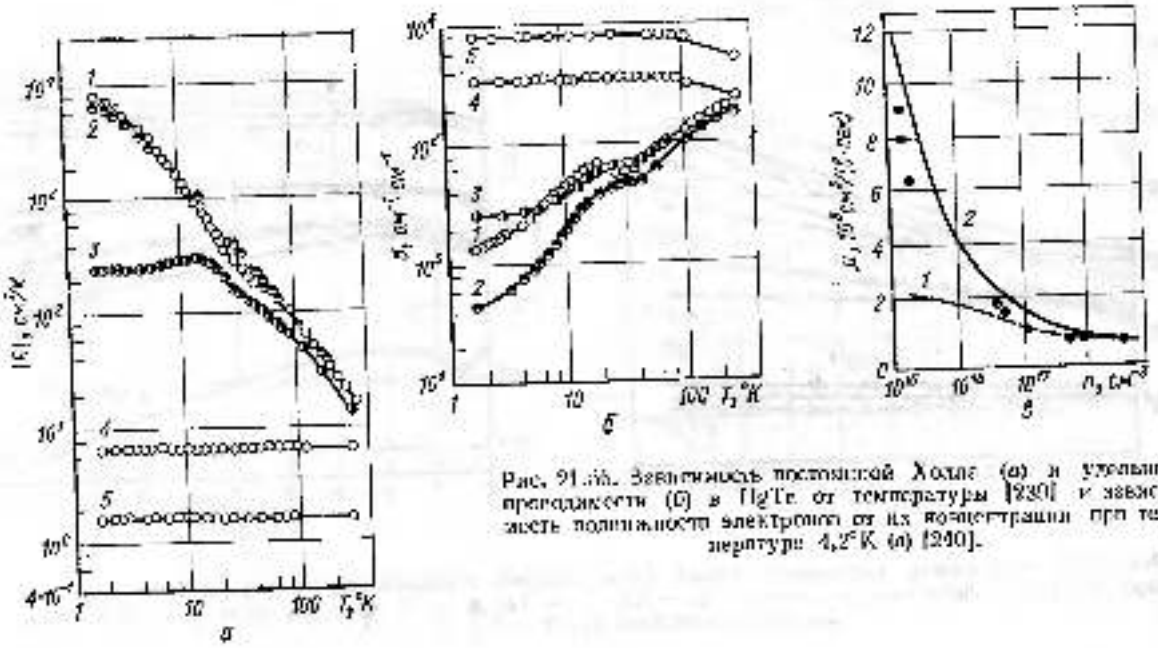


Рис. 21.55. Зависимость постоянной Холла (а) и удельной проводимости (б) в Hg_2Te от температуры [230] и зависимость подвижности электронов от их концентрации при температуре 4,2°К (в) [240].

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A^{II}B^{VI}$

Соединение	Кристаллическая структура: тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	γ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, $10^{-4}\frac{эв}{град}$	Литература	$\frac{dE_g}{dP}$, $10^{-6}\frac{эв}{атм}$	Литература	Тип проводимости	Литература
ZnO	Гексагональная C_{6v}^4	Тип вюрцита a = 3,21 c = 5,19	[1] [1]	5,664 5,70	[122] [121]	2248	[123]	3,65 3,35	[66] [144]	−8	[144]	0,6 ÷ 1,9	[10]	n	[16]
ZnS	Кубическая T_d^2	Тип сфалерита* a=5,41	[138]	4,10	[140]	1923	[123]	3,54[26] 3,6 3,67(ж) 3,91(ж)	[123] [114] [138] [124] [138]	−5,3 −3,8(ж)[27]	[114] [114]	5,7 9(ж)[24]	[114] [114]	n	[16]
ZnSe	Кубическая T_d^2	Тип сфалерита a=5,669	[136]	5,42 5,66	[121] [130]	1768	[123]	2,78 2,7 2,82	[138, 142] [114] [138]	−7,2 (50 < T < 400°K)	[138]	6	[114]	n, p	[138]
ZnTe	Кубическая T_d^2	Тип сфалерита a=6,104	[136]	5,68	[141]	1512	[123]	2,34 2,26 2,2 2,1	[142] [138] [114] [47]	—	—	6	[114]	p	[138]
CdO	Кубическая O_h^5	a=4,70	[1]	8,15	[210]	1700	[122]	2,4 2,68 2,4	[123] [50] [143]	−6	[59]	—	—	n	[60]
CdS	Гексагональная C_{6v}^4	Тип вюрцита[28] a=4,136 c=6,713	[138] [138]	4,82	[139]	2023	[123]	2,52(ж)[29] 2,4 (л) 2,58(ж)	[142] [214] [138]	−4,4 (77 < T < 300°K)	[138]	3,5 6,4	[114] [123]	n	[138]
CdSe	Гексагональная C_{6v}^4	Тип вюрцита[30] a=4,30 c=7,01	[136] [138]	5,81	[139]	1531	[123]	1,77 1,67 1,6	[142] [138] [114]	−4,6 (50 < T < 400°K)	[144]	—	—	n	[138]
CdTe	Кубическая T_d^2	Тип сфалерита a=6,48	[138]	6,20 5,90	[121] [135]	1371	[123]	1,529 1,5 (300°K) 1,6(77°K) 1,606 (7,2°K)	[68] [230] [230] [230]	−3,0 −5,6	[68] [230]	3,0 8,0	[218] [289]	n, p	[138]

Продолжение табл. 21.12

Соединение	Кристаллическая структура: тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	F, $\frac{г}{см^3}$	Литература	$t_{пл}$, °K	Литература	R_g, Ω	Литература	$\frac{dR_g}{dT}$, $k = \frac{\Omega}{°C}$	Литература	$\frac{d\rho_g}{dP}$, $\sigma = \frac{\Omega}{бар}$	Литература	Тип проводимости	Литература
HgS	Кубическая T_d^2	a=5,851*	[138]	7,73	[121]	1750	[242]	2,0	[20, 144]	—	—	—	—	n	[114]
HgSe	Кубическая T_d^2	a — 6,084	[139]	7,1—8,2 8,26	[121] [139]	1074	[123]	0,2 0,22	[148] [156]	—	—	—	—	n	[138]
HgTe	Кубическая T_d^2	a = 6,460	[138]	8,17 8,42 8,12	[121] [139] [138]	943	[123]	0,115 (300 °K) 0,276 (77 °K) 0,302 (4,2 °K) 0,3	[33] [33] [38] [199]	+6	[253]	10	[84]	n, p	[114]

* Может кристаллизоваться в структуре типа вюрцита.
** Может кристаллизоваться в структуре типа сфалерита. m — тип подвижности. Непосредственно данные, относящиеся к модификации типа сфалерита, отсутствуют. Данные относятся к основной модификации.
*** Также может кристаллизоваться в структуре типа сфалерита.
**** Может кристаллизоваться в структуре типа сфалерита ромбической формы α-HgS, здесь описывается β-HgS.

Продолжение табл. 21.12

Соединение	m_n/m_0	Литература	m_p/m_0	Литература	ν_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	ν_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	ε_n	Литература	ε_p	Литература
ZnO	0,27	[125]	—	—	180	[123]		—	—1,96	[155]	—1,24—1,74	[155]
ZnS	0,23 0,25 0,27— —0,28(ω)* m_d—0,1 m_0	[142] [114] [138] [45]	$m_{\parallel a} \gg m_a(\omega)$* $m_{\perp a}$—0,58$m_a(\omega)$ m_d = 0,6 m_0 0,5—1	[138] [138] [35] [114]	140 200	[138] [16]	50(100°K)	[138]	1,82 2,0$_{\parallel c}(\omega)$ 2,8$_{\perp c}(\omega)$*	[138] [138] [138]	1,04	[148]
ZnSe	0,18 0,17 0,15—0,17	[142] [139] [114]	0,6	[138]	530 260(300—370°K) 6000(55°K)	[138] [114] [153]	23 15(200—400°K)	[154] [114]	1,46	[148]	5,25	[148]
ZnTe	0,2 0,151	[114] [142]	0,154** m_d — 0,6m_0 m_d — 0,65m_0	[229] [138] [181]	340 350($\sim T^{-3/2}$)	[138] [114]	110 100($\sim T^{-3/2}$)	[138] [16]	0,4	[148]	10,7	[148]

Соединение	m_n/m_0	Литература	m_p/m_0	Литература	$\mu_n = \frac{e\tau^n}{m_{eff}}$	Литература	$\mu_p = \frac{e\tau^p}{m_{eff}}$	Литература	μ_n	Литература	μ_p	Литература
CdO	0,1; 0,3 0,2	[143] [17]	—	—	120	[86]	—	—	1,81	[201]	—	—
CdS	0,205 0,1—0,3(s)* m_d—0,165m_0	[138] [114] [67]	$m_{\parallel p}$ — 5,0 m_0 $m_{\perp p}$ — 0,7 m_0 m_p — 1,34 m_t m_d—(0,4—0,5) m_t	[138] [138] [21] [114]	350 6,4 $10^4 T^{-3/2}$ (70—200°K) 20($\sim T^{-3/2}$)(s)*	[138] [138] [114]	15 50	[138] [16]	$1,78_{\parallel c}$ $1,72_{\perp c}$	[138] [138]	$1,15_{\parallel c}$ 1,00	[138] [148]
CdSe	0,131 0,13	[142] [138, 114]	$m_{\parallel p}$ — m_0 $m_{\perp p}$ — 0,45m_t m_{hd} — 0,63 m_0 $m_{2\perp p}$ — 0,9 m_t	[138] [138] [22] [138]	600 580	[138] [114]	50	[114]	$+0,6_{\parallel c}$ $+0,51_{\perp c}$	[138] [138]	—	—
CdTe	0,096 0,131 0,14 0,11	[138] [102] [114] [15]	0,35 m_{pl} = 0,16 m_0 m_{ph} = 1,02 m_0	[15, 138] [236] [236]	1050 1200 3000(77°K) 5,7·10⁴(20°K)	[138] [121] [121] [149]	60($\sim T^{-3/2}$) 50	[114] [121]	—1,1	[202]	$-2_{\parallel c}$	[138]
HgS	—	—	—	—	20—70 60 250	[114] [92] [121]	—	—	—	—	—	—
HgSe	$m_{\parallel[111]}$ = =0,0187m_0 $m_{\parallel[112]}$ = =0,0509m_0 $m_{\parallel[110]}$ = =0,0408m_0	[156] [156] [156]	0,55 0,17(77—300°K)	[112] [84]	18 500($\sim T^{-3/2}$) 10⁵(4,2°K)	[114] [156]	—	—	—36	[157]	—	—
HgTe	0,017 (300°K) 0,08(4,2°K)	[84, 114] [84]	0,10(300°K) 0,35(4,2°K)	[84] [84]	90 000(4,2°K) 100 000(77°K) 30 000(300°K)	[239] [239] [239]	100 $\mu_p = \mu_n/65$ (T = 77°K)	[121] [146]	—25 —29 —40	[157] [236] [158]	—	—

* s — данные, относящиеся к модификации типа сфалерита, w — вюрцита, непомеченные данные относятся к кубической модификации.
** Масса легких дырок.

Продолжение табл. 21.12

Соединение	σ, $\frac{ом}{см \cdot см^2}$	Литература	T_D, °K	Литература	k_{Γ}, эв	Литература	k_{Γ}, эв	Литература
ZnO	—	—	416	[141]	0,0606 0,0722	[220] [254]	0,0545 0,0512	[220] [254]
ZnS	0,026	[138]	810(80°K) 340	[114] [140]	0,044	[138]	0,0394 (ом)* 0,0667	[138] [138]
ZnSe	0,19	[138]	400(80°K)	[114]	0,031	[138]	0,0203	[138]
ZnTe	0,18	[138]	250(80°K)	[114]	0,026	[138] [254]	0,024 0,0219	[138] [254]
CdO	—	—	—	—	0,0604	[254]	0,0926	[254]
CdS	0,2	[138]	250—300	[114]	0,038	[138] [254]	0,0324 0,0301	[138] [254]
CdSe	0,043	[138]	230(80°K)	[114]	0,027 0,0263	[138] [254]	0,0262 0,0175	[138] [254]
CdTe	0,075	[138]	200(80°K) 158	[114] [230]	0,0212	[138, 254]	0,0173	[138, 254]
HgS	—	—	—	—	—	—	—	—
HgSe	0,019	[138]	212(80°K) 242(300°K)	[114] [114]	—		—	—
HgTe	0,019 0,016 0,027(в тонк)	[230] [138] [199]	141	[250]	~0,014 0,0171	[100] [252]	0,0146	[252]

* γ — длина, относящаяся к координации типа сфалерита, α — вершина, неравенства длины относится к обычной координации.

Соединение	$\langle r_{cc} \rangle^*$	Литература	$\langle r_{aa} \rangle^*$	Литература	r_{cc}	Литература	r_{aa}	Литература	r_{cc_1}	Литература	r_{cc_2}	Литература
ZnO	8,5	[159]	4,0	[159]	7,55	[254]	8,67	[254]	3,69	[254]	3,69	[254]
ZnS	8,32	[138]	5,13	[138]	6,32	[138]	—	—	5,13	[138]	—	—

Соединение	$\alpha_{\parallel}$*	Литература	$\alpha_{\perp}$*	Литература	$\alpha_{\parallel}$	Литература	$\alpha_{\perp}$	Литература	$\alpha_{\parallel}$	Литература	$\alpha_{\perp}$	Литература
ZnSe	9,4 8,81 6,33	[138] [254] [142]	6,75 5,9 6,9	[114] [138] [254]	5,52	[138]	—	—	5,9	[139]	—	—
ZnTe	10,1 9,67	[138] [142]	7,28 8,25	[138] [114]	10,1	[138]	—	—	7,28	[138]	—	—
CdO	21,9	[254]	5,4	[254]	—	—	—	—	—	—	—	—
CdS	9,3	[138]	5,2	[138]	9,02	[138]	9,53	[138]	5,17	[139]	6,23	[138]
CdSe	9,4 9,63	[138] [136]	5,99 6,10	[138] [142]	10,2	[138]	9,59	[138]	5,96	[138]	6,05	[138]
CdTe	10,6 9,65 10,6 11,0	[138] [142] [252] [161]	7,6 7,21 7,4 7,3	[114] [138] [252] [161]	10,6	[138]	—	—	7,21	[138]	—	—
HgS	20,7	[114]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
HgSe	25,6 26 (10^5— —10^6 кц)	[114] [138]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
HgTe	46 21,0 20,1	[114] [252] [254]	14 14 15,2	[138] [254] [252]	—	—	—	—	—	—	—	—

* Значение усреднено по кристаллографическим направлениям.

Таблица 21.13

Свойства примесей в соединениях $A^{II}B^{VI}$

Соединение	E_D^{*}, эв	Литература	E_A^{**}, эв	Литература	$E_A'^{**}$, эв	Литература
ZnO	0,05 (доноры Zn, H)	[116]	—	—	—	—
ZnS	0,2—0,3	[138]	0,19 1,2 (Cu)	[138] [138]	—	—
ZnSe	0,19—0,23	[138]	0,11; 0,75 (Cu) 0,66 (Li)	[138] [164]	E_g—0,16	[138]
ZnTe	—	—	0,046 (V_{Zn}^{-}); 0,14 (V_{Zn}^{2-}); 0,15 (Cu); 0,11 (Ag); 0,22 (Au)	[138]	-	—
CdS	0,024—0,062 0,46; 0,63; 0,254**	[138] [138]	0,17	[138]	E_g - 0,69	[138]
CdSe	0,014—0,03	[138]	0,1	[138]	—	—
CdTe	0,011—0,022	[138]	0,06 (V_{Cd}^{-}); 0,33—0,35 (Cu); 0,3—0,38 (Ag); 0,33— —0,4 (Au)	[138]	E_g - 0,056 Γ_g—0,6 (V_{Cd}^{2-})	[138]
HgSe	Доноры: Hg в межузлиях, вакансии Se, Cu, Si	[114] [128]	—	—	—	—
HgTe	Доноры Hg, Cu, Al	[251]	Акцепторы: Cu, вакансии Hg_c, Ag_c, Au	[138] [114] [251]	—	—

* Энергии ионизации мелких донорных уровней, хорошо описываемых водородоподобной моделью. Донорами могут являться Al, Cu, In, Ga, Br, I, F, но основной тип доноров — примесный дефект: межузельный Cd или Zn.

** Энергия ионизации мелких акцепторов; обычно это V_{Zn}^{-} (вакансии цинка, заряженные), V_{Cd}^{-}, V_{Zn}^{2-}, V_{Cd}^{2-}, Cu, Ag, Au.

**' Энергия ионизации акцепторных уровней, обычно лежащих в зоне проводимости. Так, где не отмечено специально, — комплекс: дефект — примесь.

*** Промежуточные уровни.

Таблица 21.14

Полупроводниковые соединения типа $A^{II}B^{VI}$

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{m_h}{m_e}$	Литература	$\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_\infty}$	Литература
CdF_2	Кубическая O_h^5	a=5,39	[1]	6,05	[26]	0,4	[26]	10	[26]
HgI_2	Орторомбическая C_{2v}^{12}	a—4,67 b—13,76 c—7,32	[1]	1,02—2,24 (черная) 2,11 (красная) 2,13	[242] [242] [10]	—	—	—	—

Соединения типа $A^{III}B^{IV}$—$A^{III}B^{VI}$

Соединения $A^{III}B^{IV}$. Соединение B_4C (плотность $\gamma = 2,5 \div 2,6$ *г/см*^{3} [216]) проявляет полупроводниковые свойства. Ширина запрещенной зоны $E_g = 1,64$ *эв*, проводимость *p*-типа, $\mu = 300$ *см*^{2}*/в·сек*. При $T = 2623°$ К разлагается на элементы [16]. Кристаллическая структура — тетрагональная, типа D_{4h}^{17}, $a = 5,60$ Å, $c = 12,12$ Å [242].

Соединения $A^{III}B^{V}$. Для соединений типа $A^{III}B^{V}$ характерны высокая подвижность и малая эффективная масса электронов. Эти свойства обеспечивают их широкое применение. Изучены весьма подробно.

Кристаллизуются в структуру типа сфалерита (T_d^2). Зоны проводимости имеют, как правило, несколько минимумов, расположенных в точке $k = 0$ и на осях [111] и [100].

Абсолютный минимум Γ расположен в центре зоны Бриллюэна ($k = 0$) в InSb, InAs, InP, GaSb, GaAs (рис. 21.57); абсолютный минимум Δ — на оси [100] в GaP, AlSb, AlAs (рис. 21.58). Значения параметров зонной структуры — в табл. 21.15.

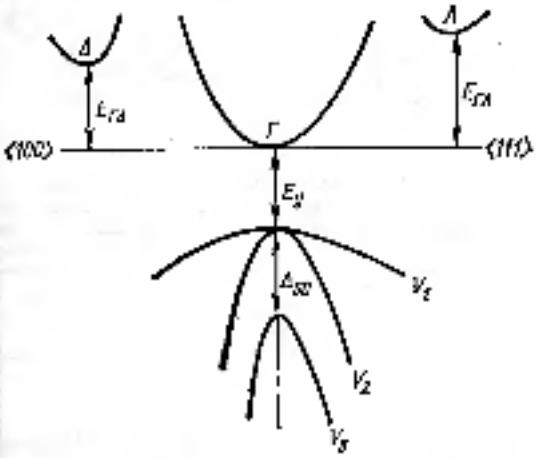


Рис. 21.57. Зонная структура InSb, InAs, InP, GaAs, GaSb [121, 170, 171].

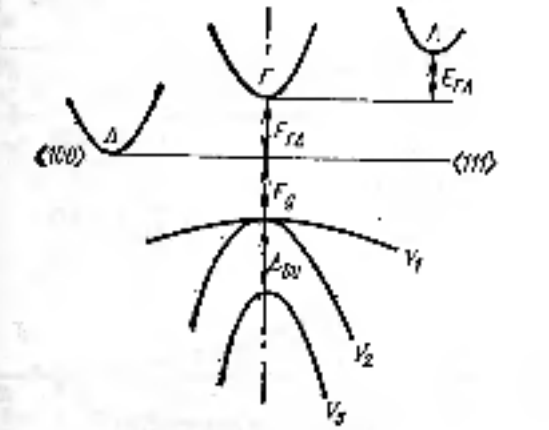


Рис. 21.58. Зонная структура GaP, AlSb, AlAs [121, 170—172].

Валентная зона вырождена при $k = 0$. Максимум зоны легких дырок V_2 находится в точке $k = 0$; максимумы зоны тяжелых дырок V_1 расположены несколько выше (на 0,01—0,001 *эв*) и лежат на осях [111]. Имеется также зона V_3, отщепленная за счет спин-орбитального взаимодействия Δ_{so}.

Электрофизические свойства соединений рассматриваемого типа см. на рис. 21.59—21.63.

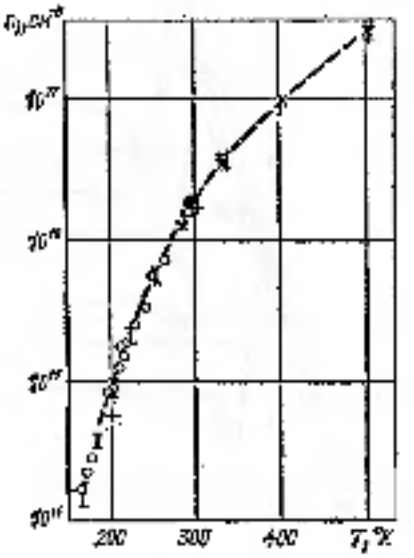


Рис. 21.59. Зависимость собственной концентрации n_i в InSb от температуры [27].

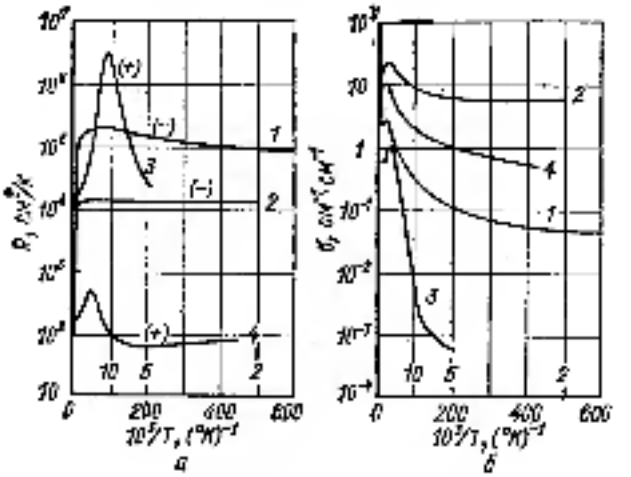


Рис. 21.60. Зависимости коэффициента Холла (*а*) и удельной проводимости (*б*) в InSb при низких температурах от температуры [27].

Эффективная концентрация доноров, см$^{-3}$:

1—$5 \cdot 10^{13}$, *3*—$5 \cdot 10^{14}$; эффективная концентрация акцепторов, см$^{-3}$: *2*—$4 \cdot 10^{14}$, *4*—$4 \cdot 10^{15}$ (+) и (−) отмечают знаки коэффициента Холла.

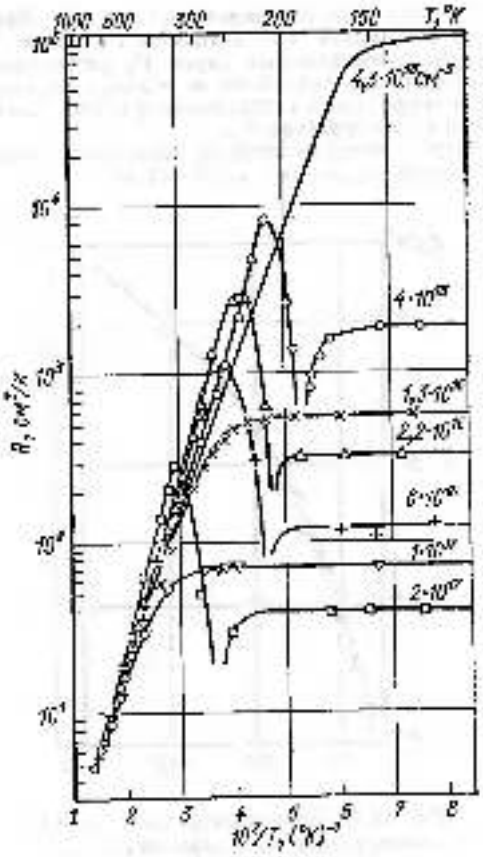


Рис. 21.61. Зависимость постоянной Холла в InSb для образцов n- и p-типа от температуры [170] при различной концентрации примесей; (2, 4, 6, 7 сверху), — акцепторы, 1, 3, 5 — доноры, см⁻³.

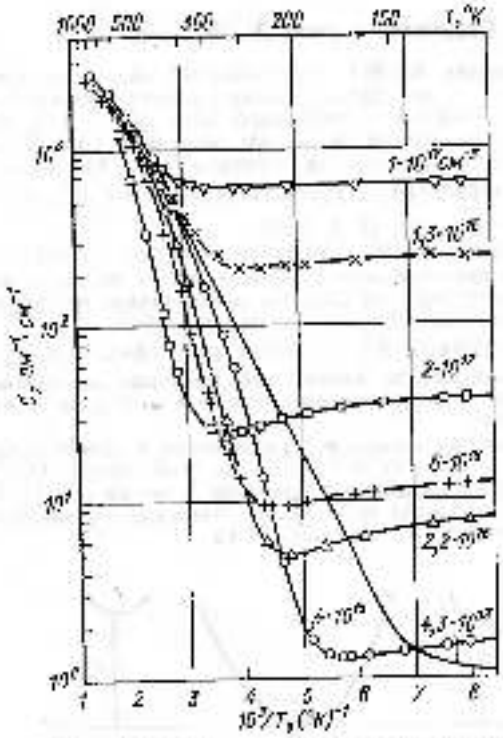


Рис. 21.62. Зависимость удельной проводимости InSb от температуры [170]. Обозначения см. в подписи к рис. 21.61.

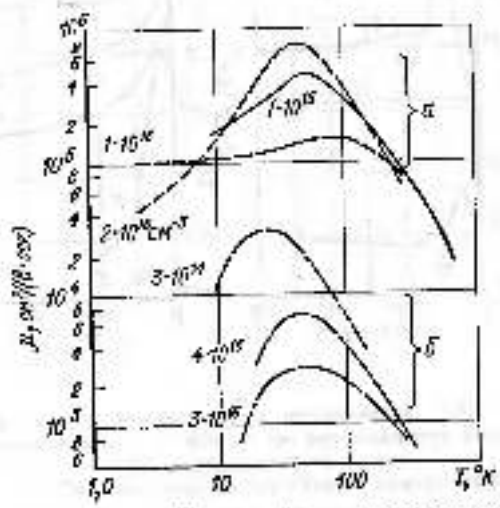


Рис. 21.63. Зависимость подвижности электронов (а) и дырок (б) в InSb от температуры при различной концентрации примесей [27].

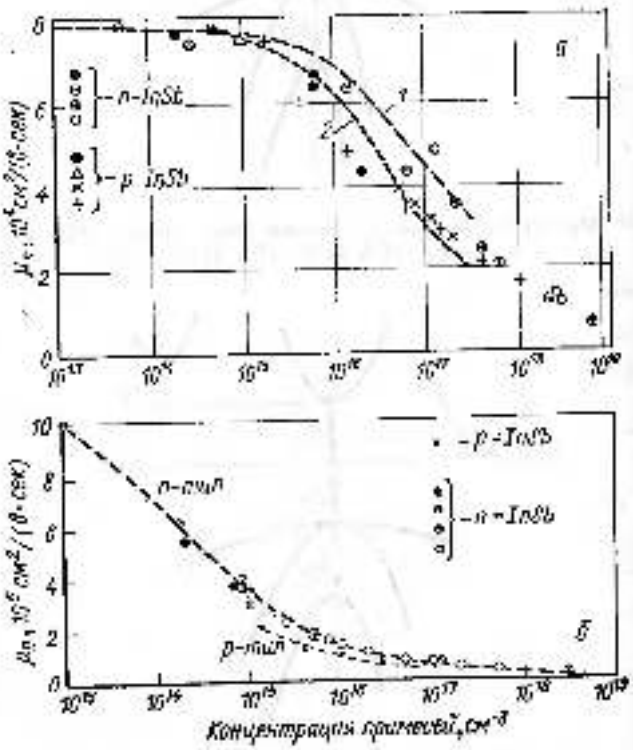


Рис. 21.64. Зависимость подвижности μ_n электронов при $T = 273$ (а) и 77° К (б) от концентрации примесей в InSb n- и p-типа [27]:

1 — теория для образцов n-типа; 2 — теория для образцов p-типа.

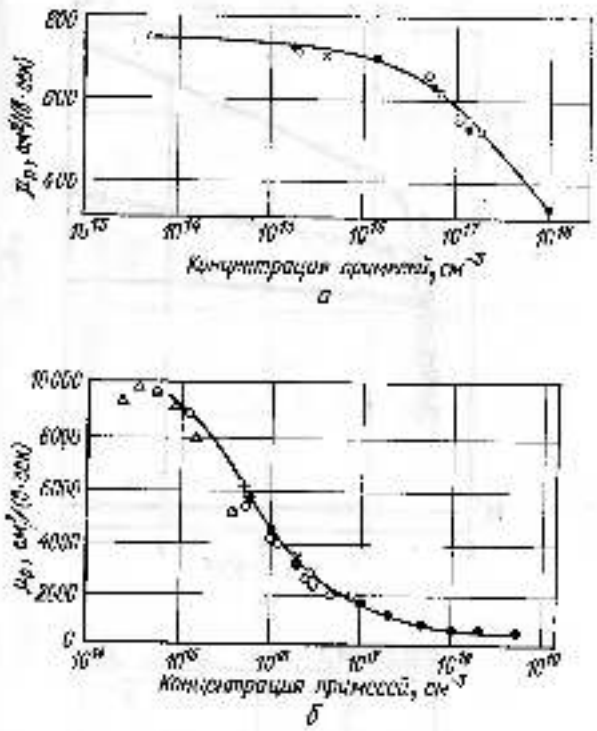


Рис. 21.65. Зависимость подвижности μ_p дырок при $T = 293$ (*а*) и 77°К (*б*) от концентрации примесей в InSb [27]. Точки — данные различных авторов.

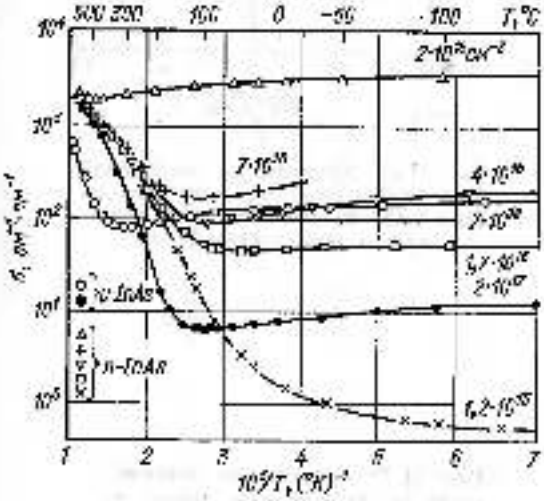


Рис. 21.66. Зависимость удельной проводимости InAs от температуры [170] при различной концентрации акцепторов в *p*-InAs и доноров в *n*-InAs.

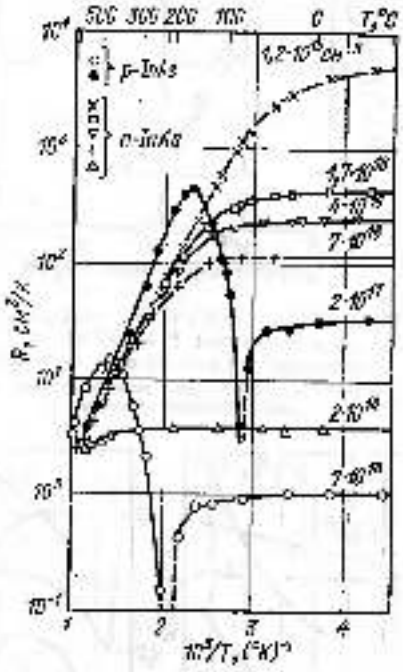


Рис. 21.67. Зависимость постоянной Холла в InAs от температуры [170].

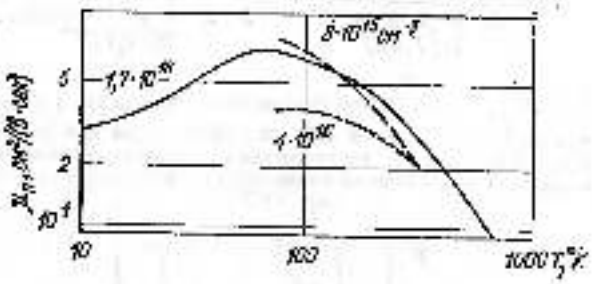


Рис. 21.68. Зависимость подвижности электронов в InAs от температуры [27].

Числа у кривых — концентрация доноров, см⁻³.

Рис. 21.69. Зависимость подвижности μ_n электронов при $T = 293$°К от концентрации примесей в *n*-InAs [27].

○ — образцы, прошедшие термообработку; ● — необработанные образцы.

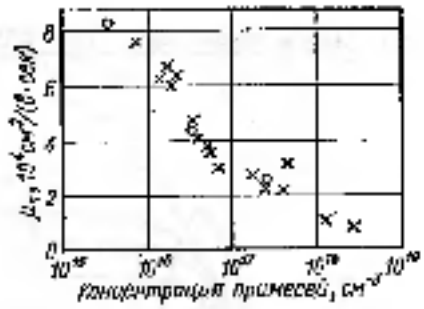


Рис. 21.70. Зависимость подвижности μ_n электронов при $T = 77°K$ от концентрации примесей в n-InAs [27]:
о — образцы, прошедшие термообработку; × — необработанные образцы.

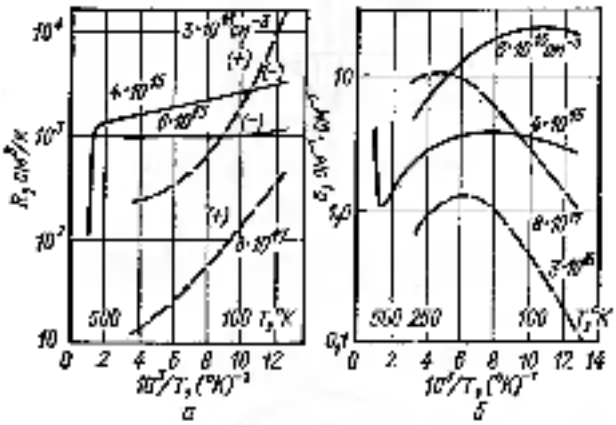
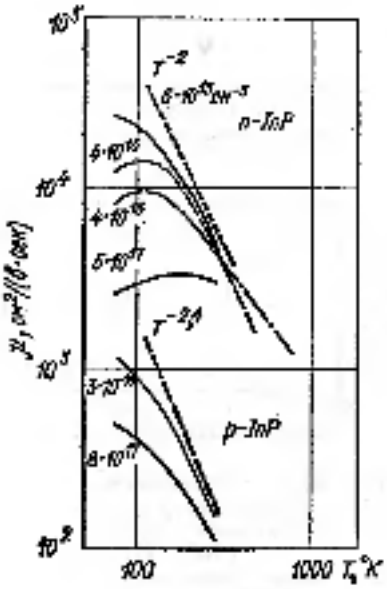
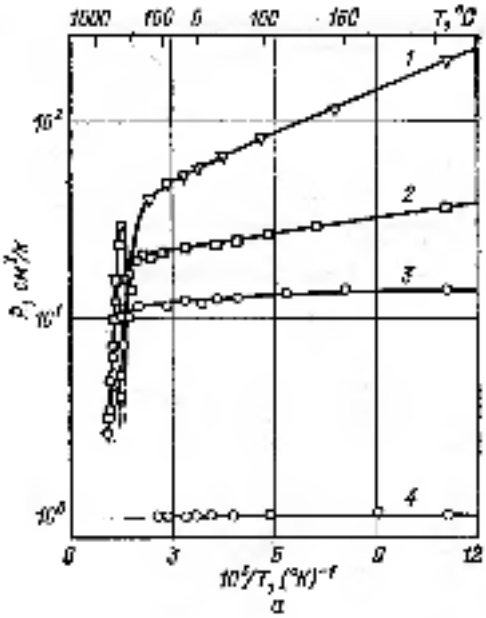


Рис. 21.71. Зависимость постоянной Холла (а) и удельной проводимости (б) в InP от температуры при различной эффективной концентрации доноров (сплошная кривая) и эффективной концентрации акцепторов (пунктир) [27].





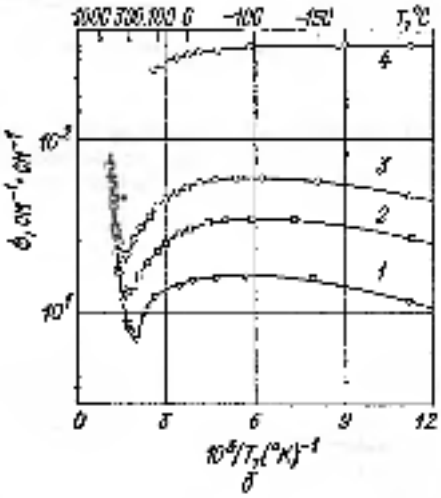


Рис. 21.73. Зависимости постоянной Холла (а) и удельной проводимости (б) в GaSb на одних и тех же образцах от температуры [170].

Рис. 21.72. Зависимость подвижности μ электронов и дырок в InP от температуры при различной эффективной концентрации доноров и эффективной концентрации акцепторов [27].

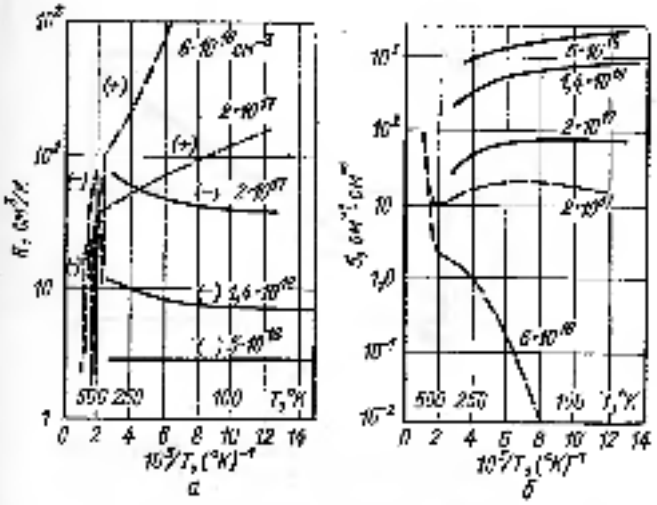


Рис. 21.74. Зависимости постоянной Холла (а) и удельной проводимости (б) в GaSb от температуры при различной эффективной концентрации доноров (сплошные кривые) и эффективной концентрации акцепторов (пунктир) [27].

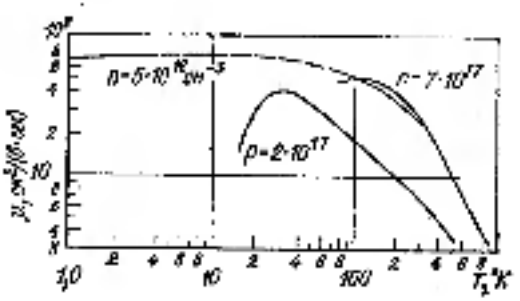


Рис. 21.75. Зависимость подвижности носителей в GaSb от температуры [27].

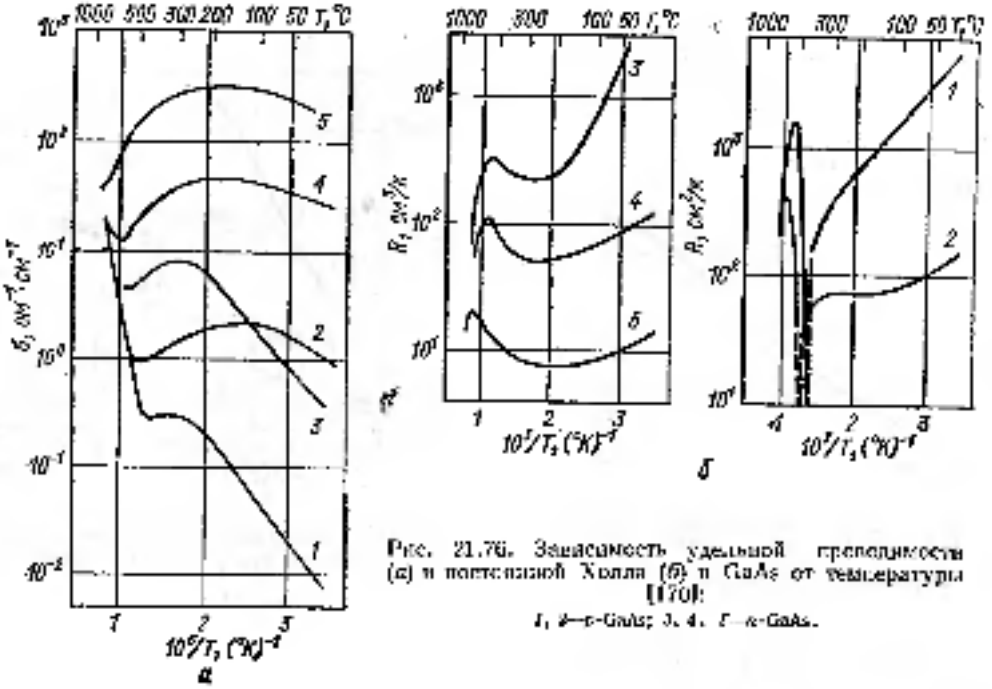


Рис. 21.76. Зависимость удельной проводимости (а) и постоянной Холла (б) в GaAs от температуры [170]:

1, 2 — n-GaAs; 3, 4, 5 — n-GaAs.

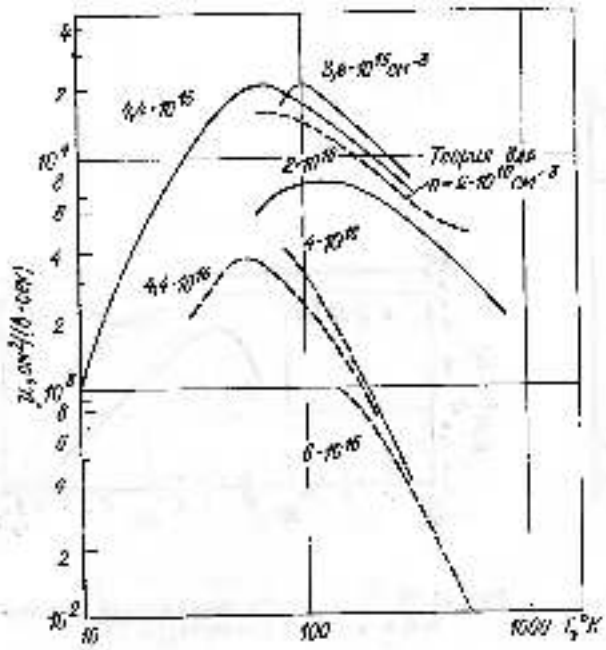


Рис. 21.77. Зависимость подвижности μ электронов (сплошные линии) и дырок (пунктир) в GaAs от температуры [27] при различной эффективной концентрации доноров с эффективной концентрации акцепторов.

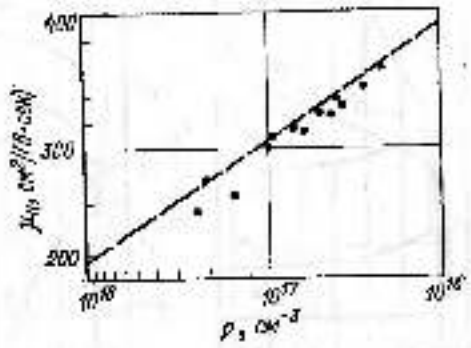


Рис. 21.79. Зависимость холловской подвижности μ_H дырок при $T = 300$ K от их концентрации в p-GaAs [170].

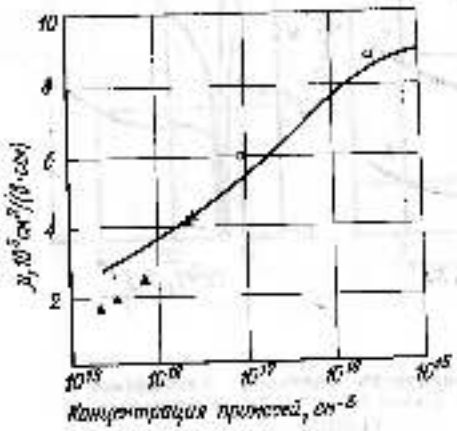


Рис. 21.76. Зависимость подвижности μ электронов при $T = 300$ K от концентрации примесей в GaAs.

Сплошная кривая — теоретическая зависимость для полупроводника, легированного только донорами; ○, ▲ — эксперимент.

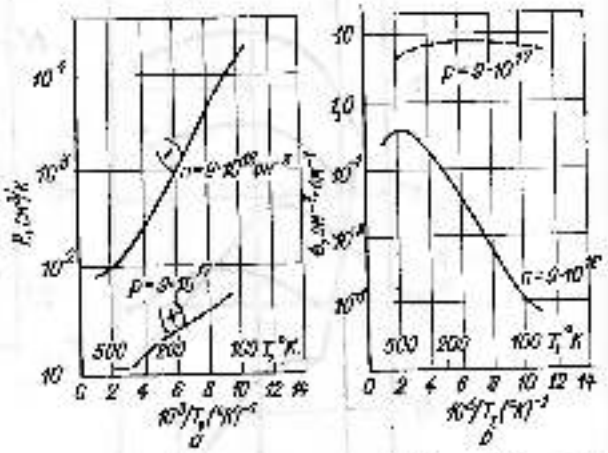


Рис. 21.80. Зависимость постоянной Холла (а) и удельной проводимости (б) в GaP от температуры [27].

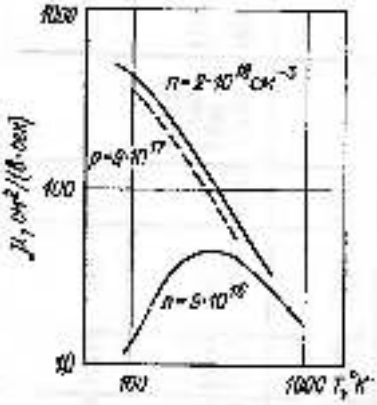


Рис. 21.81. Зависимость подвижности μ электронов и дырок в GaP от температуры [27].

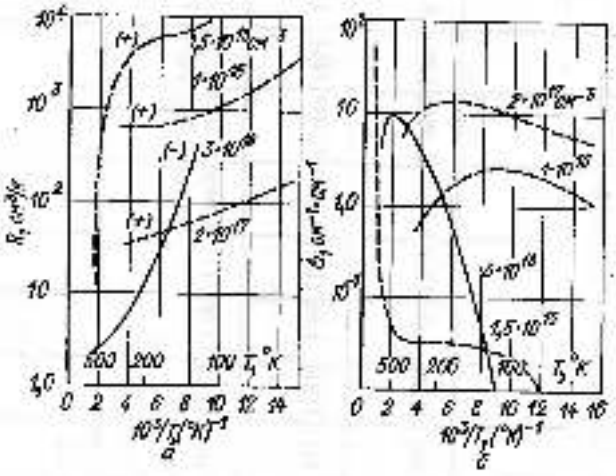


Рис. 21.82. Зависимость постоянной Холла (а) и удельной проводимости (б) в AlSb от температуры при различной эффективной концентрации доноров (образец легирован теллуром) в зависимости [27].

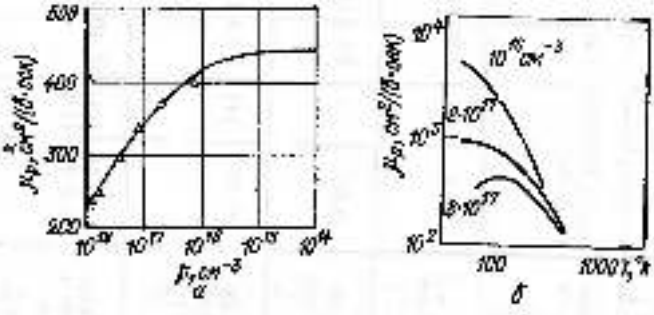


Рис. 21.83. Зависимость подвижности дырок в AlSb при $T = 293$ К от их концентрации (а) и от температуры (б) [170].

Сплошная линия — теоретическая зависимость для кубического рассеяния на акустических фононах и ионизированных примесях.

Таблица 21.15

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений $A^{III}B^{V}$

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, Å	Литература	ΔE, эв	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	T_D, °К	Литература	$\frac{m_n}{m_0}$	Литература	$\frac{m_p}{m_0}$	$\frac{m_{dp}}{m_0}$	Литература	ε	Литература	ε_∞	Литература	$\frac{\mu_n}{\text{см}^2/\text{в сек}}$	Литература	$\frac{\mu_p}{\text{см}^2/\text{в сек}}$	Литература
BP	Кубическая T_d^2	4,537	[242]	2,89	[242]	2000—3000; 1250	[242] [242]	—	—	—	—	—	—	—	11,0	[242]	—	—	—	—	—	—
AlN	Гексагональная C_{6v}^4	$a=3,104$ $c=4,965$	[242]	3,26	[242]	2470*	[242]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
AlP	Кубическая T_d^2	5,42	[1]	2,85	[123]	1770	[123]	668	[178]	0,92	[216]	0,0621	0,0545	[254]	9,83	[254]	7,50	[254]	50	[25]	150	[28]
AlAs	Кубическая T_d^2	5,62	[1]	3,0	[121]	1870	[123]	417	[121]	0,84	[121]	0,0601	0,0447	[254]	11	[254]	9	[254]	1200	[115]	—	—
AlSb	Кубическая T_d^2	6,10	[1]	4,15	[121]	1327	[123]	202	[121]	0,59	[121]	0,0428 0,042	0,0394 0,0386	[170] [251]	11,5 11,6	[27] [254]	11,5 10,2	[170] [254]	200	[121]	420 (300°K) 3700 (77° K)	[27] [27]
GaN	Гексагональная C_{6v}^4	$a=3,18$ $c=5,166$	[242] [242]	6,10	[242]	~1500	[242]	—	—	—	—	—	—	—	12,2	[214]	5,8	[214]	380	[214]	—	—
GaP	Кубическая T_d^2	5,44	[1]	4,4	[121]	1620	[123]	446	[121]	0,75	[121]	0,0969*	0,0472 0,0455	[170] [254]	10,18 10,7	[170] [254]	8,46 8,5	[170] [254]	300 (300°K) 500 (77°K)	[123] [27]	75 (300°K) 420 (77°K)	[27] [27]
GaAs	Кубическая T_d^2	5,60	[1]	5,4	[121]	1510	[123]	344	[121]	0,46	[121]	0,0868 0,0362	0,0462 0,0354	[170] [254]	12,53 12,9	[170] [254]	11,6 10,9	[170] [254]	$8,5\cdot10^3$ (300 K) $2,1\cdot10^4$ (77°K)	[27] [27]	420 (300°K) 2200 (77°K)	[27] [27]

Продолжение табл. 21.15

Соединение	Кристаллическая структура: тип	Кристаллическая структура: a, Å	Литература	ρ_{293}^{*}, $\frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	T_D, °К	Литература	α, $\frac{см}{см \cdot °К}$	Литература	k_1, эв	k_2, эв	Литература	ε_0	Литература	ε_∞	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература
GaSb	Кубическая T_d^2	6,09	[1]	5,65	[121]	985	[123]	265	[121]	0,34	[121]	0,0209	0,0266	[170, 254]	15 16,1	[27] [254]	15,2 14,4	[170] [254]	4000 (300°К) 6000 (77°К)	[27] [27]	1400 (300°К) 3600 (77°К)	[27] [27]
InN	Гексагональная C_{6v}^4	$a=3,53$ $c=5,70$	[242] [242]	6,88	[242]	1200	[242]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
InP	Кубическая T_d^2	5,86	[1]	4,79	[123]	1327	[123]	321	[121]	0,67	[121]	0,0435	0,0386	[170, 254]	14 12,4	[27] [254]	10,9 9,6	[170] [254]	$2,6 \cdot 10^4$ (300°К) $2,4 \cdot 10^4$ (77°К)	[27] [27]	150 (300°К) 1200 (77°К)	[27] [27]
InAs	Кубическая T_d^2	6,06	[1]	5,68	[121]	1216	[123]	249	[121]	0,27	[121]	0,080	0,0272	[170, 254]	14,5 14,8	[27] [254]	11,6 12,3	[170] [254]	$3,3 \cdot 10^4$ (300°К) $8,2 \cdot 10^4$ (77°К)	[27] [27]	460 (300°К) 690 (77°К)	[27] [27]
InSb	Кубическая T_d^2	6,48	[1]	5,78	[121]	796	[125]	262	[121]	0,17	[121]	0,0244	0,0226 0,0229	[170] [254]	17 17,7	[27] [254]	16,8 15,6	[170] [254]	$7,8 \cdot 10^4$ (300°К) $1,2 \cdot 10^5$ (77°К)	[27] [27]	770 (300°К) 10^5 (77°К)	[27] [27]

* Давление 1 атм, 0 °К.

** Соединения InN, InN, InN имеют кристаллическую структуру типа O_h^5 (кубическая): $a=4,980$ Å, $4,974$ Å для первых двух соединений; E_g в ряду последних составляет 2,1—2,0, 1,9—2,0, 2,1—2,8 эв соответственно [242]. Для InSb $E_g=2,6$ эв [242].

Продолжение табл. 21.16

Соединение	Абсолютный минимум зоны проводимости	Литература	E_{TA}, эв	Литература	E_{TO}, эв	Литература	E_g, эв	Литература	Δ_{so}, эв	Литература	$\frac{m_N^{(000)*}}{m_0}$	Литература	$\frac{m_N^{(111)*}}{m_0}$	Литература
BP	—	—	—	—	—	—	4,5; 4,2	[242]	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 21.15

Соединение	Абсолютный минимум зоны проводимости	Литература	E_{T1}, эВ	Литература	E_{T2}, эВ	Литература	ε_{st}, эВ	Литература	Δ_{so}, эВ	Литература	$\frac{m_n^{(100)}}{m_0}$*	Литература	$\frac{m_n^{(111)}}{m_0}$*	Литература
AlN	—	—	—	—	—	—	3,8—5 (оптич.) 4,0 3,8	[242]	—	—	—		—	—
AlP	—	—	—	—		—	3,0	[173]	0,05	[173]	—	—	—	—
AlAs	(100)	[170]	1,3	[172]	—		2,2	[172]	0,29	[173]	—	—	—	—
AlSb	(100)	[170]	0,7 0,29	[171] [170]	—	—	1,9 1,6	[84] [171]	0,75	[170]	0,09	[123]	—	—
GaN	—	—	—	—	—	—	3,3; 3,25 (300 K)	[242]	—	—	0,19—0,40	[214]	—	—
GaP	(100)	[170]	0,35	[185, 170]	0,25	[185]	2,34 2,3	[171] [84]	0,1	[171]	0,12	[123]	—	—
GaAs	(000)	[170]	0,36	[185]	0,5	[185]	1,52	[171]	0,33	[170]	0,067	[84]	—	—
GaSb	(000)	[170]	0,4	[170]	0,07	[170]	0,813	[170]	0,8 0,749	[171] [84]	0,047	[170]	0,9	[170]
InN	—	—	—	—	—	—	~2,4 (300 K)	[242]	—	—		—		—
InP	(000)	[170]	0,7	[170]	0,4	[84]	1,416 1,4	[170] [84]	0,1	[171]	0,082 0,075 (300 K)	[174] [84]	—	—
InAs	(000)	[170]	—	—	—	—	0,425 0,43—0,45	[170] [84]	0,43 0,38	[170] [84]	0,023	[170]	—	—
InSb	(000)	[170]	—	—	0,45—0,6	[84]	0,235	[170, 84]	0,88 0,805	[170] [84]	0,014	[170]	—	—

* Индекс в скобках указывает, на какой оси эллипсоида изменения зоны проводимости, к которому относится приведенная длина.

Соединение	$m_c^{(100)}/m_0$	Литература	m_{pl}/m_0	Литература	m_{pv}/m_0	Литература	m_{ds}/m_0	Литература	ε_∞	Литература	$\frac{d\varepsilon}{dT}$, 10^{-4} К/мин	Литература	$\frac{d\varepsilon_s}{dP}$, 10^{-6} см²/кг	Литература
BP	—	—	—	—	—		—		—	—	—			
AlN	—	—	—	—	—		—		—		—			
AlP	—	—	—	—	0,30	[173]	—	—	—		—			
AlAs	—	—	—	—	0,22	[173]	—	—	—		—	—		—
AlSb	0,39 $m_\perp$=0,26	[170] [84]	0,4	[123]	0,12 0,137	[170] [172]	0,9	[173]	—	—	—3,5(0°К) —4,0 (78—300°К)	[170] [123]	—1,6 (100)	[170]
GaN*)	—	—	—	—	—		0,6—0,10	[214]	—	—	3,9	[242]	—	—
GaP	0,14 0,35 $m_\perp$—0,22 $m_\parallel$—1,15	[204] [170] [84] [84]	0,5 0,56	[170] [105]	0,13 0,18	[170] [106]			—	—	—5,5	[170]	—1,7 (100)	[170]
GaAs	1,2	[170]	0,5 0,5 0,476	[170] [232] [231]	0,87 0,089 0,091	[170] [232] [231]	0,5	[173]	0,524 0,37— 0,52	[170] [84]	—5	[170]	12,5 (000) —8,7 (100)	[186] [170]
GaSb	—	—	0,23 $m_\perp$—0,36m_0 $m_\parallel$—0,26m_0	[123] [233]	0,06 0,052	[123] [233]	0,39	[173]	6	[184]	—3,5 —4,1	[170] [123]	12 (000) —10 (100) 7,3 (111)	[170] [170] [170]
InN	—		—	—	—		—		—	—	—		—	—
InP	—		0,2 0,08	[170] [105]	0,080 0,12	[170] [105]	—	—	—0,6	[230]	4,6 —2,9	[170] [123]	4,6	[170]
InAs	—	—	0,4	[170]	0,025	[170]	0,33	[173]	—32 —14,7	[177] [84]	—2,2 3,1	[170] [123]	4,8(100) 6,5(000) 3,2(111)	[170] [170]
InSb	—	—	0,04	[123]	0,015 0,0202	[123] [231]	0,2	[173]	—50 —46	[170] [84]	—2,8 —2,9	[170] [123]	16,5 (000) 14,2 (000)	[170] [170]

*) См. примечание в табл. 20.6
**) $n=5\cdot10^{18}$ см⁻³ см [217].

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	λ_K, $\frac{вт}{см\,°К}$	Литература	$\frac{d\lambda_K}{dT}$, 10^{-4} $\frac{вт}{см\,°К^2}$
GaS	Гексагональная: D_{6h}^{4}	a — 3,585 c — 15,5	[150] [150]	3,48	[150]	1298	[150]	2,5 2,95(0°К) 2,55(300°К)	[150, 260] [20] [30]	— 7,2
GaSe	Гексагональная[24] D_{6h}^{4}	a — 3,755 c — 15,92	[150] [150]	5,03	[150]	1233	[150]	1,95 2,1 1,97	[150] [150] [150]	—3,8 —4,0 —8,0
GeTe	Моноклинная[25] C_{2}^{1}	a — 11,95 b — 4,04 c — 11,62	[150] [150] [150]	5,44—5,57	[150]	1108	[150]	1,05 1,7(300°К) 1,797(77°К)	[150] [152] [152]	— 3,6 —4,25
InS	Орторомбическая D_{2h}^{12}	a — 3,94 b — 4,44 c — 10,64	[150] [150] [150]	5,18	[150]	965*	[150]	1,8	[150]	—6
InSe	Гексагональная[24] D_{6h}^{4}	a — 4,01 c — 16,90	[150] [150]	5,55—5,72	[150]	933	[150]	1,2	[150]	—
InTe	Тетрагональная D_{4h}^{18}	a — 8,437 c — 7,139	[150] [150]	6,29	[150]	966	[150]	—	—	—
TlS	Тетрагональная D_{4h}^{18}	a — 7,79 c — 6,79	[150] [150]	7,61	[150]	623*	[150]	0,57	[10]	
TlSe	Тетрагональная D_{4h}^{18}	a — 8,03 c — 7,01	[150] [150]	8,62—9,05 8,31	[39] [150]	573	[150]	0,574 0,65 0,57 0,7	[14] [150] [32] [32]	—1,19 —3,9
TlTe	Тетрагональная	a — 12,94 c — 6,158	[150] [150]	8,42	[150]	693*	[150]	—	—	—
SmS	Кубическая O_{h}^{5}	a — 5,97 ÷ ÷5,93	[242]	5,64	[62]	—	—	0,22(300°К) 0,24	[90] [62]	—
SmSe	Кубическая O_{h}^{5}	a — 6,206	[62]	6,42	[62]	1970	[64]	0,72	[64]	—
SmTe	Кубическая O_{h}^{5}	a — 6594 a—5,97; 5,93	[62] [242]	6,441	[62]	—	—	0,70(300°К)	[62]	—
EuO	—		—	—			—	1,12(300°К)	[62]	—4,7
EuS	Кубическая O_{h}^{5}	a — 5,969	[62]	5,88	[62]	—	—	1,65(300°К)	[62]	—1,7
EuSe	Кубическая O_{h}^{5}	a — 6,185	[62]	6,42	[62]	—	—	1,78 (300°К) 1,85 (300°К)	[62]	—3,2
EuTe	Кубическая O_{h}^{5}	a — 6,585	[62]	—	—	—	—	2,0(300°К)	[62]	—2
YbS	Кубическая O_{h}^{5}	a — 5,903 a — 5,87	[62] [1]	—	—		—	0,17	[64]	
YbTe	Кубическая O_{h}^{5}	a — 6,36 a — 6,34	[62] [1]	—	—	—	—	0,3	[64]	—

* Перитектическая точка.

[24] Может кристаллизоваться в ромбоэдрическую структуру C_{3}^{5} (a — 3,755 Å, c — 23,58 Å) [150].

[25] Может кристаллизоваться в тетрагональную структуру D_{4h}^{4} (a — 4,05 Å, c — 16,95 Å) [150].

[44] Может кристаллизоваться в ромбоэдрическую структуру C_{3}^{5} (a — 4,02 Å, c — 25,04 Å) [150].

Литература	Тип проводимости	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	σ, $\frac{ом^{-1}}{см}$	Литература	Примечание	Литература
[200]	p	[150]	$\mu_n/\mu_p = 8$	[151]	5 - 10	[150]	150	[150]	$\mu_n/\mu_p = 8$	[151]
[242] [10] [200]	p	[150]	—	—	30($T^{-1,5}$) 20	[30] [150]	200	[150]	$\kappa_{ac} = 5,7$ $\kappa_0 = 7,0$	[245] [132]
[31] [132]	p	[150]	50 $14 \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{1,0}$ ($T \lesssim 300°K$)	[31] [242]	15 40	[152] [150]	1000	[150]	—	—
[10]	—	—	—	—		—	—	—	—	—
—	n	[100]	900	[150]	—	—	200—500	[150]	—	—
—	p	[150]	—	—	—	—	100	[150]	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
[14] [32]	n, p	[32, 150]	30	[123]	—		400	[150]	$m_{dn} = 0,3m_0$ $m_{dp} = 0,6m_0$ $n_i = 10^{11}$ $см^{-3}$	[32] [32]
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	10($T^{-3/2}$) 37	[89] [72]	—	—	—	—	$m_h = 0,78m_0$	[89]
—	—	—	—	—	—		—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	26	[62]	—	—
[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\kappa_0 = 9,8$	[62]
[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\kappa_0 = 10,2$	[62]
[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\kappa_0 = 10,5$	[62]
[62]	—	—	44	[62]	—	—		—	$\kappa_0 = 11,2$	[62]
—	—	—	—	—	6,3	[64]	—	—	—	—
—	—		—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 21.17

Свойства примесей в соединениях $A^{III}B^{V}$

Соединение	E_D, эв	Литература	E_A, эв	Литература
AlSb	0,27 (Se); 0,13 (Te)	[170]	—	—
GaP[**]	Доноры: Se, Te	[170]	Акцепторы: Zn, Cd	[170]
GaAs[**]	~0 (Se, Te)	[170]	0,0125 (Au) 0,008 (Mn) 0,014 (Zn) 0,021 (Cd) 0,0125 (Mg)	[123] [123] [170] [170] [170]
GaSb	0,075 (S) ~0 (Se, Te)	[214] [214]	0,037 (Zn)	[170]
InP	~0 (Se, Te)	[170]	0,03 (Cd, Zn)	[170]
InAs	~0 (Te, Se, S, Cu)	[170, 123]	Акцепторы: Zn, Cd, Mg	[170]
InSb	~0 (Te, Se, S)	[170]	0,0075 (Zn) 0,0073 (Cd) 0,034 (Au) 0,066 0,023 0,039 (Ag)	[170] [170] [170]

* Энергия ионизации доноров.
** Энергия ионизации акцепторов.
*** Ge может быть как донором, так и акцептором.

Соединения $A^{III}B^{VI}$. Наиболее изученные полупроводниковые соединения III и VI групп обладают стехиометрическим составом двух типов: $A^{III}B^{VI}$ с $A_2^{III}B_3^{VI}$ и имеют много кристаллических модификаций.

Соединения $A^{III}B^{VI}$ делятся на два класса.

1. Соединения с гексагональной структурой D_{6h}^4 — GaS, GaSe, GaTe, InSe. Халькогениды галлия — полупроводники n-типа, InSe — p-типа. Все эти соединения обладают диамагнитными свойствами. В GaS, InSe и GaSe — непрямая ширина структуры E_g между максимумом валентной зоны, расположенным при $k = 0$ [96, 150].

2. Соединения с тетрагональной структурой D_{4h}^{18} — InTe, TlSe, TlS, на которых первые два — полупроводники p-типа. По физическим свойствам эти соединения близки к соединениям первого класса, но не обладают диамагнетизмом и имеют более низкие значения E_g.

Соединения $A_2^{III}B_3^{VI}$ имеют малую подвижность носителей (следствие дефектной структуры [150]) и обладают, как правило, проводимостью n-типа (за счет избыточного числа атомов халькогена). Эти соединения мало чувствительны к легированию другими примесными атомами. Многие из этих соединений кристаллизуются в структуры цинковых типов, параметры которых приведены в табл. 21.18. На рис. 21.84 представлены температурные зависимости электрофизических свойств (типичного для этой группы) соединения In_2Te_3.

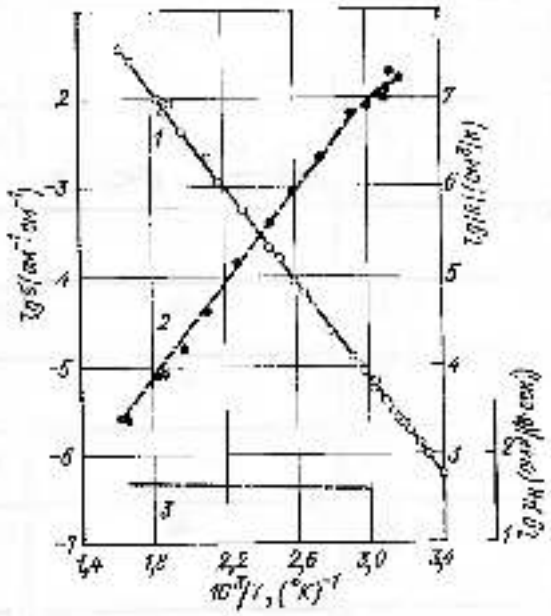


Рис. 21.84. Зависимости удельной проводимости σ (1), постоянной Холла R (2) и холловской подвижности μ_H (3) в In_2Te_3 от температуры [10].

О халькогенидах редкоземельных элементов подробнее см. работу [62]. Сульфиды редкоземельных элементов состава Ln_2X_3 имеют n-тип проводимости, сегнетоэлектрики — релакс. и $\Pi_{\mathcal{M}}/\Pi_{\mathcal{P}} \sim 0{,}5$ [62]. Халькогениды редкоземельных элементов состава Ln_3X_4 представляют собой полупроводники с E_g близкой к E_g соответствующих халькогенидов состава Ln_2X_3 (1,6 — 3,0 эв). Для разных соединений этого типа значения эффективных масс плотности состояний и коэффициенты теплопроводности χ с. близки к составляют: $m_d \sim (2{,}X \div 0{,}6)m_0$; $\alpha \sim (20 \pm 10)$ мкв/град (подробнее см. [62]). Халькогениды редкоземельных элементов могут обладать магнитным порядком (ферро- или антиферромагнитное упорядочение) [62].

Известны соединения Tl_2S с $E_g = 1$ эв (300° К) и Tl_2Te с $E_g = 0{,}5$ эв (300° К). Tl_2S обладает гексагональной кристаллической структурой типа C_3^1 ($a = 12{,}2$ Å; $c = 18{,}2$ Å) и плавится при $T = 443°$ С [242]. Полупроводниковыми свойствами обладают соединения CO_2 ($E_g = 1{,}3$ эв [87]; $\mu_p = 10$ см²/(в·сек) [249]; O_h^5, $a = 5{,}46$ Å [1]).

Таблица 21.18

Кристаллическая структура соединений $A_2^{III}B_3^{VI}$ [62, 121, 150, 242]

Соединение	Кристаллическая структура	a, b, c, Å
Al_2O_3	α-Гексагональная D_{3d}^6	$a = 4,758$; $c = 12,99$
	γ-Кубическая	$a = 7,92$; 5,42
Al_2Se_3	β-Гексагональная (тип вюрцита) C_{6v}^4	$a = 3,89$; $c = 6,30$
	α-Моноклинная	$a = 11,68$; $b = 6,73$; $\beta = 121^\circ,4$; $c = 7,35$
Al_2Te_3	Гексагональная (тип вюрцита) C_{6v}^4	$a = 4,08$; $c = 6,94$
Ga_2S_3	α-Моноклинная	$a = 11,14$; $b = 6,41$; $\beta = 121^\circ,22$; $c = 7,04$
α → β (600°C)	α-Гексагональная упорядоченная	$a = 6,38$; $c = 18,09$
	β-Гексагональная неупорядоченная (тип вюрцита) C_{6v}^4	$a = 3,69$; $c = 6,03$
β → γ (1015°C)	γ Кубическая (тип сфалерита) T_d^2	$a = 5,17$
$GaSe_2$	α-Кубическая (тип сфалерита) T_d^2	$a = 5,43$
α → β (600°C)	β-Тетрагональная	$a = 5,487$; $c = 5,411$
β → γ (900°C)	γ-Орторомбическая	$a = 7,76$; $b = 11,64$; $c = 10,82$
γ → δ (?)	δ Кубическая (тип сфалерита) T_d^2	$a = 5,46$
Ga_2Te_3	γ-Кубическая (тип сфалерита) T_d^2	$a = 5,89$
In_2O_3	Кубическая T^6	$a = 10,118$

Продолжение табл. 21.18

Соединение	Кристаллическая структура	a, b, c, Å
In_2S_3* α → γ (200°C)	α-Кубическая (тип γ'-Al_2O_3) O_h^7	$a = 5,33$
	β-Кубическая (тип γ'-Al_2O_3) O_h^7	$a = 10,7$
	γ-Тетрагональная	$a = 7,62$; $c = 32,32$
In_2Se_3* α → β (200°C)	α-Гексагональная	$a = 16,0$; $c = 15,24$
	β-Гексагональная (тип вюрцита) C_{6v}^4	$a = 7,1$; $c = 19,3$
β → γ (650°C)	γ-Кубическая (тип сфалерита) T_d^2	$a = 10,10$
γ → δ (750°C)	δ Моноклинная	—
In_2Te_3* α → β (800°C)	α Кубическая упорядоченная (тип сфалерита) T_d^2	$a = 18,40$
	β-Кубическая неупорядоченная	$a = 6,16$
Y_2S_3	Моноклинная	$a = 17,52$; $b = 4,019$; $c = 10,97$
La_2S_3	γ-Кубическая	$a = 8,723$
	α-Орторомбическая	$a = 7,584$; $b = 15,96$; $c = 4,144$
La_2Sr_3	Кубическая	$a = 4,055$
La_2Ir_3	Кубическая	$a = 9,627$; 9,649
Ce_2S_3	γ-Кубическая	$a = 8,634$
	α-Орторомбическая	$a = 7,513$; $b = 15,715$; $c = 4,094$
Ce_2Se_3	Кубическая	$a = 8,973$
Ce_2Te_3	Кубическая	$a = 9,709$

* Указан температурный переход и температура, при которой он происходит.

Продолжение табл. 21.18

Соединение	Кристаллическая структура	a, b, c, Å
Pr_2S_3	γ-Кубическая	a — 8,527
	α-Орторомбическая	a — 7,472; b — 15,604; c — 4,058
Pr_2Se_3	Кубическая	a — 8,667
Pr_2Te_3	Кубическая	a — 9,481
Nd_2S_3	γ-Кубическая	a — 8,527
	α-Орторомбическая	a — 7,442; b — 15,519; c — 4,029
Nd_2Se_3	Кубическая	a — 8,659
Nd_2Te_3	γ-Кубическая	a — 9,453
	Орторомбическая	a — 12,16; b — 11,93; c — 4,31
Sm_2S_3	γ-Кубическая	a — 8,446
	α-Орторомбическая	a — 7,38; b — 15,278; c — 3,974
Sm_2Se_3	Кубическая	a = 8,764
Sm_2Te_3	γ-Кубическая	a — 9,480
	Орторомбическая	a — 12,08; b = 4,84; c — 4,34
Gd_2S_3	γ-Кубическая	a — 8,387
	α-Орторомбическая	a = 7,338; b — 15,273; c = 3,982
Gd_2Se_3	γ-Кубическая	a — 8,717
	Орторомбическая	a — 11,18; b = 10; c — 4,05

Продолжение табл. 21.18

Соединение	Кристаллическая структура	a, b, c, Å
Gd_2Te_3	Орторомбическая	a — 11,98; b = 11,75; c = 4,29
Dy_2S_3	γ-Кубическая	a — 8,292
	δ-Моноклинная	a — 7,279; b — 15,316; c — 3,878
Dy_2Te_3	Орторомбическая	a = 12,216; b — 8,637; c — 25,911
Ho_2S_3	Моноклинная	a — 17,45; b — 4,0; c — 10,128
Er_2S_3	Моноклинная	a — 17,4; b — 3,98; c — 10,09
Er_2Se_3	Орторомбическая	a — 11,35; b — 8,10; c — 24,17
Er_2Te_3	Орторомбическая	a — 12,134; b = 8,579; c — 25,737
Yb_2S_3	Ромбоэдрическая	a — 6,748; c — 16,191
Yb_2Se_3	Орторомбическая	a — 11,27; b = 8,602; c — 23,90

Таблица 21.19

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A_2^{III}B_3^{VI}$

Соединение	ρ, $\frac{ом}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, $10^{-4}\frac{эв}{град}$	Литература	Тип проводимости	Литература	$\frac{см^2}{в\cdot сек}$	Литература	$\frac{вт}{см\cdot град}$	Литература	Примечание	Литература
α-Al_2O_3	—	—	2322	[242]	2,30	[242]	—	—	—	—	—				—	—
α-Al_2S_3	2,32	[242]	1373	[242]	4,1	[242]	—11,5 (90—373°K)	[242]	—		—	—	—	—	—	—
α-Al_2Se_3	3,91	[150]	1253	[150]	3,1	[150]	11,2	[10]	n	[150]	—	—	—	—		—
Al_2Te_3	4,5	[150]	1166	[150]	2,2 2,5	[150] [123]	—		n	[150]	—	—	—	—	$\alpha = 270\ \frac{вт}{град\cdot см}$	[150]
β-Ga_2S_3	3,65—3,74	[150]	1398	[150]	2,5 - 2,7 3,06 2,64(300°K)	[150] [150] [123]	—6,7(90—293°K) -7 —9(293—373°K)	[242] [58] [212]	n	[150]	28	[150]	—	—	$\alpha = 960\ \frac{вт}{град\cdot см}$	[150]
$Ga_2Se_3^*$	4,92 (α)	[150]	1293 (β)	[150]	1,75(α) 1,9(β)	[150] [121]	—5	[16]	p(α)	[150]	10(α)	[16]	0,005 (α)	[147]	$\alpha = 400\ \frac{вт}{град\cdot см}$	[150]
α-Ga_2Te_3	5,57	[150]	1065	[150]	1,56 1,4 1,2	[31] [160] [10]	—6,0(293—373°K) —5,4 (90—293°K)	[242] [242] [242]	p	[150]	50 26 340	[16] [150] [123]	0,0047	[150]	$m_n^* = 0,29m_0$ $m_p^* = 0,23m_0$ $\lambda_p = 26\ \frac{см^2}{в\cdot сек}$	[123] [123] [123]
In_2O_3	7,04	[132]	2270	[132]	2,8(300°K)	[132]	—7,7 (90°K $\leq T \leq$ 293°K) —8,4 (293°K $\leq T <$ 373°K)	[132] [132]	n	[60]	160 271	[242] [60]	—	—	$m_{ed}^* = 0,55\ m_0$	[60]
β-In_2S_3	5,92 4,03	[150] [121]	1383	[150]	1,1*	[150]	—6,8	[10]	n	[150]	<100	[150]	—		$\alpha = 700\ \frac{вт}{град\cdot см}$ $\varepsilon = 13,3 \div 14,7$	[150] [242]
$In_2Se_3^*$	5,36(β) 5,07(α)	[150] [150]	1172(α)	[150]	1,6(β) 1,2(α)	[150] [10]	4	[10]	n(α)	[150]	125(α)	[150]	0,03(α)	[150]	$\alpha = 100 \div 800\ \frac{вт}{град\cdot см}$ (α)	[150]
$In_2Te_3^*$	5,9(α) 5,73(β)	[121] [121]	940(α)	[150]	1,02 (α, β) 1,12 (α, β)	[150] [16]	—5,1(293—373°K) 4,2(90—293°K) —3,4	[242] [242] [16]	n	[16]	10(α) 50(β) 15—70	[150] [150] [16]	0,0107 (α)	[150]	$\alpha = 500\ \frac{вт}{град\cdot см}$ (α) $m_n^* = 0,7m_0$ (α) $m_p^* = 1,4\ m_0$	[150] [150] [160]

Продолжение табл. 21.19

Соединение	$\rho, \frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °C	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT} \cdot 10^{-4}$, эв/град	Литература	Тип проводимости	Тип структуры	$\frac{E_a}{kT_{пл}}$	Литература	$\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_\infty}$	Литература	Примечание	Литература
Tl_2S_3	—	—	—	—	1,2	[16]	—		—	—	—	—		—	—	—
Sc_2S_3			—	—	2,78	[180]		—	—	—			—		—	—
Sc_2Se_3	—	—	—	—	2,31	[190]	—		—	—	—	—		—		—
Y_2S_3	3,87	[62]	—	—	2,9	[62]		—	—				—		$\varepsilon_0 = 6,81$ $\varepsilon_\infty = 13,1$	[62] [62]
La_2S_3	4,98	[62]	2423	[62]	1,32 2,7÷2,9	[62] [62]	—	—	—	—	—			—	$\varepsilon_0 = 8,12$ $\varepsilon_\infty = 16,3; 19,6$	[62] [62]
La_2Se_3	6,15	[62]	2023	[62]	2,25 1,65	[62] [62]		—	—	—		—		—	—	—
La_2Te_3	6,53 6,4	[62] [62]	1868	[62]	2,00	[62]	—								—	—
Cr_2S_3	5,15	[62]	2473	[62]	1,12 2,6; 2,9	[242] [62]		—	—	—	—	—			$\varepsilon_0 = 7,5; 6,25$ $\varepsilon_\infty = 19,0$	[62] [62]
Cr_2Se_3	6,17	[62]	2323	[62]	1,62 1,8÷2,0	[242] [62]	—	—		—				—	—	—
Cr_2Te_3	6,6	[62]	2073	[62]	1,3—1,7 1,6	[242] [62]		—	—	—		—	—		—	—
Pr_2S_3	5,27	[62]	2323	[62]	1,1 2,2; 2,5—2,7	[242] [62]	—			—	—			—	$\varepsilon_\infty = 14,2$	[62]
Pr_2Se_3	6,61	[62]	—	—	2,15 1,81	[62] [97]	—		—	—	—	—	—			—
Pr_2Te_3	6,6	[62]		—	1,2—1,6 1,3—1,7	[242] [62]	—			—	—	—	—	—	—	—
Nd_2S_3	5,46	[62]	2285	[62]	1,06 2,1; 2,7	[242] [62]			—	—		—			$\varepsilon_\infty = 16,0$	[62]
Nd_2Se_3	6,70	[62]	—		2,2 1,6	[62] [97, 62]		—	—	—		—	—	—	—	—

Соединение	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, 10^{-4} $\frac{эв}{град}$	Литература	Тип проводимости	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	m, $\frac{г}{см^2 \cdot сек}$	Литература	Примечания	Литература
Nd_2Te_3	6,94	[62]	1323	[62]	0,6—1,0 0,8—1,12	[242] [62]	—	—			—		—	—	—	—
Sm_2S_3	5,87	[62]	2173	[62]	3,0 2,96	[62] [90]		—	—	—	—		—		ε_{∞} — 18,0	[62]
Sm_2Se_3	6,66	[62]	~1813	[62]	2,3—2,5	[62]	—	—	—		—		—	—	—	
Sm_2Te_3	—		1773	[62]	0,1	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—		—
GdS_2	6,14	[62]	—	—	2,66 2,2	[62] [62]	—	—	—			—		—	—	—
Gd_2Se_3	6,60	[62]	2023	[62]	2,2	[62]		—	—	—	—	—	—	—	—	
Gd_2Te_3	7,42	[62]	1773	[62]	0,74 0,7	[62] [64]		—		—	662*	[64]			—	—
Dy_2S_3	6,50	[62]	1773	[62]	2,94	[62]		—	—	—	—	—	—	—		—
Dy_2Te_3			1783	[62]	0,7	[62]		—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ho_2S_3	—	—	—	—	2,7	[62]		—	—	—	—	—	—	—	ε_0 — 6,92 ε_{∞} — 14,5	[69]
Er_2S_3	6,09	[62]		—	2,8	[62]	—					—		—		—
Er_2Se_3	6,83	[62]	1753	[62]	0,63	[62]	—						—	—	—	—
Er_2Te_3			1733	[62]	—		—						—	—	—	—
Yb_2S_3	6,02	[62]	—	—	2,5	[62]	—	—						—	ε_0 — 6,81 ε_{∞} — 15,1	[62]
Yb_2Se_3	7,15	[62]	—	—	3,2	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Предположительно для монокристаллов (а и б).
** μ_p = 18 см²/(в·сек) [64].
*** Значение E_g = 1,3 эв относится к непрямым переходам. Для прямых переходов E_g = 2,4 эв [64].

Соединения типа $A^{IV}B^{IV}$ — $A^{IV}B^{VI}$

Таблица 21.20

Полупроводниковые соединения типа $A^{IV}B^{IV}$*
Свойства α- и β-SiC

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	$\mu = \frac{e}{cm^2}$	Литература	T_D, °K	Литература	E_g, эв	Литература	E_{g1}, эв	Литература	ε	Литература	ε_∞	Литература
α-SiC	Гексагональная C_{6v}^4	a — 3,07 c — 37,7 (15,07)	[1] [1]	3073	[122]	3,21	[193]	1200	[193]	0,119	[194]	0,098	[194]	10,2 9,8	[124] [194]	6,9 6,73	[124] [194]
β-SiC	Кубическая T_d^2	a — 4,36	[1]	2600**	[124]	3,21	[192]	—	—	—	—	—	—	—	—		—

Соединение	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, эв/°K	Литература	$\frac{m_n}{m_0}$	Литература	$\frac{m_p}{m_0}$	Литература	$\frac{cm^2}{V\cdot сек}$	Литература	$\frac{cm^2}{V\cdot сек}$	Литература	θ_D	Литература	ε_p	Литература	$\frac{cm}{сек\cdot град}$	Литература
α-SiC	3,0	[5, 8]	—3,8	[85]	0,6	[124]	1,2 1,0	[124] [123]	200 200	[34] [49]	70	[16]	2,406	[124]	2,004	[194]	0,55— 0,57	[195]
β-SiC	2,66	[15, 79]	—5,8	[15, 79]	0,25	[73]	$m_n \to 0,59\, m_0$	[15]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Для GeSi E_g = 0,68 эв (120°K), для SnGe E_g = 0,4 эв (250°K), для SiSn E_g = 0,29 эв (50°K) [192].

** При этой температуре происходит переход (β-SiC → α-SiC) [194]. Температурные зависимости постоянных решетки и подвижности в SiC представлены на рис. 21.86, 21.88.

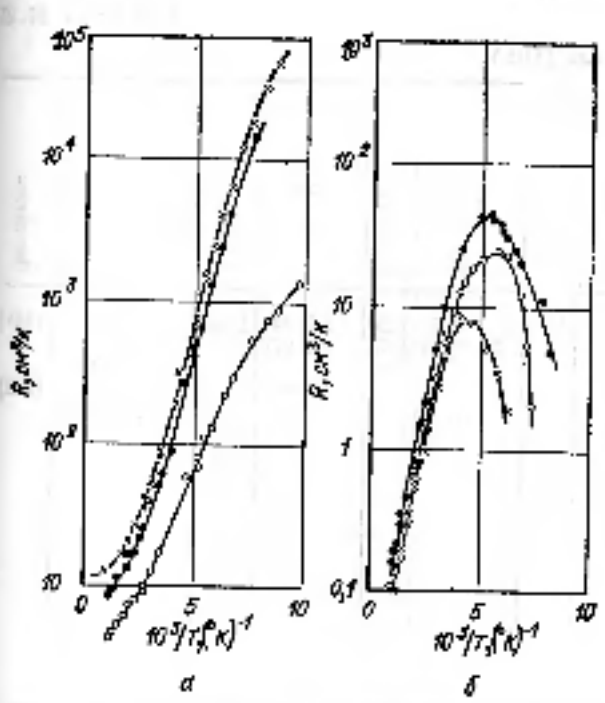


Рис. 21.85. Зависимость постоянной Холла в SiC от температуры для зеленых (а) и черных (б) образцов n-типа [224].

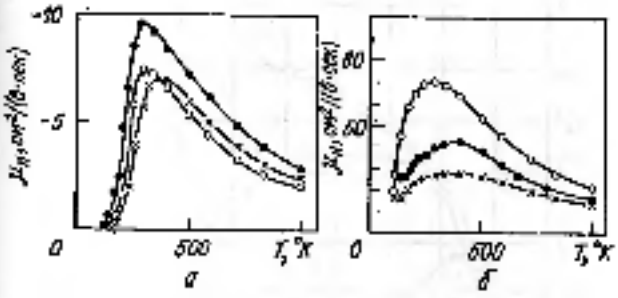


Рис. 21.86. Зависимость холловской подвижности μ_H в SiC от температуры для зеленых (а) и черных (б) образцов n-типа [224].

Полупроводниковые соединения $A^{III}B^{V}$

Из соединений этого типа известно Sn_3As_2, кристаллизующееся в ромбоэдрической решетке. Температура плавления $T_{пл} = 871°$ К, ширина запрещенной зоны $E_g = 0{,}47$ эв, подвижность дырок $\mu_p = 270$ см²/(в·сек) [100].

Полупроводниковые соединения типа $A^{IV}B^{VI}$

Наиболее изученными соединениями этого типа являются халькогениды свинца (PbS, PbSe, PbTe), кристаллизующиеся в гранецентрированной кубической решетке (O_h^5). Зонная структура — прямая, причем абсолютные экстремумы зон расположены на краю зоны Бриллюэна в направлении [111] (рис. 21.87). Ближайшие экстремумы поверхности постоянной энергии представляют собой эллипсоиды вращения (их эквивалентное

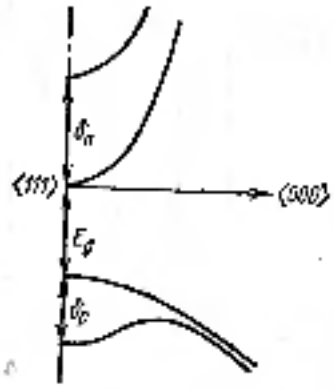


Рис. 21.87. Зонная структура PbS, PbSe, PbTe [125].

число — 4 для каждой зоны). Валентная зона расщеплена на две подзоны; нижняя из них (подзона тяжелых дырок) имеет максимумы внутри зоны Бриллюэна на осях [111] и проявляет себя в материалах p-типа при повышенных температурах (для PbTe при $T \geq 400°$ К). Халькогениды свинца обладают аномально высокой диэлектрической проницаемостью. Электрофизические свойства халькогенидов свинца см. на рис. 21.88—21.101.

Некоторые соединения рассматриваемого типа характеризуются непрямой зонной структурой, как это имеет место, например, в GeSe, SnS, SnSe [114]. Известно также, что валентные зоны в GeTe и SnTe состоят из двух подзон, разделенных энергетическим интервалом 0,3 эв [114].

Тип проводимости рассматриваемых соединений часто определяется их отклонением от стехиометрии.

К соединениям типа $A^{IV}B^{VI}$ относится также TiO_2 (рутил) — полупроводник с поляронной проводимостью (прыжковая энергия 0,13 эв [212], 0,15—0,2 эв [25]), свойства которого представлены в табл. 21.21.

Таблица 21.21

Свойства рутила (TiO_2)

Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, c, Å	$T_{пл}$, °K	$\frac{г}{см^3}$	Литература	ε_s	ε_∞	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	ε	Литература	T_c, °K	Литература
Тетрагональная D_{4h}^{14}	a—4,54 c=2,96	2113	4,28	[209]	⊥ c 89 ∥ c 173 ∥ c 260 ⊥ c 140	⊥ c 9 ∥ c 6,8 γ	[26] [211]	3,0	[10]	⊥ c 0,16 ∥ c 0,57	[25] [25]	∥ c 1,941 ⊥ c 1,970	[213]	775 650 (10 °K) 670 (68÷373 °K)	[141] [242]

* Подвижность электронов.

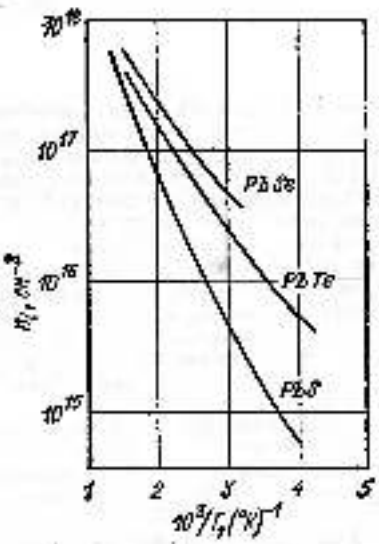


Рис. 21.88. Зависимость собственной концентрации n_i носителей в PbS, PbTe, PbSe от температуры [125].

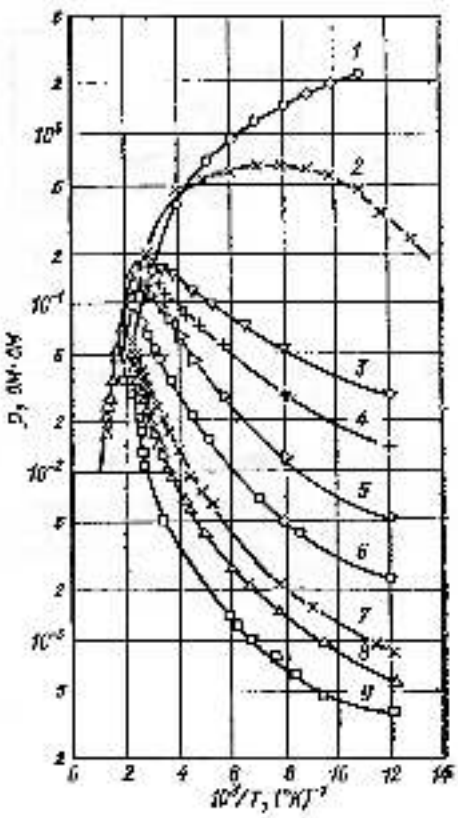
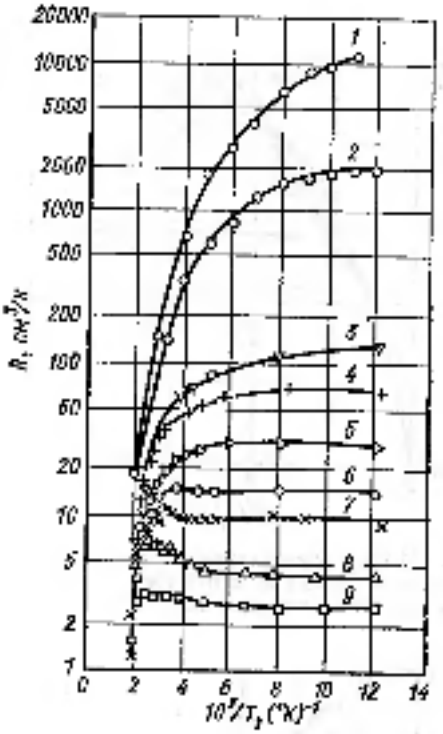


Рис. 21.89. Зависимость удельного сопротивления ρ в PbTe от температуры [117]:

1, 2 — почти собственные образцы; 3—9 — p-PbTe.

Изменение постоянной Холла на тех же образцах (см. рис. 21.90).



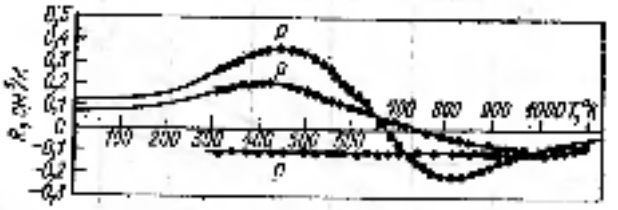


Рис. 21.91. Зависимость постоянной Холла R в сильнолегированных образцах PbTe от температуры [126].

Рис. 21.90. Зависимости постоянной Холла R от температуры [117]. Для p-PbTe приведены только положительные ветви. Образцы те же, что и на рис. 21.89.

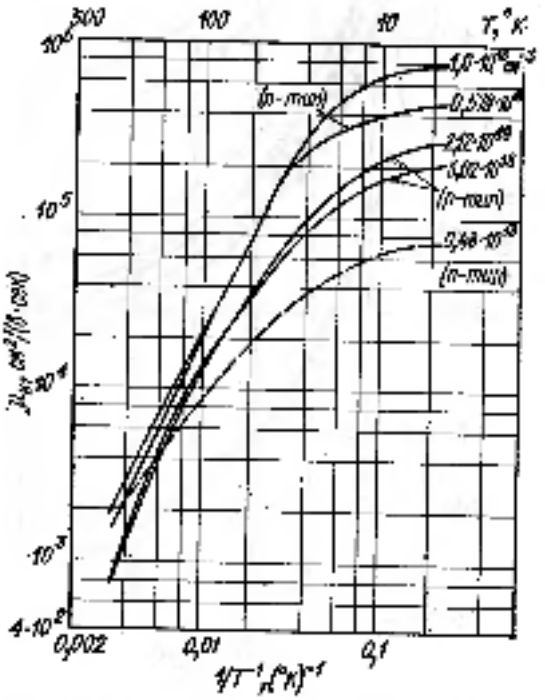


Рис. 21.92. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов и дырок в PbTe от температуры при различной концентрации носителей [117].

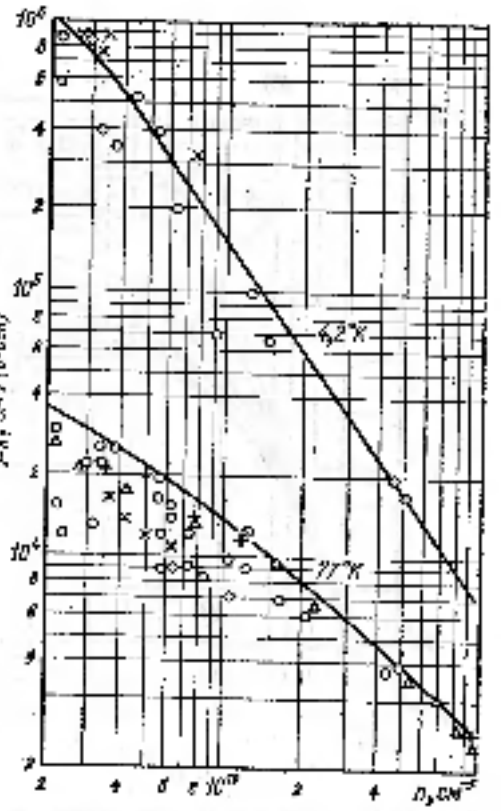


Рис. 21.93. Зависимость подвижности μ_n электронов от их концентрации n в PbTe [125]. Точки — данные различных авторов.

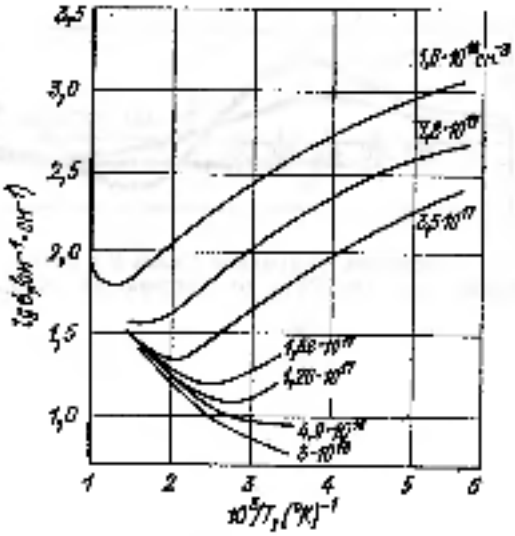


Рис. 21.94. Зависимость удельной проводимости в n-PbSe от температуры при различной концентрации доноров [117].

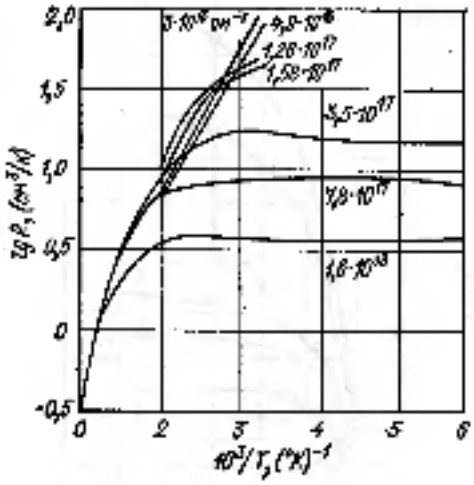


Рис. 21.95. Температурная зависимость постоянной Холла R в n-PbSe при различной концентрации доноров [117].

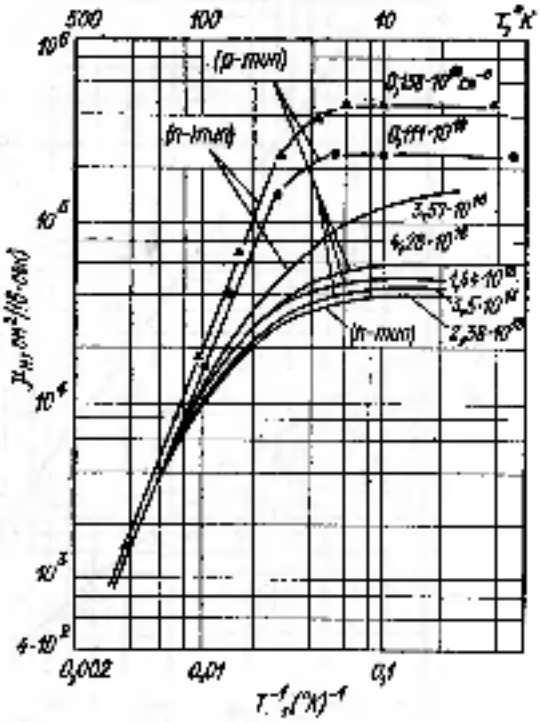


Рис. 21.96. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов и дырок в PbSe от температуры при различной концентрации носителей [117].

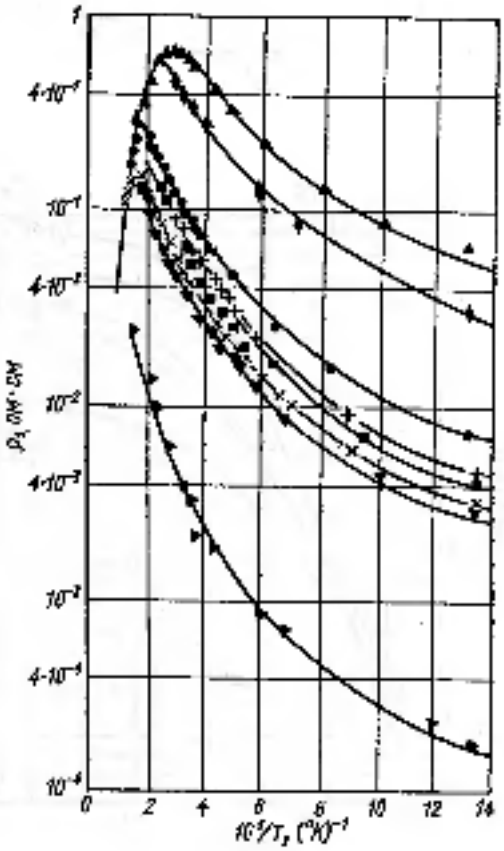


Рис. 21.97. Зависимость удельного сопротивления ρ в n-PbS от температуры [117]. Измерения постоянной Холла на тех же образцах, что и на рис. 21.96.

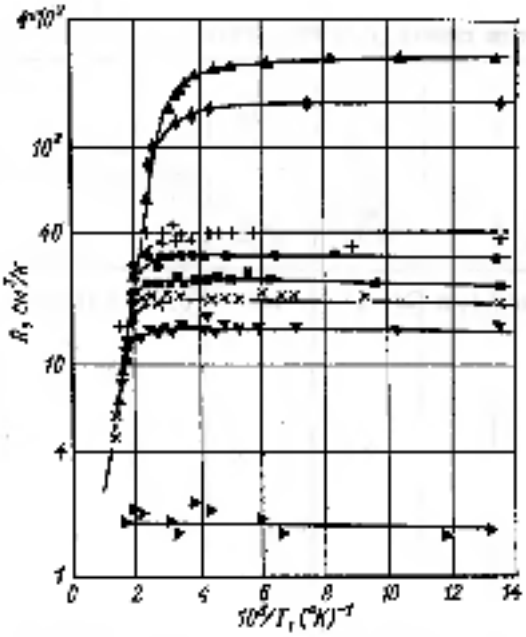


Рис. 21.98. Зависимость постоянной Холла R в n-PbS от температуры [117]. Образцы те же, что и на рис. 21.97.

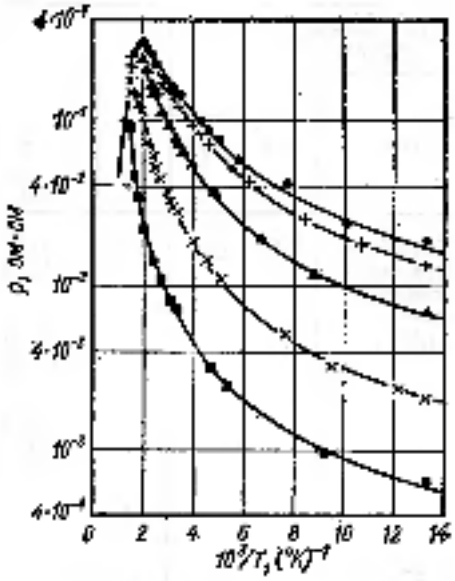


Рис. 21.99. Зависимость удельного сопротивления ρ в p-PbS от температуры [228]. Измерения постоянной Холла на тех же образцах, что и на рис. 21.100.

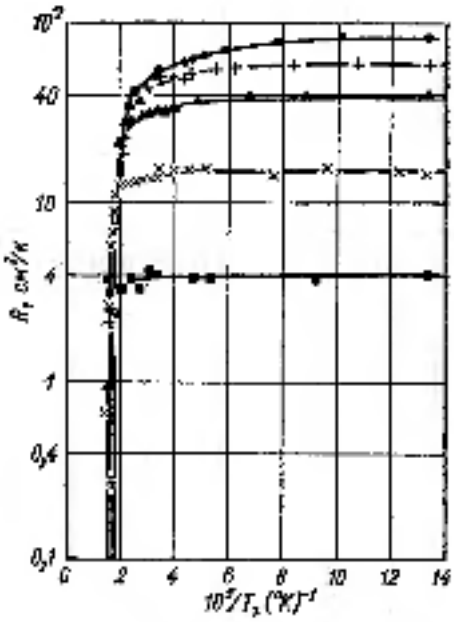


Рис. 21.100. Зависимость постоянной Холла R в p-PbS от температуры [228]. Образцы те же, что и на рис. 21.99.

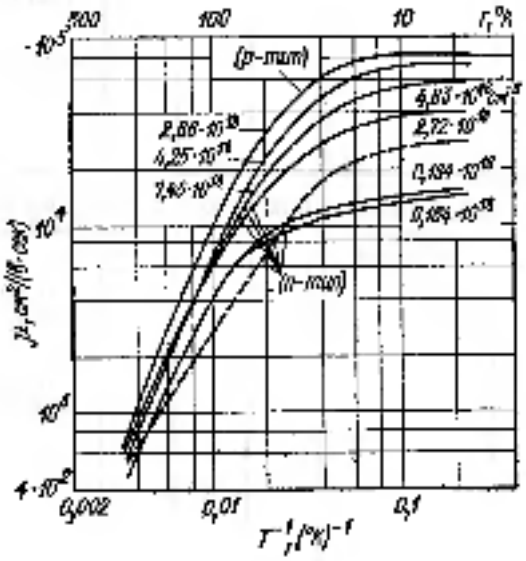


Рис. 21.101. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов и дырок в PbS от температуры при различной концентрации носителей [117].

Таблица 21.22

Электрофизические свойства халькогенидов свинца (PbS, PbSe, PbTe) [125]

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, Å	ρ, $\frac{г}{см^3}$	$T_{пл}$, °K	R_H, см³/кл	ΔE_g, эв	E_p, эв	$\frac{dE_g}{dT}\cdot 10^4$, $\frac{эв}{град}$	$\frac{dE_g}{dP}\cdot 10^4$, $\frac{эв}{атм}$	$\frac{m_{\parallel e}}{m_0}$	$\frac{m_{\parallel h}}{m_0}$	$\frac{m_{\perp e}}{m_0}$	$\frac{m_{\perp h}}{m_0}$
PbS	Кубическая гранецентрированная O_h^5	5,94	8,2	1387	0,29 (4,2°K) 0,31 (77°K) 0,41 (300°K)	1,46	1,67	4	—8	0,105	0,105	0,075	0,080
PbSe	Кубическая гранецентрированная O_h^5	6,12	8,3	1335	0,166 (4,2°K) 0,176 (77°K) 0,29 (300°K)	1,36	1,72	4	—8	0,068	0,070	0,034	0,040
PbTe	Кубическая гранецентрированная O_h^5	6,50	7,6	1190	0,19 (4,2°K) 0,22 (77°K) 0,32 (300°K)	1,11	0,77	4*	—8	0,31*	0,24	0,022*	0,024

* Данные относятся к зоне легких дырок, для зоны тяжелых дырок $dE_g/dT = 0$, $m_{pl} = 1,2 \div 1,5\ m_0$.

Соединение	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	n_i (300°K), $см^{-3}$	ε_0	ε_∞	$\hbar\omega_l$, эв	$\hbar\omega_t$, эв	T_D (300°K), °K	v_s, $\frac{см}{сек \cdot град}$	$\mathcal{E}^*_{\parallel n}$	$\mathcal{E}^*_{\parallel p}$
PbS	68 500 (4,2°K) 11 000 (77°K) 610 (300°K)	80 000 (4,2°K) 15 600 (77°K) 620 (300°K)	$2,0 \cdot 10^{18}$	175	17	0,0263	0,092	227	0,025	12	13
PbSe	139 000 (4,2°K) 16 500 (77°K) 1000 (300°K)	57 900 (4,2°K) 10 700 (77°K) 1000 (300°K)	$3,0 \cdot 10^{16}$	250	21	0,0165	0,0054	138	0,016	27	32
PbTe	800 000 (4,2°K) 34 600 (77°K) 1730 (300°K)	250 000 (4,2°K) 21 600 (77°K) 840 (300°K)	$1,5 \cdot 10^{18}$	400	33	0,0139	0,0039	125	0,02	46	51

* ∥ — направление большой оси эллипсоида энергии.

Таблица 21.23

Электрофизические свойства соединений типа $A^{IV}B^{VI}$

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	$\frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	T_D, °K	Литература	E_g, эв	Литература	Тип проводимости	Литература
$SiTe_2$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,03 (300°K)[T]	[174]		—
Si_2Te_3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,98[T]	[53]	—	—
GeS	Орторомбическая D_{2h}^{16}	a—4,30 b—10,44 c—3,65	[1] [1] [1]	4,012	[114]	898	[35]	—	—	1,8 (300°K) 1,77	[114] [165]	—	—
GeSe	Орторомбическая	a—3,82 b—10,79 c—4,38	[1] [1] [1]	6,52	[114]	943	[114]	—	—	1,0 1,10 (300°K)	[8] [114]	p	[114]
$GeSe_2$	Ромбическая	a—6,94 b—12,49 c—22,09	[242] [242] [242]	—	—	1013	[242]	—	—	2,3	[242]	—	—

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	$\rho, \frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	Θ_D, °K	Литература	E_g, эв	Литература	Тип проводимости	Литература
GeTe[8*]	Кубическая	a=5,03—5,094[4*]	[114]	6,19	[114]	993	[114]	166	[164]	0,5—1,0 (300°K) 0,27 0,23 1 ($E_{опт}$)	[114] [257] [203] [206]	p	[258]
SnI_4	Тетрагональная D_{4h}^{14}	a—4,72 c—3,17	[1] [1]	6,05	[216]	1400[5*]	[216]	500	[69]	3,97	[93]	n	[60]
SnS	Орторомбическая D_{2h}^{16}	a—3,98 b—4,33 c—11,18	[1] [1] [1]	6,08	[114]	1155	[216]	270 (80°K)	[114]	1,07	[3]	p	[114]
SnS_2	Тригональная D_{3d}^{3}	a—3,64 c—5,87	[1] [1]	4,5	[216]	—	—	—	—	2,07[6*]	[163]	—	—
SnSe[9*]	Орторомбическая D_{2h}^{16}	a=4,19 b—11,57 c=4,16	[1] [1] [1]	6,179	[114]	953[5*]	[39]	210 (80°K)	[114]	0,886[6*] 0,88	[79] [3]	p	[114]
SnSe[2]	Тригональная	—	[1]	5,13	[216]	923	[216]	—	—	0,97[6*]	[185]	—	—
SnTe[10*]	Кубическая O_h^5	a=6,28	[1]	6,46	[114]	1079	[114]	140	[114]	0,26 (300°K)	[114]	p	[114]

Соединение	m_p/m_0	Литература	$\mu_n, \frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	$\mu_p, \frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература
Si_2Te_3	—	—	—	—	—	—
Si_3Te_3	—		—	—	—	—
GeS 2	—	—	—	—	—	—
GeSe	—	—	—	—	70 (7—[illegible]) 60	[114] [8]

Соединение	m_p/m_0	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература
$GeSe_2$	—	—	—	—	—	—
GeTe	$m_1=1,15$[xxv] $m_2=5,0$	[114] [268]	100	[203]	55 150	[258] [126]
SnO_2	[xxvi]	—	200 300 ($\sim T^{-1,1}$) 80 315	[39] [5] [60]	300	[69]
SnS	$m_d=0,05$ $m_\perp=0,2$ $m_\parallel=1,0$	[127] [127] [127]	—	—	1 c 90 ($\sim T^{-2,2}$)[xxvii] 65	[127] [4]
SnS_2	—	—	—		—	—
SnSe	$m_d=0,15$	[13, 39]	—	—	c 110 [xxviii] 80	[114] [3]
$SnSe_2$	—	—	27	[183]	—	—
SnTe	$m_2=0,13$ $m_3=0,4$ $m_n=0,1$ $m_6=3,0$ $m_5=1,85$	[205] [8] [206] [7] [205]	—	—	$\mu_1=3500$ (100°K) $\mu_1=1700$ $\mu_2=50$[xxix]	[114] [181] [114]

[xx] $\frac{dE_g}{dT}=-1,22\cdot10^{-4}$ эв/град [174].

[xxi] $\frac{dE_g}{dT}=0,5\cdot10^{-4}$ эв/град [8].

[xxii] $\varepsilon=85\cdot10^{-6}$ кал/(см/град) при $T=100°$ К [250].

[xxiii] Высокотемпературная модификация: низкотемпературная модификация — ромбоэдрическая искаженная структура типа NaCl; $a=5,956$ Å, $\gamma=88°58'$; переход происходит при 340—430°С [114].

[xxiv] Размягчается.

[xxv] Непрямые переходы; прямые переходы лежат выше 1,02 эв для SnSe, и 2,85 эв для SnS_2 [183].

[xxvi] $\kappa=0,108\cdot\frac{см}{см\cdot эв\cdot сек}$ [50].

[xxvii] При 815°К — полиморфное превращение. При 898° К, 01 ат. % Se: SnSe и $SnSe_2$ образуют эвтектику [87].

[xxviii] Непрямой переход, $dE_g/dT=-1,3\cdot10^{-4}$ эв/град [39].

[xxix] $\sigma_n=1900$; $\sigma_{n_0}=\Delta\sigma_n\sigma_T^{-1}=139$ ом$^{-1}$; $\sigma_1=98$ ом$^{-1}$ [254].

[xxx] В зависимости от концентрации примесей $m_n^*=0,08\div0,18$ m_0 [205].

[xxxi] $m_{dp}=0,22$ m_0; $m_{n\parallel}=0,82\div0,18m_0$ [69]; $m_{dp}=0,16$ m_0 [206]; $m_{dp}=0,04$; $0,20$ m_0 [60].

[xxxii] μ_p в несколько раз меньше.

[xxxiii] μ_n сильно зависит от концентрации p [158]; μ_n, μ_p — подвижности электронов и тяжелых дырок.

Соединения типа $A^V B^V$—$A^V B^{VII}$

Полупроводниковые соединения типа $A^V B^V$

Из соединений этого типа наиболее изучены сплавы Bi_xSb_{1-x}. При $x=0,92$ [66]:

$\mu_n=700$ см²/(в·сек) ($\sim T^{-3/2}$), $\mu_n/\mu_p=6$, $m_n/m_0=0,17$.

SbSb — полупроводник с $E_g=1,6$ эв (300°К). $\mu_p=200$ см²/(в·сек). Плавится при $T=1080°$К [242].

Полупроводниковые соединения типа $A^V B^{VI}$

Соединения этого типа используются при создании термоэлектрических устройств. Наиболее изучены Bi_2Se_3 и Bi_2Te_3 и их твердые растворы друг с другом, а также с Bi_2S_3, Sb_2S_3, Sb_2Se_3 и др.

Кристаллы Bi_2Se_3, Bi_2Te_3 кристаллизуются в ромбоэдрической структуре (D_{3d}^5), приводящей к сильной анизотропии их механических и электрических свойств.

Зонная структура — прямая; экстремумы зон расположены на плоскостях отражения зоны Бриллюэна. Вблизи экстремумов поверхности постоянной энергии в обеих зонах близки к эллипсоидам вращения. Дополнительные подзоны имеются как в зоне проводимости, так и в валентной зоне [169] (рис. 21.102).

В других соединениях рассматриваемого типа зонная структура может быть непрямой, как это имеет место, например, в Sb_2Te_3 и As_2Se_3 [197, 198]. Тип про-

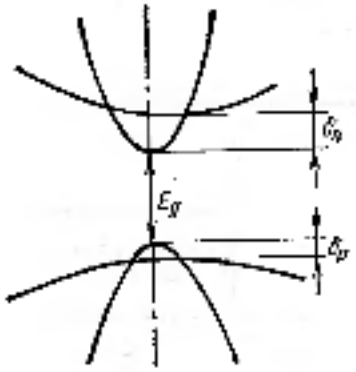


Рис. 21.102. Зонная структура Bi_2Te_3 и Bi_2Se_3. (Для Bi_2Te_3 δ_c — 0,03 эв, δ_v = 0,02 эв [169].)

водимости в этих соединениях часто определяется их отклонением от стехиометрии.

Данные по удельной проводимости типичного для этой группы соединения Bi_2Te_3 представлены на рис. 21.103, 21.104.

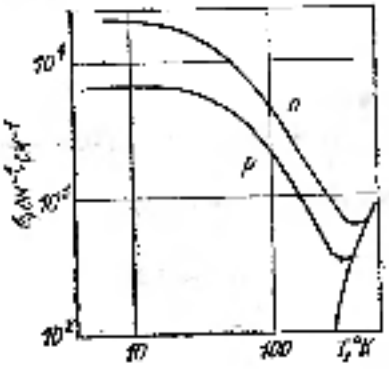


Рис. 21.103. Зависимость удельной проводимости Bi_2Te_3 от температуры (типичные образцы p- и n-типа) [117].

Полупроводниковые соединения типа $A^{V}B^{VII}$

SbI_3 обладает следующими свойствами: E_g — 2,5 эв (300° К), кристаллическая структура гексагональная, C^2_{3i}, a = 7,466 ÷ 7,49 Å, c = 20,9 Å [242].

Соединения типа $A^{VI}B^{IV}$...$A^{VI}B^{VI}$

Полупроводниковые соединения типа $A^{VI}B^{IV}$. Из полупроводниковых соединений этого типа известно $CrSi_2$, для которого E_g — 1,3 эв, α — 87 мкв/град. Оно обладает проводимостью p-типа, подвижность очень мала [16].

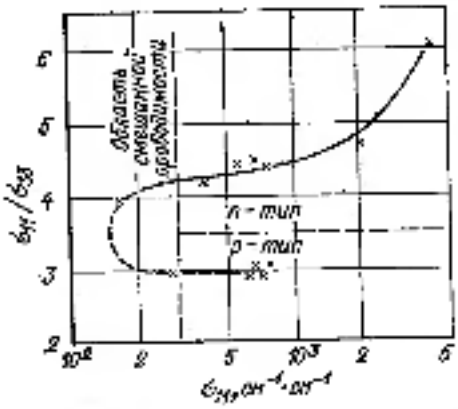


Рис. 21.104. Анизотропия проводимости Bi_2Te_3 [117]:

σ_{yy}, σ_{33} — значения удельной проводимости в направлениях, отложенных в перпендикулярной базисной плоскости (001) соответственно.

Таблица 21.26

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A^{VI}B^{VI}$

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, c, Å	Литература	E_g, эв	Литература
CrO_3	Кубическая C^{16}_{3i}	a = 5,743 b = 8,567 c = 4,789	[242] [242] [242]	1,4	[242]
Cr_2O_3	Гексагональная D^6_{3d}	a = 4,954; 4,96 c = 13,584; 13,59	[242] [242]	1,79 1,63	[242]
$CrFeO_3$*	—	—	—	0,17	[16]
MoS_2**	Гексагональная D^4_{6h}	a = 3,15 c = 12,30	[1] [1]	1,2	[10]
$MoTe_2$	—	—	—	1,02***	[90]
TiO_2	Тетрагональная D^{14}_{4h}	a = 4,79 c = 3,77	[1] [1]	1,5	[10]

* μ_n = 12 см²/(в·сек) [70].
** μ_p = 200 ÷ 300 см²/(в·сек) [269].
*** dE_g/dT = —6,4·10⁻⁴ эв/град [90].

Таблица 21.24

Электрофизические свойства соединений типа $A^{V}B^{VI}$

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	$\frac{\rho_0}{\rho_{24°}}$	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, $10^{-4}\frac{эв}{град}$	Литература	Тип проводимости	Литература	$\frac{m_p}{m_0}$	Литература	$\frac{m_n}{m_0}$	Литература
As_2S_3	Моноклинная C_{2h}^5	$a = 11,47$ $b = 9,57$ $c = 4,24$	[1] [1] [1]	3,43	[123]	596	[123]	2,5	[123]	8,6	[10]	—	—	—	—	—	—
As_2Se_3	Моноклинная	—	[207]	4,75	[216]	633	[216]	1,6 1,6 1,9	[114] [123] [307]	—	—	—		—		—	—
As_2Te_3	Моноклинная C_6^4	$a = 14,4$ $b = 4,85$ $c = 9,92$	[1] [1] [1]	6,1	[123]	635	[116]	1,0 (300°K)	[123]			—	—	$m_d = -0,56m_0$	[15]	$m_d = 0,5m_0$	[15]
Sb_2S_3	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$a = 11,2$ $b = 11,28$ $c = 3,83$	[1] [1] [1]	4,64	[123]	819	[116]	1,72 1,62	[114] [12]	~ 0,7	[114]	n, p°	[114]	—	—	—	—
Sb_2Se_3	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$a = 11,55$ $b = 11,66$ $c = 3,98$	[1] [1] [1]	5,81	[123]	888	[116]	1,2 (300°K)	[123]	—7	[114] [116]	p	[16]				—
Sb_2Te_3	Тригональная D_{3d}^5	$a = 4,26$ $c = 6,07$	[1] [1]	6,57 6,6	[114] [198]	856	[148]	0,3 (300°K) 0,19	[123] [48]	—		p	[114]	$m_d = -0,37m_0$	[16]	$m_d = -0,34m_0$	[16]
Bi_2O_3	Моноклинная C_{2h}^5	$a = 5,83$ $b = 8,14$ $c = 7,48$	[242] [242] [242]	8,76	[242]	1053	[242]	3,2	[242]	—	—	—	—				—
Bi_2S_3	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$a = 11,13$ $b = 11,27$ $c = 3,97$	[1] [1] [1]	6,73	[123]	1123	[116]	1,3 (300°K) 1,26 (300°K)	[116] [16]	—	—	n	[114]	1,26	[242]		—
BiSe	Ромбоэдрическая	$a = 5,86$; $3,846$ $\alpha = 79,0°$	[123] [242]	7,96	[123]	880	[123]	0,4	[123]	—	—	—			—	—	—
Bi_2Se_3	Тригональная D_{3d}^5	$c = 9,64$ $\alpha = 24,4°$	[132]	7,356	[114]	979	[116]	0,36 0,41	[116] [166]	—2	[168]	n	[167]	$m_\perp = -0,22m_0$ $m_\parallel = -0,18m_0$ 0,3	[166] [114]	—	—

Продолжение табл. 21.24

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c Å	Литература	ρ_x $\frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$ °C	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$ $\frac{эв}{град}$	Литература	Тип проводимости	Литература	$\frac{m_n}{m}$	Литература	$\frac{m_p}{m_0}$	Литература
Bi_2Te_3	Тригональная D^5_{3d}	$c = 10,479$ $\alpha = 24°9'32''$	[117]	7,860	[117]	853	[110]	0,16 (300°K) 0,13 (900°K)	[45] [117]	−0,95	[45, 117]	p**	[114]	$m_d = 0,37m_0$ $m_d = 0,32m_0$	[117] [123]	$m_d = 0,51m_0$ $m_d = 0,24m$ $m_{dx} = 2,5m_0$ $m_{dz} = 0,9m_0$	[117] [123] [196] [182]
V_2O_5	Ромбическая D^{13}_{2h}	$a = 11,519$ $b = 3,569$ $c = 4,371$	[242] [242] [242]	—	—	941	[63]	2,2 2,5	[65] [63]	—	—	—	—	—	—	—	—
α-Nb_2O_5	Моноклинная	$a = 21,34$ $b = 3,816$ $c = 19,47$	[242] [242] [242]	—	—	—	—	1,65	[16]	—	—	n	[16]	—	—	—	—

* Зависит от содержания S.
** При легировании Te можно получить кристаллы n-типа [66].

Продолжение табл. 21.24

Соединение	μ_n $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	σ $\frac{ом}{см \cdot град}$	Литература	α $\frac{мкв}{град}$	Литература	$\kappa_{кр}$	Литература	κ	Литература	Примечание	Литература
As_2S_3	—	—	—		—		—		7,5	[184]	9,7	[184]	$\kappa_{кр} \simeq 0,030$ *в*	[184]
As_2Se_3	—	—	—		—	—	—	—	6,0	[184]	5,9	[184]	$\kappa_{кр} \simeq 0,041$ *в*	[184]
As_2Te_3	170	[15]	80	[15]	0,025	[114]	230 ÷ 200	[110]		—	—	—	—	—
Sb_2S_3	15	[110]	65	[115]	—	—			—	—	—	—	T_D — 310°K (60°K) $\frac{dE_g}{dP}$ — −7·10 *эв/бар*	[132] [210]

Соединение	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	$\varkappa$, $\frac{вт}{см \cdot град}$	Литература	α, $\frac{мкв}{град}$	Литература	ε_{∞}	Литература	ε_s	Литература	Примечания	Литература
Sb_2Se_3	75 15	[16] [114]	45	[16, 114]	—	—	$1,2 \cdot 10^4$	[114]	—	—	—	—	$T_D = 240°K$ (80°K) $\frac{dE_g}{dP} =$ $= -14 \cdot 10^{-4}$ эв/бар	[132] [210]
Sb_2Te_3*	—	—	250—260 400 2000 (4,2°K)	[114] [44] [83]	0,04	[114]	80 80—100	[116] [114]	—	—	—	—	$T_D = 160°K$ (60°K)	[132]
Bi_2O_3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18,2(~2M гц)	[242]	—	—
Bi_2S_3	200	[123]	—	—	0,0206	[114]	700	[114]	—	—	—	—	—	—
BiSe	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Bi_2Se_3	600—2000 ($\sim T^{-3/2}$) (130—300°K) 600	[114] [114] [16]	—	—	0,024	[147]	200	[16]	—	—	—	—	$T_D = 180°K$(60°K)	[132]
Bi_2Te_3	1200 ($\sim T^{-1,7}$)	[13]	600($\sim T^{-2}$)	[13]	0,025 0,016 0,0175	[242] [147] [242]	170 (n-тип) 150 (p-тип) 50 (собств.)	[117] [117] [117]	85	[117]	300±150	[192]	$T_D = 212°K$ $T_D = 155,5°K$ Расстояние между подзонами дырок 20 мэв	[123] [117] [182]
V_2O_5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
α-Nb_2O_5	22	[242]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Валентная зона расщеплена на две. Изоэнергетические поверхности первой зоны — 12 эллипсоидов, $m^*_{p1} = 0,04 m_0$, $m^*_{p2} = 0,31 m_0$, $m^*_{p3} = 0,54 m_0$, $m_{d1} = 0,18 m_0$. Для второй зоны $m_{p1} = 0,3\ m_0$ [63]; интервал между зонами 150 мэв.

Соединения типа $A^{VII}B^{III}$ — $A^{VII}B^{VI}$

Полупроводниковые соединения типа $A^{VII}B^{III}$. Известно полупроводниковое соединение этого типа $MnAl_2$ с шириной запрещенной зоны $E_g = 0,45 \div 0,58$ эв при 300°К, подвижность электронов более 200 $см^2/(в \cdot сек)$, подвижность дырок $\mu_p \sim 200$ $см^2/(в \cdot сек)$ [242].

Полупроводниковые соединения типа $A^{VII}B^{IV}$. Известны полупроводники этого класса $ReSi_2$ с шириной запрещенной зоны $E_g = 0,13$ эв [16] и $MnSi$ с кубической кристаллической структурой: $a = 4,557$ Å, группа T_h^6, $E_g = 0,5 \div 0,6$ эв, $\mu_p = 10 \div 40$ $см^2/(в \cdot сек)$, $\varkappa = 10^{-2}$ $вт/(см \cdot град)$ [242].

Полупроводниковые соединения типа $A^{VII}B^{VI}$

Таблица 21.26

Электрофизические свойства халькогенидов и окиси марганца

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	E_g, эв	$\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература
MnO_2	Ромбическая D_{2h}^{16}	$a = 5,27$ $b = 2,866$ $c = 4,773$	[242] [242] [242]	0,13 —0,19 (300°К)	1,2	[242]
$MnSe^{*}$	Кубическая O_h^5	$a = 5,41$	[216, 242]	0,68 2,5	—	[80] [242]
$MnSe_2$	Кубическая T_h^6	—	[242]	0,15	—	[242]
$MnTe^{2*}$	Гексагональная D_{6h}^4	$a = 4,14$ $c = 6,71$	[216] [242]	0,26 1	— 1	[242] [106]
$MnTe_2^{**}$				0,48		[16]

Продолжение табл. 21.26

[1] Антиферромагнетик. Температура Нееля $T_N = 240$°К.

[2] Антиферромагнетик. Температура Нееля $T_N = 210$°К.

[*] $a = 26$ килобар. Температура начала кристаллизации 1150°С [41].

Соединения типа $A^{VIII}B^{V}$ — $A^{VIII}B^{VI}$

Полупроводниковые соединения типа $A^{VIII}B^{V}$. Соединения этого типа изучены слабо. Зона проводимости $PtSb_2$ имеет эллипсоидное вращения, большие оси которых расположены в направлениях [111]. Валентная зона — 6 эллипсоидов вращения, расположенных вдоль осей [100] [41]. Энергия прямого перехода $E_g > 0,4$ эв, $E_g = 0,08$ эв соответствует непрямому переходу [175].

Таблица 21.27

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A^{VIII}B^{V}$

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{m_d}{m_0}$	Литература	$\frac{m_p}{m_0}$	Литература	$\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература
$CoSb_2$	Орторомбическая D_{2h}^{12}	$a = 3,21$ $b = 6,76$ $c = 6,42$	[1] [1] [1]	—	—	0,2	[16]	—		—	—	—	—
$CoSb_3$	Кубическая T_h^5	$a = 9,134$; 9,036	[242] [242]	[131]	[229]	0,5	[16, 249]			—	—	300	[16]
$PtSb_2$	Кубическая T_h^6	$a = 6,43$	[1]	1503	[41]	0,08	[43]	$m_d = (0,42 \div 0,54) m_0$ $\frac{m_\parallel}{m_\perp} = 1,4$	[41] [41]	$m_d = (0,57 \div 0,72) m_0$ $m_\parallel = 0,168 m_0$ $m_{\perp 1} = 0,098 m_0$ $m_{\perp 2} = 0,06 m_0$	[41] [175] [175] [175]	—	—

Таблица 21.28

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A^{VIII}B^{VI}$

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	E_g, эв	Литература	ρ_0, $\frac{ом}{см \cdot сек}$	Литература	ε, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература
Fe_2O_3	Ромбоэдрическая	$a = 5{,}4271$	[242]	1500 1838	[242] [10]	1,6 2,2	[16] [242, 249]	—	—		—
FeS_2	Кубическая T_h^6	$a = 5{,}406$	[242]	962	[249]	1,25	[16]	200	[16]	—	—
$TiSe_2$	Ромбическая. D_{2h}^{12}	$a = 3{,}68$ $b = 4{,}79$ $c = 5{,}72$	[1] [1] [1]	1183*	[16]	0,95	[16]	—	—	62	[16]
$TiTe_2$	Ромбическая D_{2h}^{12}	$a = 3{,}85$ $b = 5{,}34$ $c = 6{,}26$	[1] [1] [1]	1016*	[16]	0,46	[16]	1	[61]	64	[16]
Ti_2Te_3		—	—	—	—	0,34	[70]	11,5	[242]		—
NiO^{**}	Кубическая O_h^5	$a = 4{,}18$	[1]	3170	[42]	3,7**	[95]		—	—	—

* Приведены температуры начала кристаллизации, так как эти данные можно [illegible] с термическим.

** [illegible] $= 5{,}0$ [illegible] $= 0{,}4424$ [illegible] [illegible] [illegible] $\rho = 0{,}1$ [illegible] [95]. $\varepsilon = 0{,}2$ [illegible] [251]. $\varepsilon_{\infty} = 4{,}75$, $\varepsilon_0 = 11{,}9$ [29]. Полупроводник имеет области магнитных порядков.

*** Соответствует по ширине запрещенной зоны, электронному переходу $3d \to 4s$; ширина запрещенной зоны значительно больше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Landolt-Börnstein.** Zählenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik, Technik.— «J. Springer», 1955, Bd I, S. 4.
2. **Wilkoff R. W. G.** Cristall Structures. N. Y., Interscience Publ., 1958.
3. **Харциев К. Г.** «Физика твердого тела», 1962, т. 4, с. 453.
4. **Albers W.** «Phys. Chem. Sol.», 1960, v. 16, p. 209.
6. **Maesen F., Willner C.** Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1211.
6. **Wohler L., Shlephake O.** «Z. anorgan. und allgem. Chem.», 1926, Bd 151, S. 1.
7. **Ефимов Б. А.** «Физика твердого тела», 1963, т. 7, с. 2523.
8. **Almahle S.** «J. Phys. Soc. Japan», 1960, v. 16, p. 189.
9. **Физический** энциклопедический словарь. М., «Советская энциклопедия», 1960.
10. **Бьюб Р.** Фотопроводимость твердых тел. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
11. **Смит Р.** Полупроводники. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
12. **Yhuki I.** «J. Phys. Soc. Japan», 1955, v. 10, p. 549.
13. **Drybble G.** «Proc. Phys. Soc.», 1956, v. B69, p. 1101; 1958, v. B72, p. 380.
14. **Nayar P. S., Verma J. K. D., Nag B. O.** «J. Appl. Phys.», 1968, v. 39, p. 4603.
15. **Rodot M.** «Phys. St. Sol.», 1963, v. 3, p. 10.
16. **Утай Я. А.** Введение в химию полупроводников. М., «Высшая школа», 1966.
17. **Benedict B. P., Lark D. C.** «Phys. Rev. B», 1970, v. 2, p. 4940.
18. **Кот М. В., Крецу Л. В.** «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 281, с. 295.
19. **Novakov T., Prins R.** «Sol. State Commun.», 1971, v. 9, p. 1975.
20. **Stevenson M. J.** Intern. Conf. Semicond. Phys. Prague, 1960, p. 1183.
21. **Hopfield J. J., Thomas D. G.** «Phys. Rev.», 1961, v. 122, p. 35.
22. **Dimmock J. O., Wheeler R. J.** «J. Appl. Phys.», 1961, v. 32, p. 2271.
23. **Nogud P. C. e. a.** «J. Phys.», 1965, v. 26, p. 317.
24. **Gerstein B. C. e. a.** «J. Chem. Phys.», 1967, v. 47, p. 2109.
25. **Богомолов В. Н.** и др. «Физика твердого тела», 1967, т. 9, с. 3176.
26. **Prener I. Woodbury.** Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1231.
27. **Хилсум К., Роуз-Инс А.** Полупроводники типа AIII—BV. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1963.

28. Мосс Т. С. Оптические свойства полупроводников. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
29. Marshall R. Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1101.
30. Fisher A. S. "Helv. Phys. acta", 1963, v. 36, p. 317.
31. Грановский В. И., Мушинский В. П. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 28, с. 1077.
32. Ахундов Г. А. и др. Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1277.
33. Veric C. New Develop Semiconductors, Leyden, 1973, p. 514.
34. Мирзабеков М. и др. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 28, с. 1300.
35. Dennis L. M., Hulse R. E. "J. Amer. Chem. Soc.", 1930, v. 52, p. 3553.
36. Жузе В. П. Полупроводниковые материалы. Вып. 17. Изд-во Ленингр. дома научно-тех. пропаганды. Л., 1967.
37. Парфеньев Р. В. и др. «Физика твердого тела», 1962, т. 4, с. 3596.
38. Juldner J. e. a. Proc. XI Conf. Phys. Semicond., Warshawa, 1972, p. 331.
39. Хворостенко А. С. Сплавы металлов: диаг. состояния, свойства. Сер.: Физ. и хим. свойства твердого тела. М., ВИНИТИ, 1971.
40. Rodot M. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1965, v. 260, p. 1006.
41. Emtage P. R. "Phys. Rev.", 1965, v. 139, p. 246.
42. Bitting J. F. "J. Chem. Phys.", 1960, v. 33, p. 300.
43. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам. Под ред. Н. Н. Горюнова. М., «Энергия», 1972.
44. Von Liebe L. "Ann. Physik", 1965, Bd 7, N 16, S. 179.
45. Sälzer O., Nieke H. "Ann. Physik", 1965, Bd 7, N 15, S. 192.
46. Onuki M. "J. Phys. Soc. Japan", 1965, v. 20, p. 171.
47. Кот М. В. и др. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 1242.
48. Vlischke R. "Ann. Physik", 1965, Bd 7, N 15, S. 100.
49. Лежандра Г. А. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 600.
50. Kuniya H. "Phys. Rev.", 1964, v. 133, p. A1679.
51. Suchet J. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1964, v. 259, p. 3219.
52. Rosenstein M. J. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1964, v. 259, p. 2621.
53. Vennik J. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1965, v. 260, p. 496.
54. Hacke J. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 2464.
55. Redfn A. D. "Phys. Rev.", 1956, v. 109, p. 1616.
56. Rodot M. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1964, v. 259, p. 5414.
57. Baer W. S. "Phys. Rev.", 1964, v. 135, p. 1368.
58. Korner C., Rohrnau A. "Z. Naturforsch.", 1958, Bd 13, S. 591.
59. Dunstäder H. "Z. Physik", 1954, Bd 137, S. 383.
60. Вольфштейн В. М., Фистуль В. И. В сб.: Электроника и ее применение. Т. 4. Сер. Проблемы науки и техники. М., ВИНИТИ АН СССР, 1973.
61. Соммер А. Х. Фотоэмиссионные материалы. Пер. с англ. М., «Мир», 1972.
62. Физические свойства халькогенидов редкоземельных элементов. Под ред. В. П. Жузе. Л., «Наука», 1973.
63. Allersma T. e. a. "J. Chem. Phys.", 1967, v. 46, p. 154.
64. Reid F. "J. Electrochem. Soc.", 1964, v. 111, p. 943.
65. Монеров В. Г., Рамов А. В. «Физика твердого тела», 1969, т. 11, с. 197.
66. Park V. S. "Phys. Rev.", 1966, v. 143, p. 512.
67. Lidl S. A., Synch D. W. "Phys. Rev.", 1966, v. 141, p. 681.
68. Camassel J. e. a. "Sol. State Comm.", 1973, v. 13, p. 63.
69. Marhy J. A. "Phys. Rev.", 1965, v. 140, p. 304.
70. Aramu Z., Marcu P. Rend. Semin fac. Sci. Univ. Cagliari, 1963, v. 33, N 3—4, p. 26.
71. Ruer N. "Z. anorg. Chem.", 1911, Bd 70, S. 372.
72. Ogorlee L. "Croc. Chem. Acta", 1965, v. 37, p. 49.
73. Moss T. S., Ellis B. Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 311.
74. Drbesch P. e. a. "Sol. State Comm.", 1973, v. 13, p. 9.
75. Whitaker J. "Sol. St. Electronics", 1966, v. 8, p. 649.
76. Угай Я. А., Зюбина Т. А. «Неорган. материалы», 1965, т. 1, с. 790.
77. Zdanowich W., Wojkowski A. "Phys. St. Sol.", 1966, v. 8, p. 569.
78. Douglas R. "J. Phys. Chem. Sol.", 1965, v. 21, p. 326.
79. Rikland D. "J. Phys. Chem. Sol.", 1965, v. 26, p. 439.
80. Миновецкий Г. Н., Сирота Н. Н. «Докл. АН БССР», 1965, т. 9, с. 16.
81. Abrahim A. «Чехосл. физ. журн.», 1965, т. B15, с. 138.
82. Tamura H. e. a. "Sol. State Comm.", 1973, v. 12, p. 11.
83. Von Middendorff A. e. a. "Sol. State Comm.", 1973, v. 13, p. 443.
84. Цидильковский И. М. Электроны и дырки в полупроводниках. М., «Наука», 1972.
85. Орлова Н. И., Шишкин П. Т. «Изв. АН АзССР. Сер. физ.-мат.», 1964, № 4, с. 53.
86. Winter H. "Helv. Phys. Acta", 1965, v. 28, p. 655.
87. Myers H. P. "Sol. State Comm.", 1964, v. 2, p. 321.
88. Сорокин Г. П. «Изв. вузов. Физика», 1965, № 4, с. 140.
89. Голубков А. В. и др. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 2430.
90. Soperlt A. "J. Phys.", 1965, v. 26, p. 175.
91. Гертович Т. С. и др. «Укр. фіз. журн.», 1973, т. 18, с. 1523.
92. Veroliun C. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 1791.
93. Милославский В. К. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 1550.
94. Сорокин Г. П. и др. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 2244.
95. Ксендзов Я. М., Драбкин И. А. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 1684.
96. Лашкарёв Г. В. «Укр. фіз. журн.», 1966, т. 10, с. 620.
97. Лашкарёв Г. В. и др. «Укр. фіз. журн.», 1965, т. 10, с. 536.
98. Алиев С. А. и др. «Физика и техника полупроводников», 1973, т. 7, с. 1086.
99. Aulich E., Brebner J. L., Mooser E. "Phys. St. Sol.", 1969, v. 31, p. 129.
100. Угай Я. А. и др. «Докл. АН СССР», 1966, т. 163, с. 663.
101. Колошнец Б. Т. и др. «Физика твердого тела», 1966, т. 7, с. 2534.
102. Dryden V. R. M. "Phys. Rev.", 1966, v. 149, p. 666.
103. Kuniya H. e. a. "Phys. Rev.", 1964, v. A133, p. 676.
104. Верднева Н. А. и др. «Изв. АН АзССР», 1973, № 3, с. 85.
106. Lenlin J. e. a. "Sol. State Comm.", 1974, v. 15, p. 693.
106. Wassher J. D. Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1260.
107. Колошнец Б. Т. и др. Ibid., p. 1283.
108. Blick L. M., Landwehr G. "Phys. St. Sol.", 1969, v. 33, p. K67.

109. Кай Дж., Лэйби Т. Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1962.
110. Masumi T. "Phys. St. Sol.", 1965, v. 11, p. 163.
111. Zdanovich W., Wojkowski A. "Phys. St. Sol.", 1966, v. 16, p. K129.
112. Kreys V. E. a. a. "Phys. St. Sol. (a)", 1974, v. 65, p. K43.
113. Адирович Э. И., Гольдштейн Л. М. «Физика твердого тела», 1966, т. 8, с. 2487.
114. Абрикосов Н. Х. и др. Полупроводниковые соединения, их получение и свойства. М., «Наука», 1967.
115. Reindorf A. General Survey of the Semiconductor field. National Bureau of Standards. Technical Note. 1962, p. 159.
116. Полупроводники. Под ред. Н. Б. Хитцей. Пер. с англ. и нем. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
117. Материалы, используемые в полупроводниковых приборах. Под ред. К. Хогарта. Пер. с англ. М., «Мир», 1968.
118. "Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials". Purdue Univ., 1967.
119. Kazuo A., Hirashi M., Tetsu T. "Japan J. Appl. Phys.", 1971, v. 10, p. 1107.
120. Grosse P. "Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften". Bd. 46. Springer Tracts in Modern Physics. Berlin, 1969.
121. Горюнова Н. А. Сложные алмазоподобные полупроводники. М., «Советское радио», 1968.
122. Wagner R. J., Ewald A. K. "J. Phys. Chem. Sol.", 1971, v. 32, p. 697.
123. Роло М. Полупроводниковые материалы. Пер. с франц. М., «Металлургия», 1971.
124. Добровольский С. А. и др. Карбид кремния. Киев, Гос. изд-во тех. лит. УССР, 1963.
125. Равич Ю. И. и др. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца. М., «Наука», 1968.
126. Колошина Н. В., Лев Е. Я., Сысоева Л. М. «Физика твердого тела», 1963, т. 5, с. 2871.
127. Alberts W. e. a. "J. Appl. Phys., Suppl.", 1961, v. 32, p. 2220.
128. Kafalas J. A., Brebrick R. F., Strauss A. J. "Appl. Phys. Lett.", 1963, v. 4, p. 98.
129. Соболев В. В. «Физика твердого тела», 1970, т. 12, с. 2687.
130. Cohen M. L., Au-Yang M. Y. "Phys. Rev.", 1968, v. 178, p. 1358.
131. Winkler H. "Helv. Phys. acta", 1955, v. 28, p. 663.
132. Algrain P., Balkansky M. Table de constante des Semiconducteur's. Pergamon Press, Paris, 1961.
133. Turner W. J., Fisher A. S., Reese W. E. "J. Appl. Phys.", 1961, suppl. to v. 32, p. 2241.
134. Горюнова Н. А. с др. «Физика твердого тела», 1969, т. 11, с. 280.
135. Turner W. J. "Phys. Rev.", 1961, v. 121, p. 759.
136. Gorcharenko G. I., Sheudienko V. Yu. "Phys. St. Sol.", 1970, v. 41, p. K117.
137. Aubin M., Brizzard R., Messa J. P. "Canad. J. Phys.", 1970, v. 48, p. 2915.
138. Физика и химия соединений типа $A^{III}B^{VI}$. Пер. с англ. Под ред. А. С. Медведева. М., «Мир», 1970.
139. Hamilton P. H. "Semicond. Proc. and Sol. St. Technol.", 1964, v. 7, N 6, p. 15.
140. Betts D. D. "Canad. J. Phys.", 1961, v. 39, p. 223.
141. Rubie R. A., Edwards J. L. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 2055.
142. Rode D. L. "Phys. Rev.", 1970, v. 2B, p. 4036.
143. Мелесланский В. К., Шилкреанский О. Н. «Физика и техника полупроводников», 1971, т. 5, с. 926.
144. Watanabe H., Wada H., Takahashi T. "Japan J. Appl. Phys.", 1964, v. 3, p. 617.
145. Полупроводники с узкой запрещенной зоной и их применение. М., «Мир», 1969.
146. Sobolev V. V., Sirbu N. N. "Phys. St. Sol. (b)", 1973, v. 51, p. 863.
147. Драбл Д., Голдсмит Г. Теплопроводность полупроводников. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
148. Balkansky M., Zeling E. A. M., Longen O. "J. Phys. Chem.", 1966, v. 27, p. 299.
149. Segall B., Lorenz M., Woodbury H. "Phys. Rev.", 1963, v. 129, p. 2471.
150. Мишерена З. С. Халькогениды элементов III Б группы периодической системы. М., «Наука», 1968.
151. Tagiev B. F. e. a. "Phys. St. Sol. (a)", 1970, v. 3, p. K119.
152. Chen T. e. a. "J. Phys. Soc. Japan", 1970, v. 29, p. 110.
153. Aven M. "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1204.
154. Park Y. S., Hemenger P. M., Chung C. H. "Appl. Phys. Lett.", 1971, v. 18, p. 46.
155. Reignold D. C., Litton C. W., Collins T. "Phys. Rev.", 1965, v. 140, p. 1726.
156. Seiler D. G., Galazka R. R., Becher W. M. "Phys. Rev.", 1971, v. 83, p. 1274.
157. Баширов Р. И., Гаджиев Р. М. «Физика твердого тела», 1970, т. 4, с. 1936.
158. Новоселов Р. В. и др. В кн.: Труды IX Междунар. конф. по физике полупроводников. Т. 2. М., «Наука», 1968, с. 763.
159. Dietz R. E., Hopfield J. J., Thomas D. G. "J. Appl. Phys.", 1961, v. 32, p. 2282.
160. Dickey D., Mavrodes J. "Sol. State Comm.", 1964, v. 9, p. 213.
161. Fisher P., Fan H. "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1959, v. 4, p. 406.
162. Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М., Физматгиз, 1963.
163. Marchall G. "J. Phys. (France)", 1970, v. 31, p. 681.
164. Fitzgold L. "Phys. Rev. Lett.", 1964, v. 13, p. 233.
165. Yabumoto T. "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 13, p. 559.
166. Köhler H., Landwehr G. "Phys. St. Sol.", 1971, v. 46, p. K109.
167. Caywood L. P., Miller G. R. "Phys. Rev. B", 1970, v. 2, p. 3209.
168. Black J. "Phys. Chem. Sol.", 1957, v. 2, p. 240.
169. Смирнов Н. А., Шалдырев Е. В., Кутасов В. А. «Физика твердого тела», 1969, т. 11, с. 3311.
170. Мадельунг О. Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп. Пер. с англ. М., «Мир», 1967.
171. Long D. Energy Bands in Semiconductors. Interscience Publishers. A Division of John Wiley and Sons. New York—London—Sydney, 1968.
172. Minden H. T. "Appl. Phys. Lett.", 1970, v. 17, p. 358.
173. Kessler F. R. "Phys. St. Sol.", 1964, v. 6, p. 3.
174. Samhrce A. P. e. a. "Phys. St. Sol.", 1973, v. 57, p. 799.
175. Damon D. H., Miller R. C., Enfage P. R. "Phys. Rev. B", 1972, v. 5, p. 2176.
176. Mears A., Stradling R. A. "J. Phys. C", 1971, v. 4, p. 122.
177. Tsidilkovsky I. M., Akselrod M. M., Critsky S. I. "Phys. St. Sol.", 1965, v. 12, p. 607.
178. Steigmeier E. F., Kudman I. "Phys. Rev.", 1966, v. 141, p. 767.

179. Kusel R., Weichmann F. L. "Canad. J. Phys.", 1970, v. 48, p. 2643.
180. Dismukes D. "J. Phys. Chem. Sol.", 1971, v. 32, p. 1689.
181. Пуриэ А. Е., Максимова О. Г., Верлин В. И. В сб.: Сложные полупроводники и их физические свойства. Кишинев, «Штиинца», 1971, с. 128.
182. Schröder B. e. a. "Phys. St. Sol. (B)", 1973, v. 58, p. 661.
183. Domingo G., Hoga R. S., Kannewur C. R. "Phys. Rev.", 1966, v. 143, p. 536.
184. Марков Ю. Ф. Исследование оптических свойств полупроводниковых соединений в далекой инфракрасной области спектра. Кандидатская диссертация. ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Л., 1972.
185. Ehrenreich H. "Phys. Rev.", 1960, v. 120, p. 1951.
186. Панфилов В. В., Субботин С. Л., Верещагин Л. Ф. «Докл. АН СССР», 1971, т. 96, с. 659.
187. Drexler J., Heyman P. M. "Phys. Rev. B", 1971, v. 3, p. 2689.
188. Heller M. W., Bahiskin J., Radoff P. L. "Phys. Rev.", 1971, v. A36, p. 365.
189. Уайт У. Физические постоянные. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1961.
190. Полупроводники в науке и технике. Под ред. А. Ф. Иоффе. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1957.
191. Becker W., Fuhs W., Stuke J. "Phys. St. Sol.", 1971, v. 44, p. 147.
192. Unkelbach K. H. e. a. "Phys. St. Sol. (B)", 1973, v. 60, p. K41.
193. Slack G. A. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 145, p. 866.
194. Мороз А. Н., Одарич Б. А. «Укр. физ. журн.», 1971, т. 16, с. 1661.
195. Сидоров В. Г., Руденко В. Н. «Изв. АН СССР. Сер. географ. назоров.», 1970, т. 6, с. 1861.
196. Сотсуб В. В., Гомецкий А. Д., Парфентьев В. В. «Физика твердого тела», 1972, т. 14, с. 945.
197. Коломиец Б. Т. и др. «Физика и техника полупроводников», 1971, т. 5, с. 2301.
198. Шутов С. О., Соболев В. В., Сменовский Л. И. В сб.: Полупроводниковые соединения и их твердые растворы. Изд.-изд. отд. АН МССР, Кишинев, 1970, с. 155.
199. Whitsell C. R., Nelson D. A. "Phys. Rev. B", 1972, v. 5, p. 3126.
200. Overhul H. "Phys. St. Sol.", 1971, v. 43, p. 221.
201. Miller K. A., Schneider J. "Phys. Lett.", 1963, v. 4, p. 286.
202. Look D. C., Moore D. L. "Phys. Rev. B", 1972, v. 5, p. 3406.
203. Lewis J. E. "Phys. St. Sol. (B)", 1973, v. 59, p. 367.
204. Oulton A. "Phys. Rev. B", 1971, v. 4, p. 4449.
205. Brebrick R. F., Strauss A. J. "Phys. Rev.", 1963, v. 131, p. 104.
206. Bis R. F., Dixon J. R. "Phys. Rev. B", 1970, v. 2, p. 1004.
207. Потемкин А. Я. Полупроводниковые материалы. М., Изд-во Моск. авиац. ин-та, 1966.
208. Nilsson N. G. "Phys. St. Sol. (A)", 1973, v. 19, p. 476.
209. Grant F. A. "Rev. Mod. Phys.", 1959, v. 31, p. 646.
210. Мейлиск А. И., Корс Я. Я. «Физика и техника полупроводников», 1969, т. 3, с. 11.
211. Frederikse H. P. R. "J. Appl. Phys.", 1961, Suppl. to v. 32, p. 2211.
212. Остин И. Г., Мотт Н. Физика и физики. Пер. с англ. М., «Мир», 1972.
213. Пол В. В кн.: Труды IX междунар. конф. по физике полупроводников. Т. 1. М., «Наука», 1968, с. 17.
214. Кесаманлы Ф. П. «Физика и техника полупроводников», 1974, т. 8, с. 225.
215. Chiei T. e. a. "Japan J. Appl. Phys.", 1971, v. 10, p. 1606.
216. Справочник химика. М., «Химия», 1964.
217. Shaver P. J., Blair J. "Phys. Rev.", 1966, v. 141, p. 649.
218. Langer D. Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 241.
219. Kohn A., Lipson H. G., Loewenstein E. V. Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1067.
220. Mitra S. S., Marshall R. Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1086.
221. Киреев П. С. Физика полупроводников. М., «Высшая школа», 1969.
222. Блатт Ф. Физика электронной проводимости в твердых телах. Пер. с англ. М., «Мир», 1971.
223. Блатт Ф. Теория подвижности электронов в твердых телах. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1963.
224. Дишман Х. Введение в физику полупроводников. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
225. Фистул В. И. Сильно легированные полупроводники. М., «Наука», 1967.
226. Prince M. B. "Phys. Rev.", 1954, v. 93, 1204.
227. Голикова О. А., Мойжес Б. Я., Стильбанс Л. С. «Физика твердого тела», 1961, т. 3, с. 3105.
228. Brebrick R. F., Scanlon W. W. "Phys. Rev.", 1954, v. 96, p. 596.
229. Stradling R. "Sol. State Comm.", 1966, v. 4, p. 665.
230. Cardona M. Phys. III—V Compounds. Acad. Press, 1966, v. 3, p. 125.
231. Stradling R. Electronic Components, 1135—1142, October 1966.
232. Walton A., Mishra U. "Proc. Phys. Soc.", 1967, v. 90, p. 1111.
233. Stradling R. "Phys. Lett.", 1966, v. 20, p. 217.
234. Prince M. B. "Phys. Rev.", 1953, v. 92, p. 681.
235. Кот М. В., Прилепов В. Д., Цуркан А. Е. В сб.: Полупроводниковые соединения и их твердые растворы. Изд.-изд. отд. АН МССР, Кишинев, 1970, с. 3.
236. Мишковский М. В. и др. «Зарубежная электронная техника», Вып. 12, 1974, с. 3. Произв.-изд. отд. ЦНИИ «Электроника».
237. Kalashnikow S. G. "J. Phys. Chem. Sol.", 1959, v. 8, p. 62.
238. Ewald A. W., Tuttle O. N. Ibid., p. 623.
239. Иванов-Омский В. И. и др. «Физика и техника полупроводников», 1970, т. 4, с. 264.
240. Гельмонт Б. Л. и др. «Физика и техника полупроводников», 1971, т. 5, с. 986.
241. Nasledov D. N., Stevchenko V. Ya. "Phys. St. Sol. (a)", 1973, v. 15, p. 9.
242. Кристаллохимические, фазово-химические и физические свойства полупроводниковых веществ. М., Стандартгиз, 1973.
243. Никитин Е. Н., Базанов В. Г., Тарасов В. И. «Физика твердого тела», 1961, т. 3, с. 3046.
244. Blunt R. F., Frederikse H. P. R., Hosler W. R. "Phys. Rev.", 1956, v. 100, p. 603.
245. Lipson H. G., Kahan A. "Phys. Rev.", 1954, v. 133, p. A800.
246. Redin R. D., Morris R. G., Danielson G. C. "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 1916.
247. Kreisig P., Lynch D. W., Danielson G. C. "J. Phys. Chem. Sol.", 1963, v. 20, p. 122.
248. Физико-химия твердого тела. Сборник. Под ред. В. Стасиевича. М., «Химия», 1972.
249. Соловьев М. С. Полупроводники. Л., «Наука», 1967.
250. Alper T., Snodgrass G. A. "J. Phys. Chem. Sol.", 1967, v. 28, p. 1637.

251. **Long D., Shmill J. L.** «Semicond. Scmimetals», 1970, v. 6, p. 175.
252. **Bears J., Jorger P.** "Sol. State Comm.", 1972, v. 10, p. 875.
253. **Smith J. L., Helzer E. L.** "J. Appl. Phys.", 1969, v. 40, p. 4355.
254. **Burstein E., Phaczuk A., Wallis R. F.** Proceedings of the conference on physics of semimetals and narrow gap semiconductors. — "J. Phys. Chem. Sol.", 1971, v. 32, suppl. N 1, p. 251.
255. **Ih C. S., Langenberg D. N.** Proceedings of the conference on physics of semimetals and narrow gap semiconductors. — "J. Phys. Chem. Sol.", 1971, v. 32, suppl. N 1, p. 73.
256. **Горбачев В. В.** с др. «Физика и техника полупроводников», 1973, т. 7, с. 844.
257. **Сасонова Л. М.** «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 2223.
258. **Lewis J. E., Rudot H., Haen P.** "Phys. St. Sol.", 1969, v. 29, p. 743.
259. **Wright L.** "Proc. Brit. Ceram. Soc.", 1968, v. 10, p. 103.
260. **Неменов Р. И., Гусейнова Э. С., Акундов Г. А.** «Физика твердого тела», 1963, т. 5, с. 3520.
261. **Gerstein B. C., Chung P. L., Danielson G. C.** "J. Phys. Chem. Sol.", 1966, v. 27, p. 1161.
262. **Jelinek F. J., Shiliell W. D., Gerstein B. C.** "J. Phys. Chem. Sol.", 1967, v. 28, p. 267.
263. **Кокомаев Н. А.** и др. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 28, с. 1329.
264. **Dexter D. S.** "J. Phys. Chem. Sol.", 1959, v. 8, p. 173.
265. **Андронов И. К., Кот М. В.** «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 28, с. 1028.
266. **Соколов В. П.** «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 28, с. 1090.
267. **Кот М. В., Мишенский В. А.** «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 28, с. 1025.
268. **Иванов-Омский В. И.** и др. «Докл. АН СССР», 1965, т. 162, с. 1269.
269. **Dexter D. S.** "J. Phys. Chem. Sol.", 1959, v. 8, p. 173.
270. **Haas A.** "Metall. V. Erz.", 1914, v. 10, p. 831.
271. **Asenable S., Kazaki A. O.** "Proc. Phys. Soc.", 1959, v. 73A, p. 624.
272. **Sydor H.** "Phys. Rev.", 1964, v. 136, p. 514.
273. **Copper J.** "J. Phys. Chem. Sol.", 1964, v. 25, p. 1277.
274. **Pallik E.** "Phys. Rev.", 1964, v. 135, p. 763.
275. **Sagar A., Rubenstein M.** "Phys. Rev.", 1966, v. 48, p. 55.
276. **Tippins H.** "Phys. Rev.", 1966, v. 140, p. 316.
277. **Prosser V.** "Чехосл. физ. журн.», 1965, т. B15, с. 128.
278. **Dziuba Z., Zakrjewski T.** "Phys. St. Sol.", 1965, v. 7, p. 1019.
279. **Иванов-Омский В. И.** и др. "Phys. St. Sol.", 1965, v. 8, p. 613.
280. **Adams S.** "Sol. State Comm.", 1964, v. 2, p. 387.
281. **Park J. S., Chen F. S.** "J. Appl. Phys.", 1966, v. 36, p. 200.
282. **Maesen F. D.** Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1211.
283. **Baveselal L.** "J. Phys. C", 1971, v. 4, p. 142.
284. **Ефимова Б. А.** «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 2524.
285. **Mizuka N., Tanaka L.** "Phys. St. Sol.", 1970, v. 42, p. 257.
286. **Sukinka K., Tomura H.** "Phys. Lett.", 1972, v. A37, p. 243.
287. **Kanimura H., Nakado H.** "J. Phys. Sol. Japan", 1966, v. 21, p. 27.

ГЛАВА 22

ПОТЕНЦИАЛЫ ИОНИЗАЦИИ И ЭНЕРГИИ ДИССОЦИАЦИИ

22.1. ПОТЕНЦИАЛЫ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ

Потенциалом ионизации называется энергия, необходимая для отрыва электрона от атома или иона.

В табл. 22.1 приведены последовательные потенциалы ионизации атомов и ионов в электронвольтах [1, 2]: U_1 — энергия, необходимая для отрыва электрона от нейтрального невозбужденного атома; U_2 — энергия, необходимая для отрывания электрона от однократного (положительного) невозбужденного иона, и т. д. Таблица составлена на основании работ [1, 2], причем предпочтение отдавалось значениям, для которых указана экспериментальная погрешность.

Таблица 22.1

ПОТЕНЦИАЛЫ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ

Атомный №	Химический символ	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	U_9	U_{10}	U_{11}
1	H	13,595										
2	He	24,580	54,403									
3	Li	5,392	75,620	122,42								
4	Be	9,320	18,206	153,86	217,68							
5	B	8,296	25,149	37,92	259,315	340,15						
6	C	11,264	24,376	47,864	64,476	391,246	489,99					
7	N	14,54	29,605	47,448	77,45	97,890	551,925	667,59				
8	O	13,614	35,149	54,934	77,394	113,875	138,08	739,114	871,12			
9	F	17,418	34,98	62,646	87,23	114,214	157,117	185,139	953,9 ± 0,5	1101,8		
10	Ne	21,559	41,07	63,5 ± 0,1	97,10	126,4	157,91	207,2 ± 0,1	239,1 ± 0,1	1195,4 ± 0,1	1396,2	
11	Na	5,138	47,29	71,8 ± 0,1	98,88	138,6	172,38	208,444	264,9 ± 0,1	299,7 ± 0,1	1464,7 ± 0,2	1646,4
12	Mg	7,646	15,03	80,2 ± 0,1	109,29	141,23	186,8 ± 0,1	225,31	266,557	328,0 ± 0,1	357,2 ± 0,1	1962,25
13	Al	5,984	18,823	28,44	120,00	153,77	190,42	241,8 ± 0,1	284,53	330,1	398,8 ± 0,1	441,5

Атомный номер	Химический элемент	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_1	U_8	U_9	U_{10}	U_{11}
14	Si	8,149	16,34	33,46	45,13	166,73	205,11	245,38	314,0±0,1	351,83	401,3	476,0
15	P	10,55	19,66	30,156	51,964	65,007	220,41	263,33	309,3±0,1	372,8±0,2	425,40	479,4
16	S	10,360	23,4	34,2	47,24	72,5±0,1	88,0±0,1	280,98	315,4±0,1	378,90	448,5±0,2	504,4
17	Cl	13,10	23,80	39,9	53,3	67,6±0,2	90,6±0,3	114,2±0,1	348,5	400,2±0,1	456,3	534,1
18	Ar	15,759	27,62	40,90	59,20	75,0±0,1	91,3±0,3	123,9±0,4	143,4±0,1	422,6±0,2	479,0±0,2	540,0
19	K	4,339	31,81	46,2	60,1	82,6±0,4	99,4±0,4	117,9±0,4	154,3±0,6	176,0±0,1	503,8±0,3	565,1
20	Ca	6,111	11,87	51,20	67,2	84,34	109±1	127,04±0,5	143,3±0,4	187,5±0,7	911,3±0,1	618,3
21	Sc	6,54	12,8	24,75	73,6	91,8	111,1	138±1	159,2±0,6	180,3±0,3	224,9±0,6	249,76
22	Ti	6,83	13,57	27,4	43,24	99,8	115	141±1	172±1	193,4±0,9	310,5±0,6	254,5
23	V	6,74	14,65	29,31	48	65,2	128,5	154	173,7	205±2	250,3±0,8	286,8
24	Cr	6,766	16,49	30,96	49,6	73,2	95,6	161,1	186	229,6	265±2	—
25	Mn	7,432	15,64	33,69	52	76,1	105±1	119,24	194,4	223±1	268+1	—
26	Fe	7,896	16,18	30,64	57,1	79	103±1	130+3	181,1	224,4+0,6	262+1	340,3
27	Co	7,85	17,05	33,43	54	83,5	106	133±1	185±5	185,8+0,1	275,3±0,6	305
28	Ni	7,633	18,15	35,16	56	78	110	136	165+9	240±6	259±3	318
29	Cu	7,724	20,29	36,83	59,9	82	116	160	169	206±4	241±8	—
30	Zn	8,339	17,96	39,70	62	85	112	142	177	232	247+6	—
31	Ga	6,00	20,51	30,7	64,2	90	118	144	174	216	255	—
32	Ge	7,88	15,93	34,21	45,7	93,1	118	164	177	213	262	—
33	As	9,81	18,9±0,1	29,3	50,1	62,8±0,1	127,5	153	182	218	274	—
34	Se	9,7	21,5	32,0	42,9	65,3±0,2	82,1±0,2	155	157	220	250	—
35	Br	11,84	21,6	35,9	47,3	59,7±0,1	88,6±0,2	100,0±0,4	190	228	266	—
36	Kr	13,996	24,56	36,9	52,6	64,7	78,2±0,1	111,0±0,4	126±0,1	214	270	—
37	Rb	4,176	27,54	39,8	53,6	71	84,4	96,8±0,1	130±1	157±2	277	—
38	Sr	5,692	11,03	42,0	57,1	71,6	87,5	106	122,8±0,1	162±1	177±2	324
39	Y	6,38	12,23	20,5	61,8	77,0	93,0	115	120	196,1±0,2	191±1	—
40	Zr	6,835	13,02	34,11	34,07	89,5	99,4	116	139	151	173,0±0,2	—
41	Nb	6,88	13,8	28,1	53,5	45,3	110,2	124	141	165	156	—
42	Mo	7,100	16,72	29,0	46,4	61,2	67	130	153	167	184	—
43	Tc	7,23	14,87	31,9	63	68	76	94	161	183	196	—
44	Ru	7,37	16,6	37,5	49,3	63	81	100	112	199	216	—
45	Rh	7,46	18,02	35,6	45,6	69	85	105	125	147	186	—
46	Pd	8,33	19,43	37,4	43,2	66	90	110	122	156	178	—
47	Ag	7,574	21,15	35,90	52	70	89	118	138	162	187	—
48	Cd	8,991	16,904	44,5	57	73	92	116	145	170	195	—
49	In	5,785	18,85	28,0	58	77	98	131	144	176	201	—
50	Sn	7,332	14,63	30,7	40,4±0,1	81,1	103	126	150	176	213	—
51	Sb	8,64	16,7±0,5	24,8	44,1	62,8±0,5	107,6	132	167	194	211	—
52	Te	9,01	18,8±0,3	30,6	37,5	65±1	83±1	137,1	164	192	220	—
53	I	10,41	19,0	31,9	41,7	71	93±2	101±2	190,9	210	225	—
54	Xe	12,127	21,2	32,1	46,5	67	89	102±3	129±3	204,7	235	—
55	Cs	3,893	23,1	34,6±0,7	43,9	62	74	109	132±2	156±4	255	—
56	Ba	5,210	10,01	35,0	43,5	69	80	93	106	144±4	185±6	—
57	La	5,61	11,43	19,17	52	65	90	107	163	151	190±5	—
58	Ce	6,91	20,3	20,5	35,7	70	85	100	132	137	172	—
59	Pr	5,76	—	—	—	—	80	105	129	146	164	—
60	Nd	6,34	—	—	—	—	—	110	145	147	173	—
61	Pm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
62	Sm	5,6	11,3	—	—	—	—	—	—	161	181	—
63	Eu	5,67	11,24	—	—	—	—	—	—	—	197	—
64	Gd	6,15	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—
65	Tb	6,74	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
66	Dy	6,85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
67	Ho	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
68	Er	6,08±0,05 [3]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
69	Tm	6,14±0,05 [3]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
70	Yb	6,20	12,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—
71	Lu	5,16	14,7	25	—	—	—	—	—	—	—	—
72	Hf	5,5	14,9	31	30	—	—	—	—	—	—	—
73	Ta	7,88 [3]	16,9±0,5	22,3	33,1	45	—	—	—	—	—	—
74	W	7,98	17,7±0,5	33,1	36,4	48	61	—	—	—	—	—
75	Re	7,87	19,6±0,5	26	37,7	54	64	79	—	—	—	—
76	Os	8,7	17±1	36	42	54	65	83	98	—	—	—
77	Ir	9,2	17,04±0,3	27	39	57	72	88	105	131	—	—
78	Pt	8,96	18,34±0,1	28,5	41,1	55	75	92	119	137	146	—
79	Au	9,228	20,5	30,5	43,6	58	78	95	124	131	153	—
80	Hg	10,437	18,762	34,20	48	61	77	94	123	136	170	—
81	Tl	6,108	20,42	29,6	50,7	64	81	98	116	143	161	—
82	Pb	7,415	15,03	31,93	42,3	69,31	83	100	132	142	173	—
83	Bi	7,287	16,8	35,8	45,3	65	94,42	107	127	146	180	—
84	Po	8,2±0,4	18,4±1,7	27,8±0,6	38	61	73	112	132	154	176	—
85	At	9,2±0,4	20,1±1,7	26,3±0,4	41	61	78	96	138	160	183	—
86	Rn	10,745	21,4±1,8	29,4±1,0	43,8	65	87	97	111	166	190	—
87	Fr	3,98±0,4	22,5±1,8	35,6±1,5	43	59	71	84	117	188	187	—
88	Ra	5,277	10,144	34,3	46,4	68,5	78	89	103	140	196	—
89	Ac	6,89±0,6	11,5±0,1	—	49	62	76	95	109	155	164	—
90	Th	6,95±0,05 [3]	11,5±1,0	20,0	23,7	66	80	94	115	180	145	—
91	Pa	—	—	—	—	—	84	100	115	139	164	—
92	U	6,2[4]	—	—	—	—	—	104	131	157	194	—

22.2. ПОТЕНЦИАЛЫ ИОНИЗАЦИИ МОЛЕКУЛ РАДИКАЛОВ

В табл. 22.2—22.6 приведены потенциалы ионизации молекул и радикалов. Имеющиеся во многих случаях различия между значениями потенциалов ионизации, определенными спектроскопически и методом электронного удара, следует объяснять тем, что в первом случае потенциалы ионизации адиабатические, а во втором — вертикальные. Метод фотоионизации в большинстве случаев дает значения, близкие к адиабатическим [3].

Погрешности потенциалов ионизации в тех случаях, когда они указаны авторами, определяют только экспериментальный разброс значений и не содержат возможных систематических ошибок.

Молекулы разбиты по следующим классам: углеводороды, галогензамещенные углеводороды, азотсодержащие соединения, кислородсодержащие соединения и т. д. Внутри каждого класса молекулы расположены в порядке нарастания числа атомов H и C (например, C_2; C_2H; C_2H_2; ...), заместители — галогены — вводятся в порядке нарастания атомного номера (F, Cl, Br, I). Радикалы находятся перед соединениями, из которых они образуются.

Таблица 22.2

Азотсодержащие молекулы и радикалы [1.3]

Соединение	Потенциал ионизации, эв	Соединение	Потенциал ионизации, эв
NH	13,10±0,05	C_2H_5N	7,34
NH_2	11,4±0,1	N_2	15,51; 15,60
NH_3	10,15—10,40	N_2^+	50 [2]
NO_2	11,52±0,03	N_2H_2	9,85±0,1
CN	15,13	N_2H_3	7,88±0,2
HCN	13,86	N_2H_4	9,56±0,03
CH_3NH_2	9,41±0,02	CH_2N-NH_2	5,07
CH_2N	8,97	C_2N_2	13,8
C_2N	12,8	$(CH_3)_2N-NH_2$	8,12±0,1
CH_2CN	10,87±0,1		
CH_3CN	11,96	$(CH_3)_2N_2$	4,95
C_2H_3N	9,94±0,15	NCC=CCN	11,4±0,2
$(CH_3)_2NH$	8,4.	NH_3	10,3±0,2
	8,93±0,03	CH_3N_3	9,5±0,1
$C_2H_5NH_2$	9,32.	NF	12,0
	9,19±0,05	NF_2	12,0±0,1
C_2H_3CN	10,75	NF_3	13,2±0,2
C_2H_5CN	11,85	CH_2FCN	13,0±0,1
C_3N	14,3	N_2F_4	12,04±0,10
C_3HN	11,6±0,2	CNCl	12,49±0,04
CH_2CHCN	9,76±0,1	CH_2ClCN	12,2±0,1
$C_3H_7NH_2$	9,6±0,2	CNBr	11,95±0,08
n-$C_3H_7NH_2$	9,17±0,04	CNI	10,98±0,06
$(CH_3)_3N$	8,32±0,02		
C_4N	12,3		
$(CH_3)_2CCN$	9,15±0,1		
n-$C_4H_9NH_2$	9,19±0,04		
$(C_2H_5)_2NH$	8,44±0,01		
C_5N	12,0		
C_5H_7N	7,70		

Таблица 22.3

Углеводороды [1.3]

Соединение	Название	Потенциал ионизации, эв
H_2	Водород	15,427
C	Графит	3,8; 4,39
CH_2	Метилен	11,82±0,05
CH	Метил	9,86±0,02
CD_3	—	9,95±0,03
CH_4	Метан	12,99±0,01; 11,2 [2]
CD_4	—	13,25
C_2H_2	Ацетилен	11,41±0,01
C_2H_3	Этенил (винил)	9,45±0,05
C_2H_4	Этилен	10,516±0,01
C_2H_5	Этил	8,80±0,05
C_2H_6	Этан	11,65
C_3H_3	Пропаргил	8,25±0,05
C_3H_4	Метилацетилен	10,34
C_3H_6	Пропилен	9,75±0,01
C_3H_6	Циклопропан	10,06±0,02
C_3H_8	Пропан	11,08
C_4H_2	Диацетилен	10,73
C_4H_6	Дивинил (бутадиен-1,3)	9,07
C_4H_6	Диметилацетилен	11,46
C_4H_6	Этилацетилен	10,18
C_4H_8	Бутилен	9,58
C_4H_8	Изобутилен	9,23
C_4H_8	Метилциклопропан	9,88
C_4H_{10}	Бутан	9,07
C_4H_6	Циклобутадиен	8,58
C_5H_6	(2-Метилбутадиен-1,3)	8,85
C_5H_{10}	2-Метилбутен-1	9,12
C_5H_{10}	Пентен-1	9,50
C_5H_{12}	2,2-Диметилпропан (неопентан)	10,37
C_6H_5	Фенилен	10,23±1
C_6H_6	Бензол	9,245
C_6H_{10}	Диизопропенил (2,3-диметилбутадиен-1,3)	8,72
C_6H_{10}	Циклогексен	8,945
C_6H_{12}	Гексен-1	9,46
C_6H_{12}	Тетраметилэтилен	8,30
C_6H_{12}	Циклогексан	9,03
C_6H_{14}	Гексан	10,17
C_7H_7	Толил	7,73±0,03
C_7H_8	Толуол	8,820±0,005
C_7H_{14}	Метилциклогексен	9,86
C_7H_{16}	Гептан	10,06
C_8H_8	Стирол	8,86±0,04
C_8H_{10}	о-Ксилол	8,56; 7,61
C_8H_{10}	Этилбензол	8,76
C_8H_{16}	Октен-1	9,52
C_8H_{18}	Октан	10,24; 9,86
C_9H_{12}	Пропилбензол	8,72
C_9H_{20}	Нонан	10,21
$C_{10}H_8$	Нафталин	8,12±0,02
$C_{10}H_{14}$	Бутилбензол	8,69
$C_{10}H_{22}$	Декан	10,19
$C_{14}H_{10}$	Антрацен	7,38
$(CH_2)_n$	Полиметилен	10,15

Таблица 22.4

Молекулы и радикалы, содержащие галогены [3]

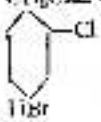
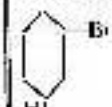
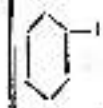
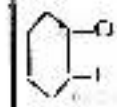
Соединение	Потенциал ионизации, эв	Соединение	Потенциал ионизации, эв
HF	15,77 ± 0,02	$C_2F_3Cl_3$	10,9 ± 0,2
F_2	15,65 ± 0,05	C_2F_5Cl	10,4 ± 0,2
CF	13,61 ± 0,12	C_2Cl_4	9,5
CF_2	13,30 ± 0,12	C_2H_5Cl	10,97 ± 0,02
CHF_2	9,45	$CH_2C{=}CCl$	9,9 ± 0,1
CF_3	10,10 ± 0,05		8,07 [1]; 9,42
CH_3F	12,85 ± 0,01		
CF_4	17,8		
C_2H_5F	10,37		
$H_2C{=}CF_2$	10,30	HBr	11,62 [1]
C_2HF_3	10,14		12,04
C_2H_4	10,12	Br_2	10,55 ± 0,02
C_3H_6F	12,00 ± 0,01	BrCl	11,1 ± 0,2
$CH_2{=}CHCF_3$	10,0	CBr_4	10,11 ± 0,05
C_4H_9F	10,86	CH_3Br	8,34 ± 0,11
C_6H_5F	9,197 ± 0,005	$CHBr_3$	8,13
C_2ClF_5	10,4	CF_3Br	10,54 ± 0,01
C_2BrF_5	9,6	CH_2BrF	12,1 ± 0,2
$C_2F_5CH_3$	9,6	CF_2Br	12,3 ± 0,3
HCl	12,74 ± 0,01	CH_2Br_2	10,8 ± 0,1
ClF_3	13,0 ± 0,2	C_2H_5Br	9,80
Cl_2	11,48 ± 0,01	цис-BrHC—CHBr	9,66 ± 0,05
CCl	12,9 ± 0,1		
CCl_4	13,10 ± 0,03	C_2HBr_3	9,27
CF_3Cl	9,70 ± 0,05	C_2H_3Br	10,20 [1]; 0,01
CCl_3	8,78 ± 0,05	$CH_2{=}C{=}CBr$	10,1 ± 0,1
CF_2Cl	11,28 ± 0,01		8,86 [1]; 9,41 ± 0,04
CF_2Cl	12,92 ± 0,01		
CClF	13,13 ± 0,25	HI	10,38 ± 0,02
CCl_2F	8,96 ± 0,16	IF_5	13,5 ± 0,2
CCl_3	7,92 ± 0,35	ICl	10,4 ± 0,2
CCl_4	11,1; 11,47 [1]	IBr	10,3 ± 0,2
		I_2	9,28 [1]; 9,36 ± 0,03
CH_2Cl_2	11,4 ± 0,1		
CF_2Cl_2	11,6 ± 0,6	CH_3I	9,51 ± 0,02
$CHCl_3$	11,42 ± 0,03	CF_3I	10,0 ± 0,3
C_2HCl_5	9,47 ± 0,01	C_2H_5I	9,33 ± 0,01
C_2H_3Cl	9,995	н-C_3H_7I	9,41 ± 0,04
$Cl_2C{=}CH_2$	9,79	CH_3I- C_6H_5	9,19 ± 0,01
цис-ClHC=CHCl	9,07 ± 0,05		8,73 [1]; 9,10 ± 0,04
			8,35 ± 0,1

Таблица 22.5

Молекулы и радикалы, содержащие кислород [3]

Соединение	Потенциал ионизации, эв	Соединение	Потенциал ионизации, эв
OH	13,18 ± 0,1	$HCOOCH_3$	10,82
H_2O	12,61 ± 0,01	CH_3COCHO	9,60 ± 0,06
CO	14,01 ± 0,01 [2,3]	C_2H_5COOH	10,47
		CH_3COOCH_3	10,27
CO^+	43 [2]	н-C_3H_7COOH	10,22
CH_3O	10,90 ± 0,03	O_2	11,7
CH_2O	9,2	FO	13,0
CH_3OH	8,2	F_2O	13,7 ± 0,2
CH_3OH	10,95 ± 0,10	$HFC{=}O$	11,4
$CH_2{=}C{=}O$	9,60 ± 0,2	$(CF_3)_2C{=}O$	11,82
C_2H_6O	9,2	ClO	10,4
C_2H_5OH	7,0	$COCl_2$	11,77 ± 0,04
C_3H_7OH	10,23 [1]; 10,65	$CH_3ClCOCH_3$	9,91 ± 0,02
		$CHCl_2COCH_3$	10,12 ± 0,03
$(CH_3)_2O$	10,00 ± 0,02	ClO_2	11,1
н-C_3H_7OH	10,42 ± 0,10	ClO_3	11,7
и-C_4H_9OH	10,30 ± 0,10	ClO_3F	13,6 ± 0,2
$(C_2H_5)_2O$	9,53 ± 0,02		
C_6H_5OH	8,50 ± 0,03	NO	9,25 ± 0,02 [3]
		$NH_2HC{=}O$	10,16 ± 0,03
$(C_6H_5)HC{=}O$	9,51 ± 0,02	N_2O	12,63—12,90 [1—3]
O_2	14,01 [1]; 12,075 ± 0,03		
O_2^+	50 [2]	NO_2	9,78—12,3
HO_2	11,53 ± 0,1	CH_3ONO	10,7
H_2O_2	10,69 ± 0,05	CH_3NO_2	11,34 ± 0,09
CO_2	13,79 ± 0,03		
HCOO	9,0		
COOH	8,7		
HCOOH	11,05 ± 0,03		
$CHOCHO$	9,48 ± 0,08		
$(H_2CO)_3$	10,51 ± 0,03		
CH_3COOH	10,38 ± 0,03		

Таблица 22.6

Молекулы и радикалы, содержащие бор, кремний, серу и другие элементы [3]

Соединение	Потенциал диссоциации, эв	Соединение	Потенциал ионизации, эв
BH	10,06	$(CH_3)_2S$	8,684
BH_2	8,12	CF_3CH_2SH	9,21±0,05
BH_3	10,06	SO_2	12,34±0,02
BCH_3	9,26	SF_6	15,3
BC_2H_5	8,73	S_2	8,3±0,2
$B(CF_3)_2$	6,44	CS_2	10,08—10,15 [1, 3]
$B(CH_3)_3$	6,8±0,2	S_8	8,9±0,2
$B(C_2H_5)_3$	5,50	He_2	4,25 [2]
B_2H_5	11,9	LiF	8,65±0,15
B_6H_6	10,8±0,5	NaF	8,8±0,3
$B_{10}H_{14}$	11,0±0,5	NaN_3	11,7±0,2
BF_3	15,5±0,5	MgC_2H_5	7,02
BCl	10,4	AlF	9—10
BCl_2	7,20	Al_2O	7,7±0,2
BCl_3	10,91	PH_3	10,0±0,2
BBr	9,25—10,14	PCl_3	12,3
BBr_3	7,06	KI	8,3±0,2
BBr_2	9,7	$TiCl_4$	11,7±0,2
BI	8,90	VC_6H_6	6,63
BI_2	7,13	CrC_6H_6	8,90
BI_3	9,0	CrO_2F_2	14,0±0,2
SiH_3	12,2±0,3	CrO_2Cl_2	12,6±0,3
$SiH(CH_3)_3$	9,8±0,3	$Cr(CO)_6$	8,03 [1]
SiF	7,2	MnC_5H_5	7,04
SiF_4	15,4±0,4	FeC_5H_5	6,78
$SiCl_4$	11,6±0,2	$Fe(CO)_5$	7,95 [1]
SiO	10,8±0,6	CoC_5H_5	10,05
SiO_2	11,7±0,6	$Ni(CO)_4$	6,28 [1]
Si_2O_6	10±1	NiC_5H_5	6,32
$P(CF_3)_3$	11,3±0,1	GeH_4	12,3±0,3
PAs	11,2±0,5	$Ge(CH_3)_4$	9,2±0,2
PAs_2	10,0±0,3	GeF	7,2
P_2	11,8±0,6	Ge_2	6,1
P_2As_2	10,3±0,3	Ge_3	6,1
P_3As	10,3±0,3	AsH_3	10,6±0,1
P_4	10,8±0,3	$As(CH_3)_3$	8,3±0,1
H_2S	10,46±0,01	$AsCl_3$	12,4
CS	10,7±0,3	As_2	11,0±0,5
CHS	6,8	As_3	9,6±0,2
CH_2S	6,7	SeH_2	9,88
CH_3SH	9,44	$Mn(CO)_5$	8,12 [1]
C_2H_5S	9,1	SnH_4	11,7±0,3
		$Sn(CH_3)_4$	6,25±0,16
		SnF_4	7,0
		$SbCl_3$	11,5
		Sb_2	8,4±0,3
		Sb_4	7,7±0,1
		Re_2O	~4
		$W(CO)_6$	8,18
		$Hg(CH_3)_2$	8,90±0,2
		$Pb(CH_3)_4$	8,0±0,4
		$PbTe$	8,2±0,5
		UCl_4	11,5

22.3. СРОДСТВО К ЭЛЕКТРОНУ И ПРОТОНУ

Сродством к электрону χ называется энергия, выделяемая при образовании отрицательного иона из нейтрального атома и электрона, т. е. отвечающая процессу $A + e^- \rightarrow A^-$. При этом предполагается, что до образования отрицательного иона нейтральный атом находился в состоянии с наименьшей энергией. Сродство к электрону с обратным знаком представляет собой потенциал ионизации, т. е. энергию, необходимую для отрыва электрона от отрицательного иона с образованием нейтрального атома (молекулы).

В случае присоединения к атому (молекуле) нескольких электронов указывается их число, например $N + 3e^-$.

Таблица 22.7

Сродство атомов к электрону [1, 5]

Атом	χ, эв	Атом	χ, эв
H	0,754	As	2,0
He	0,08	Se	2,0; 3,7 [3]
Li	0,6; 0,82[3]	Br	3,37; 3,51 [3]
Be	Не существует	Rb	0,27
B	0,3	Sr	Не существует
C	1,2	Y	0,3
$C+4e$	30,7	Zr	0,8
N	0,2 [5]; 0,09	Nb	1,3
$N+3e^-$	23,7	Mo	1,3
O	1,46	Tc	1,0
$O+2e^-$	6,76±0,04	Ru	1,4
F	3,40—3,62[3, 5]	Rh	1,5
Ne	Не существует	Pd	1,2
Na	0,35—1,21	Ag	2,0; 2,5[3]
Mg	Не существует	Sn	1,8
Al	0,5	Sb	1,6; 2,0[3]
Si	1,4—2,0	Te	2,0; 3,6[3]
P	0,6—0,9	I	3,06—3,23
S	2,07—2,33 [3,6]	Cs	0,23
$S+2e^-$	3,47	La	0,6
Cl	3,82±0,06	Hf	Не существует
Ar	Не существует	Ta	0,2
K	0,3—0,69	W	1,2
Ca	Не существует	Re	0,4
Ti	0,4	Os	1,4
V	0,8	Ir	2,0
Cr	1,0	Pt	2,6
Mn	Не существует	Au	2,1[3]; 2,8
Fe	0,5	Hg	1,54—1,8[3,2]
Co	0,9	Tl	2,1
Ni	1,3	Pb	1,6
Cu	1,9—2,4 [3,5]	Bi	0,7

Таблица 22.6

Сродство к электрону молекул и радикалов [1, 3]

Соединение	χ, эв	Соединение	χ, эв	Соединение	χ, эв	Соединение	χ, эв
H_2	0,72	HO_2	3,4	$C_3H_5CH{=}CH_2$	0,35	ClO_3	3,95
CH	~1,65	CO_2	3,8	$C(C_6H_5)_3$	2,08÷0,22	ClO_4	3,81
CH_2	0,95	NO_2	1,62; 3,82± ±0,05	Графит	4,35	Cl_2	<1,7
CH_3	1,08; 1,8			NH_2	1,21	$SiCl_3$	>2,6
C_2	3,1	O_3	2,89	CN	3,7±0,2	CCl_3	>3,10÷0,05
C_2H_3	1,61	NO_3	3,86	OH	1,73±2,05	SeH	2,04
C_2H_5	1,4	BF_3	0,78; 2,17	H_2O	0,9	SeO_2	~2,3
C_3	1,8	SiC	~4	C_2H_5O	1,17	Br_2	2,6
$H_2C{=}CH{-}CH_2$	2,1	SH	2,0	NO	3,2÷0,2	MnO_4	2,73
$n\text{-}C_3H_7$	1,6	SO	>1,8	C_2	0,8÷0,87 [1÷5]	AuCl	3,79
$изо\text{-}C_3H_7$	1,0	SO_2	1,1; 2,8			$AgBr$	3,37
C_6H_4	0,64	CNO	2,91			AgI	3,29
$C_6H_5CH_2$	1,8	ClO_2	3,43			I_2	2,4

Таблица 22.9

Сродство некоторых атомов и молекул к протону [9]

Атом	Сродство к протону, эв	Молекула	Сродство к протону, эв
H	2,75	H_2	3,6
He	1,8	CH	5,1
C	6,0	CH_2	5,2
O	4,9	CH_3	5,1
F	3,7	CH_4	5,3
Ne	2,2	C_2H_6	6,8
Cl	5,4	HCl	5,2
Ar	2,3	OH	6,2
Br	6,8	H_2O	7,3
Kr	3,7	NH_3	9,4
I	6,4	H_2S	7,6

22.4. ФОТОИОНИЗАЦИЯ АТОМОВ

Атомы ионизуются при поглощении квантов света, энергии которых равна потенциалу ионизации атома или превосходит его. Сечение фотоионизации σ_i есть отношение вероятности ионизации атома в секунду к плотности падающего светового потока; σ_i имеет размерность [см²]. Коэффициент поглощения K связан с σ_i соотношением $K = N\sigma_i$, где N — число атомов в единице объема.

Сечения σ_i имеют сложную структуру, зависящую от длины волны падающего света и строения электронных оболочек атома-мишени.

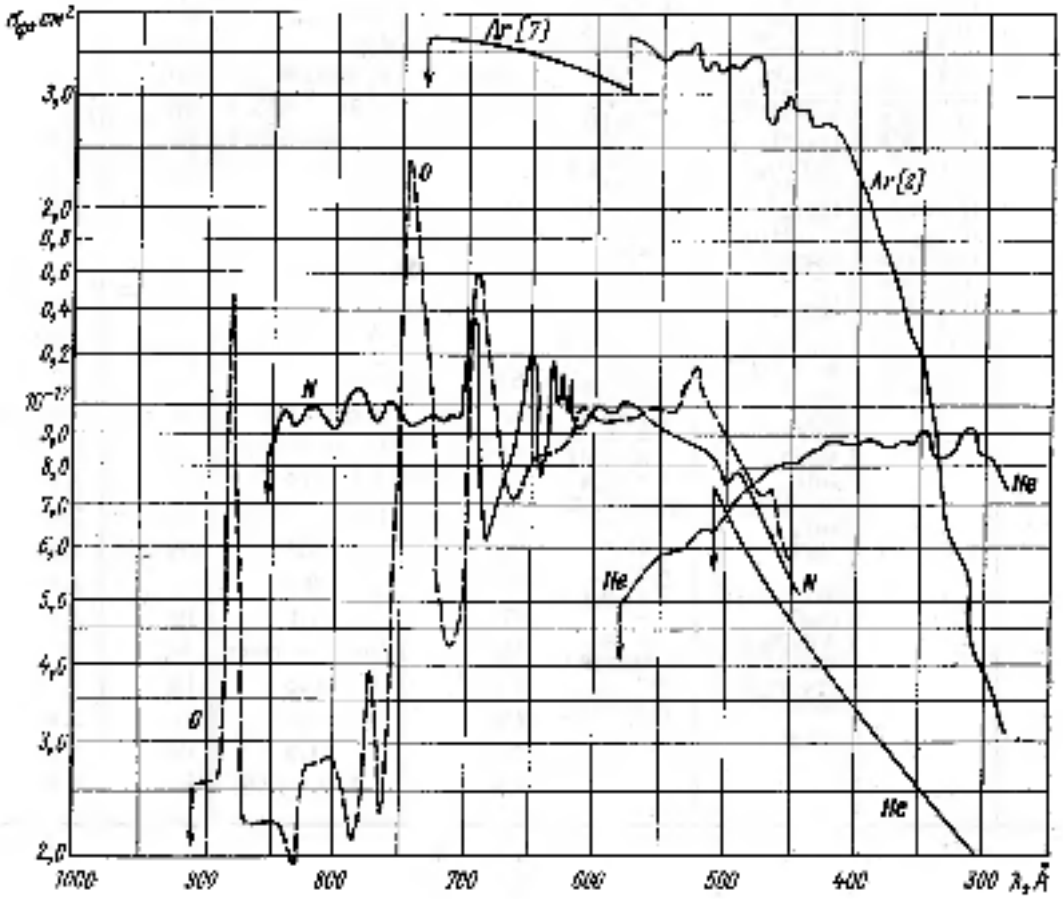


Рис. 22.1. Сечения фотоионизации He [7], атомарных азота и кислорода [8], Ne [8] и Ar [7,8]. (Стрелками у длинноволнового края кривых указаны пороги фотоионизации.)

22.5 ПЕРЕЗАРЯДКА ПРИ АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ

Перезарядкой называют обмен электроном при столкновении двух атомных систем (атомов, ионов, молекул и т. п.):

$$A + (B + e^-) \rightarrow (A + e^-) + B.$$

Эффективное сечение перезарядки и есть отношение вероятности обмена электроном в единицу времени к плотности потока налетающих частиц A при единичной плотности частиц мишени. Сечение резонансной перезарядки обычно превышает сечение упругого рассеяния иона на атоме даже при тепловых энергиях столкновения.

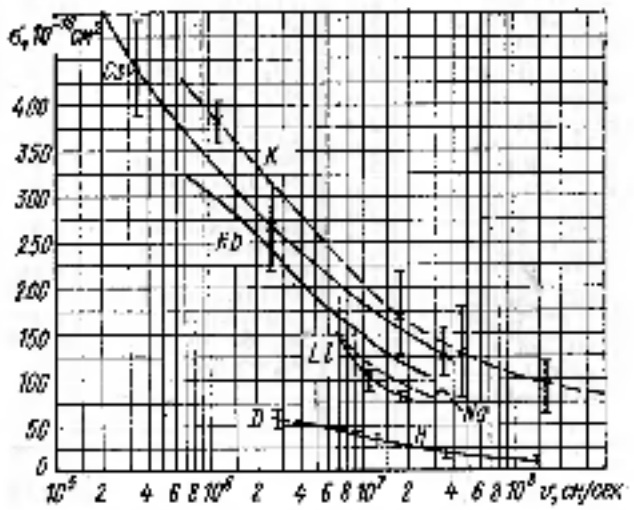


Рис. 22.2. Зависимость сечения резонансной перезарядки ионов на нейтральных атомах этих элементов от скорости ионов. Кривые получены усреднением экспериментальных данных, собранных в работе [5]. Погрешности указывают на разброс данных различных авторов.

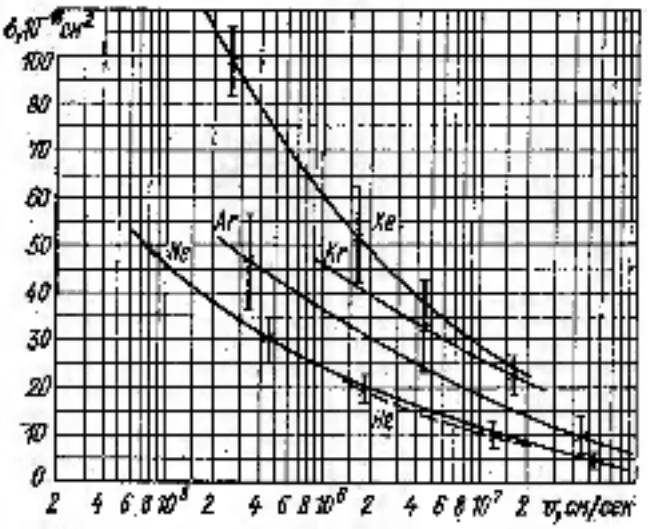


Рис. 22.3. Зависимость сечения резонансной перезарядки ионов гелия, неона, аргона, криптона и ксенона на нейтральных атомах этих элементов от скорости ионов. (Кривые получены усреднением экспериментальных данных, собранных в работе [5]. Погрешности указывают на разброс данных различных авторов.)

22.6. ЭНЕРГИИ ДИССОЦИАЦИИ МОЛЕКУЛ

Таблица 22.10

Энергии диссоциации $E_{дис}$ двухатомных молекул [3]

Молекула	$E_{дис}$, эв	Молекула	$E_{дис}$, эв
Ag_2	1,8	Cu_2	0,2
AgBr	3,1	CuBr	3,4
AgCl	3,4	CuCl	3,7
AgH	2,36	CuF	3,0
AgI	2,6	CuH	2,9
AgO	2,5	CuI	3,0
AgSn	2,5	CuO	4,8
AlBr	4,6	D_2	4,55
AlC	1,9	F_2	1,6
AlCl	5,1	FO	1,9
AlF	7,65	H_2	4,46
AlH	2,9	HD	4,51
AlI	3,81	HT	4,52
AlO	5,0	HBr	3,75
AlS	3,5	HCl	4,43
AsN	6,6	HF	5,9
AsO	5,0	HI	3,05
Au_2	2,28	Hg_2	0,06
AuAl	3,1	HgBr	0,7
AuCl	3,1	HgCl	1,0
AuCr	2,2	HgF	1,8
AuCu	2,4	HgH	0,38
AuH	3,1	HgI	0,36
AuMg	2,7	HgS	2,8
AuSn	2,55	I_2	1,54
BBr	4,5	IBr	1,82
BCl	5,2	ICl	2,15
BF	8,1	IF	2,9
BH	3,0	IO	1,9
BO	7,45	K_2	0,51
BaBr	2,8	KBr	3,95
BaCl	2,7	KCl	4,4
BaF	3,9	KF	5,1
BaH	1,8	KH	1,86
BaO	4,7	KI	3,33
BaS	2,4	Li_2	1,1
BeCl	4,8	LiBr	4,4
BeF	7,0	LiCl	4,8
BrCl	2,23	LiF	6,0
BrF	2,4	LiH	2,4
BrO	2,4	LiI	3,0
CaBr	2,9	LiO	3,4
CaCl	2,8	MnBr	3,2
CaF	3,1	MnCl	3,0
CaH	1,7	MnF	6,0
CaI	2,6	MnH	2,2
CaO	5,0	MnO	3,4
CaS	3,0	Na_2	0,73
C_2	6,2	NaBr	3,8
CO	2,8	NaCl	4,2
CF	4,7	NaF	5,0
CH	3,47	NaH	2,1
CN	8,4	NaI	3,1
CO	11,1	NaK	0,61
Cl_2	2,48	N_2	9,76
ClF	2,6	NBr	2,9
ClO	2,8	NF	2,6
Cs_2	0,46	NH	3,6
CsBr	4,3	NO	3,3
CsCl	4,4	NS	5,0
CsF	5,0	O_2	5,1
CsH	1,9	OH	4,4
CsI	3,6		

Продолжение табл. 22.10

Молекула	$E_{дис}$, эв	Молекула	$E_{дис}$, эв
P_2	5,0	SO	5,3
RbI_2	0,48	T_2	1,59
RbBr	4,0	TlBr	3,4
RbCl	4,4	TlCl	3,8
RbF	5,4	TlF	4,7
RbH	1,8	TlH	2,0
RbI	3,3	TlI	2,8
S_2	4,3	ZnCl	2,6
SF	2,8	ZnH	0,85
SH	3,5	ZnI	1,4

Таблица 22.11

Энергия диссоциации молекулярных ионов [3]

Ион	$E_{дис}$, эв	Ион	$E_{дис}$, эв
Ar_2^+	1,1	HBr^+	4,0
As_2^+	2,56	HCl^+	4,7
AsO^+	7,7	HF^+	3,7
BH^+	1,3	HI^+	3,1
BCl^+	3,1	He_2^+	2,24
BeH^+	3,8	HgH^+	2,3
Br_2^+	3,3	I_2^+	2,8
C_2^+	5,5	IBr^+	2,0
CF^+	2,2	ICl^+	2,2
CH^+	3,6	K_2^+	0,75
CO^+	8,35	MgH^+	2,19
Cs^+	7,3	N_2^+	8,7
CdH^+	2,13	NO^+	10,9
Cl_2^+	4,2	O_2^+	6,7
ClO^+	5,3	O_2^-	4,1
CS^+	0,7	OH^+	4,9
I_2^+	3,3	OH^-	4,7
FO^+	2,58	Rb_2^+	0,7
H_2^+	2,65	SiF^+	6,4
H_2^-	0,18	Xe_2^+	1,0

22.7. ЭНЕРГИИ РАЗРЫВА СВЯЗЕЙ В МОЛЕКУЛАХ И РАДИКАЛАХ

Таблица 22.12

Энергии разрыва связей $E_{разрыв}$ в неорганических молекулах и радикалах [3]

Реакция	$E_{разрыв}$, эв	Реакция	$E_{разрыв}$, эв
$ClO \to Cl + O$	2,7	$(LiOH) \to LiO + H$	5,5
$ClO_2 \to Cl + O_2$	2,3	$NF_2 \to NF + F$	2,6
$FNO \to NO + F$	2,4	$NF_3 \to NF_2 + F$	3,5
$HF_2^- \to HF + F^-$	2,5	$NH_3 \to NH_2 + H$	4,2
$HO_2 \to F + O_2$	2,0	$NO_2 \to NO + O$	3,1
$HO_2 \to OH + O$	2,8	$N_2O \to NO + N$	5,0
$H_2O \to H + OH$	5,0	$N_2O \to N_2 + O$	1,7
$H_2O_2 \to 2OH$	2,1	$(NaBr)_2 \to 2\ NaBr$	2,0
$H_2S \to SH + H$	4,0	$(NaCl)_2 \to 2NaCl$	2,2
$(KBr)_2 \to 2KBr$	2,0	$(NaI)_2 \to 2NaI$	1,9
$(KCl)_2 \to 2KCl$	1,8	$NaOH \to Na + OH$	3,0
$(KF)_2 \to 2KF$	2,2	$NaOH \to Na + OH$	4,8
$(KI)_2 \to 2KI$	1,7	$O_3 \to O_2 + O$	0,11
$(LiBr)_2 \to 2LiBr$	2,0	$(RbCl)_2 \to 2RbCl$	1,9
$(LiCl)_2 \to 2LiCl$	2,6	$(RbF)_2 \to 2RbF$	2,1
$(LiI)_2 \to 2LiI$	1,8	$SF_2 \to SF + F$	3,0
$(Li_2O) \to LiO + Li$	3,8	$SO_2 \to SO + O$	3,6
$(LiOH) \to Li + OH$	4,6		

Таблица 22.13

Энергии разрыва связей $E_{разрыв}$ в органических молекулах и радикалах [3]

Связь	$E_{разрыв}$, эв	Связь	$E_{разрыв}$, эв
$CBr_3—Br$	2,13	$C_6H_5—H$	4,5
$CBr_3—H$	4,0	$C_6H_5—BF_2$	4,2
$CCl_3—Cl$	2,9	$C_6H_5—H$	4,2
$CF_3—Cl$	3,6	$C_6H_5—Li$	2,07
$CF_3—CN$	5,5	$C_6H_5—OH$	4,0
$CF_3—H$	4,6	$C_6H_5—SH$	3,8
$(CH_3)_2As—CF_3$	2,5	$C_6H_5—Br$	3,1
$CH—H$	5,6	$C_6H_5—I$	2,65
$CH_3—H$	4,4	$CHCl_2—H$	3,9
$CH_3CH_2CH_2—H$	3,33	$CH_3—I$	1,6
$CH_3CH—I$	2,9	$CH_3Br—Br$	2,7
$CH_3—Pc$	2,9	$CH_3F—CN$	5,1
$CH_3—BF_2$	4,3	$CH_3Cd—CH_3$	1,9
$CH_3—Cl$	3,6	$CH_3O—NO$	1,99
$CH_3—CN$	4,5	$CH_3O—NO_2$	1,66
$CH_3—I$	3,1	$CH_3S—SCH_3$	3,3
$CH_3—I$	2,3	$CO—H$	1,32
$CH_3—OH$	3,9	$NC—H$	4,8
$CH_3—NH_2$	3,6	$NC—CN$	5,5
$CH_3—NO_2$	2,6	$NC_2—CN$	5,2
$CH_3—SH$	3,01	$NC_2—N$	7,0
$C_2H—H$	5,2	$NC_3—N$	6,6
$C_2H_5—CHO$	3,9	$NC_4—N$	7,05

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Справочник химика.** Под ред. Б. П. Никольского. Т. 1. Изд. 3-е. Л., «Химия», 1971.
2. **Аллен К. У.** Астрофизические величины. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
3. **Энергия** разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. Справочник. Под ред. В. Н. Кондратьева. М., Изд-во АН СССР, 1962.
4. **Meggers W. F., Corliss C. H., Scribner B. F.** Tables of Spectral Line Intensities. National Bureau of Standards, 1961.
5. **Смирнов Б. М.** Асимптотические методы в теории атомных столкновений. М., Атомиздат, 1973.
6. **Дей М. К., Селбин Д.** Теоретическая неорганическая химия. Пер. с англ. М., «Химия», 1969.
7. **Хастед Дж.** Физика атомных столкновений. Пер. с англ. М., «Мир», 1965.
8. **Hudson R. D., Kieffer L. J.** «Atomic Data», 1971, v. 2, p. 205.
9. **Смирнов Б. М.** Атомные столкновения и элементарные процессы в плазме. М., Атомиздат, 1968.

ГЛАВА 23

ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД

23.1. ВВЕДЕНИЕ

Термином *газовый разряд* объединяются все явления, связанные с прохождением электрического тока через газ [1]. Обычно газовый разряд происходит между проводящими электродами, создающими границную конфигурацию электрического поля и играющими значительную роль в качестве источников и стоков заряженных частиц. Однако наличие электродов не обязательно (высокочастотный, коронный разряд).

При достаточно больших давлениях и длинах разрядного промежутка основную роль в возникновении и протекании разряда играет газовая среда. Поддержание разрядного тока определяется поддержанием равновесной ионизации газа, происходящей при малых токах за счет таунсендовских процессов каскадной ионизации, а при больших токах — за счет термической ионизации.

При уменьшении давления газа p и длины разрядного промежутка d все большую роль играют процессы на электродах: при $pd < 0{,}02 \div 0{,}04$ *мм рт. ст.·см* процессы на электродах становятся определяющими и меньшие значения pd соответствуют области вакуумного разряда, или электрического пробоя вакуума*.

В области газового разряда ($pd \geq 0{,}04$ *мм рт. ст.·см*) произведение этих величин в значительной степени определяет характер возникновения и протекания разряда, в частности пробивное напряжение (закон Пашена).

При малых разрядных токах между холодными электродами и в достаточно однородном электрическом поле основным типом разряда является тлеющий разряд, характеризующийся значительным (50 — 400 *в*) катодным падением потенциала. Катод в этом типе разряда испускает электроны под действием заряженных частиц и световых квантов, а тепловые явления не играют роли в поддержании разряда.

Тлеющий разряд в сильно неоднородном электрическом поле и при значительном давлении ($p \geq 100$ *мм рт. ст.*) называется *коронным разрядом*.

Дуговой разряд наблюдается при токе не менее нескольких ампер. Для этого типа разряда характерны малые порядка 10 *в* катодные падения потенциала и высокая плотность тока. Для горения дугового разряда существенна высокая электронная эмиссия катода, термическая ионизация в плазменном столбе. Спектр дуги обычно содержит линии материала катода.

23.2. ПРОЦЕССЫ НА ЭЛЕКТРОДАХ

Возникновение и характер газового разряда в значительной степени зависят от эмиссии электронов из катода. В случае холодного катода эмиссия происходит в основном при ионной бомбардировке и облучении его фотонами; горячий катод испускает электроны в результате термоэлектронной эмиссии.

В случае коронного разряда и электрического пробоя вакуума заметную роль играет автоэлектронная эмиссия: на горячих электродах может также происходить образование ионов за счет поверхностной ионизации.

Основной материал по электронной эмиссии изложен в гл. 24. Ниже приводятся сведения о ионно-электронной эмиссии и поверхностной ионизации.

Ионно-электронная эмиссия. Ион, падающий на поверхность электрода, выбивает из нее электроны, имеющие энергию не более 10—30 *эв* (рис. 23.1 и 23.2).

Поверхностная ионизация. Адсорбированный атом может покинуть нагретую поверхность как в ионном, так и в нейтральном состоянии. Для того чтобы про-

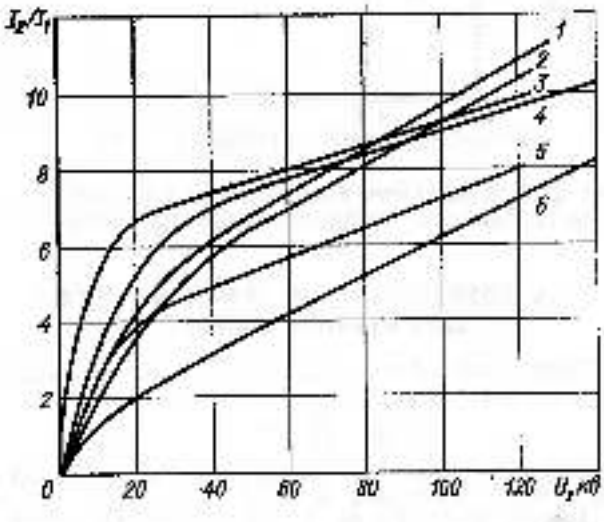


Рис. 23.1. Эмиссия электронов при падении ионов гелия на поверхность различных металлов:

1 — свинец; 2 — ниобий; 3 — никель; 4 — железо; 5 — сталь; 6 — медь [2].

* Вопросы вакуумного пробоя подробно освещены в работе [3].

вает ионов в потоке десорбированных частиц был значителен, необходимо выполнение условия $U > E_{валент}$, где U — работа выхода адсорбирующей поверхности,

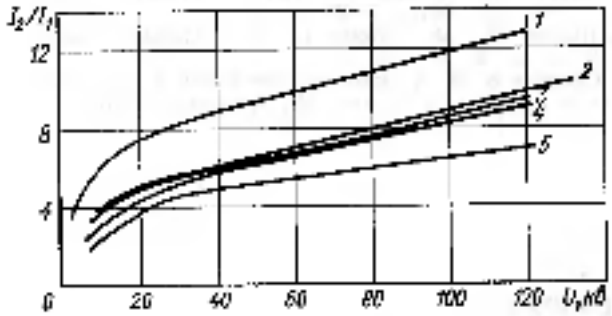


Рис. 23.2. Эмиссия электронов при падении различных ионов на поверхность алюминия:

1 — ион; 2 — атомы; 3 — атомы; 4 — ртуть; 5 — молекулы [3].

$E_{валент}$ — энергия ионизации уровня валентного электрона адсорбированных атомов. Это условие выполняется при ионизации щелочных элементов на вольфраме и платине (рис. 23.3).

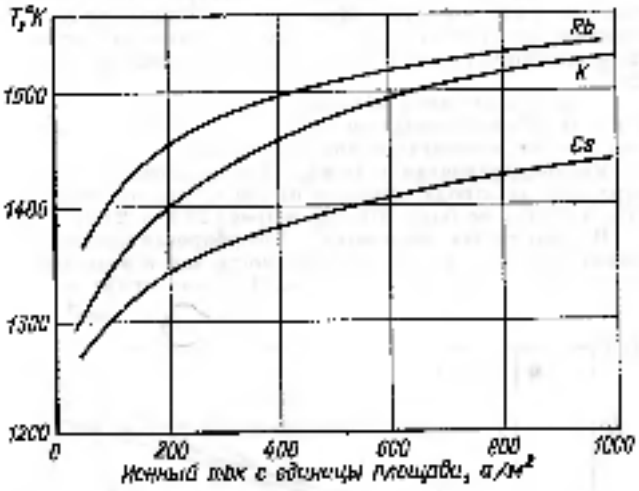


Рис. 23.3. Зависимость максимального значения тока ионов K, Rb, Cs от температуры поверхности вольфрама [4].

23.3. ПОДВИЖНОСТЬ И РЕКОМБИНАЦИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Подвижность ионов k_i и коэффициент их диффузии D_i связаны равенством [5]

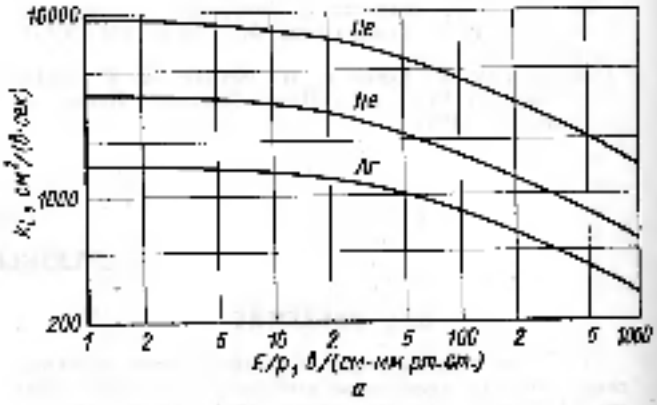
$$k_i = N_e D_i / T.$$

Подвижность ионов не зависит от E/p вплоть до $E/p \ll 20$ в (см·мм рт. ст.).

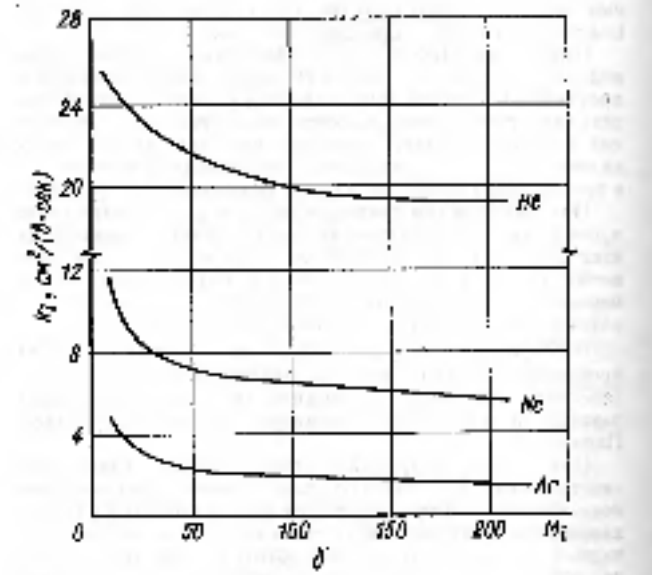
Теория, учитывающая взаимодействие дипольных моментов иона и молекулы, дает для k_i следующее выражение [2]:

$$k_i = A \left[\frac{1 + m/m_i}{p\,(\varkappa - 1)} \right]^{1/2}. \qquad (23.1)$$

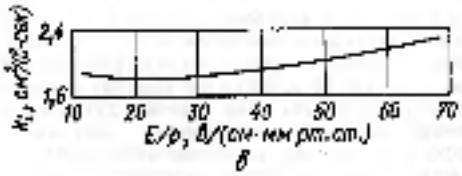
Здесь m — масса молекулы; m_i — масса иона; $\varkappa$ — диэлектрическая постоянная газа. Постоянная A при больших (для газа) $\varkappa$, малых температурах и малых размерах ионов и молекул равна 0,52, а при больших радиусах и температурах и малых $\varkappa$ уменьшается до 0,1.



а



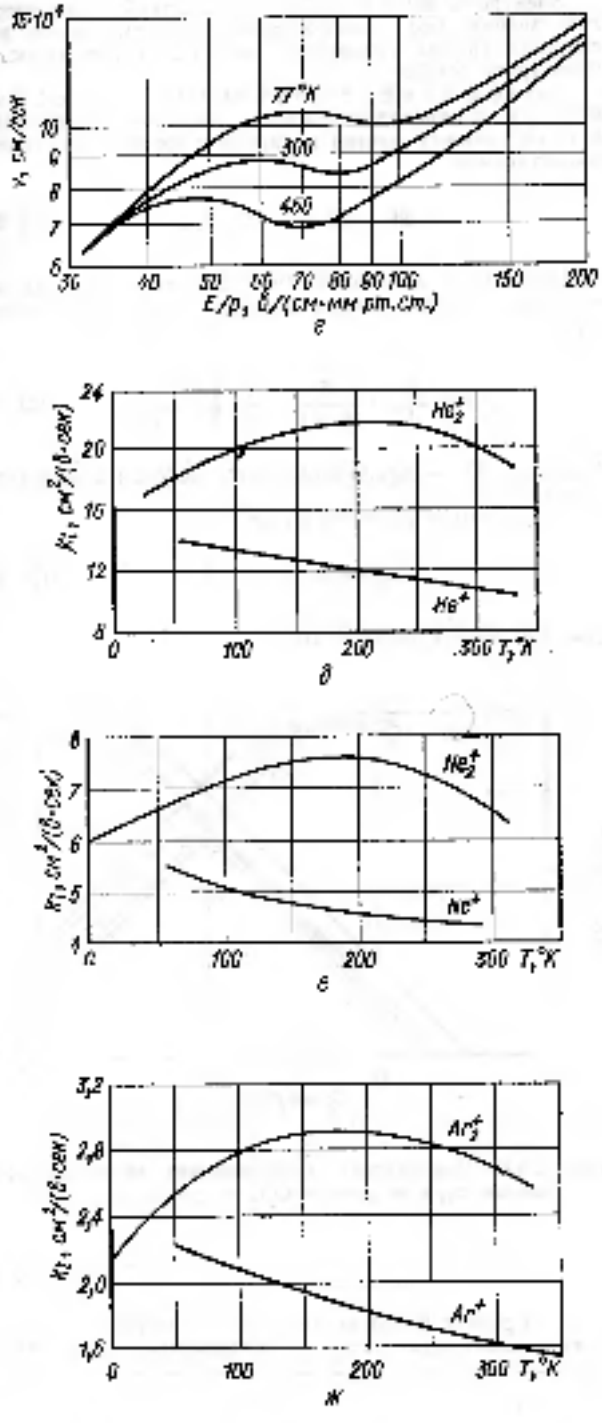
б



в

Рис. 23.4. Зависимость подвижности ионов в различных газах от E/p [6]:

а — подвижность собственных ионов в гелии, аргоне и ксеноне, $p = 1$ мм рт. ст.; б — зависимость подвижности от массы ионов в гелии, неоне и аргоне, $p = 760$ мм рт. ст.; в — подвижность ионов



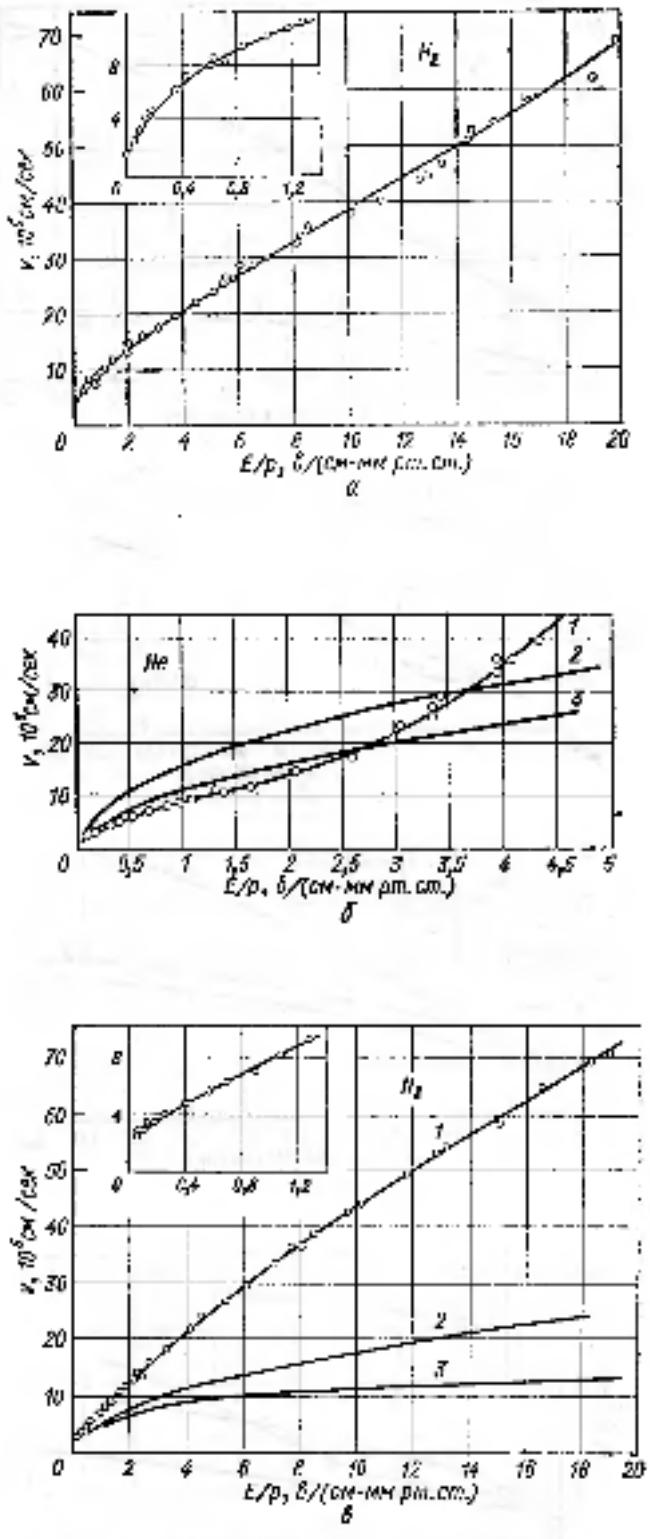
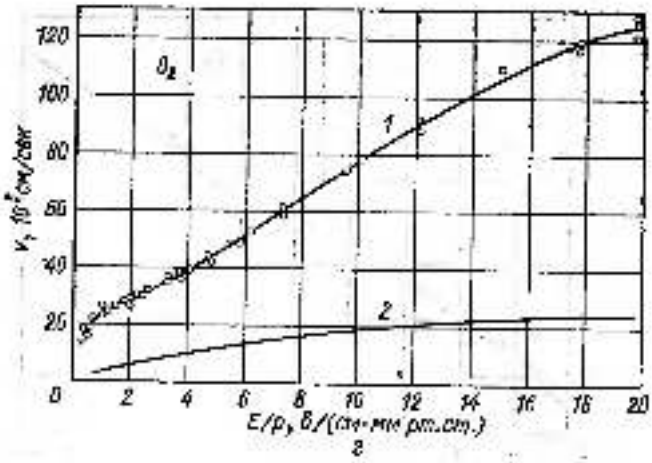
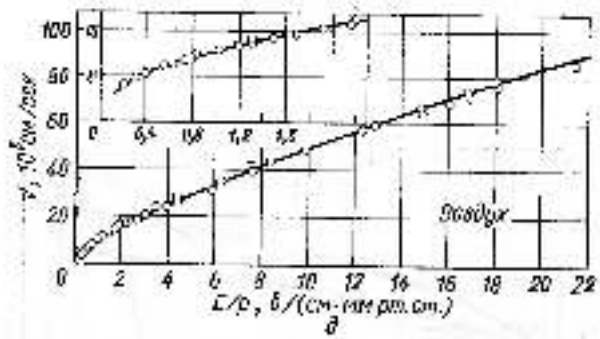


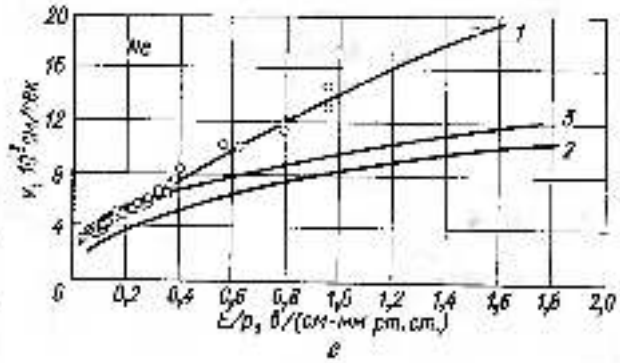
Рис. 23.5. Зависимость скорости дрейфа электронов от E/p в различных газах [5]:

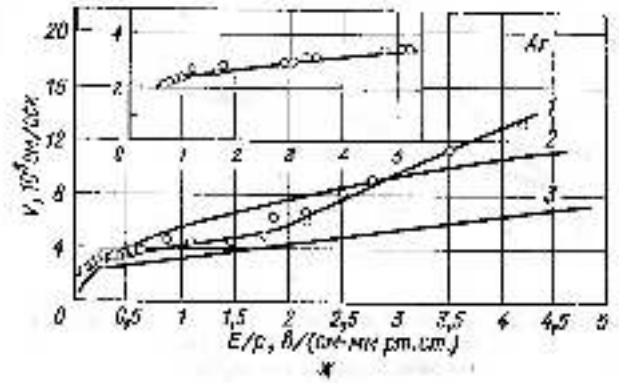
1 — эксперимент; 2, 3 — теория.

рузии в аргоне при 300°K, p_{Ar} = 700 мм рт. ст.; г — скорость дрейфа ионов в аргоне при различных температурах: N_2^+ — для низких значений E/p и N_2^+ для высоких значений E/p; плотность газа постоянна и соответствует нормальным условиям; д — зависимость подвижности ионов гелия от температуры; е — зависимость подвижности ионов неона от температуры; ж — зависимость подвижности ионов аргона от температуры (плотность газа, неона и аргона постоянна и соответствует нормальным условиям).









Электроны даже в слабых полях приобретают энергию, значительно превышающую тепловую, поэтому их скорость дрейфа перестает зависеть от напряженности поля (рис. 23.5).

Коэффициент объемной рекомбинации α определяет скорость взаимной нейтрализации заряженных частиц и связан с их концентрацией соотношением

$$dN_+ / dt = -\alpha N_+ N_- . \qquad (23.2)$$

При малых давлениях ($p < 1$ атм) коэффициент ион-ионной рекомбинации определяется соотношением [2]

$$\alpha_{ii} = \frac{8\pi}{27} \cdot \frac{e^6}{(k_0 T)^3} \cdot \frac{1}{\lambda_i} \sqrt{\frac{8k_0 T_i}{M}} . \qquad (23.3)$$

Здесь λ_i и T_i — длина свободного пробега и температура ионов.

При высоких давлениях газа

$$\alpha_{ei} = 4\pi e (b_i + b_e) \qquad (23.4)$$

(см. рис. 23.6 и табл. 23.2).

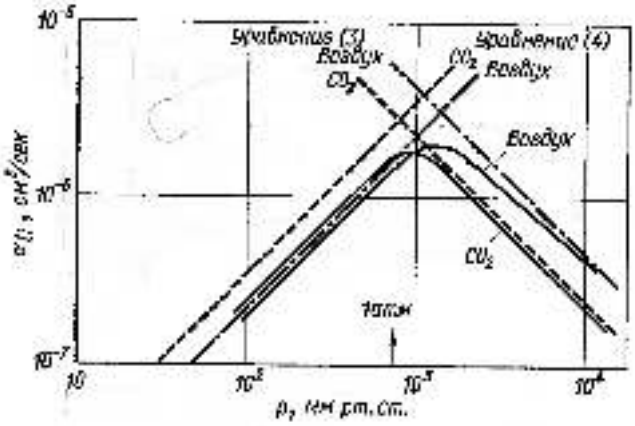


Рис. 23.6. Зависимость коэффициента рекомбинации ионов α_{ii} в воздухе и CO_2 от давления [2].

Таблица 23.1

Среднее число столкновений электрона δ до момента прилипания к нейтральному атому [1]

Газ	δ	Газ	δ
Инертные газы, H_2, N_2	∞	Воздух	$2{,}1 \cdot 10^6$
CO	$1{,}6 \cdot 10^6$	O_2, H_2O	$4{,}0 \cdot 10^5$
NH_3	$9{,}9 \cdot 10^6$	CH_4	$2{,}1 \cdot 10^3$
N_2O	$6{,}1 \cdot 10^3$		

Таблица 23.2

Коэффициенты ион-ионной рекомбинации α_{ii} в собственном газе [2]
($p = 760$ мм рт. ст., $T = 0°C$, возраст ионов $\approx 0{,}1$ сек)

Газ	α_{ii}, 10^{-6} см³/сек	Газ	α_{ii}, 10^{-6} см³/сек
CO_2	1,7	SO_2	1,4
O_2	1,6	H_2O	0,9 (100°C)
Воздух	1,4	CO	0,85
N_2O	1,4		

Таблица 23.3

Коэффициенты ион-электронной рекомбинации α_{ie} в различных газах [2]

Газ	p, мм рт. ст.	Температура электронов, эв	α_{ie}
Hg	0,3	0,15	$2 \cdot 10^{-10}$
Cs	0,01—0,1	0,15	$(3 \div 4) \cdot 10^{-10}$
He	1	0,03	$1,7 \cdot 10^{-8}$
Ne	15—30	0,03	$2 \cdot 10^{-7}$
O_2	2—20	0,03	$2,7 \cdot 10^{-7}$
Ar	15—30	0,03	$3 \cdot 10^{-7}$
N_2	2—5	0,03	$1,4 \cdot 10^{-6}$
H_2	3—12	0,03	$2,5 \cdot 10^{-6}$

В инертных газах α_{ie} растет с увеличением плотности газа. При $T < 300°K$ $\alpha_{ie} \sim \sqrt{p}$.

23.4. СЛАБОТОЧНЫЕ РАЗРЯДЫ

Тлеющий разряд. Тлеющий разряд возникает в достаточно однородном электрическом поле между холодными электродами при давлении от — 0,1 до десятков и сотен миллиметров ртутного столба. Катод в этом типе разряда испускает электроны вследствие его бомбардировки образующимися в зоне разряда ионами и сильным катодным.

Огромную роль в возникновении тлеющего разряда играет лавинный процесс размножения электронов. Он описывается формулой Таунсенда [2]:

$$i = i_0 \frac{\exp(\alpha d)}{1 - \gamma[\exp(\alpha d) - 1]},$$

где i_0 — ток первичных электронов; d — длина разрядного промежутка; α — первый коэффициент ионизации Таунсенда, определяющий число новых электронов, создаваемых первичным электроном при прохождении 1 см пути в направлении поля; γ — второй коэффициент ионизации Таунсенда, равный числу электронов, выбиваемых из катода одним положительным ионом. Обращение знаменателя этого выражения в нуль соответствует пробою газового промежутка.

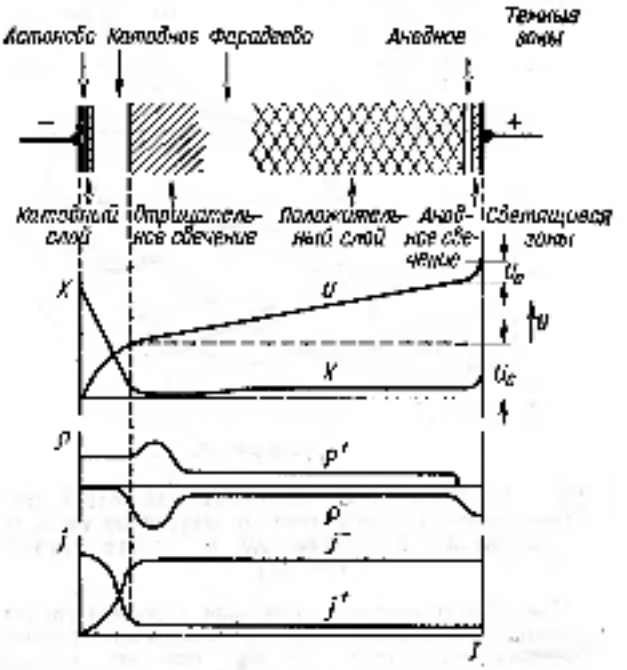


Рис. 23.7. Пространственное распределение темных и светящихся зон, напряженность электрического поля X, потенциала U, плотностей пространственного заряда ρ^+ и ρ^- и плотностей тока j^+ и j^- в тлеющем разряде (схема) [2].

На рис. 23.7 показано пространственное распределение темных и светящихся зон, электрического поля и других характеристик тлеющего разряда.

Изменение расстояния между катодом и анодом влияет лишь на длину положительного столба, а изменение давления ведет к обратно пропорциональному изменению длины прикатодных и прианодных областей разряда.

Таблица 23.4

Катодное падение потенциала в различных газах, в [2]

Материал катода	He	Ne	Ar	Xe	воздух	H	H_2	Другие газы
C	280	—	—	—	424	—	475	575 (CO)
Al	170	140	120	180	230	100	245	280 (Cl_2)
K	94	60	68	170	180	64	—	80 (K)
Fe	250	150	150	215	270	165	300	290 (O_2)
								306 (Xe)
								80 (K)
								340 (Cs)
Ni	210	160	140	200	226	130	275	—
Cu	214	177	220	208	370	130	450	481 (CO)
								460 (CO_2)
Zn	184	143	—	210	280	119	—	354 (O_2)
								430 (CO)
Pt	276	165	152	216	277	130		354 (O_2)
								275 (Cl_2)
Hg	337	143		226	-	—	340	—

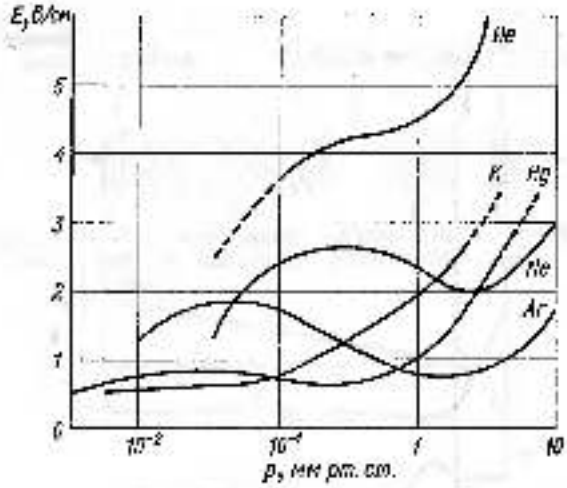
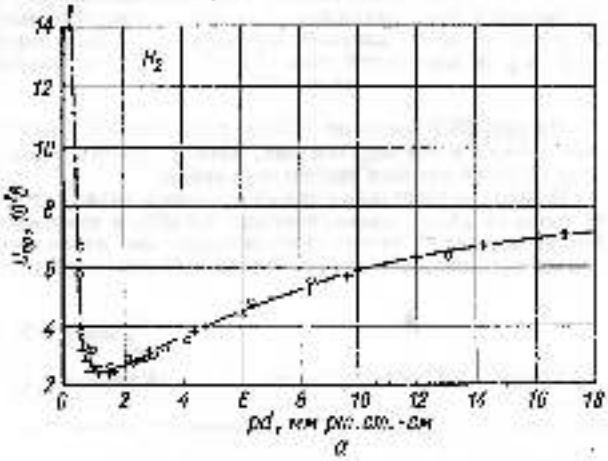


Рис. 23.8. Зависимость напряженности поля в положительном столбе разряда в различных газах и парах от давления. (Ток 0,3 а, радиус трубки 1см [2].)

Наибольшая напряженность поля тлеющего разряда наблюдается в области темного катодного пространства. Электроны, испущенные катодом, еще не успевают здесь набрать энергию, необходимую для возбуждения и ионизации молекул газа.



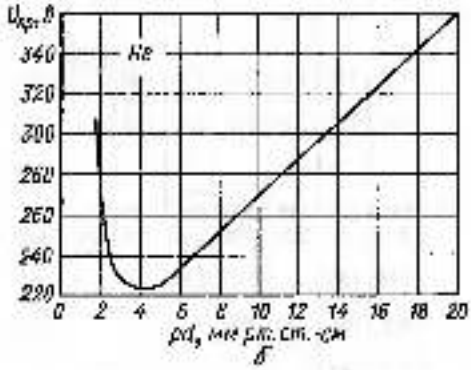


Таблица 23.5

Приведенная ширина темного катодного пространства $d_{кр}p$, см·мм рт. ст., для различных газов [2]

Материал катода	H_2	N_2	O_2	Cl_2	Воздух	Ar	He	Другие газы
C	0,9	—	—	—	—	—	0,66	—
Mg	0,61	1,45	—	0,35	—	—	—	0,25 (O_2)
Al	0,72	1,32	1,64	0,31	0,25	0,29	0,33	0,24 (O_2)
Fe	0,9	1,3	0,72	0,42	0,62	0,33	0,34	0,31 (O_2) 0,23 (Xe)
Cu	0,8	—	—	—	0,23	—	0,6	—
Hg	0,9	—		—	—	—	—	—

Часть площади катода, активно участвующая в разряде, пропорциональна току разряда.

При очень малых токах (обычно меньше 10^{-4} а), когда диаметр катодного пятна меньше ширины катодного пространства, катодное падение потенциала увеличивается из-за радиальной диффузии зарядов (ненормальное катодное падение потенциала). При большой плотности тока, когда уже вся поверхность катода покрыта разрядом, катодное падение потенциала также нарастает (аномальное катодное падение потенциала). На рис. 23.8 даны значения напряженности поля в положительном столбе разряда для различных газов. Даже небольшая примесь электроотрицательного газа приводит к резкому повышению напряженности поля положительного столба. Примесь молекулярных газов приводит также к появлению в положительном столбе *страт*, т. е. расположенных поперек градиента электрического поля темных и светящихся зон. В тлею-

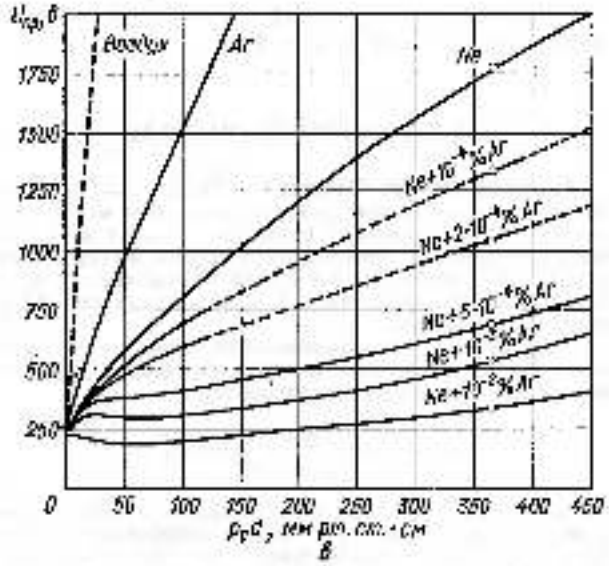
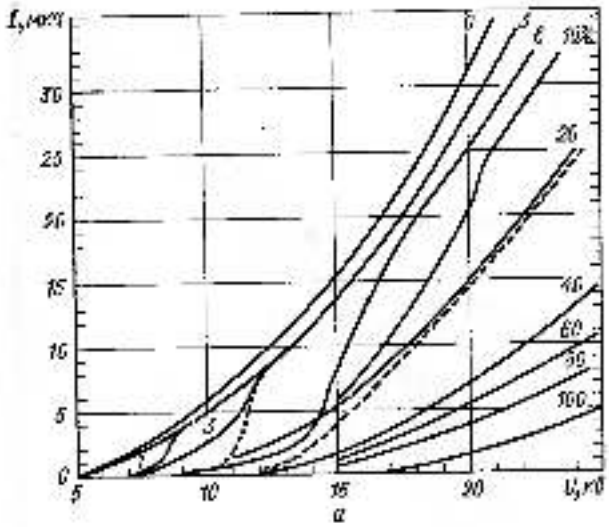


Рис. 23.9. Зависимость пробивного напряжения в различных газах от pd [5]:

а — H_2 (+ — эксперимент; ○ — расчет, катод никелевый); б — гелий; в — аргон, неон и их смеси (жирные кривые, промежуток 2 см), воздух (катод — нержавеющая сталь, d=0,5 мм, T=23°С).



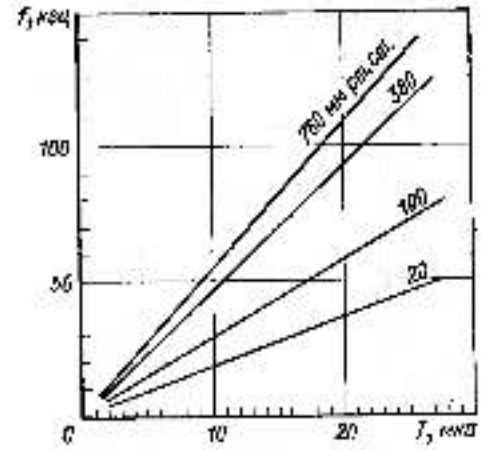


Рис. 23.11. Зависимость частоты импульсов от тока отрицательной короны в воздухе при различных давлениях [5].

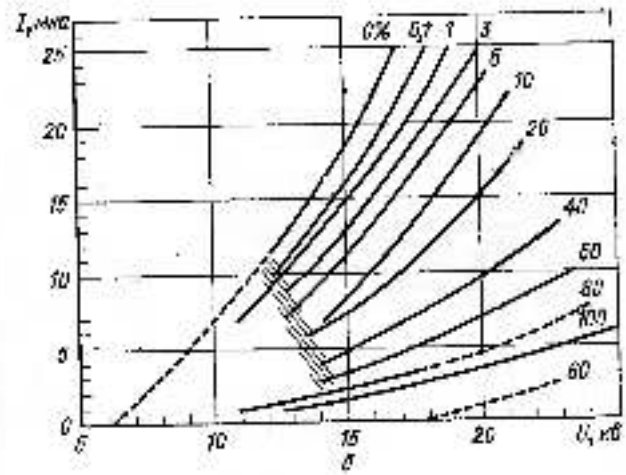


Рис. 23.10. Вольт-амперные характеристики короны для смесей Фреона-12 с воздухом. Общее давление — 746 мм рт. ст:

а — разряд с положительного острия (пунктирные кривые — результат дугового остаточного); б — разряд с отрицательного острия. Ток в заштрихованной области сильно флуктуирует.

сия разряда, происходящая в смеси газов, наблюдается явление *катафореза* — разделения газовой смеси. Газ с меньшим потенциалом ионизации накапливается у катода. Питание люминесцентных ламп, рекламных трубок, работающих на газовых смесях, и т. п. для предотвращения катафореза осуществляется только переменным током.

В большинстве случаев пробойное напряжение в однородном электрическом поле является функцией произведения длины разрядного промежутка d на давление газа p (рис. 23.9):

$$U_{пр} = f(pd).$$

Эта закономерность известна под названием *закона Пашена*.

На абсолютную величину пробойного напряжения оказывает влияние также материал электродов и такие факторы, как освещение и облучение разрядного промежутка.

Коронный разряд — это особая форма тлеющего разряда в сильно неоднородном электрическом поле. Этот тип разряда достаточно четко выражен лишь при давлении газа от 0,1 до нескольких бар.

Ток коронного разряда имеет характер импульсов, вызываемых электронными лавинами. Частота повторения импульсов 10—100 кгц (рис. 23.10, 23.11).

23.3. ДУГОВОЙ РАЗРЯД

Электрическая дуга — это разряд при большой силе тока (более 1 а) и низком катодном падении потенциала (менее 20 в). Плотность эмиссии электронов с катода дугового разряда достигает значений 10^8—10^9 *а/см*^{2}.

У самостоятельных дуг эта эмиссия поддерживается тепловыделением самой дуги, у несамостоятельных — специальным его нагревом. Проводимость газового канала самостоятельных (термических) дуг обусловливается термической ионизацией газа, причем температуры электронов, ионов и нейтральных частиц в канале приблизительно одинаковы. Разряды низкого давления с подогреваемым активированным катодом* (несамостоятельные дуги) могут, как и в случае тлеющего разряда, иметь температуру электронов, много большую новой температуры (рис. 23.12—23.15).

* Наиболее распространенное изделие с таким типом разряда — люминесцентная лампа.

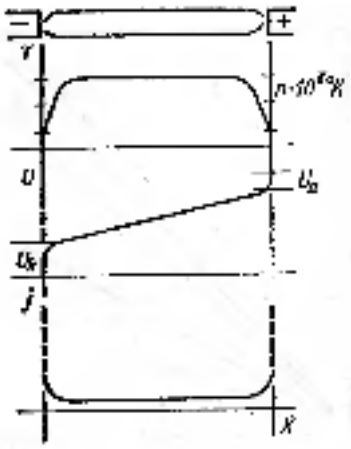


Рис. 23.12. Зависимость температуры газа T, потенциала U и плотности тока j от расстояния x для длинной дуги; U_k и U_a — катодное и анодное падение потенциала [2].

Температура столба дуги весьма неоднородна по длине и диаметру, максимум температуры столба у обычных дуг составляет $(4-8)\cdot10^4$ °К, а у некоторых специальных дуг достигает $5\cdot10^5$ °К [6] (рис. 23.20 и 23.21).

Диаметр свободно горящей дуги уменьшается с ростом давления. При увеличении силы тока диаметр дуги вначале увеличивается, а затем остается неизменным (рис. 23.16). Вольт-амперные характеристики свободно горящих дуг обычно являются падающими для не слишком больших токов (рис. 23.17). При токах в десятки и сотни ампер характеристика может стать возрастающей (рис. 23.18).

На рис. 23.19 показана зависимость катодного падения потенциала от силы тока для аргоновой дуги, на рис. 23.20 и 23.21 — распределение температур в столбе дуги с угольными электродами.

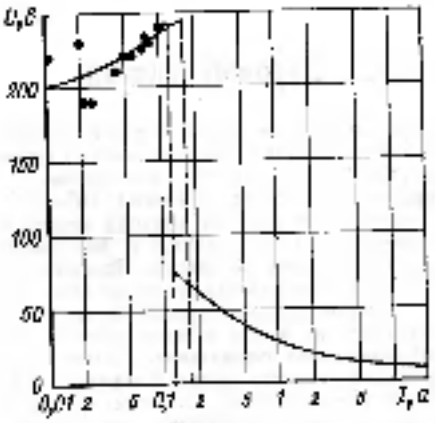


Рис. 23.13. Вольт-амперная характеристика разряда в ксеноновой лампе (5 атм) при режиме, переходном от тлеющего разряда к дуговому [6].

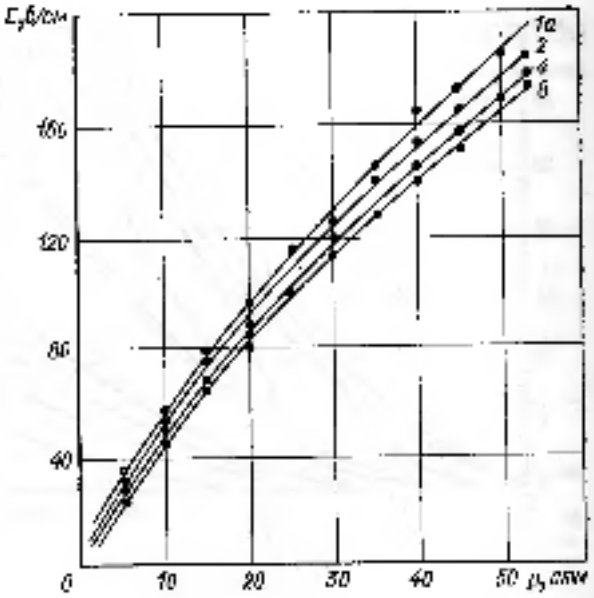


Рис. 23.14. Зависимость напряженности поля от давления в столбе дуги ртутной лампы высокого давления для различных значений тока [6].

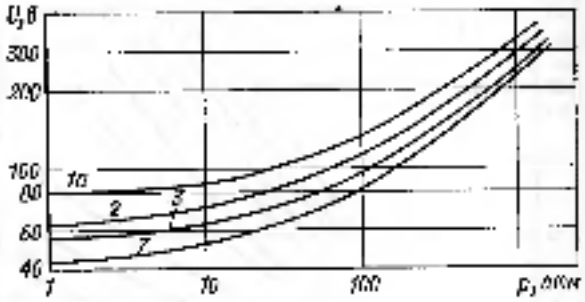


Рис. 23.15. Зависимость напряжения от давления для дуги, горящей в азоте при различных значениях тока [6].

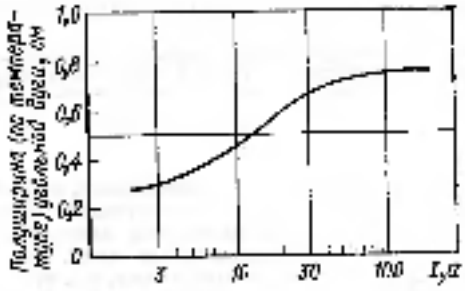


Рис. 23.16. Зависимость полуширины дуги между угольными электродами от тока [6].

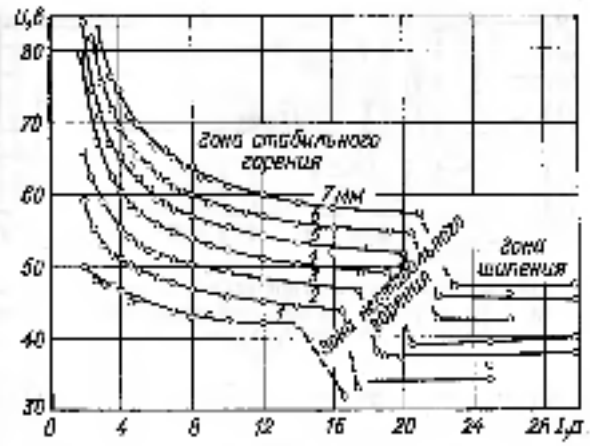


Рис. 23.17. Вольт-амперные характеристики дуг с угольными электродами различной длины с переходной областью от стабильно горящей дуги к «шипящему» разряду [6].

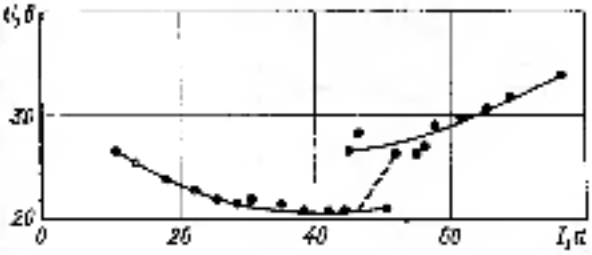


Рис. 23.18. Вольт-амперная характеристика дуги высокой интенсивности с угольными электродами (в том числе при начавшемся выбросе сварки из анода) [6].

Таблица 23.6

Характеристика различных электродов для дуги при $p = 1$ ат [2]

Электроды	Газ	U_a, в	T_a, °К	T_c, °К	$\frac{a}{cm^2}$	U_c, в	U_k, в
C—C	Воздух	1—10	3500	4200	65	9—11	11—12
C—C	N_2	4—10	3500	4000	70	—	—
Cu—Cu	Воздух	5	2300	2400	—	8—9	2—6
Fe—Fe	»	5	2400	2500	—	8—12	2—6
Ni—Ni	»	5	2400	2400	—	—	—
W—W	»	5	3000	4200			—
Al—Al	»	5	3400	3400	—	—	—
Al—Al	N_2	5	2500	2500	—	—	—
Zn—Zn	Воздух	5	3000	3000	—	—	—
Hg—C	Hg	2	600	600	—	7—10	0—10

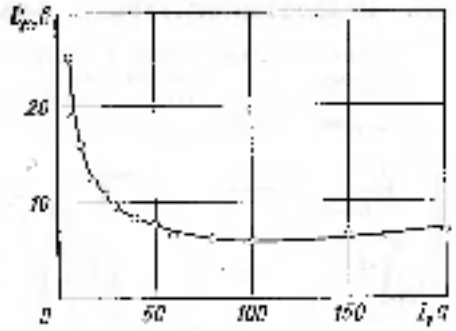


Рис. 23.19. Зависимость катодного падения потенциала от тока в угольной дуге [6].

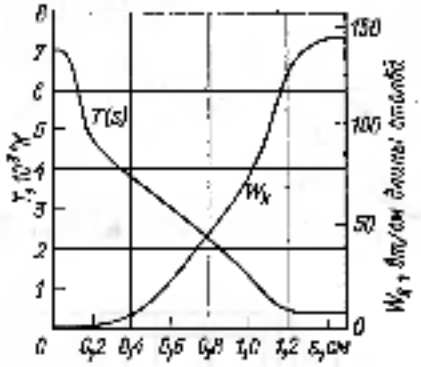


Рис. 23.20. Распределение температуры $T(s)$ в дуге с угольными электродами при $I = 10$ а:

Кривая W_k — мощность, передаваемая электронами; $T(s)$ — расстояние от оси дуги [6].

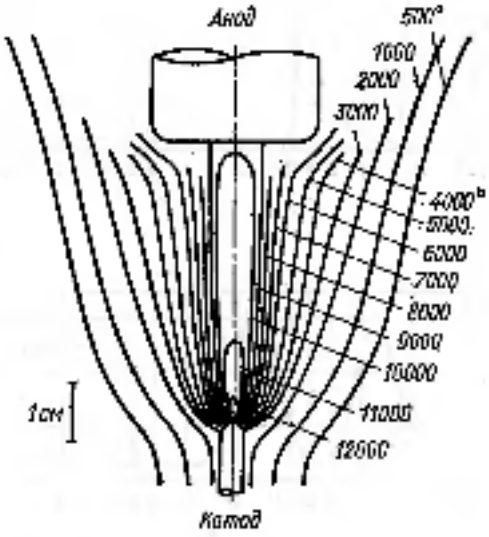


Рис. 23.21. Поле температур в столбе дуги с угольными электродами, горящей в воздухе при $I = 200$ а [6].

23.6. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА

Область состояний, именуемая низкотемпературной плазмой, определена недостаточно четко. Температура такой плазмы обычно ниже 50 000° К, степень ионизации меняется от долей процента до почти 100%. Излуча-

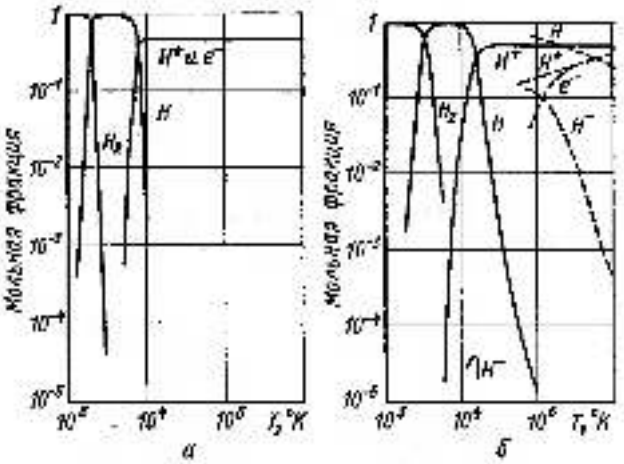


Рис. 23.22. Зависимость состава водородной плазмы от ее температуры [4]:

а — для $p = 10^{-4}$ атм; б — для $p = 1$ и 10^6 атм (пунктир).

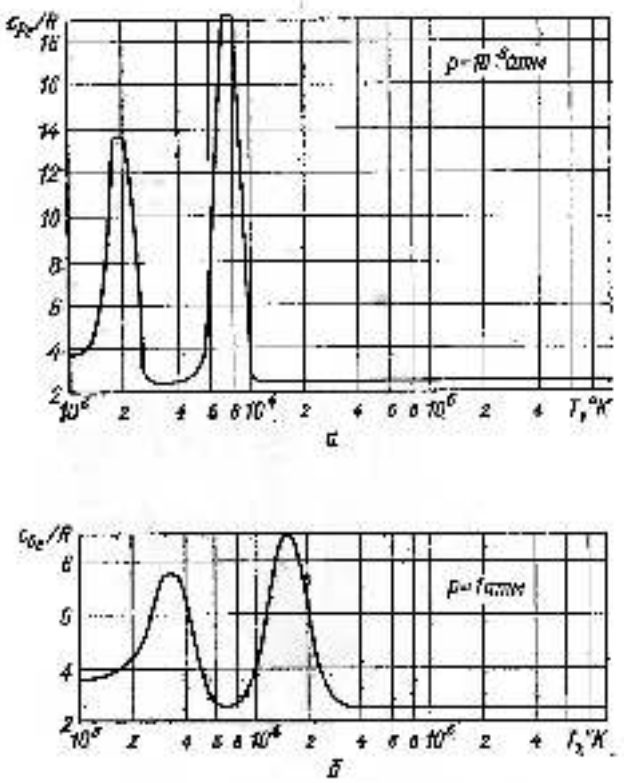


Рис. 23.23. Удельная теплоемкость равновесной водородной плазмы [4]:

а — для $p = 10^{-4}$ атм; б — для $p = 1$ атм.

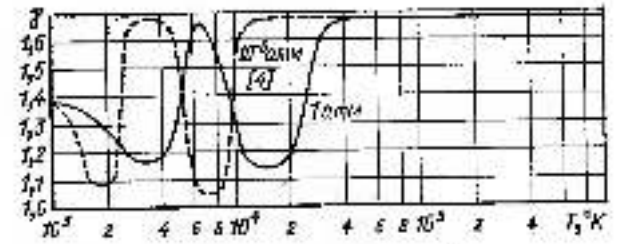


Рис. 23.24. Зависимость отношения удельных теплоемкостей $c_p/c_v = \gamma$ для равновесной водородной плазмы от температуры.

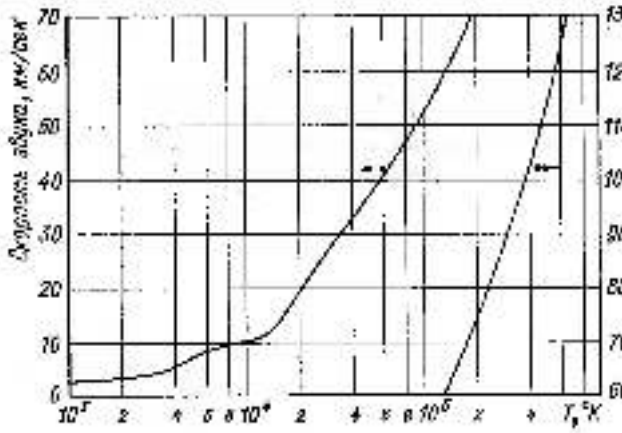


Рис. 23.25. Зависимость скорости звука в равновесной водородной плазме ($p = 1$ атм) от температуры [4].

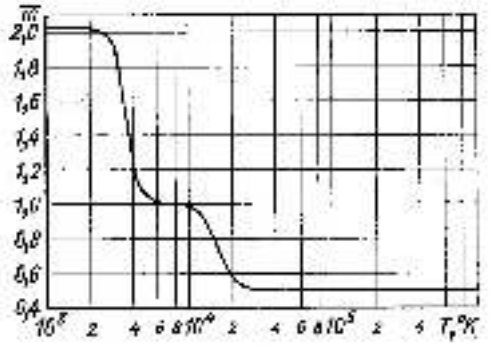


Рис. 23.26. Зависимость средней молекулярной массы водородной плазмы $\overline{m}$ от температуры при $p = 1$ атм [4].

тельная способность плазмы может быть значительной, приближающейся к излучательной способности черного тела. Расчет и изучение низкотемпературной плазмы усложняется зависимостью ее состава. Так, газовая H_2 состоит из H_2, H, H^+, H^-, e^-.

На рис. 23.22—23.27 приведены некоторые сведения о свойствах низкотемпературной плазмы. Большинство приводимых данных — расчетные.

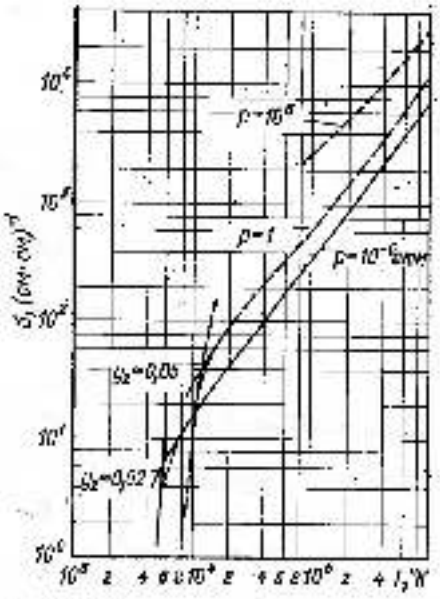


Рис. 23.27. Зависимость проводимости водородной плазмы от температуры [4].

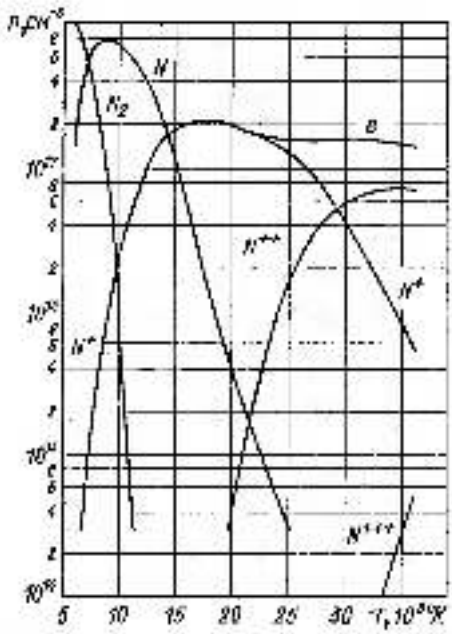


Рис. 23.29. Состав азотной плазмы при атмосферном давлении [6].

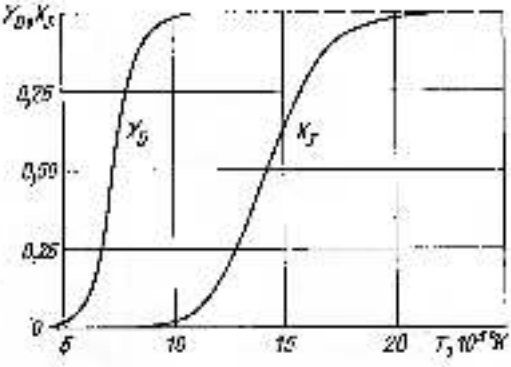


Рис. 23.28. Степень диссоциации X_D и степень ионизации X_S азота при атмосферном давлении [6].

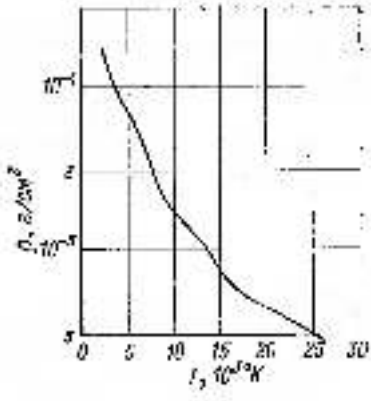


Рис. 23.30. Зависимость плотности азота от температуры при атмосферном давлении [6].

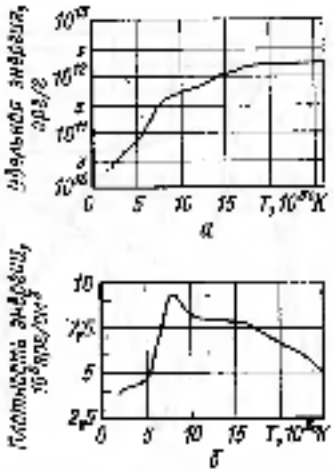


Рис. 23.31. Зависимость удельной энергии (а) и плотности энергии (б) аэотной плазмы от температуры [6].

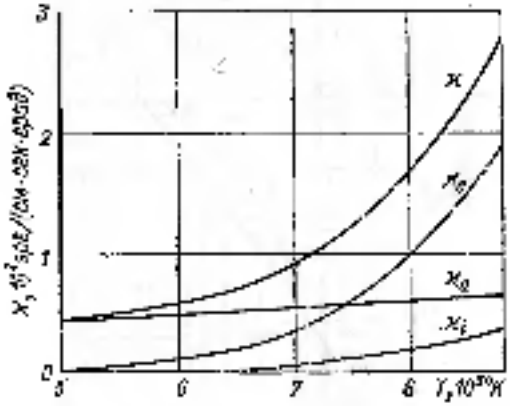


Рис. 23.34. Зависимость теплопроводности ксенона при давлении 25 атм от температуры (обозначения см. на рис. 23.32) [6].

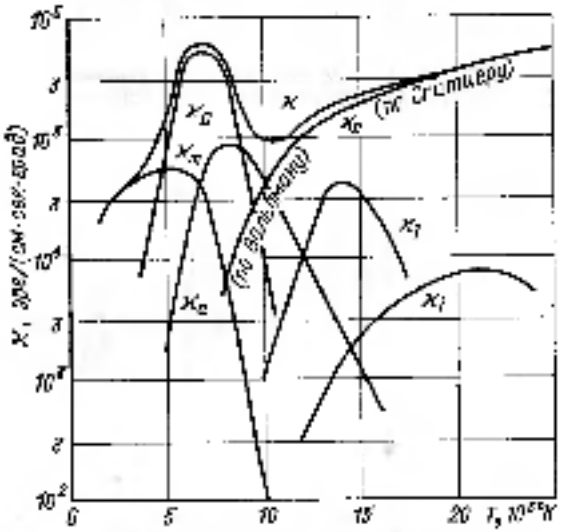


Рис. 23.32. Зависимость теплопроводности молекул $\varkappa_m$, атомов $\varkappa_a$, ионов $\varkappa_i$ и электронов $\varkappa_e$ аэотной плазмы от температуры. $\varkappa_D$ — теплопроводность вследствие диффузии энергии диссоциации, $\varkappa_i$ — ионизации, $\varkappa$ — сумма всех компонент [6].

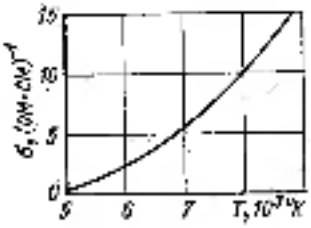


Рис. 23.35. Зависимость проводимости ксенона при p — 25 атм от температуры [6]

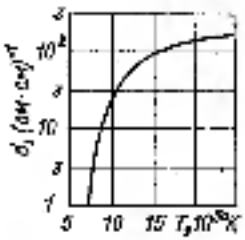


Рис. 23.33. Зависимость проводимости аэотной плазмы при атмосферном давлении от температуры [6].

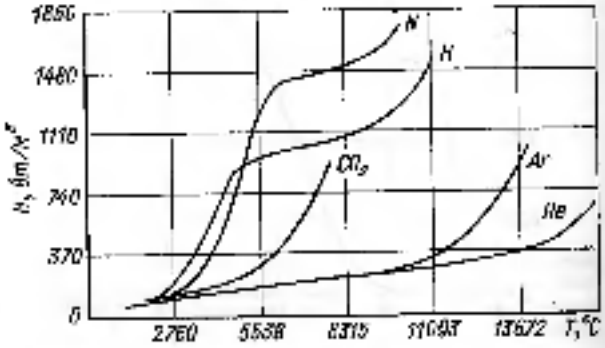


Рис. 23.36. Зависимость энтальпии от температуры для различных газов.

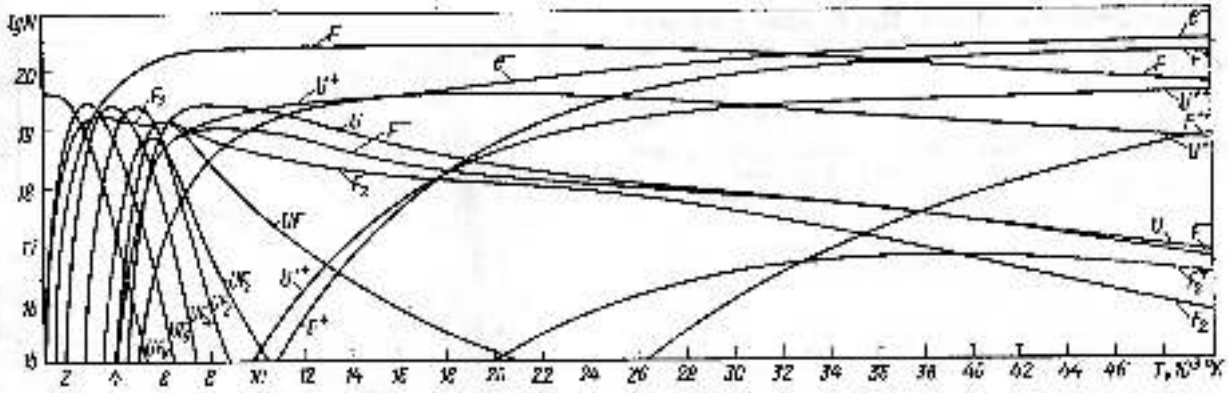


Рис. 23.37. Концентрация различных компонентов в газовой гексафторида урана [7] (p = 1,6 ат при T = 273° К).

23.7. ИСКРОВОЙ РАЗРЯД

Искровой разряд начинается с образования стримеров — самораспространяющихся электронных лавин, образующих проводящий канал между электродами. Вторая стадия искрового разряда — главный разряд происходит вдоль канала, образованного стримером, и по своим характеристикам близок к дуговому разряду, ограниченному по времени емкостью электродов и возобновляемым питанием.

Пробивное напряжение. Пробивное напряжение в воздухе при 20° С и 760 мм рт. ст. дается приближенной формулой Ритца [5]:

$$U_{пр} = 24{,}55d + 6{,}60\sqrt{d}\ \text{кв},$$

На рис. 23.38 приводится зависимость пробивного напряжения от давления воздуха и расстояния между электродами.

Материал и состояние поверхности электродов не оказывают заметного влияния на пробивное напряжение.

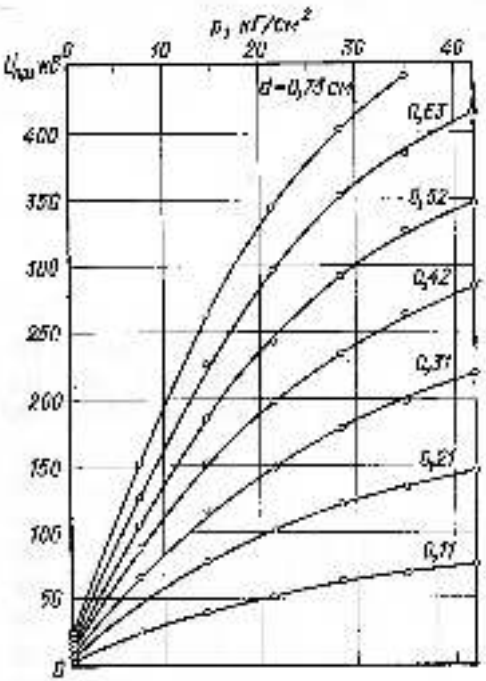


Рис. 23.38. Зависимость пробивного напряжения от давления воздуха и расстояния между плоскими электродами [5].

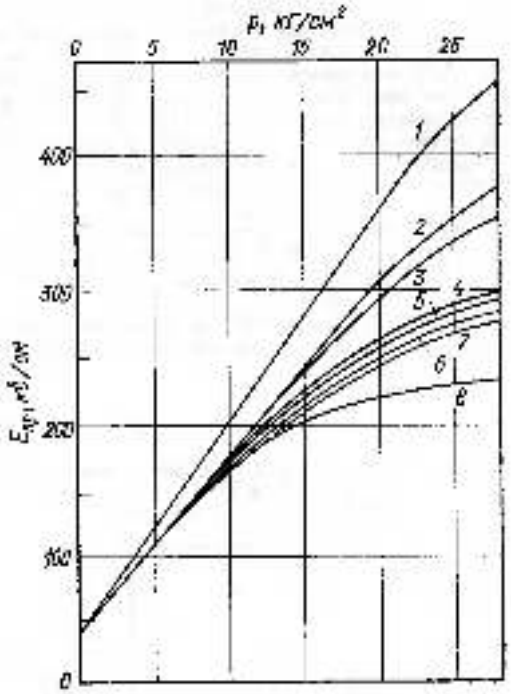


Рис. 23.39. Зависимость градиента пробивной напряженности от давления газа для различных газов и электродов [5]:

1 — воздух + нержавеющая сталь; 2 — CO_2 + нержавеющая сталь; 3 — CO_2 + N_2 + нержавеющая сталь; 4 — воздух + Al; 5 — CO_2 + Al; 6 — N_2 + нержавеющая сталь; 7 — CO_2 + N_2 + Al; 8 — N_2 + Al.

лишь при давлениях ~1 *атм*. При больших давлениях материал и состояние электродов играют заметную роль (рис. 23.39).

Таблица 23.7

Пробивные напряжения (50 *гц*, амплитудное значение) для однородного поля в воздухе
(T=20°С, p=760 *мм рт. ст.*, парциальное давление 10 *мм рт. ст.*) [5]

d, *см*	$U_{пр}$, *кв*	$E_{пр}$, *кв/см*	d, *см*	$U_{пр}$, *кв*	$E_{пр}$, *кв/см*
0,06	3,13	52,10	0,2	7,90	39,50
0,07	3,49	49,86	0,3	11,02	36,73
0,08	3,84	48,00	0,4	14,01	35,03
0,09	4,16	46,44	0,5	17,00	34,00
0,10	4,54	45,40	0,8	25,70	32,13
0,12	5,23	43,58	1,0	31,35	31,35
0,15	6,25	41,67			

Расстояние между сферическими электродами, соответствующее возникновению искрового пробоя, весьма часто служит для измерения высокого напряжения.

Запаздывание пробоя от момента приложения напряжения изменяется в широких пределах в зависимости от давления и состава газа, материала и конфигурации электродов (рис. 23.42).

Разряд молнии. Разряд молнии имеет, как правило, прерывистый характер, он состоит из отдельных импульсов тока, разделенных промежутками ~10 *мсек*.

Процесс разряда (между облаком и землей) начинается со стримера, распространяющегося ступенями или с интервалами между ступенями 15—100 *мксек*. (В случае молнии стример носит название *ступенчатого лидера*.) Средняя скорость распространения стримера ($1—5)10^7$ *см/сек*; на отдельных ступенях она составляет $5\cdot10^8$ *см/сек*.

Когда лидер (стример) достигает земли, по ионизованному каналу начинает в обратном направлении (вверх) развиваться главный разряд. Скорость его развития $2\cdot10^9$—$1{,}5\cdot10^{10}$ *см/сек*.

После паузы в несколько сотых долей секунды распространяется второй (стреловидный) лидер со скоростью:

Таблица 23.8

Пробивные напряжения между плоскими электродами в воздухе [5]
(T=20° С, p=760 *мм рт. ст.*)

d, *см*	$U_{пр}$, *кв*	d, *см*	$U_{пр}$, *кв*
1	31,35	9	240,0
2	55,7	10	265,0
3	76,8	11	290,0
4	112,0	12	315,5
5	136,5	13	338,1
6	163,8	14	363,2
7	189,9	15	387,7
8	215,0	16	412,6

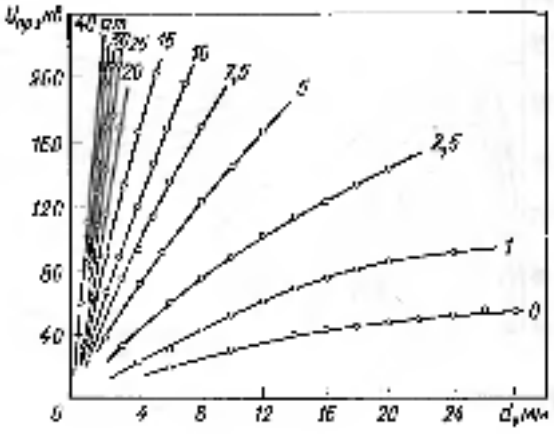


Рис. 23.40. Зависимость пробивного напряжения в воздухе при различных давлениях от длины промежутка шар (Ø = 50 *мм*) — плоскость. Давление — избыточные атмосферы (*ат*) [5].

Таблица 23.9

Пробивные напряжения (*кв*) для промежутков между шарами различных диаметров в воздухе [5]
(p=760 *мм рт. ст.*, T=20°С) (рис. 23.40)

d, *см*	Диаметр шара, *см*					
	6,25	12,5	25	50	100	200
1	31,9	31,5	31	—	—	—
1,5	45,9	45,6	45	—	—	—
2	58,2	58,2	59	58		—
2,5	69,6	72,0	72	72	73	—
3	79,1	85,2	86	85	86	—
4	94,8	109	112	112	112	—
5	—	129	137	137	137	137
6	—	146	161	164	163	163
8		174	206	214	215	215
10	—	—	243	243	266	263
15	—	—	314	372	357	388
20	—	—	—	461	503	510
25	—	—	—	532	611	630
30		—	—	601	709	745
35	—	—		640	797	856
40	—	—	—	—	876	955
45	—				940	1070
50		—		—	1010	1180
75		—	—	—	1240	1600
100	—	—		—	—	1990
150	—	—	—	—	—	2350

Таблица 23.10

Пробивное напряжение различных газов (рис. 23.41) относительно воздуха
($p = 760$ мм рт. ст.) [5]

Газ	Относительное пробивное напряжение	Газ	Относительное пробивное напряжение
CCl_4	6,3	SOF_2	2,5
SeF_6	4,5	CCl_2F_2	2,4—2,5
CCl_3F	3—4,4	SO_2	1,9—2,3
CCl_3H	4,3	C_2H_5Br	1,5
C_2H_5I	3,0	C_2H_5Cl	1,25
C_2H_5I	2,9	CF_4	1,1
$C_2Cl_2F_2$	2,8	N_2	1,0
SF_6	2,3—2,5	CO_2	0,9

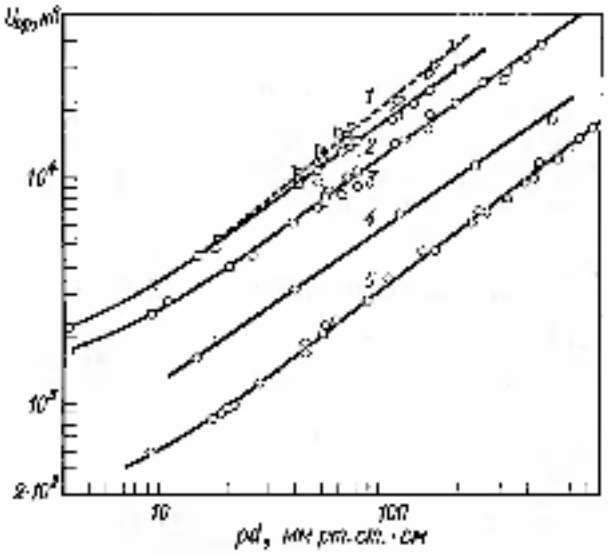


Рис. 23.41. Зависимость пробивного напряжения от pd для различных газов [5]:

1, 2 — CCl_4; 3 — фреон-12 (CCl_2F_2); 4 — воздух; 5 — водород.

$\sim 2\cdot10^8$ см/сек, а затем новый главный разряд и т. д. (до 40 отдельных разрядов). Обычно последующие разряды происходят по каналу первого разряда. В случае разряда молнии, ударяющей в высокое сооружение, первый ступенчатый лидер может начать движение не от облака, а от земли. Главный разряд в первом импульсе может отсутствовать, заменяясь непрерывно протекающим током. В большинстве разрядов земля является анодом, а атмосфера — катодом (рис. 23.43, 23.44).

Разрядный ток молнии в редких случаях превышает 10^5 а. Обычное его значение $\sim 10^4$ а (рис. 23.45). Характерная осциллограмма тока молнии на рис. 23.46. Во многих случаях кроме импульсов тока по каналу разряда протекает и непрерывный ток от десятков до нескольких тысяч ампер. Время нарастания импульса

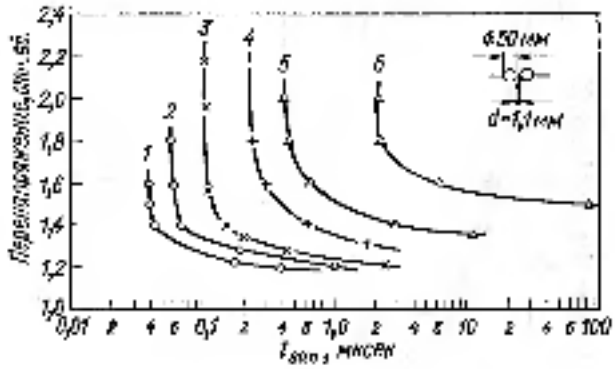


Рис. 23.42. Зависимость среднего статистического времени запаздывания $t_{зап}$ от перенапряжения при различных материалах электродов [5] ($p = 1$ атм, воздух):

1 — сплав «элькарон»; 2 — алюминий; 3 — железо; 4 — серебро; 5 — медь; 6 — сплав меди.

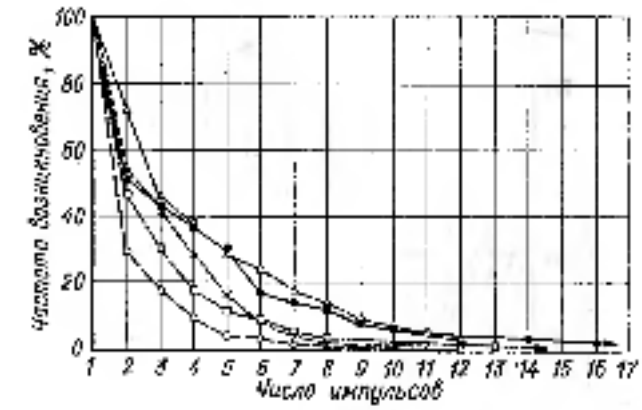


Рис. 23.43. Частота возникновения разрядов молнии с различным числом импульсов (% разрядов, в которых число импульсов меньше указанной величины); кривые получены различными авторами [5].

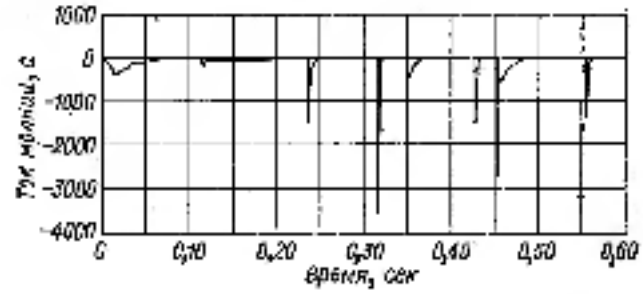


Рис. 23.44. Осциллограмма тока характерного разряда молнии [5].

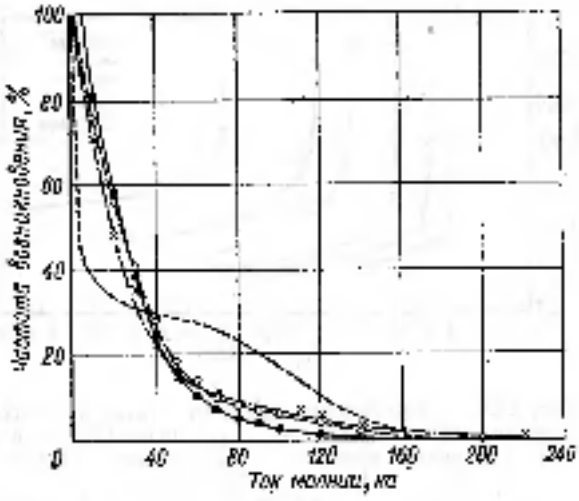


Рис. 23.45. Частота возникновения разрядов молнии с различной величиной максимального тока (данные см. подпись к рис. 23.43) [5].

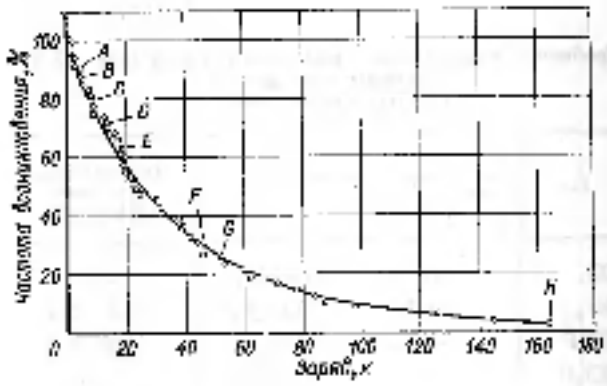


Рис. 23.47. Частота возникновения разрядов молнии с различной величиной общего нейтрализованного заряда (данные см. подпись к рис. 23.43) [5].

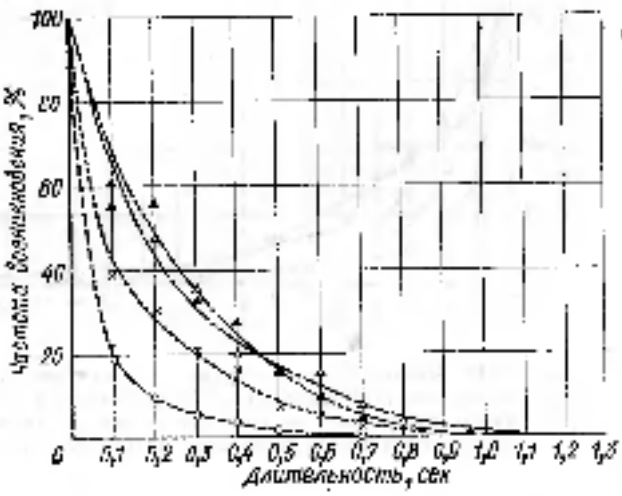


Рис. 23.46. Частота возникновения разрядов молнии различной длительности (см. подпись к рис. 23.43) [5].

тока составляет 1—19 *мксек*, время спада тока импульса 7—100 *мксек*.

Заряд, переносимый отдельным импульсом тока, колеблется от 0,1 до 5 *к* (5% импульсов несут более чем по 1,5 *к*). Суммарный заряд, нейтрализуемый при ударе молнии, может быть более 100 *к* (рис. 23.47).

23.6. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ РАЗРЯД

Пробивное напряжение (амплитудное значение) при частоте 50 *гц* практически соответствует пробивному напряжению постоянного тока, а сам разряд на переменном токе такой частоты является последовательной разверткой во времени тех разрядов, которые существовали бы при данном мгновенном значении тока и напряжения. При повышении частоты эта квазистационарная картина нарушается.

Зависимости пробивного напряжения от частоты, длины разрядного промежутка и давления для различных газов представлены на рис. 23.48—23.52. Рис. 23.50 на примере зависимости пробивного напряжения в воздухе от длины пути иллюстрирует эффект падения пробивного напряжения по достижении электроном амплитуды колебаний (с учетом их соударений с молекулами газа), равной разрядному промежутку.

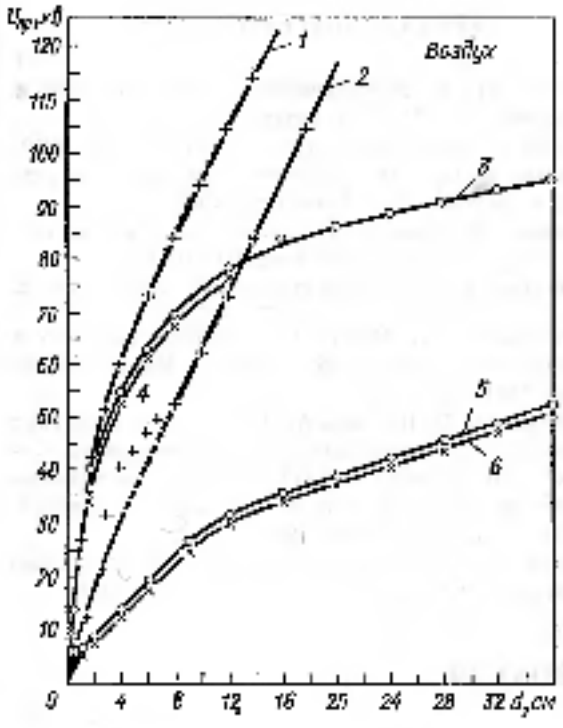


Рис. 23.48. Зависимость пробивного напряжения (воздух, p — 760 мм рт. ст.) от длины разрядного промежутка при различных частотах [5]:

1 — плоские электроды, 50 гц; 2 — игольчатые электроды, 50 гц; 3 — плоские электроды, 0,5 Мгц; 4 — плоские электроды, 1 Мгц; 5 — игольчатые электроды, 0,5 Мгц; 6 — игольчатые электроды, 1 Мгц.

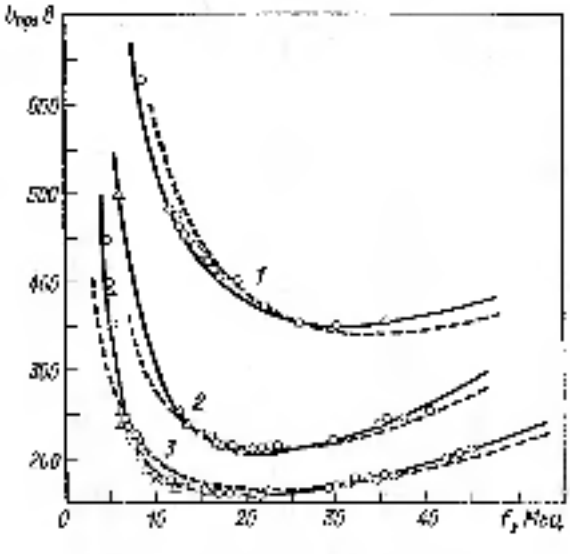


Рис. 23.49. Зависимость пробивного напряжения в аргоне от частоты при различных давлениях и длине разрядного промежутка [5]: пунктирные кривые — теория:

1 — d = 1·10⁻³ мм рт. ст., d = 10 см; 2 — p = 30·10⁻³ мм рт. ст., d = 10 см; 3 — p = 30·10⁻³ мм рт. ст., d = 5 см.

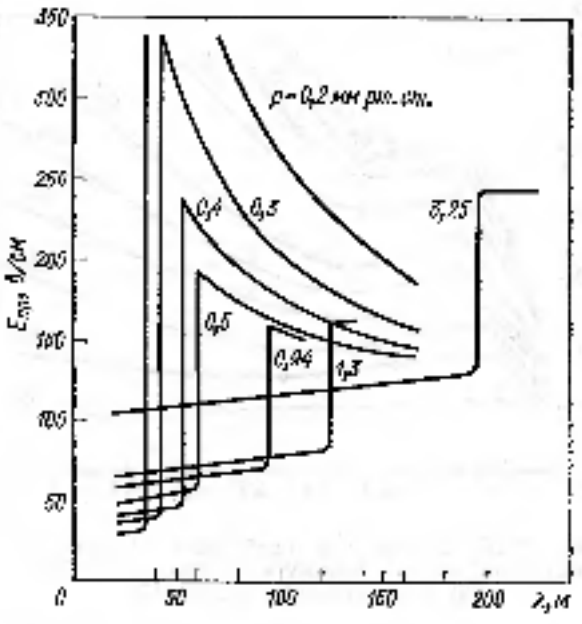


Рис. 23.50. Зависимость пробивной напряженности поля в водороде от длины волны при различных давлениях [5]. Электроды — цилиндрические трубки с плоскими торцами. Зазор — 3,55 см.

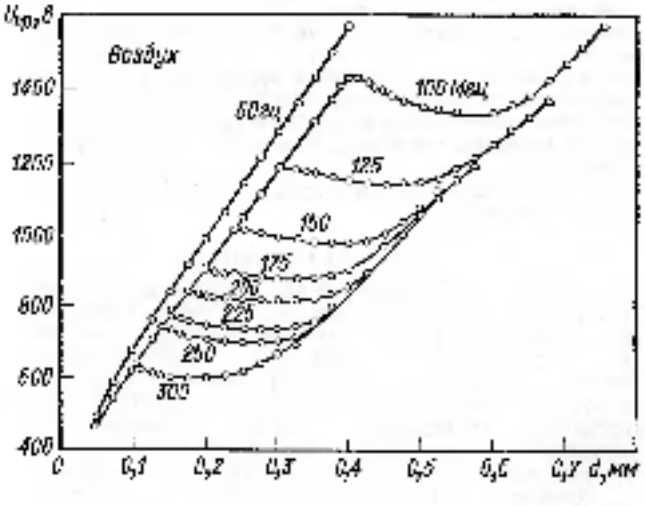


Рис. 23.51. Зависимость пробивного напряжения в воздухе от длины промежутка и частоты. Электроды плоские [5].

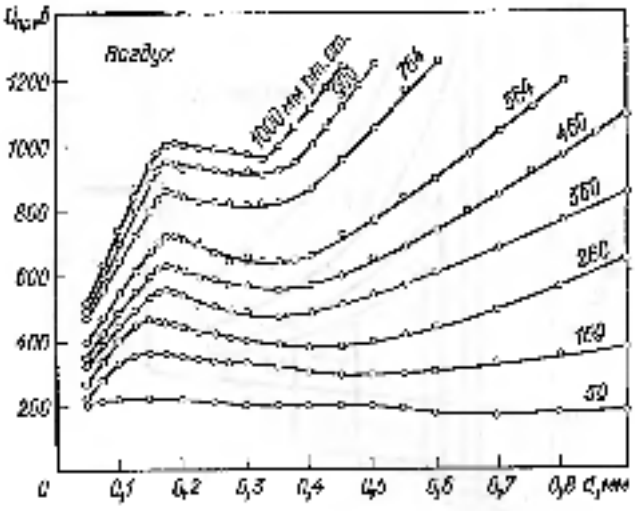


Рис. 23.52. Зависимость пробивного напряжения в воздухе от длины промежутка и давления. Частота 200 *Мгц*, электроды плоские [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кишко Н. А. Электрические явления в газах и вакууме. М.—Л., Гостехиздат, 1950.
2. Энгель А. Поднесение газов. М., Физматгиз, 1959.
3. Сливков И. Н. и др. Электрический пробой и разряд в вакууме. М., Атомиздат, 1968.
4. Ионные, плазменные и дуговые ракетные двигатели. Пер. с англ. М., Госэнергоиздат, 1961.
5. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
6. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и тепловая плазма. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
7. Сапожников В. П., Баз А. И. Уравнение состояния гексафторида урана при высоких температурах.— В сб.: Труды Всесоюз. науч.-тех. конф. по теплофизическим свойствам веществ при высоких температурах. М., Стандартгиз, 1967.
8. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. Пер. с англ. М., Госэнергоиздат, 1961.

ГЛАВА 24

ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

24.1. ВВЕДЕНИЕ

Электронная эмиссия — испускание электронов телами под влиянием внешних воздействий: нагревания, потока фотонов, электронов, ионов или сильного электрического поля. В зависимости от характера внешнего воздействия различают соответственно термоэлектронную, фотоэлектронную, вторичную электронную, ионно-электронную и автоэлектронную эмиссии. По всех видах эмиссии, кроме автоэлектронной, роль внешних воздействий сводится к увеличению энергии части электронов или отдельных электронов тела до значения, позволяющего преодолеть потенциальный порог на границе тела, с последующим выходом в вакуум или в другую среду. В случае автоэлектронной эмиссии внешнее электрическое поле превращает потенциальный порог на границе тела в барьер конечной ширины и уменьшает его высоту относительно высоты первоначального порога, вследствие чего становится возможным квантовомеханическое туннелирование электронов сквозь барьер. При этом эмиссия происходит без затраты энергии электрическим полем, чем и обусловлено название этого вида эмиссии.

Тело, испускающее электроны, называется *эмиттером*, или *катодом*.

24.2. РАБОТА ВЫХОДА

Важнейшей эмиссионной характеристикой материала катода является *работа выхода* $e\varphi$ (e — заряд электрона, φ — потенциал), равная минимальной энергии, необходимой для перемещения электрона с поверхности Ферми в твердом теле в вакуум (в точку пространства, в которой электрическое поле равно нулю) [1, 2]. Если отсчитывать потенциал от уровня, соответствующего покоящемуся электрону в вакууме, то φ — потенциал внутри кристалла, соответствующий уровню Ферми.

Внешнее электрическое поле уменьшает работу выхода (*эффект Шottки*). Если поверхность эмиттера однородна, то уменьшение работы выхода при наложении электрического поля напряженностью E (*в/см*) равно

$$\Delta(e\varphi) = (e^3E)^{1/2} = 3{,}79 \cdot 10^{-4}\, E^{1/2}\ эв.$$

Таблица 24.1

Работа выхода для химических элементов-поликристаллов (приведены рекомендуемые значения из работы [2])

Элемент	$e\varphi$, эв	Элемент	$e\varphi$, эв
Li	2,38	Mo	4,3
Be	3,92	Ru	4,80
B	4,1	Rh	4,75
C	4,7	Pd	4,8
Na	2,35	Ag	4,3
Mg	3,64	Cd	4,1
Al	4,25	In	3,8
Si	4,8	Sn	4,38
K	2,22	Sb	4,08
Ca	2,80	Te	4,73
Sc	3,3	Cs	1,81
Ti	3,95	Ba	2,49
V	4,12	La	3,3
Cr	4,58	Ce	2,7
Mn	3,83	Hf	3,53
Fe	4,31	Ta	4,12
Co	4,41	W	4,54
Ni	4,50	Re	5,0
Cu	4,40	Os	4,7
Zn	4,24	Ir	4,7
Ga	3,96	Pt	5,32
Ge	4,76	Au	4,30
As	4,72	Hg	4,52
Se	4,72	Tl	3,7
Rb	2,16	Pb	4,0
Sr	2,35	Bi	4,4
Y	3,3	Th	3,30
Zr	3,9	U	3,3
Nb	3,99		

Таблица 24.2

Работа выхода для химических элементов на поликристаллических подложках, покрытых оптимальным слоем адсорбата [2]

Адсорбент — адсорбат	φ, эв	Адсорбент — адсорбат	φ, эв
Be—Cs	1,94	Pt—O	0,55
C—Cs	1,37	Pt—Na	2,10
Ti—Cs	1,32	Pt—K	1,62
Cr—Cs	1,71	Pt—Rh	1,57
Fe—Cs	1,82	Pt—Cs	1,36
Ni—Cs	1,37	Pt—Ba	1,9
Cu—Cs	1,64	Pt—Ba	3,28
Cu—Ba	3,35	Au—O	0,46
Co—Ba	2,2	Au—O	5,66
Zr—Cs	3,93	Au—Ba	2,3
Mo—Cs	1,54	Au—Ba	3,35
Mo—Th	2,68	W—O—Na	1,72
Ag—Ba	1,56	W—O—K	1,76
Hf—Cs	3,62	Сталь	1,41
Ta—Cs	1,1	ЭИ869Т—Cs	
Ta—Cs	1,6	Сталь 304—Cs	1,52
W—Li	2,18	Ag_2O—Cs	0,75
W—O	6,20	NbC—Cs	1,9
W—Ba	1,75	ZrC—Cs	1,60
W—La	2,2	Mo_2C—Cs	1,46
W—Th	2,63	Ta_2C—Cs	1,4
Re—Cs	1,45	$MoSi_2$—Cs	1,76
Rr—Ba	2,3	$TaSi_2$—Cs	1,47
Re—Th	2,58	WSi_2—Cs	1,47

Таблица 24.3

Работа выхода соединений на подложках [2]. Слои активированы прогревом

Адсорбент — адсорбат	φ, эв	Адсорбент — адсорбат	φ, эв
Al—BaO	1,80	Ag—BaO	1,92
Ti—BaO	1,58	Ta—BaO	1,58
Cr—BaO	1,79	W—BaO	1,84
Fe—BaO	1,61	W—ThO_2	2,5
Ni—BaO	1,35	Pt—BaO	1,71
Mo—BaO	1,39	Au—BaO	1,10
Mo—ThO_2	2,9	LaB_6—BaO	2,27—2,07

24.3. ТЕРМОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Плотность тока термоэлектронной эмиссии j_s эмиттера с однородной поверхностью при слабом внешнем электрическом поле, не влияющем на работу выхода, определяется уравнением Ричардсона — Дешмана [3]:

$$j_s = AT^2 \exp\left(-\frac{e\varphi_0}{kT}\right),$$

где $A = A_0(1 - \overline{R}_e)$, $e\varphi_0$ — эффективная работа выхода эмиттера; $\overline{R}_e$ — коэффициент отражения электронов от потенциального барьера, усредненный по энергии электронов; $A_0 = 4\pi m e k^2/h^3 = 120{,}4$ $a/(см^2 \times \times град^2)$ — универсальная постоянная; k — постоянная Больцмана.

Термоэлектронный катод (термокатод) — элемент электровакуумного прибора, являющийся источником электронов. Основные типы термоэмиссионных катодов: металлические, оксидные, металлопористые и боридные.

Металлические термокатоды, изготавливаемые из торированного вольфрама и торированного карбидированного вольфрама, в настоящее время находят лишь ограниченное применение.

Оксидный термокатод — смесь окислов металлов, нанесенная на металлический керн. В низкотемпературных катодах, работающих в интервале температур от 900 до 1300° К, используются смеси окислов щелочноземельных металлов — бария, кальция и стронция. Эти окислы получаются при разложении карбонатов щелочноземельных металлов, нанесенных на металлический керн катода, в процессе его прогрева непосредственно в вакуумном приборе, в котором катод должен работать. Оксидные низкотемпературные катоды наиболее широко используются в электровакуумных приборах. В высокотемпературных оксидных катодах, работающих в интервале температур от 1400 до 1900° К, используются окислы иттрия и тория. Такие термокатоды применяются главным образом в магнетронах.

Металлопористый вольфрамо-бариевый термокатод — пористая вольфрамовая губка, внешняя поверхность которой покрыта пленкой бария, снижающей работу выхода и обеспечивающей получение большого тока термоэмиссии. В процессе работы пленка бария разрушается вследствие испарения, ионной бомбардировки и под воздействием газов, выделяющихся из деталей прибора. Возобновление пленки происходит при поступлении бария из вольфрамовой губки, освобождающегося при разложении содержащегося в ней активного вещества. Существует несколько типов металлопористых вольфрамо-бариевых термокатодов: *диспенсер*, или *L-катод* (состоит из камеры, заполненной активным веществом — карбонатом бария-стронция и запрессованной — губкой, наружная сторона которой является эмиттирующей поверхностью); *прессованные* (представляют собой пористую губку из тугоплавкого металла — вольфрама, рения или молибдена, поры которой заполнены активным веществом — алюминатом или вольфраматом бария-кальция). Металлопористые вольфрамо-бариевые термокатоды широко используются в вакуумных СВЧ-приборах); *керамо-металлические*, или *керметкатоды* (представляют собой пористую вольфрамовую губку, заполненную активным веществом, окисью тория или металлическим торием). Катоды этого типа работают при температуре 1650—2000° К и предназначены для использования главным образом в магнетронах).

Боридный термокатод — катод на основе металлоподобных соединений типа MeB_6, где Me — щелочно-земельные и редкоземельные металлы или торий. В качестве термокатода наиболее широко применяется гексаборид лантана, реже — гексаборид иттрия и гадолиния и диборид хрома. Термоэмиссионные катоды из гексаборида лантана работают при температуре 1050° К и обеспечивают получение плотности термоэмиссионных токов до 40—50 $a/см^2$ в режиме пространственного заряда, а при большой напряженности электрического поля у поверхности катода — до 200 $a/см^2$. Высокая механическая прочность и устойчивость таких катодов к ионной бомбардировке позволяет использовать их в внешних автоэлектронной эмиссии (при напряженности внешнего электрического поля $\geq 10^8$ $в/см$ значительная часть эмиссионного тока обусловлена туннелированием

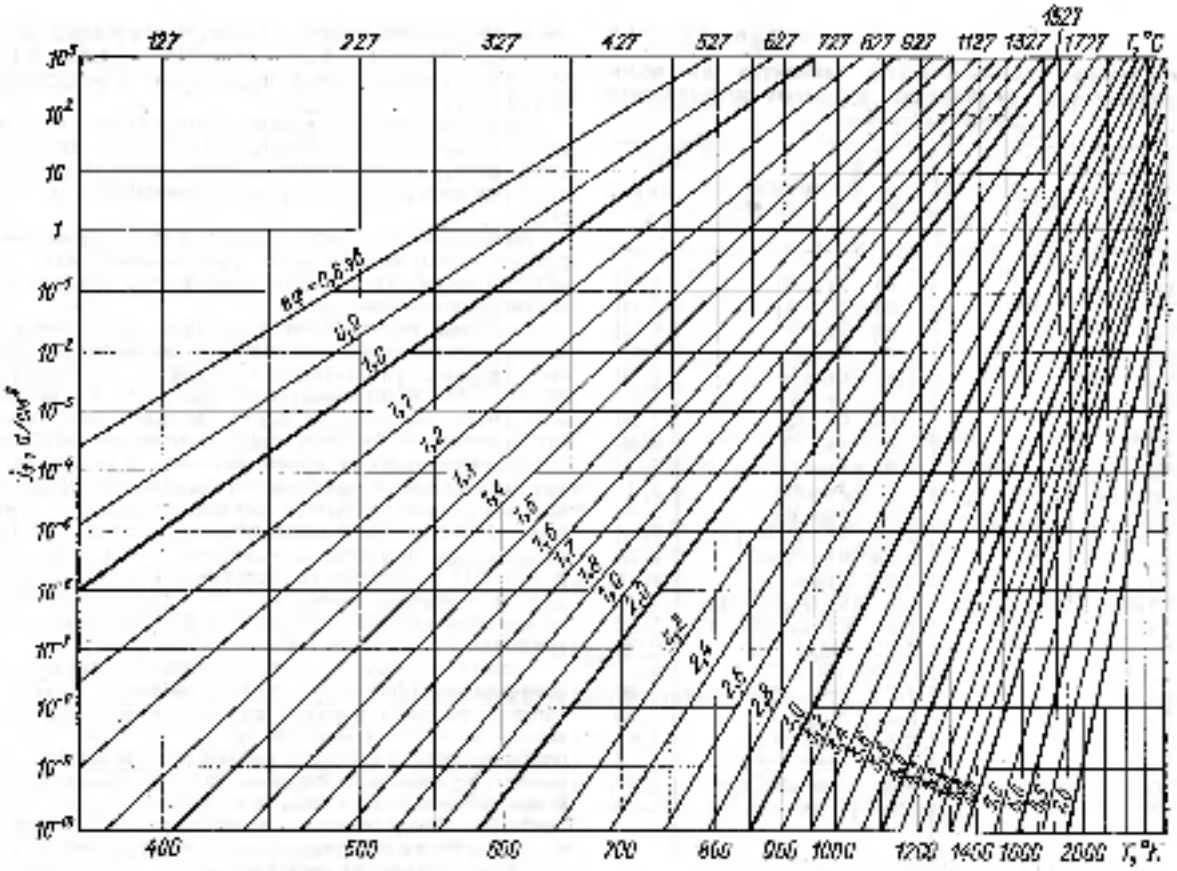


Рис. 24.1. Зависимости тока термоэлектронной эмиссии от температуры и работы выхода катода [10].

электронов сквозь барьер. В этом режиме катод из гексаборида лантана при температуре 1400—1500 К может давать плотность термоэмиссионного тока до 1000 а/см². Катоды из гексаборида лантана не отравляются на воздухе и устойчиво работают в относительно плохом вакууме. Срок их службы не зависит от давления остаточных газов в приборе вплоть до давлений $\sim 10^{-3}$ мм рт. ст. Эти катоды используются в усилительных и в различных вакуумных устройствах.

Основные характеристики термоэлектронных катодов: работа выхода $e\varphi$, рабочая температура T; плотность термоэмиссионного тока j_s и ее зависимость от температуры; скорость испарения активных веществ при рабочей температуре $v_{исп}$; эффективность катода η — отношение плотности термоэмиссионного тока к мощности, затраченной на нагревание катода; критерий качества катода — отношение работы выхода к теплоте испарения при отношении плотности термоэмиссионного тока к скорости испарения активного вещества при данной температуре.

Свойства термокатодов

В табл. 24.4—24.6, 24.10 используются обозначения: δ — толщина слоя, испарившегося за 1 ч, $\delta_{кр}$ — критическая толщина слоя [10], $v_{исп}$ — скорость испарения катода.

Таблица 24.4

Термоэмиссионные свойства вольфрамового термокатода [10]
Чистый вольфрам; $\gamma = 19{,}3$ г/см³; работа выхода $e\varphi = 4{,}54$ эв

T, °К	j_s, а/см²	$j_{нет}$, а/(см²·сек)	$j_s/j_{нет}$, 1/с	d, мкм	Срок службы, ч: $\varphi = 0{,}1$ мм; $d_{кр} \sim 3$ мкм	$\varphi = 1$ мм; $d_{кр} \sim 30$ мкм	Массивный катод $d_{кр} \sim 150$ мкм
2100	$3{,}0 \cdot 10^{-3}$	$2{,}0 \cdot 10^{-13}$	$2{,}0 \cdot 10^{10}$	$3{,}7 \cdot 10^{-14}$	$8 \cdot 10^{8}$	$8 \cdot 10^{9}$	$4 \cdot 10^{9}$
2200	$1{,}3 \cdot 10^{-2}$	$2{,}1 \cdot 10^{-12}$	$0{,}2 \cdot 10^{12}$	$3{,}9 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{6}$	$8 \cdot 10^{8}$	$4 \cdot 10^{7}$
2300	$4{,}1 \cdot 10^{-2}$	$1{,}8 \cdot 10^{-11}$	$2{,}3 \cdot 10^{9}$	$3{,}3 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{4}$	$9 \cdot 10^{5}$	$5 \cdot 10^{6}$
2400	$1{,}2 \cdot 10^{-1}$	$1{,}2 \cdot 10^{-10}$	$9{,}3 \cdot 10^{8}$	$2{,}4 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{3}$	$1 \cdot 10^{4}$	$5 \cdot 10^{5}$
2500	$3{,}0 \cdot 10^{-1}$	$7{,}6 \cdot 10^{-10}$	$4{,}0 \cdot 10^{8}$	$1{,}4 \cdot 10^{-6}$	2150	$2 \cdot 10^{4}$	$1 \cdot 10^{6}$
2600	$7{,}0 \cdot 10^{-1}$	$3{,}9 \cdot 10^{-9}$	$1{,}8 \cdot 10^{8}$	$7{,}3 \cdot 10^{-6}$	410	4100	$2 \cdot 10^{4}$
2700	1,6	$1{,}6 \cdot 10^{-8}$	$0{,}9 \cdot 10^{7}$	$3{,}3 \cdot 10^{-5}$	90	900	4500
2800	3,5	$7{,}4 \cdot 10^{-8}$	$4{,}7 \cdot 10^{7}$	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	21	210	1080
2900	7,3	$2{,}6 \cdot 10^{-7}$	$2{,}6 \cdot 10^{7}$	$5{,}2 \cdot 10^{-4}$	5,8	58	290
3000	14,0	$9{,}5 \cdot 10^{-7}$	$1{,}7 \cdot 10^{7}$	$1{,}6 \cdot 10^{-3}$	1,7	17	84

Оксидный термокатод

Таблица 24.5

Термоэмиссионные свойства BaO–SrO-оксидного термокатода [10]
Средняя плотность $\rho = 5{,}5$ г/см³; работа выхода $e\varphi = 1{,}6$ эв; толщина активного слоя 20 мкм (10 мг/см²); керн никелевый; $d_{кр} = 6$ мкм

T, °К	j_s, а/см²	$j_{нет}$, а/(см²·сек)	$j_s/j_{нет}$, 1/с	d*, мкм	Срок службы*, ч
500	10^{-6}	—	—	—	—
600	$4 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	—
700	$7 \cdot 10^{-3}$		—	—	—
800	$4 \cdot 10^{-2}$	—			—
900	0,1	—	—	—	
1000	3,0	$6 \cdot 10^{-11}$	$6 \cdot 10^{10}$	$3{,}2 \cdot 10^{-7}$	5000 ($2 \cdot 10^{4}$)
1100	12	$2 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{9}$	$1{,}3 \cdot 10^{-6}$	115 (460)
1200	50	$8 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{8}$	$5{,}2 \cdot 10^{-6}$	3 (11)
1300	200	$1 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{8}$	$0{,}5 \cdot 10^{-5}$	0,25 (0,92)

* Значения для BaO. Для BaO–SrO-термокатодов скорости испарения несколько меньше.

Таблица 24.6

Термоэмиссионные свойства металлопористого вольфрамо-бариевого термокатода (L-катод) [10]
Работа выхода $e\varphi = 1{,}8 \div 2{,}0$ эв; количество BaO 30 мг/см²

T, °К	j_s, а/см²	$j_{нет}$, а/(см²·сек)	$j_s/j_{нет}$, 1/с	d, мкм	Срок службы*, ч
800	$1 \cdot 10^{-3}$	—	—	—	—
900	$3 \cdot 10^{-3}$	—	—	—	—
1000	$5 \cdot 10^{-3}$	—	—	—	—
1100	$6 \cdot 10^{-3}$	—	—	—	—
1200	0,4	—	—	—	—
1300	2	$1{,}7 \cdot 10^{-10}$	$1{,}2 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{4}$
1400	10	$2 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{9}$	$7 \cdot 10^{-3}$	4300
1500	30	$1{,}7 \cdot 10^{-8}$	$1{,}8 \cdot 10^{9}$	$6 \cdot 10^{-2}$	500
1600	90	$1 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{8}$	0,4	75
1700	300	$5{,}5 \cdot 10^{-7}$	$5{,}6 \cdot 10^{8}$	2	15

* Срок службы определяется моментом остановки непрерывно движения при стандартном катоде [10].

Таблица 24.7

Термоэмиссионные характеристики и срок службы прессованных металлопористых оксидно-никелевых катодов [3]

T, °К	j_s, а/см²	Срок службы, ч	Режим отбора тока
1200	0,5	5000	Стационарный
1220	0,6	5000	»
1270	1	5000	»
1340	3	3000	»
1250	10	600	Импульсный

Таблица 24.8

Термоэмиссионные свойства керамо-металлических термокатодов различного состава [8]

Состав (состав, %)	T, °С	j_s, а/см² Импульсный режим	j_s, а/см² Стационарный режим
ThH_2 ; W_2C ; W (0,5÷10 ; 89,5)	1700	-	
W+ThO_2 (96÷4)	1500	0,8	—
	1600	2,0	—
W+ThO_2+B (95÷4 ; 1)	1370	—	0,4
W+ThO_2 ; B (97,5 ; 2÷0,5)	1370	—	0,4
W+La_2O_3 (70÷30)	1300	-	1,4
W ; Nd_2O_3 (70 ; 30)	1300	—	0,5
W ; Gd_2O_3 (70÷30)	1400	-	0,4
W ; $\left(\frac{3}{4}\ Gd_2O_3+\frac{1}{4}\ La_2O_3\right)$ (70 ; 30)	1400	—	0,86
W+Th (пропитанный)	1600		2- 3

Таблица 24.9

Термоэмиссионные константы боридов [8]

$$\varphi_T=\varphi_0+\frac{d\varphi}{dT}T$$

Соединение	φ_0, эв	$\frac{d\varphi}{dT}\cdot10^4$, эв/град	Коэффициент отражения электронов	Соединение	φ_0, эв	$\frac{d\varphi}{dT}\cdot10^4$, эв/град	Коэффициент отражения электронов
ScB_6	2,90	2,3	0,58	NdB_6	3,97	1,6	0,8
TiB_2	3,88		0,82	TmB_6	4,9	—	
VB_2	3,95	—	0,8	GdB_6	2,00	4,0	0,8
CrB_2	3,36	—	0,77	TbB_6	3,26	—	
MnB_2	4,14	—	—	DyB_6	3,55	1,5	0,8
SrB_6	2,67	2,5	—	HoB_6	3,42	1,6	0,7
YB_6	2,22	2,08	1,0	ErB_6	3,37	2,3	
ZrB_2	3,67	2,0	0,85	TmB_6 ; +TmB_6	3,36	—	—
PaB_6	3,46	7,6	—				
LaB_6	2,68	1,4	0,95	YbB_6	3,13	3,0	—
CeB_6	2,59	2,3	0,68	LuB_6	3,0	1,6	0,8
PrB_6	3,46	2,5	0,8	ThB_6	2,92	2,0	

Таблица 24.10

Термоэмиссионные свойства гексаборида лантана LaB_6 [10]. Плотность ρ—2,61 г/см³; работа выхода $e\varphi_T$—2,68 эв

T, °К	j_s, а/см²	$j_{эл}$, а/(см²·сек)	$j_s/j_{эл}$, в/с	σ, мм	Срок службы катода с жидким подогревом, ч: Технический вакуумметр, 5·10⁻⁶ мм рт. ст.	Сверхвысокий вакуумметр, $5\cdot10^{-10}$ мм рт. ст.
1600	0,4	$1\cdot10^{-11}$	$4,0\cdot10^{10}$	$1,4\cdot10^{-5}$	$2\cdot10^{6}$	$7\cdot10^{8}$
1700	1,0	$1\cdot10^{-10}$	$1,0\cdot10^{10}$	$1,4\cdot10^{-4}$	2150	$7\cdot10^{6}$
1800	3,0	$1\cdot10^{-9}$	$3,0\cdot10^{9}$	$1,4\cdot10^{-3}$	207	$7\cdot10^{5}$
1900	8,5	$9\cdot10^{-8}$	$9,5\cdot10^{7}$	$1,2\cdot10^{-4}$	25	600
2000	25	$7\cdot10^{-6}$	$3,6\cdot10^{6}$	$1,0\cdot10^{-3}$	3	100
2100	100	$6\cdot10^{-7}$	$1,7\cdot10^{8}$	$6,3\cdot10^{-4}$	0,35	12
2200	400	$4\cdot10^{-6}$	$1,0\cdot10^{8}$	$5,55\cdot10^{-4}$	0,06	1,8

Сравнительные характеристики различных термокатодов

Таблица 24.11

Работа выхода $e\varphi$, теплота испарения q и критерий качества $e\varphi/q$ современных термокатодов [3]

Тип катода	$e\varphi$, эв	q, эв	$e\varphi/q$	Рабочая температура (°К) при долговечности: 10⁴ ч	1000 ч
Вольфрамовый . . .	4,54	8,0	0,57	2500*	2500*
Танталовый	4,2	7,9	0,53	2000*	2200*
Торированный . .	3,2	7,6	0,42	1770	1870
Бариевый	2,6	6,8	0,41	1720	1870
Вольфрамо-бариевый	2,1	4,7	0,45	1300	1420
Оксидный	1,5	4,0	0,4	1030	1100

* Значения приблизительные, так как долговечность катодов сильно зависит также от диаметра катода.

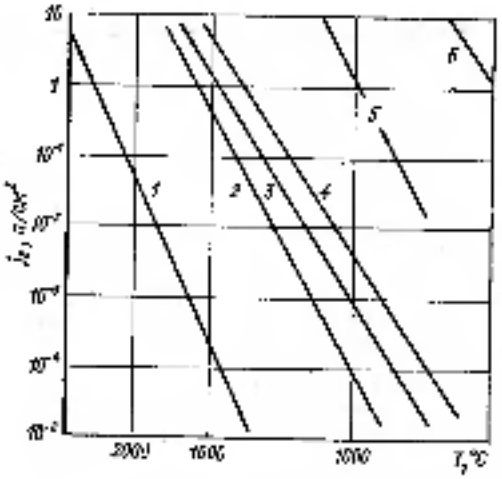


Рис. 24.2. Зависимость тока термоэлектронной эмиссии от температуры для различных катодов [2]:

1 — вольфрам; 2 — торированный вольфрам; 3 — окись тория; 4 — гексаборид лантана; 5 — L-катод; 6 — нагретый.

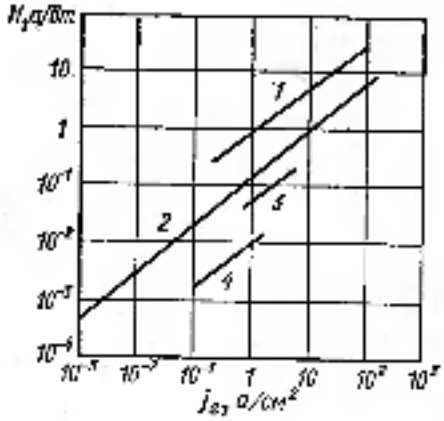


Рис. 24.3. Зависимость эффективности (расчетной) от плотности тока эмиссии для катодов различных типов [3]:

1 — оксидный; 2 — L-катод; 3 — скандат-торий; 4 — вольфрамовый.

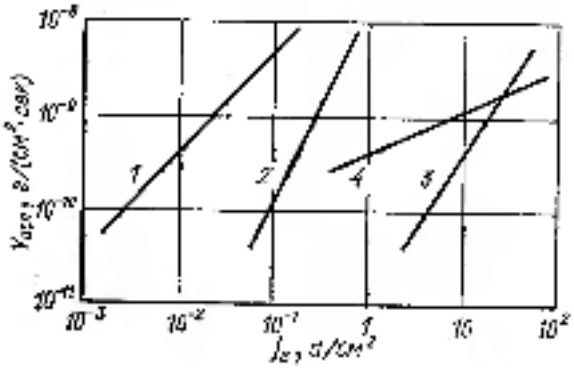


Рис. 24.4. Зависимость скорости испарения от плотности тока эмиссии для различных материалов [3]:

1 — вольфрам; 2 — торированный вольфрам; 3 — импрегнированный катод; 4 — гексаборид лантана.

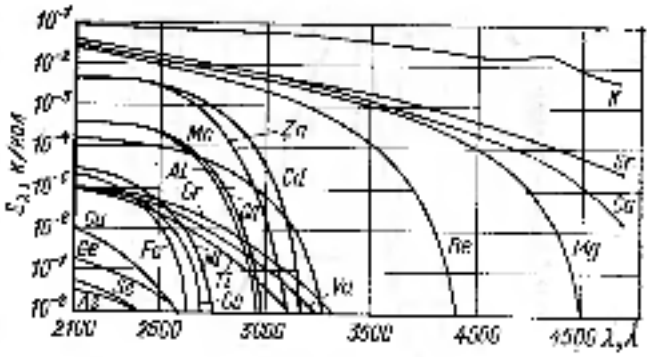


Рис. 24.5. Спектральная чувствительность металлов в ультрафиолетовом диапазоне [5]. Плохообезгаженные поверхности.

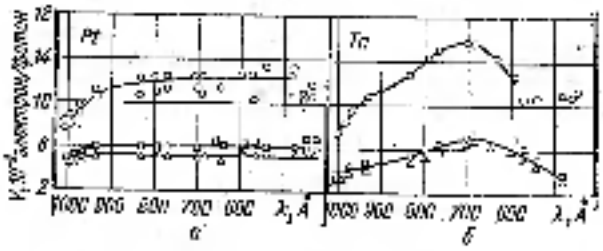


Рис. 24.6. Спектральные характеристики платины (а) и тантала (б) в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне [14]:

Сплошные — необезгаженные, пунктирные — обезгаженные металлы; Г — после прогревания на воздухе в течение 17 ч.

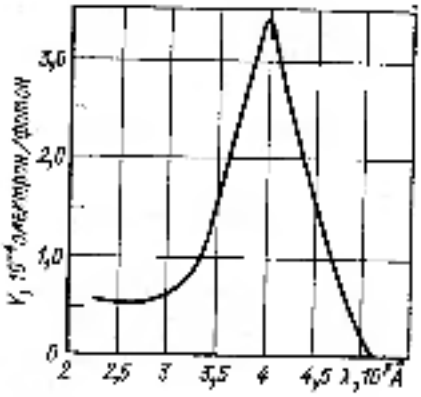


Рис. 24.7. Спектральная характеристика квантового выхода фотоэмиссии цезия [6].

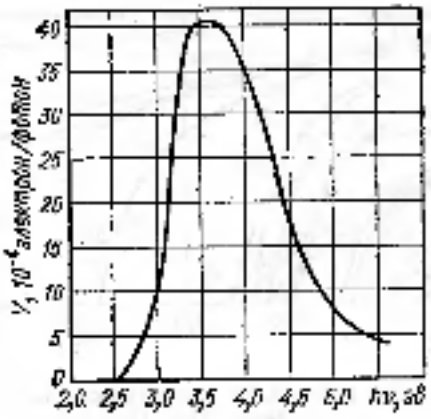


Рис. 24.6. Спектральная характеристика квантового выхода фотоэмиссии натрия [6].

24-4. ФОТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Основные законы фотоэлектронной эмиссии (ФЭ) [1, 4—6]. 1. Величина фототока насыщения пропорциональна потоку фотонов, падающих на поверхность тела:

$$I = eYF/h\nu,$$

где F — интенсивность излучения в энергетических единицах, Y — квантовый выход (*электрон/фотон*) — число эмитированных электронов на каждый фотон, падающий на поверхность фотоэмиттера.

2. Для каждого вещества при $T = 0$ существует минимальная (пороговая) частота излучения ν_0, способного вызвать ФЭ; $\lambda_0 = c/\nu_0$ — красная граница ФЭ; $h\nu_0$ — порогова энергия, или фотоэлектрическая работа выхода.

3. *Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов* не зависит от интенсивности излучения и линейно связана с его частотой: $(mv^2/2)_{max} = h(\nu - \nu_0)$. Пороговая частота ФЭ ν_0 строго определена только при $T = 0$. При $T > 0$ ФЭ наблюдается вблизи порога и при частотах $\nu < \nu_0$. ФЭ из металлических фотокатодов при частотах излучения, не очень далеких от пороговой частоты ($\nu \leq 1{,}5\,\nu_0$), хорошо согласуется феноменологической теорией Фоулера [1], согласно которой

$$I = eA_1T^2 \exp\left(-\frac{h\nu_0 - h\nu}{kT}\right), \quad \nu < \nu_0;$$

$$I = e\frac{A_1}{2}\left[\frac{h^2}{k^2}(\nu - \nu_0)^2 + \frac{\pi^2}{3}T^2\right], \quad \nu > \nu_0,$$

где e — отношение плотности возбужденных состояний электронов вблизи поверхности эмиттера к плотности нормального электронного газа в эмиттере ($e = F/h\nu$), $A_1 = 4\pi emk^2/h^3$ — постоянная Ричардсона. Пороговая энергия ФЭ $h\nu_0$ в металлах совпадает с термоэлектронной работой выхода $e\varphi$. В полупроводниках спектральная зависимость квантового выхода ФЭ вблизи порога ФЭ имеет вид:

$$Y = (h\nu - h\nu_0)^m,$$

где $m = 3/2$ для непрямых оптических переходов, $m = 1$ для $m = 2$ для прямых оптических переходов и выхода электронов из полупроводника соответственно без рассеяния и при упругом рассеянии. ФЭ из полупроводника может быть обусловлен оптическим возбуждением электронов из зоны проводимости (в примесных полупроводниках n-типа), с уровней примесей или дефектов или из валентной зоны. Для каждого из этих случаев $h\nu_0$ имеет свое значение. Обычно, если иное не оговорено, под фотоэлектрической работой выхода понимают минимальную энергию фотонов, при которой начинается ФЭ из валентной зоны полупроводника. Это значение может совпадать с термоэлектронной работой выхода $e\varphi$ полупроводника или быть больше нее. Специальной обработкой поверхности цезием и кислородом у некоторых полупроводников — германия (Si, GaAs, твердые растворы GaAs — GaSb, GaAs — InAs, InAs-InP) удается снизить сродство к электрону, (т. е. разность энергий покоящегося электрона в вакууме и на дне зоны проводимости в полупроводнике) до нуля или даже сделать его отрицательным. При этом фотоэлектрическая работа выхода становится равной ширине запрещенной зоны полупроводника, а квантовый выход ФЭ резко возрастает, так как выходить из полупроводника в вакуум могут электроны, перешедшие излучением из валентной зоны в зону проводимости и имеющие в ней практически нулевую энергию.

Основные типы фотоэмиссионных катодов. *Металлические фотокатоды* (используются для регистрации коротковолнового ультрафиолетового излучения с длиной волны $\lambda < 2000$ Å); *сурьмяно-щелочные* Sb_2Cs_3, SbBi, SbK,NaCs (используются для регистрации ближнего ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного излучений $2000\ \text{Å} < \lambda < 9000$ Å); *кислородно-серебряно-цезиевый* фотокатод (используется для регистрации длинноволновой части видимого и инфракрасного излучений с длиной волны до $\lambda = 1{,}1$ мкм); *фотокатоды с отрицательным сродством* к электрону на основе монокристаллического кремния или полупроводников типа $A^{III}B^{V}$ и их твердых растворов или тонких пленок этих материалов со сниженной работой выхода (используются главным образом для регистрации ближнего инфракрасного излучения).

Основные характеристики фотокатодов. *Квантовый выход* $Y\left(\frac{\text{электрон}}{\text{фотон}}\right) = \frac{I/e}{F_\nu/h\nu}$ — число выделенных в вакууме фотоэлектронов, приходящихся на каждый падающий на поверхность фотокатода фотон.

Спектральная чувствительность $S_\lambda\left(\frac{a}{вт}\right) = \frac{\lambda\,(мкм)}{1{,}236 \cdot 10^{-4}}\,Y$ — фототок насыщения на единицу мощности падающего на фотокатод монохроматического излучения.

Спектральная характеристика — зависимость S_λ или Y от частоты или длины волны излучения.

Интегральная чувствительность S — отношение фототока насыщения к интенсивности потока излучения стандартного источника света, за который обычно принимают вольфрамовую лампу накаливания с температурой нити 2850° К:

$$S = \frac{\int_0^\infty S_\lambda F_\lambda\, d\lambda}{\int_0^\infty F_\lambda\, d\lambda}, \quad a/лм.$$

$$S = \frac{\int_0^\infty S_\lambda F_\lambda \, d\lambda}{683 \int_0^\infty F_\lambda K_\lambda \, d\lambda} \text{ а/лм},$$

где K_λ — относительная спектральная чувствительность «дневального» человеческого глаза $K_{\lambda_{макс}} = K_{\lambda=0,555\ мкм} = 683$ лм/вт.

Плотность теплового тока j_T — плотность тока термоэмиссии необлучаемого фотокатода при рабочей температуре. Тепловой ток является основным источником шума в фотоэлектронных приборах при регистрации слабых потоков излучения. Среднеквадратический ток шума в отсутствие излучения дается формулой Найквиста:

$$(\overline{i_ш^2})^{1/2} = (4kTj_T sΔf)^{1/2},$$

где s — площадь фотокатода, $Δf$ — ширина полосы частот регистрирующего устройства.

Таблица 24.12

Длина волны фотоэлектрического порога чистых металлов [5]

Металл	λ_T, Å	Металл	λ_T, Å	Металл	λ_T, Å
Церий	4800	Титан	3150	Хром	2840
Калций	3830	Тантал	3080	Вольфрам	2700
Торий	3650	Кадмий	2990		
Уран	3400	Ванадий	2870	Железо	2680
Магний	3350	Молибден	2850	Никель	2650
Цирконий	3300			Платина	2000

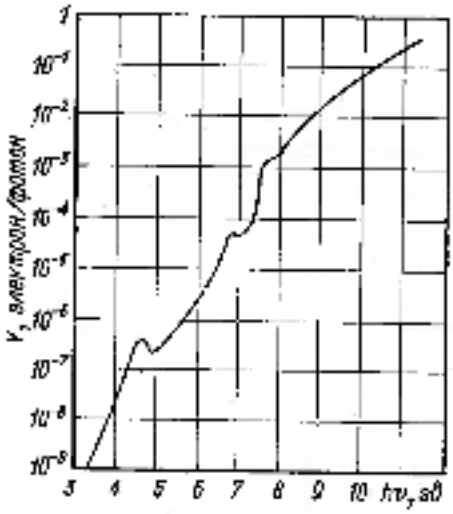


Рис. 24.9. Спектральная характеристика квантового выхода фотоэмиссии MgO [6].

Таблица 24.13

Ширина запрещенной зоны E_g, сродство к электрону χ и порог фотоэмиссии $h\nu_0$ различных полупроводниковых материалов [5]

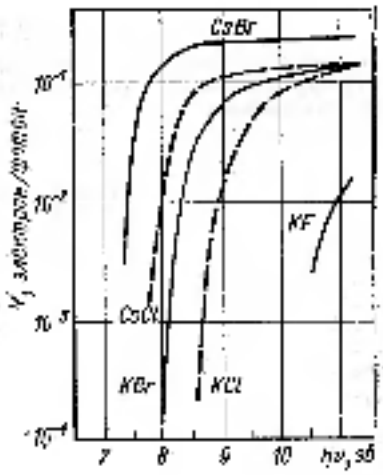
Материал	Химическая формула	E_g, эв	χ, эв	$h\nu_0$, эв
Бария окись	BaO	3,7	1,3	5
Бария титанат	$BaTiO_3$	2,7	2,0	5,3
Висмута теллурид	Bi_2Te_3	0,1	5,2	5,3
Галлия антимонид	GaSb	0,7	4,1	4,8
Галлия арсенид	GaAs	1,4	4,1	5,5
Германий	Ge	0,7	4,2	4,9
Индия антимонид	InSb	0,2	4,6	4,8
Индия арсенид	InAs	0,4	4,9	5,3
Индия фосфид	InP	1,3	4,4	5,7
Кадмия селенид	CdSe	3	4	7
Кадмия сульфид	CdS	2,4	3,8–4,8	6,2–7,2
Кадмия теллурид	CdTe	1,5	4,4	5,9
Калия иодид	KI	6,2	1,1	7,3
Кремний	Si	1,1	4	5,1
Кремния карбид (кубич.)	SiC	2,2	4,8	7
(гекс.)	SiC	2,9	4,1	7
Лития иодид	LiI	5,9	1,4	7,3
Лития фторид	LiF	12	1	13
Магния антимонид	Mg_3Sb_2	0,6	3,0	3,8
Магния окись	MgO	8,7	1	< 10
Меди иодид	CuI	3	3	6
Натрия иодид	NaI	5,8	1,5	7,3
Ртути селенид	HgSe	0,7	4,4	5,1
Ртути теллурид	HgTe	0,5	4	4,5
Рубидия иодид	RbI	6,1	1,2	7,3
Рубидия теллурид	Rb_2Te	3,3	< 0,5	3,7
Свинца сульфид	PbS	0,4	< 4,2	< 4,6
Свинца теллурид	PbTe	0,3	4,7	5
Селен	Se	2,3	3,7	6
Серебра бромид	AgBr	2,5	3,5	6
Серебра хлорид	AgCl	3	3	6
Теллур	Te	0,3	4,6	4,9
Цезия аурид	CsAu	2,6	1,4	4
Цезия иодид	CsI	> 6	< 0,5	6,4
Цезия теллурид	Cs_2Te	3,3	< 0,5	3,8

Свойства фотокатодов

Таблица 24.14

Ширина запрещенной зоны E_g и сродство к электрону χ для щелочных галоидов

Соединение	E_g, эв	χ, эв	Соединение	E_g, эв	χ, эв
CsI	6,5	0,1	NaI	5,8	1,5
KI	6,2	1,1	RbI	6,1	1,2
LiI	5,9	1,4			



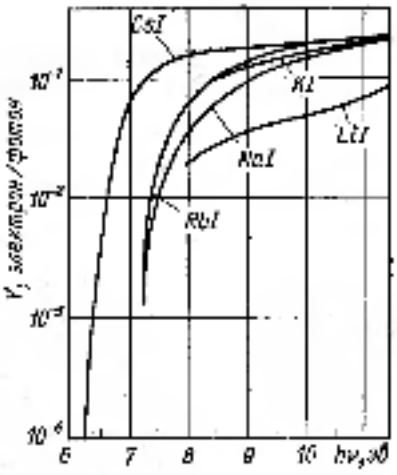


Рис. 24.10. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии щелочных галогенидов [6].

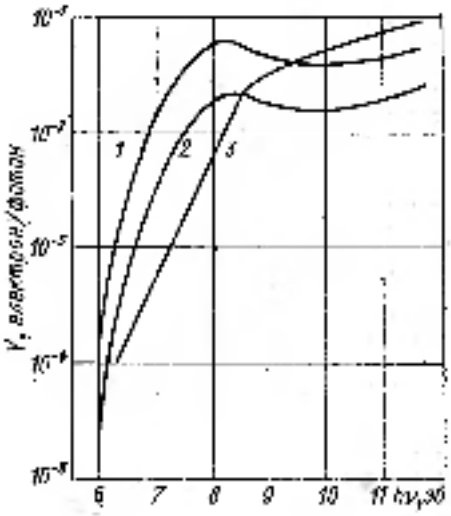


Рис. 24.11. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии галогенидов серебра [6]:

1 — монокристаллический AgBr; 2 — поликристаллический AgBr; 3 — AgCl.

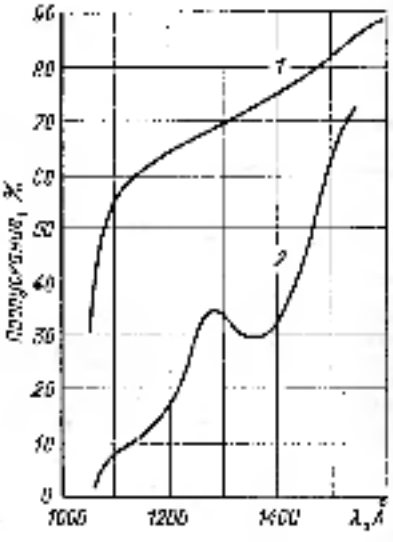


Рис. 24.12. Пропускание плотных кристаллов LiF до (1) и после (2) эксплуатации на воздухе [6].

Таблица 24.15

Основные свойства фотокатодов на основе щелочных антимонидов [6]

Обозначения: V_{max} — максимальный квантовый выход; S_{max} — максимальная чувствительность; λ — длина волны, соответствующая чувствительности в 1 % V_{max}; χ — сродство к электрону; n — электронная, p — дырочная проводимость; j_s — плотность термоэмиссионного тока при комнатной температуре

Фотокатод	Тип кристаллической решетки	V_{max}, электрон/фотон	λ_0, Å	S_{max}, мка/лм	E_g, эв	χ, эв	Тип проводимости	j_s, а/см²
K_3Sb	куб.	0,07	5500	12	1,4	0,9	p	—
K_2Sb	тетр.	0,07	4000	2	1,1	1,6	n	—
K_2CsSb	куб.	0,30	6600	100	1,0	1,1	n	10^{-12}
$K_2CsSb(O)$	»	0,24	7800	130	1,0	1,1	p	10^{-16}
Na_3Sb	тетр.	0,02	3300	2	1,1	2,44	n	—
Na_2KSb	куб.	0,30	6000	60	1,0	1,0	p	10^{-10}
Rb_3Sb	»	0,10	5800	25	1,0	1,2	p	—
Cs_3Sb	»	0,13	5800	25	1,6	0,45	p	10^{-16}
Cs_3Sb на MgO	»	0,20	6500	80	1,6	0,45	p	10^{-18}
$(Cs)Na_2KSb$	»	0,30	6700	300	1,0	0,55	p	10^{-19}

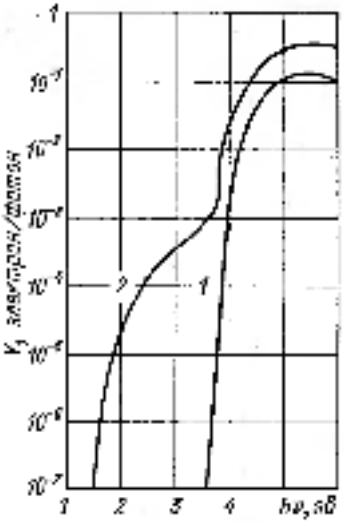


Рис. 24.13. Спектральная характеристика квантового выхода фотоэмиссии Cs_2Te-фотокатода [6].

1 — без добавки Cs; 2 — с добавкой Cs.

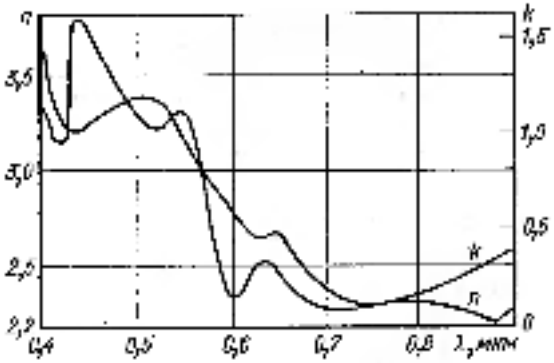


Рис. 24.14. Спектральная зависимость показателей преломления (n) и поглощения (k) Cs_3Sb [4].

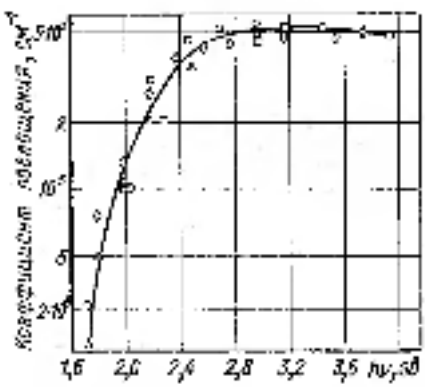


Рис. 24.15. Спектральная характеристика коэффициента поглощения Cs_3Sb [6]. Точки — данные различных авторов

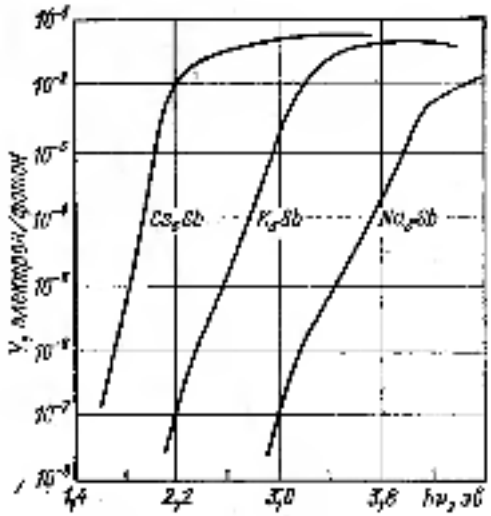


Рис. 24.16. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии сурьмяно-щелочных фотокатодов [6].

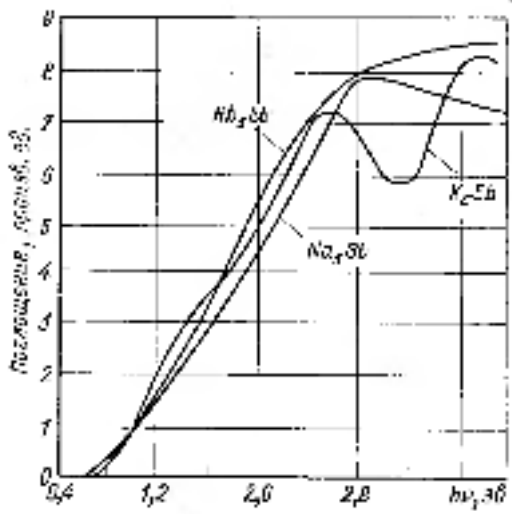
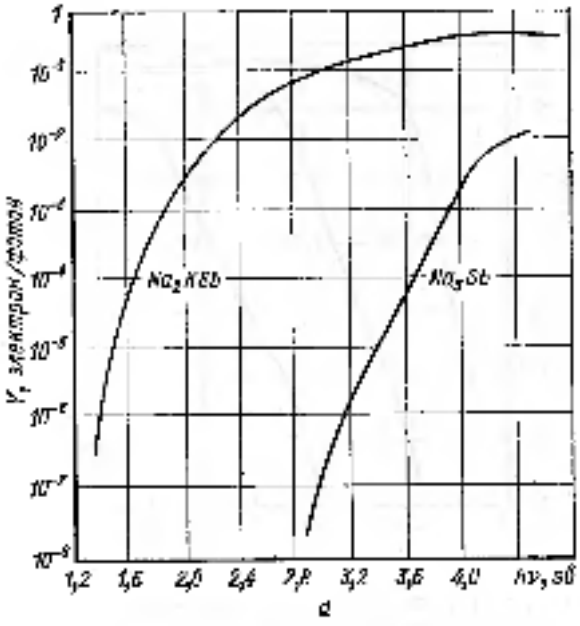


Рис. 24.17. Спектральные зависимости витического поглощения Na_3Sb, K_3Sb (пунк.) и Rb_3Sb [6].



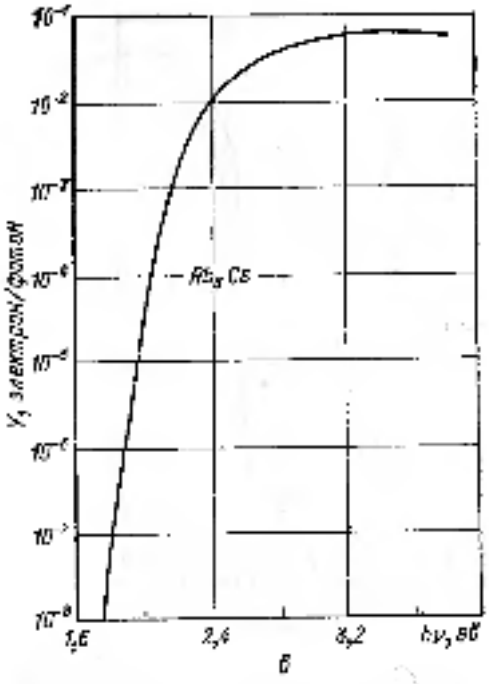
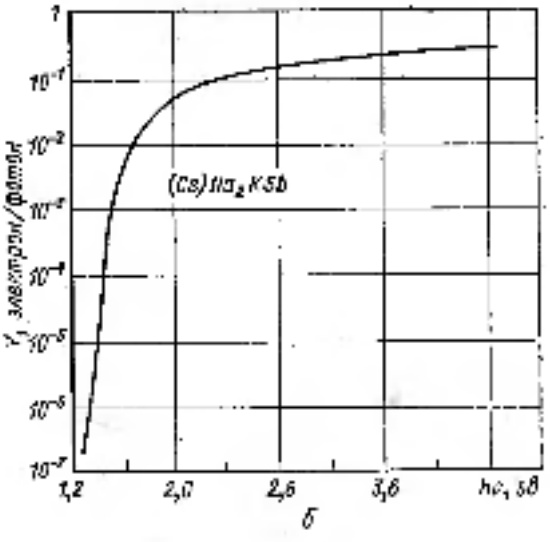


Рис. 24.18. Спектральные характеристики квантового выхода фотокатодов сурьмяно-щелочных фотокатодов [6]:

а — Na_2KSb и Na_3Sb; б — (Cs)Na_2KSb; в — Rb_3Cs.



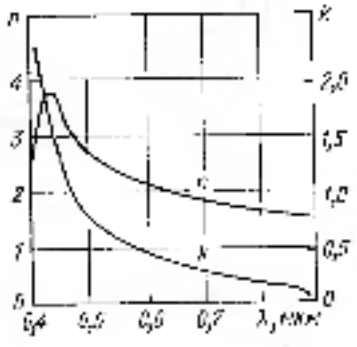


Рис. 24.20. Спектральные зависимости показателей преломления (n) и поглощения (k) (Cs)Na_2KSb фотокатода [4].

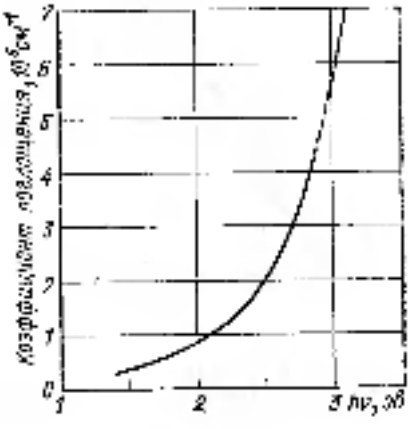


Рис. 24.19. Спектральная зависимость коэффициента оптического поглощения (Cs)Na_2KSb [6].

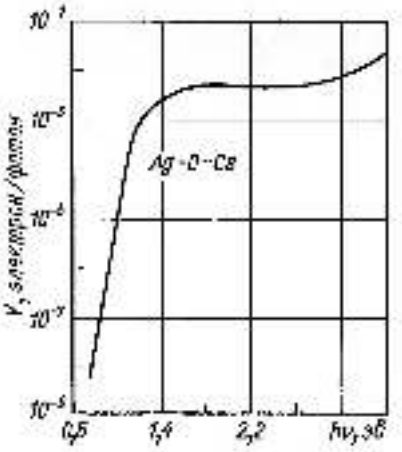
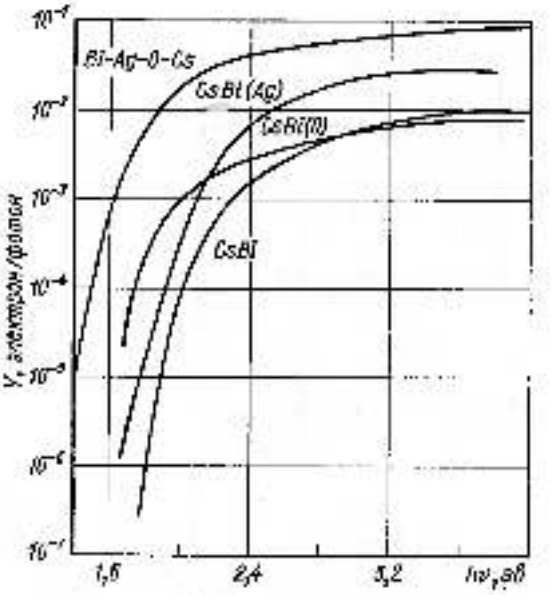


Рис. 24.21. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии Ag-O-Cs- и висмуто-цезиевых фотокатодов [6].



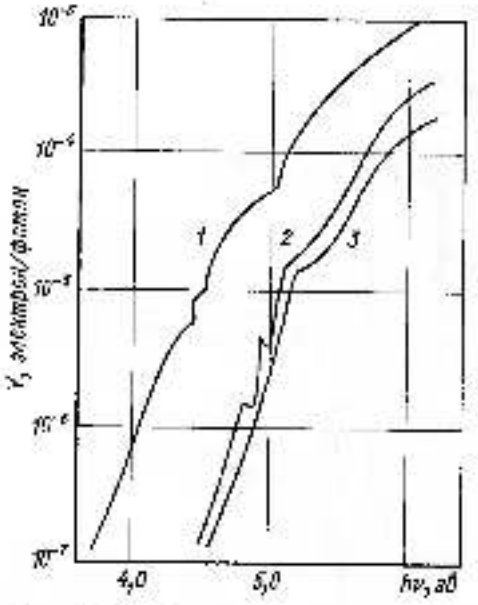


Рис. 24.22. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии ZnS для образцов с различной обработкой [6]:

1 — сколотый и плоскостной либо подвергнутый ионной бомбардировке в отношении; 2 — шлифованный; 3 — сколотый.

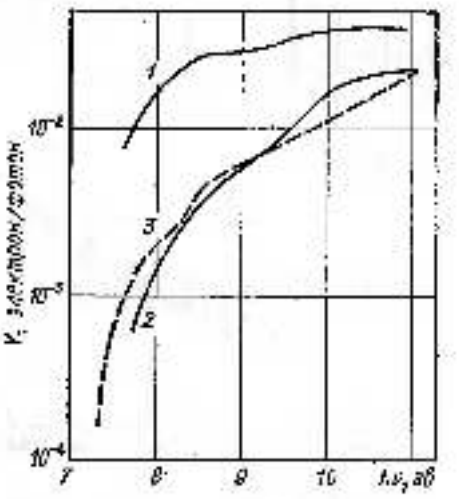


Рис. 24.23. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии SiC n- и p-типа [6]:

1 — p-SiC (плас.); 2 — n-SiC (текс.); 3 — SiC (куб.).

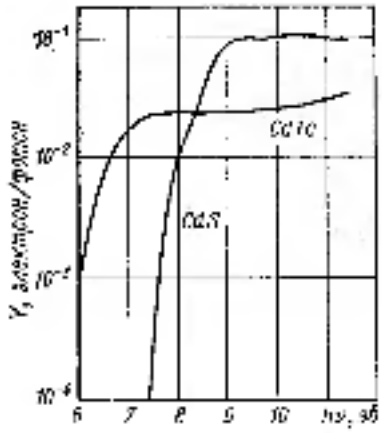
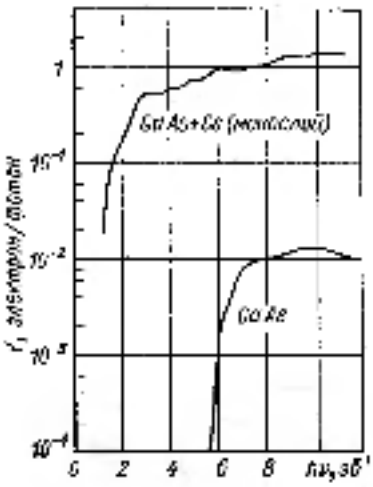


Рис. 24.24. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии для сколотых кристаллов CdS и CdTe [6].



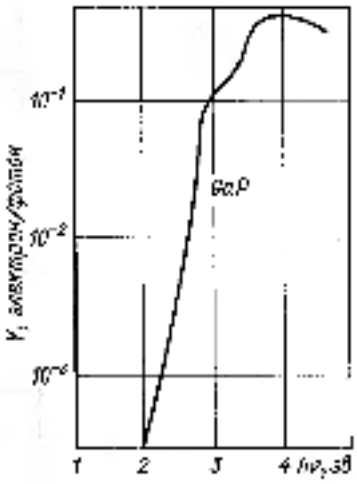


Рис. 24.25. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии p^+-GaAs (сколотый образец) [4] и p-GaP [6]. Квантовый выход GaAs увеличивается после нанесения на сколотую поверхность монослоя Cs и может превысить единицу за счет генерации пар.

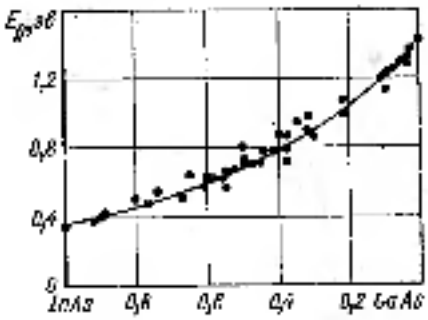


Рис. 24.26. Зависимость ширины запрещенной зоны E_g для твердых растворов $In_xGa_{1-x}As$ от x [11].

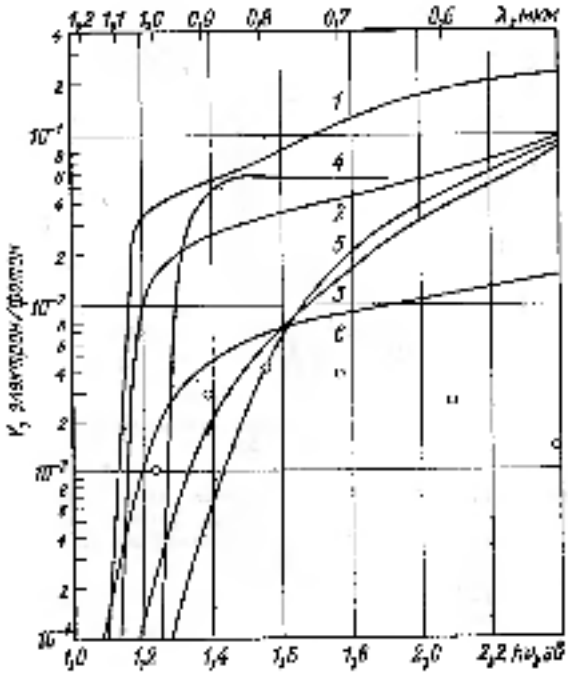


Рис. 24.27. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии фотокатодов с отрицательным сродством к электрону на основе твердых растворов соединений $A^{III}B^{V}$ [11]:

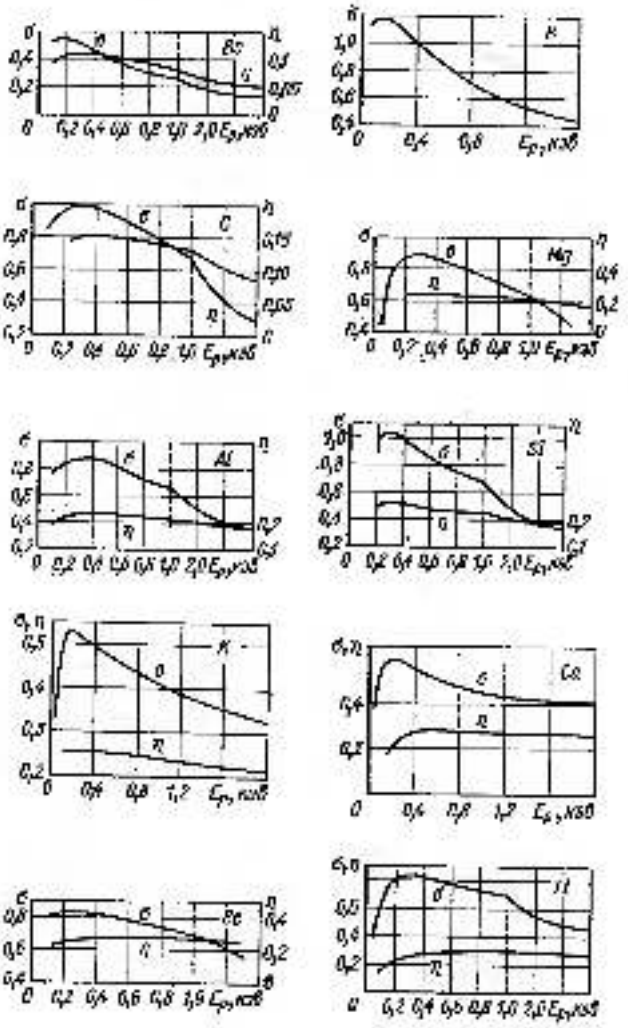
1 — $In_{0,15}Ga_{0,85}P_{0,87}$ (ширина запрещенной зоны E_g — 1,87 эв); 2 — $GaAs_{0,82}Sb_{0,18}$ (E_g — 1,17 эв); 3 — $In_{0,5}Ga_{0,5}As$ (E_g — 0,8 эв); 4 — $In_{0,68}Ga_{0,32}As$ (E_g — 1,0 эв); 5 — $In_{0,4}Ga_{0,6}As$ (E_g — 0,8 эв); 6 — $In_{0,35}Ga_{0,65}As$ (E_g — 0,96 эв). Кружками показан экспериментальный квантовый выход фотоэмиссии Ag-O-Cs-фотокатода.

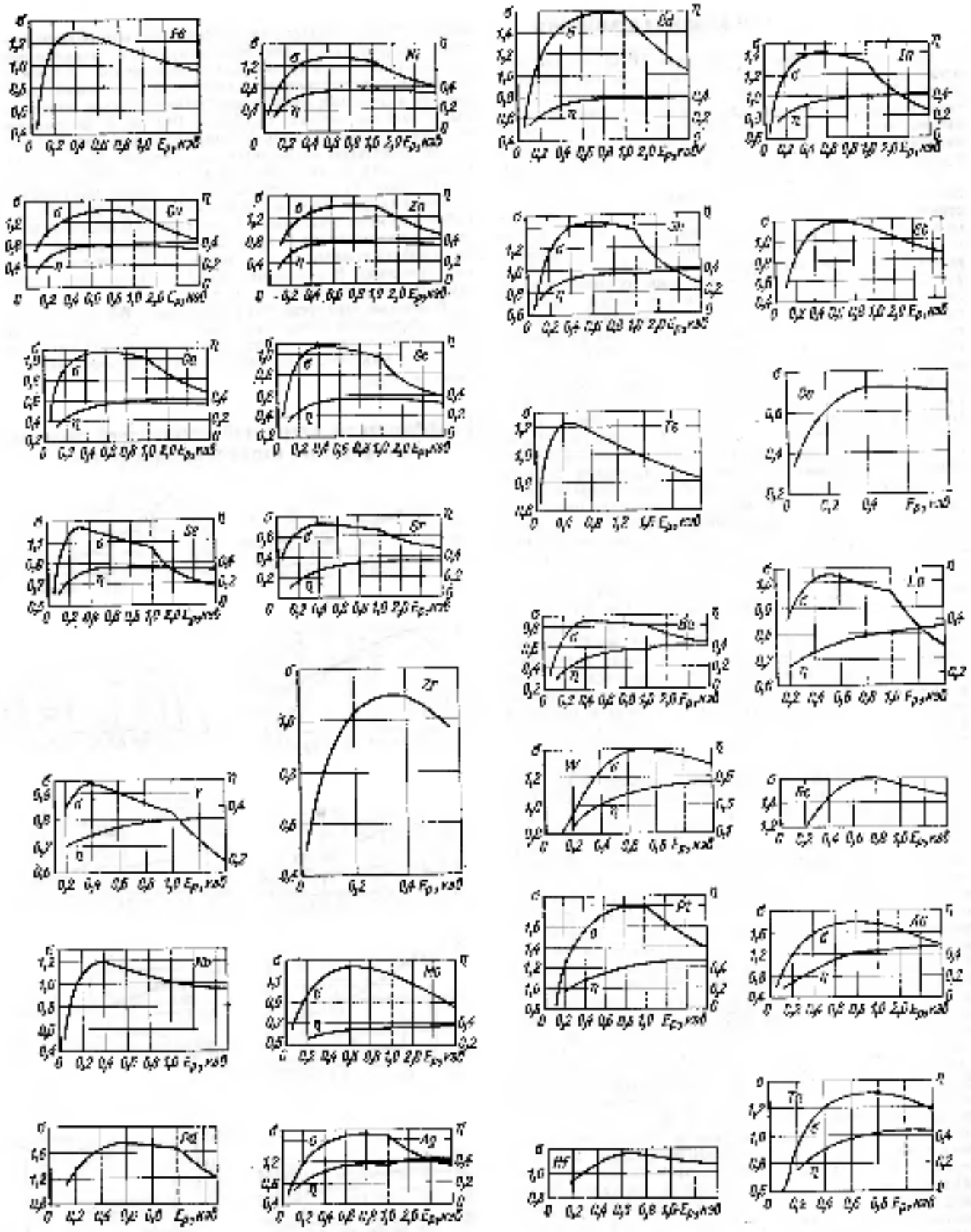
21.5. ВТОРИЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ) — эмиссия электронов, вызываемая бомбардировкой тел электронами [7]. Электроны, бомбардирующие поверхность тела, называются *первичными*; электроны, эмиттированные телом, — *вторичными*. Вторичные электроны могут эмиттироваться как со стороны облучаемой первичным пучком поверхности тела (ВЭЭ «на отражение»), так и — в тонкопленочных эмиттерах — со стороны поверхности, противоположной облучаемой (ВЭЭ «на просвет»). Отношение числа электронов N_2, испускаемых телом, к числу падающих на него за то же время первичных электронов N_1 называется *коэффициентом* ВЭЭ данного тела: $\sigma = N_2/N_1 = I_2/I_1$ (I_1, I_2 — первичный и вторичный токи соответственно). Значение σ зависит от свойств и структуры эмиттера, состояния его поверхности, энергии первичных электронов E_p и угла падения первичного пучка на поверхность эмиттера. В потоке вторичных электронов имеются две группы электронов: истинно вторичные — электроны вещества, получившие от первичного пучка достаточно энергии для выхода в вакуум, и отраженные (упруго и неупруго) — часть первичного пучка, отразившаяся от поверхности эмиттера. При малых E_p ($E_p < 0{,}1$ кэв) основную долю вторичных электронов составляют упруго отраженные электроны. С ростом E_p доля упруго отраженных электронов быстро уменьшается и при $E_p > 0{,}1$ кэв составляет лишь несколько процентов всей ВЭЭ. Истинно вторичные электроны имеют энергии от 0 до ~50 эв. Наиболее вероятная энергия истинно вторичных электронов составляет 1,5—3,5 эв при $E_p > 20$ эв практически не зависит от E_p. Неупруго отраженными условно принято считать электроны первичного пучка, энергия которых превышает 50 эв. Отношение числа неупруго отраженных электронов к числу первичных электронов $\eta = N_3$ ($E_3 > 50$ эв)$/N_1$ называется коэффициентом неупругого отражения (в I_3 входят и упруго отраженные электроны, но число их мало и на величине η не сказывается). В металлах и полупроводниках максимальное значение σ лежит в пределах 0,1—1,8. В некоторых диэлектриках (MgO, щелочно-галоидные кристаллы) σ значительно больше (10—20). Это обусловлено тем, что в таких материалах запрещенная зона велика ($E_g \approx 6 \div 12$ эв), сродство к электрону мало ($\chi < 1$ эв), вследствие чего медленные электроны с энергией, лежащей между χ и E_g, могут на большой глубине без потерь энергии подходить к поверхности тела и выходить в вакуум. При наложении на диэлектрик сильного электрического поля, направленного от эмиттирующей поверхности вглубь слоя (т. е. ускоряющего вторичные электроны к поверхности), σ значительно возрастает. Обычно сильное поле создается бомбардировкой тонкого слоя диэлектрика на металлической подложке электронами с E_p, при котором $\sigma > 1$. В результате поверхность диэлектрика заряжается положительно относительно металлической подложки до потенциала, близкого к потенциалу коллектора, на который отсасываются все ВЭЭ. Ток ВЭЭ, возникающий в присутствии сильного электрического поля в эмиттере, состоит из двух компонент: *мгновенной*, быстро следующей за изменением первичного тока (эта часть ВЭЭ называется вторичной электронной эмиссией, усиленной полем, не инерционность $< 10^{-5}$ сек), и *замедленной*, существующей и при отсутствии первичного пучка, после того как осуществлена первоначальная зарядка слоя. В некоторых случаях ВЭЭ с электродов вакуумных приборов, подвергавшихся бомбардировке электронами, является нежелательным паразитным эффектом. Для его устранения электроды покрывают веществами с малым σ: углеродом (сажа, аквадаг), титаном, цирконием, диоксидами переходных металлов. Также покрытия называются *антидинатронными*. Эффективные эмиттеры вторичных электронов: сурьмяно-цезиевый Cs_3Sb- и многощелочной SbK(NaCs)-фотокатоды одновременно являются эффективными эмиттерами вторичных электронов, обладающими наиболее высокими σ при малых E_p ($E_p \lesssim 100$ эв). В фотоэлектронных умножителях (ФЭУ) широко применялся в качестве эмиттеров вторичных электронов (ВЭ) пленки окиси магния и окиси бериллия с избытком содержащих атомов этих металлов. Такие пленки получаются на поверхности двух- и трехкомпонентных сплавов серебра или меди с магнием и бериллием при прогреве их в атмосфере кислорода (иногда для улучшения механических свойств сплавов в их состав добавляют алюминий или кремний). В каналовых ФЭУ используются эмиттеры ВЭ из проводящих стекол.

Основные характеристики эмиттеров ВЭ: зависимости коэффициента вторичной эмиссии σ и коэффициента неупругого отражения η от энергии первичных электронов E_p и максимальные значения этих коэффициентов: $\sigma_{макс}$ и $\eta_{макс}$.

Коэффициенты вторичной электронной эмиссии и неупругого отражения электронов




Fe
Ni
Cu
Zn
Co
Se
Sr
Zr
Y
Nb
Mo
Ru
Ag
Cd
In
Sn
Sb
Te
Cs
I
W
Re
Pt
Au
Tl
Hf

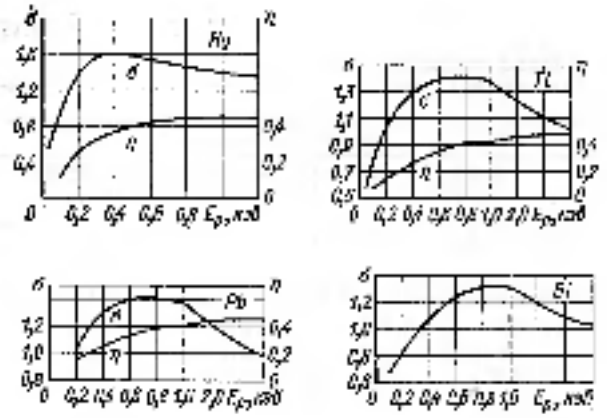


Рис. 24.29. — Рис. 24.69. Зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии σ и коэффициента неупругого отражения электронов η от энергии первичных электронов E_p для простых веществ [7].

Эффективные эмиттеры вторичных электронов

Таблица 24.16

σ_{max} и соответствующие им энергии первичных электронов E_p для эффективных эмиттеров [5]

Эмиттер	σ_{max}	E_p, эв
Кислородно-магниевый	9—12	600—900
Медно-бериллиевый сплав	6—12	500—700
Медно-кислородно-цезиевый	6	700
Медно-магниевая смесь (получена испарением)	~12	500
Никель-бериллиевый сплав	12	700
Серебряно-кислородно-цезиевый	7—11	600—1100
Серебряно-магниевая смесь (получена испарением)	~9,5	500
Сложные боридные поверхности (окислы металлов Ni, Mo, активированные бором)	12	600
Сурьмяно-литиевый	15	700—800
Сурьмяно-цезиевый	9—12	500

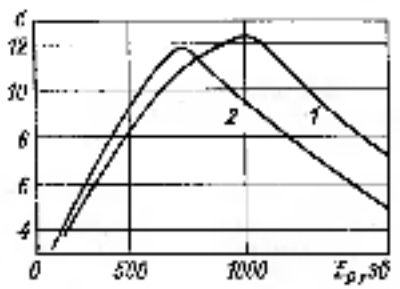


Рис. 24.70. Зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии σ от энергии первичных электронов E_p для эмиттеров [Ni] - NiO - Ba (1) и [Mo]-MoO_3-Ba (2) [5].

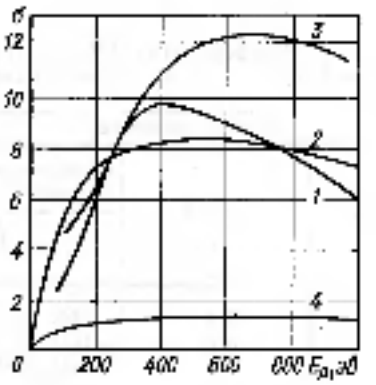


Рис. 24.71. Зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии σ от энергии первичных электронов для эмиттеров:

1 — серебряно-магниевого; 2 — серебряно-цезиевого; 3 — никель-бериллиевого; 4 — никелевого [5].

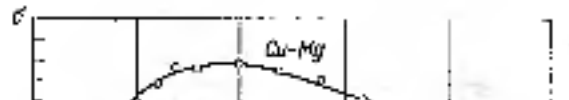


Рис. 24.72. Зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии σ от энергии первичных электронов E_p для различных металлических смесей, полученных испарением [5].

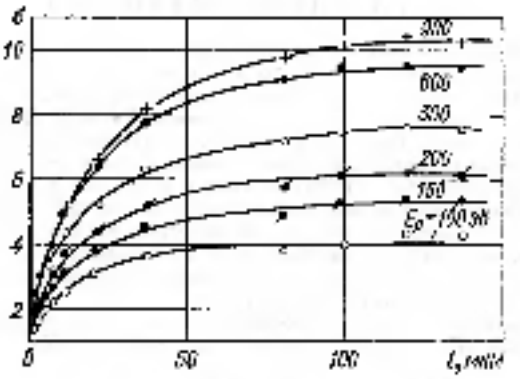


Рис. 24.73. Зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии σ от толщины Sb-Cs-эмиттера l при различных энергиях первичных электронов E_p [5].

Таблица 24.17

Коэффициенты ВЭЭ некоторых двухкомпонентных эвтектических смесей [5]

Указанные в таблице значения коэффициентов ВЭЭ для различных металлических смесей не являются максимальными

Основной металл Ag				Основной металл Cu			
Максимальное содержание, %	σ при E_p=500 эв	Формирование в вакууме при давлении 10^{-6}—10^{-8} мм рт. ст.		Максимальное содержание, %	σ при E_p=500 эв	Формирование в кислороде при давлении 10^{-3}—10^{-5} мм рт. ст.	
		t, °C	Время, мин			t, °C	Время, мин
Al 2,2	5,1	610—680	70	Al 15	7,6	600	40
1,4	3,8	620—670	50	5	9,0	620	30
Ba 5	2,0	530—760	90	Be 2,3	5,7	720—770	60
Be 5	4,9	720	60	5	6,2	650—700	40
15	7,6	650	50	2 (сплав компактный)	6	670—700	40
Cs 1,3	4,9	700—750	30				
Mg 5	0,5	670—620	30				
15	8,5	570—620	40	Mg 5	12,2	550—600	35
5 (сплав)	9,2	570	30	10	9,4	570	30
				15	9,1	570—620	30

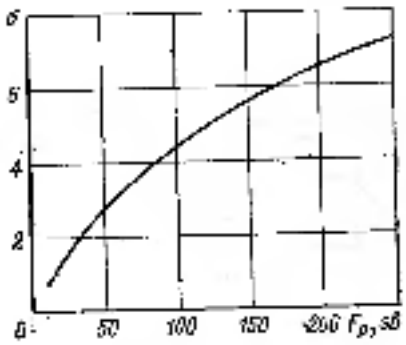


Рис. 24.24. Зависимость коэффициента вторичной электронной эмиссии σ серебрянно-кислородно-цезиевого эмиттера от энергии первичных электронов E_p [5].

24.6. АВТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Автоэлектронная эмиссия (АЭ) — эмиссия электронов под действием внешнего электрического поля. Если внешнее электрическое поле достаточно велико для того, чтобы потенциальный порог превратился в барьер конечной и малой ширины и высоты, то становится возможным прохождение электронов сквозь барьер — квантомеханическое туннелирование и выход их в вакуум. При этом электроны непосредственно после прохождения сквозь барьер имеют ту же энергию, что и в твердом теле, а электрическое поле совершает работу только на разгон электронов в вакууме в межэлектродном пространстве между эмиттером и анодом.

Плотность автоэмиссионного тока из металла при низкой ($T \ll 300°$ K) температуре эмиттера [8]:

$$j = \frac{e^2 E^2}{8\pi h\varphi} \exp\left[-\frac{8\pi}{3}\frac{(2em)^{1/2}}{h}\frac{(e\varphi)^{3/2}}{eE}\theta(y)\right],$$

где $\theta(y)$ — функция Нордгейма, в которой аргументом является относительное снижение работы выхода внешним электрическим полем по Шоттки:

$$y = \frac{\Delta(e\varphi)}{e\varphi} = \frac{(eE)^{1/2}}{\varphi}$$

(см. табл. 24.18).

Если $e\varphi$ — в эв, а E — в $e/см^2$, то

$$j = 1{,}55 \cdot 10^{-6}\frac{E^2}{e\varphi}\exp\left[-\frac{6{,}85\cdot 10^7 (e\varphi)^{3/2}}{E}\times\right.$$
$$\left.\times\,\theta\left(\frac{3{,}62\cdot 10^{-4}E^{1/2}}{e\varphi}\right)\right].$$

Отсюда видно, что АЭ зависит от электрического поля так же, как термоэмиссия от температуры: $\ln(j/E^2) = f(1/E)$.

Теория АЭ полупроводников развита Стреттоном, Елиасоном и др. [12]. АЭ эмиттеры используются пока ограниченно — в некоторых специальных электронно-лучевых приборах, в приборах для генерирования миллиметровых и субмиллиметровых волн [13]. Наиболее широкое применение явление АЭ нашло в автоэмиссионной и автоионной микроскопии [9]. В качестве АЭ эмиттеров чаще всего используются металлические острия из наиболее тугоплавких металлов: вольфрама, рения.

Таблица 24.18

Функция Нордгейма $\theta(y)$

y	$\theta(y)$	y	$\theta(y)$
0	1,0000	0,55	0,6351
0,05	0,9948	0,6	0,5766
0,1	0,9817	0,65	0,5152
0,15	0,9622	0,7	0,4504
0,2	0,9370	0,75	0,3825
0,25	0,9068	0,8	0,3117
0,3	0,8716	0,85	0,2379
0,35	0,8323	0,9	0,1613
0,4	0,7888	0,95	0,0820
0,45	0,7413	1	0
0,5	0,6900		

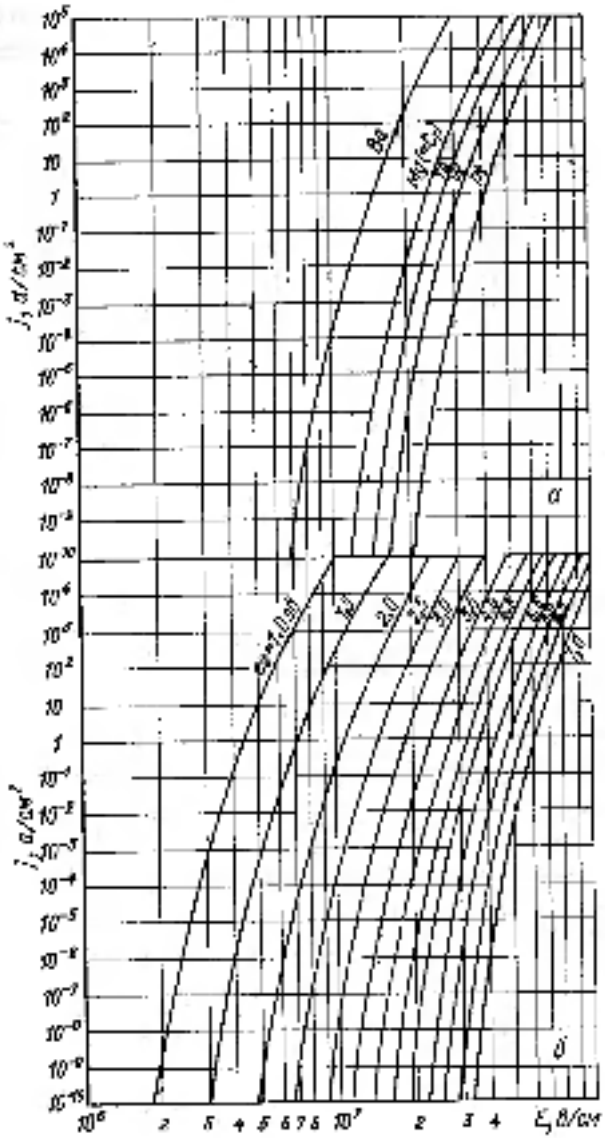


Рис. 24.76. Зависимость плотности автоэмиссионного тока j от напряженности электрического поля E для некоторых металлов (*а*) и эмиттеров с различной рабочей площадью (*б*) [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Добрецов Л. Н., Гомонова М. В.** Эмиссионная электроника. М., «Наука», 1966.
2. **Фоменко В. С.** Эмиссионные свойства материалов. Справочник. Киев, «Наукова думка», 1970.
3. **Кудинцева Г. А.** и др. Термоэлектронные катоды. М.—Л., «Энергия», 1966.
4. **Соболева Н. А.** и др. Фотоэлектронные приборы. М., «Наука», 1965.
5. **Чечик Н. О., Фрайштейн С. М., Лифшиц Т. М.** Электронные умножители. М., Физматгиз, 1957.
6. **Сомлер А. Х.** Фотоэмиссионные материалы. Пер. с англ. М., «Мир», 1972.
7. **Бронштейн И. М., Фрайман Б. С.** Вторичная электронная эмиссия. М., «Наука», 1969.
8. **Елинсон М. И., Васильев Г. Ф.** Автоэлектронная эмиссия. М., Физматгиз, 1958.
9. **Автоионная** микроскопия. Под ред. Л. Рена и С. Ранганатана. Пер. с англ. М., «Мир», 1971.
10. **Ardenne M.** Tabellen der Elektronenphysik, Ionenphysik und Übermikroskopie. Bd 1. Berlin, 1956.
11. **Bell R. L., Spicer W. E.** "Proc. IEEE", 1970, v. 58, p. 1788.
12. **Stratton R.** "Proc. Phys. Soc.", 1956, v. 63, N 430, p. 746; "Phys. Rev.", 1962, v. 125, p. 67; **Елинсон М. И.** «Радиотехника и электроника», 1959, т. 4, с. 140; **Васильев Г. Ф.** «Радиотехника и электроника», 1958, т. 3, № 7; **Морозов Н. Д.** «Журн. техн. физ.», 1947, т. 7, с. 963.
13. **Техника** спектроскопии в дальней инфракрасной, субмиллиметровой и миллиметровой областях спектра. Под ред. Д. Х. Мартина. Пер. с англ. М., «Мир», 1970, с. 268.
14. **Weinfurn K., Walker W. G.** "J. Appl. Phys.", 1969, v. 24, p. 1318.

ГЛАВА 26

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

26.1. ЭФФЕКТ ЗЕЕБЕКА

Эффект Зеебека состоит в том, что в замкнутой электрической цепи из различных металлов возникает термоэлектродвижущая сила (термо-э. д. с.) E_{12}, если места контактов поддерживаются при разных температурах T_1 и T_2.

E_{12} зависит только от температур T_1 и T_2 соединенных проводников и от природы материалов, составляющих термоэлемент. По E_{12} оценивают температуру в месте спая. В небольшом интервале температур имеет место зависимость $E_{12} = e_{12}(T_1 - T_2)$, где e_{12} — коэффициент термо-э. д. с., определяемый природой материалов термоэлемента и интервалом температур, в котором применяется термоэлемент. Поведение e_{12} может резко меняться с температурой (может даже менять знак).

Измеряемые термо-э. д. с. относятся всегда к двум металлам и поэтому не являются характеристиками отдельных металлов. В таблицах обычно приводят термо-э. д. с. материалов по отношению к свинцу, платине или меди.

Абсолютные коэффициенты термо-э. д. с. e_1, e_2 отдельных металлов вычисляются с помощью термодинамического соотношения:

$$e_{12} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{S_1}{T}\,dT - \int_{T_1}^{T_2} \frac{S_2}{T}\,dT = e_1 - e_2,$$

где S_1 и S_2 — коэффициенты Томсона пары соединенных проводников (см. эффект Томсона, с. 266), e_1 и e_2 — абсолютные коэффициенты термо-э. д. с. этих проводников.

Таблица 25.1

Абсолютные коэффициенты термо-э. д. с. для некоторых металлов в зависимости от температуры [1]. *мкв/град*

(Скорректированы с поправками коэффициентов Томсона)

T, °C	Pb	Cu	Pt
−255	−0,74	+0,34	+1,81
−240	0,74	+0,89	+4,04
−200	−0,75	+1,37	+5,88
−160	−0,88	+1,15	+3,56
−120	−0,99	+1,15	+1,18
−80	−1,08	+1,30	−0,92
−40	−1,15	+1,51	−2,79
0	−1,22	+1,73	−4,42
+20	−1,26	+1,86	−5,13

Продолжение табл. 25.1

T, °C	Pb	Cu	Pt
+100	−1,44	+2,23	7,3
+200	—	+2,77	−9,2
+300	—	+3,31	−10,9
+400	—	+3,86	−12,5
+500	—	+4,39	−14,0
+600	—	+4,93	−15,6
+700	—	+5,47	−17,1
+800	—	+6,01	−18,6
+900	—	+6,55	−20,1
+1000	—	+7,09	−21,6
+1200	—	+17	−24,6
+1400	—	—	−27,6
+1600	—	—	−30,6

Таблица 25.2

Абсолютные коэффициенты термо-э. д. с. для различных металлов в зависимости от температуры [2]

Приводимые значения e_1 вычислены, исходя из измеренных относительных коэффициентов e_{12} различных металлов по отношению к первому металлу, заключенному в круглые скобки, и абсолютных коэффициентов термо-э. д. с. этих первых металлов e_1, которые приведены в табл. 25.1 и 25.2.

Термо-э. д. с. положительна, если ток в нагретом спае течет из металла 2 в металл 1.

Li(Pt)		Na(Pt)		K(Pt)		Rb(Pt)		Cs(Pt)	
T, °C	e_1, мкв/град	T, °C	e_1, мкв/град	T, °C	e_1, мкв/град	T, °C	e_1, мкв/град	T, °C	e_1, мкв/град
−50	+6,3	−50	−7,1	50	17,0	50	8,2	−50	−0,1
−25	+10,0	−25	−7,7	−25	−14,4	−25	−9,2	−25	−0,1
0	+11,5	0	8,3	0	15,6	0	−10,2	0	+0,1
+25	+12,2	+25	−8,7	+25	−16,6	+25	−11,1	+25	+0,1
+50	+11,5	+50	−9,2	+50	−17,6	+50	−7,5	+50	−5,6
+75	+11,0	+75	9,7	+75	−16,0	+75	−8,3	+75	−4,6
+100	+10,4	+100	−10,4	+100	−18,0	+100	−8,9		
+125	+9,9			+125	19,1				

Продолжение табл. 25.2

Yb (Pt)		Mg (Cu) эксперимент			Al(Pt)		Ti(Pt)		Th(Pt)	
T, °C	e_1, мкв/град	T, °C	e_1, мкв/град		T, °C	e_1, мкв/град	T, °C	e_1, мкв/град	T, °C	e_1, мкв/град
			[illegible]	[illegible]						
−150	−5,1				0	−1,6	0	+7,3	+400	−2,5
−100	−3,8	0	+3,38	+3,58	+50	−1,8	+100	+8,1	+500	−4,0
50	−3,1	+25	+4,05	+4,77	+100	−1,9	+200	+7,4	+600	−6,5
0	−3,3	+50	+4,59	+5,67	+150	1,8	+300	+4,3	+700	−9,0
+50	−2,0	+75	+4,98	+6,30	+200	−1,8	+400	+1,7	+800	−13
+100	0,3	+100	+5,24	+6,60	+300	2,0	+500	−0,7	+900	−16
+150	+0,4				+400	−2,3	+600	−2,1	+1000	−19
					+500	−2,5	+700	−2,6	+1100	−23
					+600	−2,8	+800	−2,8		
					+650	−3,0	+900	+0,6		
							+1000	+1,1		

Продолжение табл. 25.2

V (Au)		Nb (Ag)		Ta (Ag)		Cr (Ag)		Mo (Ag)	
T, °C	α_1, мкв/град	T, °C	α_1, мкв/град	T, °C	α_1, мкв/град	T, °C	α_1, мкв/град	T, °C	α_1, мкв/град
−240	0,0	−240	+1,0	−240	+0,5			−240	+4,5
−200	+2,3	−200	+3,4	−200	+0,8	−200	+1,4	−200	+3,0
−100	+1,7	−100	+1,6	−100	−1,1	−100	+7,5	−100	+3,1
0	+1,0	0	−0,5	0	−2,3	0	+20,0	0	+5,9
+100	+0,7	+100	−1,5	+100	−3,3	+100	+15,8	+100	+8,6
+200	+0,9	+200	−1,6	+200	−3,5	+200	+15,0	+200	+11,2
+300	+1,3	+300	−1,6	+300	−3,3	+300	+15,8	+300	+13
		+400	−1,4	+400	−3,0			+400	+15

Продолжение табл. 25.2

W (Pt)		U (Pt)		Fe (Pt)		Co (Pt)		Ni (Pt)	
T, °C	α_1, мкв/град	T, °C	α_1, мкв/град	T, °C	α_1, мкв/град	T, °C	α_1, мкв/град	T, °C	α_1, мкв/град
−100	−1,0	0	+8	+800	−0,1	+100	−32,3	+450	−30,2
0	+0,2	+100	+10	+900	−0,6	+200	−39,8	+550	−31,6
+100	+3,5	+200	+13	+910	−9,8	+300	−43,5	+650	−27,1
+200	+6,8	+300	+15	+1000	−9,1	+400	−46,0	+750	−30,3
+400	+12,6	+400	+18	+1100	−8,1	+500	−43,0	+850	−32,8
+550	+15,8	+500	+20	+1200	−6,0	+600	−39,0	+950	−35,2
+650	+19,2	+600	+20	+1300	−6,6	+800	−28,8	+1050	−37,3
+800	+22,3	+700	+21	+1400	−4,6	+900	−22,0		
+1000	+25,6	+800	+22	+1405	−1,7	+1000	−14,0		
+1100	+26,0	+900	+23	+1450	1,4	+1100	−9,0		
+1300	+27,6								

Продолжение табл. 25.2

Rh (Pt)		Os (Pt)		Ru (Pt)		Ir (Pt)		Ag (Pt)	
T, °C	α_1, мкв/град	T, °C	α_1, мкв/град	T, °C	α_1, мкв/град	T, °C	α_1, мкв/град	T, °C	α_1, мкв/град
+200	29,7	0	+0,9	0	−0,6	0	+0,8	−40	+1,0
+250	−31,7	+100	+0,8	+100	−13,4	+100	+0,2	+50	+1,4
+300	−32,5	+200	+0,8	+200	−16,3	+200	−0,1	+150	+1,8
+350	−35,2	+300	+0,6	+300	−18,8	+300	0,6	+250	+2,3
+400	−38,8	+400	+0,5	+400	−21,7	+400	−0,9	+350	+3,4
+500	−42,2	+500	+0,2	+600	−28,5	+600	−1,7	+450	+4,5
+600	−44,3	+600	0	+800	−35,3	+800	−2,4	+550	+5,1
+700	−43,3	+800	−0,1	+1000	−41,5	+1000	3,2	+650	+7,1
+800	−43,3	+1000	−0,9	+1200	−47	+1200	−4,7	+750	+7,9
+1000	−47	+1200	−1,5	+1400	−51	+1500	−9,0	+850	+8,8
+1150	−50			+1500	53				
+1200	−51								
+1300	−53,5								

Продолжение табл. 25.2

Au (Pt)		Zn (Cu)			Cd (Cu)			Hg (Cu)		Tl (Cu)	
T, °C	e_T, мкв/град	T, °C	e_T, мкв/град		T, °C	e_T, мкв/град		T, °C	e_T, мкв/град	T, °C	e_T, мкв/град
			∥*	⊥**		∥*	⊥**				
0	+1,6	−253	−0,76	+1,28	−253	−0,15	+3,14	−200	+1,3	0	+0,84
+100	+1,8	−246	−0,81	+1,71	−240	−0,34	+2,24	150	+1,75	+50	+0,09
+200	+2,4	227	−1,50	+1,75	−225	−0,51	+1,59	−100	+1,95	+100	−0,41
+400	+3,1	−219	−2,41	+1,45	−183	−0,83	+0,67	−40	+3,60	+150	−0,67
+600	+3,3	197	−1,06	+1,15	−149	−1,02	+0,59	−30	+7,20	+200	−0,69
+800	+3,7	−160	−0,40	+1,22	−140	−1,04	+0,63	0	+7,84	+233	−0,57
+1000	+4,7	−112	−0,06	+1,39	−81	0,95	+1,20	+50	+9,51	+250	−0,46
		−80	+0,06	+1,57	0	−0,04	+3,16	+100	+11,55		
		0	+0,42	+2,16	+98	+1,96	+7,22	+150	+13,39		
		+98	+0,82	+3,36							

Продолжение табл. 25.2

Sb (Cu)			Bi (Cu)			Se (Ni)		Te (Cu)		C (Fe)	
T, °C	e_T, мкв/град		T, °C	e_T, мкв/град		T, °C	e_T, мкв/град	T, °C	e_T, мкв/град	T, °C	e_T, мкв/град
	∥*	⊥**		∥*	⊥**						
0	+20,6	+46,8	−100	−75	−35	+35	+850	−100	+550	+1200	6,5
+20	+21,3	+48,0	−120	−96	−45	+50	+860	−100	+650	+1500	−7,0
+40	+22,0	+49,1	−80	−104	−33	+100	+940	−50	+300	+1750	0
+60	+22,7	+50,2	−40	−110	−53	+150	1020	0	−100	+2000	+23
+80	+23,4	+51,4	0	−100	−53	+200	1100	+100	−150	+2200	+43,5
+100	+24,2	+52,6						+200	100	+2400	−1,5
										+2700	−11
										+3100	−15

* ∥ — тепловой поток направлен параллельно градиенту температуры.
** ⊥ — тепловой поток направлен перпендикулярно градиенту температур.

Таблица 25.3

Термо-э. д. с. важнейших сплавов для термопар относительно платины при разных температурах [3], мкв

T, °C	Дюраль 94%Al+4,5%Cu	Алюмель 94%Ni+2Al+3Mn	Константан 60%Cu+40%Ni
−200	−3,36	+2,39	+5,35
−100	−2,20	+1,20	+2,96
0	0	0	0
+100	+2,81	−1,29	−3,51
200	5,56	−2,17	−7,46
300	8,32	−2,69	−11,71
400	12,75	−3,04	−16,19
500	16,21	−4,43	−20,79
600	19,62	−5,28	−25,47
700	22,96	−6,18	−30,18
800	26,23	−7,08	−34,86
900	29,41	−7,96	−39,45
1000	32,52	−8,79	−43,92
1100	35,56	−9,58	—
1200	38,51	−10,34	—
1300	41,35	−11,06	—
1400	44,04	−11,77	—

Таблица 25.4

Термо-э. д. с. металлов и сплавов при различных давлениях и температурах [4], мкв

В таблице дана зависимость от температуры термо-э. д. с. (мкв) между металлом, сжатым всесторонним давлением p (кГ/см²), и тем же металлом, находящимся при нормальном давлении. Термо-э. д. с. считается положительной, если ток в нагретом спае течет от несжатого металла к сжатому.

Металлы и сплавы	t, °C	p, 10³ кГ/см²		
		4	9	12
Алюминий	20	−0,081	−0,006	0,066
	60	−0,060	+0,146	+0,543
	100	+0,294	+0,929	+1,962
Вольфрам	20	+0,90	+1,60	+2,70
	60	+2,57	+5,72	+8,59
	100	+4,90	+10,12	+15,14
Висмут	20	+42	+106	+185
	60	+134	+308	+539
	100	—		

Продолжение табл. 25.4

Металлы и сплавы	θ, °C	$\alpha \cdot 10^3$, в/(°С·см²)		
		1	8	12
Железо (отожженное)	20 60 100	−0,15 +1,08 +3,25	−0,50 +1,31 +5,62	−0,99 +1,40 +7,68
Железо (нетожженное)	20 60 100	−0,15 +1,05 +4,42	0,45 +1,54 +8,70	−0,74 +2,20 +12,60
Золото	20 60 100	+0,303 +1,115 +2,051	+0,670 +2,406 +3,974	+0,990 +3,213 +5,760
Калий	20 60 100	+1,10 +6,22 +14,38	+3,46 +13,08 +28,74	+6,69 +23,93 +45,36
Кобальт	20 60 100	−1,20 −3,86 −6,92	−2,37 −7,70 −13,60	−3,52 −11,47 20,61
Константан	20 60 100	+2,29 +6,09 +11,81	+4,53 +13,82 +27,79	+6,75 +20,77 +35,47
Магний	20 60 100	−0,72 −2,17 −3,62	−1,56 −4,75 −7,91	−2,59 −7,79 −12,56
Манганин	20 60 100	0,103 −0,296 −0,452	−0,513 0,573 −0,894	−0,308 −0,846 −1,314
Медь	20 60 100	+0,224 +0,700 +1,216	−0,424 +1,370 +2,420	−0,596 +1,076 +3,346
Молибден	20 60 100	+0,052 +0,218 +0,278	+0,101 +0,436 +0,556	−0,146 +0,649 +0,833
Никель	20 60 100	+0,55 +1,85 +3,40	+1,17 +3,97 +7,10	+1,89 +6,32 +11,44
Олово	20 60 100	0,000 +0,083 +0,165	−0,045 +0,122 +0,292	−0,182 +0,103 +0,390
Палладий	20 60 100	+1,96 +5,28 +8,80	+3,40 +10,41 +17,09	+5,09 +15,04 +20,52
Платина	20 60 100	+1,99 +4,39 +7,31	+2,56 +6,96 +14,35	+3,98 +13,39 +21,57

Продолжение табл. 25.

Металлы и сплавы	θ, °C	$\alpha \cdot 10^3$, в/(°С·см²)		
		1	8	12
Свинец	20 60 100	+0,32 +1,14 +2,12	+0,69 +2,20 +4,21	+1,06 +3,44 +6,33
Серебро	20 60 100	+0,66 +2,10 +3,72	+1,29 +4,08 +7,19	+1,90 +6,02 +10,56
Таллий	20 60 100	+3,57 +11,45 +20,29	+6,41 +21,01 +37,63	+8,78 +29,15 +52,46
Цинк	20 60 100	+4,9 +15,9 +28,5	0,6 +32,1 +58,1	+14,4 +47,4 +67,4

Таблица 25.5

Коэффициенты термо-э. д. с. различных металлов в сплавах в магнитном поле при насыщении относительно тех же сплавов металлов без магнитного поля [5, 6]

Металл	Область температур, °C	α_{12}^{*}, мв/(°С·см²)	
		$\alpha_{12\parallel}$	$\alpha_{12\perp}$
Fe	10—95	+0,90	−0,058
Ni	10—97	+0,301	−0,136
Ni	5—100	+0,20	−0,11
Ni + 5% Mn	5—100	+0,26	−0,12
Ni + 10% Mn	5—100	+0,12	—
Ni + 15% Mn	5—100	+0,065	−0,02
Ni + 25% Mn	5—100	—	−0,05
Ni + 30% Mn	5—100	—	−0,10

* $\alpha_{12\parallel}$ — коэффициенты термо-э. д. с. в магнитном поле, параллельном градиенту температуры; $\alpha_{12\perp}$ — коэффициенты термо-э. д. с. в магнитном поле, перпендикулярном градиенту температуры.

25.2. ЭФФЕКТ ПЕЛЬТЬЕ

Эффект Пельтье обратен эффекту Зеебека. При прохождении тока через спай различных проводников кроме джоулева тепла выделяется или поглощается, в зависимости от направления тока, некоторое количество тепла $Q_П$, пропорциональное протекающему через контакт заряду (т. е. силе тока I и времени t) $Q_П = ПIt$, где П — коэффициент Пельтье, который зависит от природы находящихся в контакте материалов.

Согласно термодинамической теории, коэффициент Пельтье связан с коэффициентом термо-э. д. с. $\varepsilon = dE/dT$ соотношением $П = \varepsilon T$.

Таблица 25.6

Коэффициент Пельтье для различных металлов [7]

Стрелка показывает направление тока через нагретый спай

Пара металлов	T, °C	Π, мв/а	Пара металлов	T, °C	Π, мв/а
Sb → Pb	20	0,01	Fe → Cu	0	0,064
$Bi_{\perp}$ → $Bi_{\parallel}$	20	3,55*	Fe → Hg	18,4 90,64 162,3	1,1644 1,385 1,511
$Cd_{\parallel}$ → Cd	20	0,2681*			
Cd → Ni	15	1,59	Fe → Ni	15	2,268
Cu → Ag	0	0,0168	Fe → Константан	0	3,10
Cu → Al	14	0,405	Pb → Bi	20	0,16
Cu → Au	0	0,0813	Pb → Константан	0 100 200 300	1,90 2,73 3,6 4,4
Cu → Bi	18	3,85			
Cu → Ni	0	1,90	Sb → Bi	20	10,7
	14,4	1,385	Sb → Pb	20	0,186
Cu → Pd	0	0,588	Zn → Ni	15	1,534
Cu → Pt	0	0,239*	$Zr_{\perp}$ → $Zr_{\parallel}$	20	0,126*
Cu → Константан	15,0	2,430	Графит → Cu	20	0,703

* Вычислено по термоэлектрической формуле из эффекта Пельтье и Томсона и теплоемкости [7].

Таблица 25.7

Зависимость коэффициента Пельтье, измеренного калориметрическим методом для различных пар металлов, от температуры

Чтобы получить коэффициенты Пельтье в киловатт-часах на кулон, надо приведенное в таблице число умножить на 0,530.

Хромель — копель* (Bi)		Медь — никель (C)		Сплав — константан (Pt)	
T, °C	Π, мв	T, °C	Π, мв	T, °C	Π, мв
0	+13	19	+8,0	20	+8,7
20	+15	66	+9,6	110	+11,8
100	+19	205	+10,3	235	+16,0
240	+26	290	+8,6	300	+18,7
320	+34	340	+8,0	360	+20,6
500	+52	440	+10,6	440	+23,4

* Копель — константан: Π = 11,0 мв при T = 20°С [16].

25.3. ЭФФЕКТ ТОМСОНА

Если вдоль проводника, по которому протекает электрический ток, существует перепад температур ($T_1 - T_2$), то кроме джоулева тепла в объеме проводника выделяется или поглощается, в зависимости от направления тока, некоторое количество тепла

$$Q_S = S(T_1 - T_2)\,It,$$

где S — коэффициент Томсона, зависящий от природы материала; I — ток; t — время.

Согласно термодинамической теории, коэффициент термоэл. д. с. пары проводников связан с их коэффициентами Томсона соотношением

$$de/dt = (S_1 - S_2)/T.$$

Таблица 25.8

Значения коэффициента Томсона для различных металлов

Чтобы получить коэффициент Томсона в *киловатт-часах/(град·час)*, надо умножить S на 0,239. Коэффициент Томсона имеет положительный знак, если направление потока тепла совпадает с направлением тока.

Металл		T, °K	S, мв/град	Литература
Ag		105 150 300	−0,10 +0,15 +1,31	[11] [11] [11]
Al(99%)		250 300 400	+0,11 −0,08 0,50	[11] [11] [11]
Au		105 150 300	+0,25 +0,96 +1,14	[11] [11] [11]
Cd (монокристалл)	∥ [1]	373 473	+6,0 +7,3	[18] [18]
	⊥ [2]	373 473	+8,2 +8,7	[18] [18]
Co		100 200 300	−8,4 −19,6 −25,4	[19] [19] [19]
Cr		70 170 300	−0,26 0,47 +1,52	[14] [14] [14]
Cu + 0,57 ат. % Au		20 40 60 90 130 300	+0,44 +2,17 +2,06 +2,20 +1,71 +2,33	[14] [14] [14] [14] [14] [14]
Fe (Армко)		323 423 523	−15,3 −22,8 −26,3	[12] [12] [12]

Продолжение табл. 25.8

Металл		T, °K	S, $\frac{\text{мкв}}{\text{град}}$	Литература
Ni		100 200 300	−4,5 −12,1 −15,7	[19] [19] [19]
Pb (99,99%)		120 200 400	+0,19 −0,45 −0,85	[11] [11] [11]
Pd		20 100 200 300	+1,9 7,8 −12,2 −18,2	[19] [19] [19] [19]
Pt		203 273 353	9,6 −9,1 −9,2	[13] [13] [13]
Sn(99,99%)		100 200 300 400	+0,86 +0,42 0,07 −0,45	[11] [11] [11] [11]
Zn (монокристалл)	⊥ *	322,5 358	+1,6 +4,6	[17] [17]
	∥ **	322,5 358	+4,1 +8,8	[17] [17]
W		328	+8,5	[11]
Константан		323 384 440	−24,6 −25,5 −26,0	[16] [16] [16]
Нейзильбер		328	12,0	[15]

* ⊥ — образец вырезан перпендикулярно оси кристалла (Томсон-эффект измерялся вдоль образца).

** ∥ — образец вырезан под углом 90° к гексагональной оси кристалла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Borelius G.** Handb. Metallphysik. Berlin, J. Springer, 1935.
2. **Landolt-Börnstein.** Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, 6 Teil, Elektrische Eigenschaften. Berlin, Göttingen—Heidelberg, Springer-Verlag, 1959.
3. **American** Institute of Physics Handbook. Ed. D. Gray. Mc Graw-Hill Book, Company, Inc., New—York—Toronto—London, 1957.
4. **Bridgman P. W.** "Proc. Amer. Acad. Arts Sci.", 1917/18, v. 53, p. 267.
5. Анасов Р. Г. «Изв. АН СССР», 1948, т. 63, с. 659.
6. **Konstantinow I.** "Helv. Phys. Acta", 1934, v. 7, p. 732.
7. Сборник физических констант. Ред. Дорфман Я. Г. и Франк С. Э. М., ОНТИ, 1937.
8. **Grüneisen P.** "Ann. Physik", 1907, v. 24, p. 351.
9. **Grüneisen P.** "Ann. Physik", 1908, v. 26, p. 521.
10. **Woodall A. J.** "Proc. Phys. Soc.", 1935, v. 47A, p. 615.
11. **Borelius G.** "Ann. Physik", 1921, v. 65, p. 519.
12. **Jonge J.** "Proc. Phys. Soc.", 1935, v. 37A, p. 145.
13. **Berg O.** "Ann. Physik", 1910, v. 32, p. 477.
14. **Borelius G., Keesom W. H.** "Comm. Kamerlingh Onnes Lab. Univ. Leiden", 1925, v. 156a, p. 3.
15. **Smith H. E.** "Proc. Phys. Soc.", 1925, v. 38A, p. 1.
16. **Nettleton R.** "Proc. Phys. Soc.", 1922, v. 34A, p. 77.
17. **Ware L. A.** "Phys. Rev.", 1930, v. 35, p. 989.
18. **Verleger H.** "Ann. Physik", 1931, v. 9, p. 366.
19. **Borelius G.** e. a. "Proc. Amsterdam", 1930, v. 33, p. 17.

ГЛАВА 26

ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ И ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

26.1. ВВЕДЕНИЕ

Гальваномагнитные явления — совокупность явлений, возникающих под действием магнитного поля в проводниках (металлах и полуметаллах), по которым протекает электрический ток.

Термомагнитные явления — совокупность явлений, возникающих под действием магнитного поля в проводниках, внутри которых имеется тепловой поток. Наиболее характерные черты этих явлений связаны с влиянием воздействия внешнего магнитного поля на движение носителей тока.

При поперечном намагничивании проводника с током ($\mathbf{H} \perp \mathbf{J}$) наблюдаются следующие гальваномагнитные явления:

1) в направлении, перпендикулярном к вектору магнитного поля и вектору плотности тока $\mathbf{J}$, возникает электрическое поле (эффект Холла) $\mathbf{E} = R[\mathbf{JH}]$, где R — коэффициент Холла;

2) в направлении, перпендикулярном к вектору маг-

нитного поля $\mathbf{H}$ и вектору плотности тока $\mathbf{J}$, возникает температурный градиент (эффект Эттингсгаузена) $\nabla T = P[\mathbf{JH}]$, где P — коэффициент Эттингсгаузена.

Эффект изменяется теплопроводность проводника, что эквивалентно появлению добавочной разности потенциалов вдоль направления электрического тока.

При поперечном намагничивании проводника возникают следующие термомагнитные явления:

1) в направлении, перпендикулярном градиенту температур $\nabla_x T$ и направлению магнитного поля $\mathbf{H}$, появляется электрическое поле (эффект Нернста) $\mathbf{E} = Q[\nabla T\mathbf{H}]$ при $\mathbf{J} = 0$, где Q — коэффициент Нернста;

2) в направлении, перпендикулярном градиенту температур $\nabla_x T$ и направлению магнитного поля $\mathbf{H}$, возникает градиент температур (эффект Ригги—Ледюка) $\nabla_y T = S[\mathbf{H}\cdot\nabla_x T]$, где S — коэффициент Ригги—Ледюка. При продольном намагничивании образца изменяются электропроводность, термоэ. д. с. и теплопроводность.

Значения коэффициентов гальваномагнитных эффектов в металлах отличаются большим разнообразием, связанным со сложностью зонной структуры и формы поверхности Ферми. Гальвано- и термомагнитные эффекты очень чувствительны ко всякого рода примесям и неоднородностям. По этой причине приведенные в таблицах значения коэффициентов надо рассматривать лишь как наиболее заслуживающие доверия.

Различают гальваномагнитные явления четные (т. е. зависящие от четных степеней H) и нечетные (т. е. зависящие от нечетных степеней H). Наиболее может из нечетных — эффект Холла, наиболее существен из четных эффектов — эффект изменения сопротивления в магнитном поле.

Эффект Холла

Опыт показывает, что коэффициент Холла R может быть положительным и отрицательным и даже менять знак с изменением температуры. Для большинства металлов наблюдается почти полная независимость коэффициента Холла от температуры. Четко аномальным эффектом Холла обладают щелочные и другие металлы V группы периодической системы. Значения гальваномагнитных коэффициентов этих металлов помещены в отдельную таблицу (табл. 26-7).

В ферромагнитном поле $\mathbf{H}$ меняет направление намагниченности доменов, так что на электроны проводимости подействует магнитное поле, отличное от внешнего. При этом наблюдается особый, ферромагнитный, эффект Холла. Для ферромагнитных экспериментально найдено, что

$$E_y = (R_0 \mu_0 H + R_1 M) J, \qquad (26.1)$$

где E_y — поле Холла в направлении y (рис. 26.1); H — напряженность магнитного поля; μ_0 — постоянная индукции; M — намагниченность образца; J — плотность тока, протекающего через образец; R_0 и R_1 — обыкновенный и необыкновенный (аномальный) коэффициенты Холла.

Последнее соотношение с учетом равенства $B = \mu_0 H + M$ можно записать в виде

$$e = \frac{U_H d}{I} = R_0 B + R_S M, \qquad (26.2)$$

где U_H — напряжение Холла; I — полный ток через образец; d — толщина образца; $R_S = R_1 - R_0$ — так называемый *спонтанный*, или *ферромагнитный*, коэффициент Холла. Для большинства ферромагнитных металлов обнаружено, что $R_0 \ll R_1$ и $R_S \approx R_1$.

Из этого выражения определяют коэффициенты Холла, используя экспериментальные зависимости $e(B)$ (рис. 26.2).

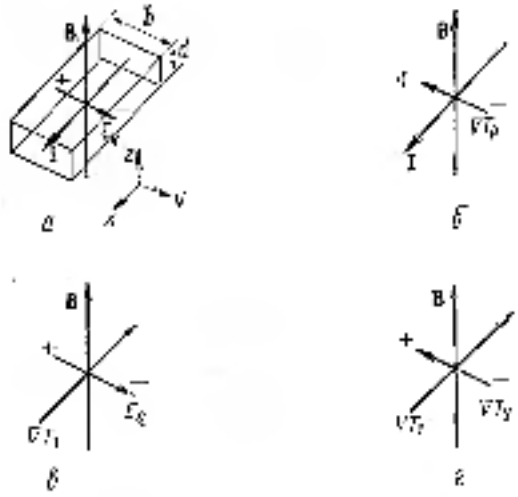


Рис. 26.1. Схемы ориентации векторов $\mathbf{H}$, $\mathbf{J}$, $\mathbf{E}_R$, $\mathbf{grad}\ T$

а — для эффекта Холла; *б* — для эффекта Нернста; *в* — для эффекта Эттингсгаузена; *г* — для эффекта Ригги—Ледюка.

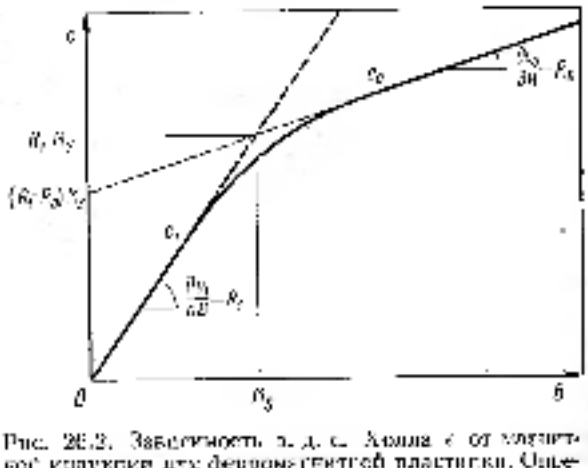


Рис. 26.2. Зависимость э. д. с. Холла e от магнитной индукции для ферромагнитной пластинки. Определение обыкновенного R_0 и аномального R_1 коэффициентов Холла.

Выше магнитного насыщения второй член в (26.2) постоянен, и тогда зависимость $e(B)$ переходит в прямую линию. Ее наклон дает R_0. Продолжив прямую линию до $B = 0$, получим отрезок на оси ординат, равный $R_S M_S$, где M_S — намагниченность насыщения образца. Отсюда определяют R_S. Обычно $R_S \gg R_0$ и сильно зависит от температуры. С повышением температуры коэффициент Холла R_S возрастает, достигая максимума в точке Кюри, а затем снижается. В парамагнитной области температур эффект Холла определяется соотношением

$$e = R^* H,$$

где $D^* = D_0 + \chi D_S = D_0 + D_p$; χ — диэлектрическая восприимчивость вещества; D_p — гиромагнитный коэффициент Холла—Кикоина.

Значения гальваномагнитных коэффициентов ферромагнитных металлов помещены в отдельную таблицу (26-13).

Термомагнитные эффекты в ферромагнетиках определяются следующими формулами:

эффект Эттингсгаузена

$$\frac{\partial T_E}{\partial y} = (P_0 \alpha_0 H + P_1 M) I;$$

эффект Ригги — Ледюка

$$\frac{\partial T_S}{\partial y} = (S_0 \alpha_0 H + S_1 M) \frac{\partial T}{\partial x};$$

эффект Нернста

$$\frac{\partial T_Q}{\partial y} = (Q_0 \alpha_0 H + Q_1 M) \frac{\partial T}{\partial x}.$$

Изменение сопротивления в магнитном поле (магнетосопротивление)

При обычно используемых напряженностях поля $H \ll 10^5$ э и комнатной температуре магнетосопротивление $\Delta\rho/\rho_0$ ($\Delta\rho$ — изменение сопротивления в магнитном поле, ρ_0 — сопротивление при $H = 0$) для большинства металлов весьма мало. Например, для меди $\Delta\rho/\rho_0 \approx 10^{-4}$ при $H = 2 \cdot 10^4$ э. Исключением является висмут, у которого $\Delta\rho/\rho_0 \approx 2$ при $H = 3 \cdot 10^4$ э. В полупроводниках этот эффект значительно больше, чем в металлах (например, в германии при $T \approx 100°$ К и $H = 2 \cdot 10^4$ э $\Delta\rho/\rho_0 \approx 3$).

У большинства металлов и полупроводников (за исключением ферромагнитных) удельное сопротивление ρ с ростом магнитного поля возрастает. В сильных магнитных полях характер зависимости сопротивления от H существенно связан с характером энергетического спектра электронов. Все металлы с замкнутыми поверхностями Ферми, у которых число электронов n_1 не равно числу дырок n_2 (Na, Al, In), имеют сопротивление, которое сравнительно слабо зависит в сильных магнитных полях.

Металлы с замкнутыми поверхностями Ферми, для которых число электронов равно числу дырок ($n_1 = n_2$) (K, Be и др.), характеризуются квадратичной зависимостью от H, причем это имеет место при любом направлении H. Исключение составляет случай продольного поля ($H \parallel I$), когда сопротивление стремится к насыщению. Для металлов с замкнутыми поверхностями Ферми линейное возрастание сопротивления с увеличением напряженности поля, по-видимому, наблюдается в промежуточных полях.

У металлов с открытыми поверхностями Ферми (Sn, Au, Zn, Ta и др.) наблюдается резкая анизотропия гальваномагнитных свойств: при одних направлениях H — квадратичное возрастание с увеличением напряженности, при других — насыщение. В ряде случаев линейное возрастание сопротивления с ростом H является результатом усреднения.

В ферромагнитных металлах зависимость ρ от H имеет ряд особенностей, которые обусловлены наличием в этих веществах самопроизвольной намагниченности. В больших магнитных полях вплоть технического насыщения материала (или в области пара-процесса) сопротивление с ростом поля всегда уменьшается независимо от направления магнитного поля по отношению к току.

Значения всех гальвано- и термомагнитных коэффициентов даны в таблицах в системе СИ. Для перевода в другие системы единиц следует пользоваться табл. 26.1

Таблица 26.1

Таблица перевода единиц измерения коэффициентов гальвано- и термомагнитных явлений из системы СИ в другие системы

Величина	Обозначение	Система СИ	Практическая система (внесистемные единицы)	Система СГСМ
Магнитная индукция	B	$\frac{вб}{м^2} = \frac{в \cdot сек}{м^2}$	10^4 гс	10^4 $см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Коэффициент Холла	R	$\frac{м^3}{к} = \frac{м^3}{а \cdot сек}$	$10^{-9} \frac{см^3}{а \cdot сек}$	10^9 $см^{3/2} \cdot г^{-1/2}$
Коэффициент Эттингсгаузена	P	$\frac{драд \cdot м^3}{в \cdot а \cdot сек}$	$10^{-8} \frac{драд \cdot см}{а \cdot гс}$	10^{-1} $драд \cdot см \cdot г^{-1/2} \cdot сек^2$
Коэффициент Ригги — Ледюка	S	$\frac{м^3}{в \cdot сек}$	10^{-8} $гс^{-1}$	10^{-4} $см^{1/2} \cdot г^{-1/2} \cdot сек$
Коэффициент Эттингсгаузена — Нернста	Q	$\frac{м^2}{драд \cdot сек}$	$10^{-4} \cdot \frac{см}{драд \cdot гс}$	10^3 $драд^{-1} \cdot см^2 \cdot сек^{-1}$

Таблица 26.2

Коэффициенты Холла для металлов

Металл	T, °K	B, вб/м²	R, 10^{-10} м³/к	Литература
Li	207	1,7—1,8	−1,70	[1]
Pb (99,5%)[1]	200	0,3—2,0	−7,7	[4]
Na	298	0,2—2,04	−2,1	[2]
Mg	300	0,4—2,5	−0,83	[5]
Al (99,0%)	83	0,54	0,22	[8]
	273	0,54	−0,33	[8]
	573	0,54	−0,39	[8]
	873	0,54	−0,41	[8]
K	256—333	0,4—2,64	−4,2	[2]
Ca (99%)	293	0,3—1	−1,75	[6]
Ti (99,91%)	291	1,2—2,9	−0,20	[15]
Ti (99,87%)	291	0,4—2,6	+0,10	[15]
	294	—	+0,7[19]	[16]
	294	—	−1,08[19]	[16]
	294	—	+0,42[19]	[17]
	294	—	−0,17[19]	[17]
V	301	0,3—2,9	−0,89	[14]
V (99,13%)	293	—	−0,79	[21]
	20	—	+0,62	[21]
Cr (99,0%)	287	1,0—2,9	−3,63	[14]
Mn (99,99%)	297	0,6—2,9	+0,84	[14]
Cu	298,2	1,13—1,24	−0,536	[31]
	328,2	1,13—1,24	−0,537	[31]
	358,2	1,13—1,24	−0,538	[31]
Cu (98,9%)	83	0,54	−0,560	[30]
	173	0,54	−0,510	[30]
	273	0,54	−0,518	[30]
	573	0,54	−0,543	[30]
	873	0,54	−0,587	[30]
Cu (отожженная)	300	0—1,5	−0,53	[32]
	150	0—1,5	0,54	[32]
	50	0—1,5	−0,63	[32]
	40	0—1,5	−0,68	[32]
	4	0—1,5	−0,65	[32]
Zn (технический)	298	0,5—1,1	+1,04	[26]
Cd	293	1,65	−0,83	[30]
Rh	293—308	0,2—1,6	−4,2	[3]

Металл	T, °K	B, вб/м²	R, 10^{-10} м³/к	Литература
Y (99,2%)	293	0,56	0,770	[9]
Y (монокристалл) $\frac{R_{293°K}}{R_{4,2°K}} = 10,4$	250	0—1,0	−1,72[19]	[10]
	200	0—1,0	−0,47[19]	[10]
	1	0—1,0	−0,65[19]	[10]
	4	0—1,0	−0,58[19]	[10]
Y (монокристалл) $\frac{R_{293°K}}{R_{4,2°K}} = 16$ Ср. рис. 26.3 [11]				
Zr (97,3% Zr + 2,4% Hf)	83	0,54	+1,08	[8]
	273	0,54	+1,385	[8]
	573	0,54	+0,605	[8]
	873	0,54	+0,215	[8]
Zr $\left(\frac{R_{293°K}}{R_{4,2°K}} = 38\right)$	400	0—1,5	+3,15	[18]
	200	0—1,5	+2,72	[18]
	300	0—1,5	+2,15	[18]
Nb	83	0,54	+0,02	[8]
	273	0,54	+0,38	[8]
	873	0,54	+0,91	[8]
Mo	83	0,54	+1,79	[8]
	273	0,54	+1,80	[8]
	873	0,54	+1,76	[8]
Ru	293	4,45	−2,2	[26]
Rh (99,5%)	291	4,9	+0,506	[27]
Te	299	0,87—0,92	−0,845	[28]
	318	0,87—0,92	−0,853	[28]
	337	0,87—0,92	−0,844	[28]
Ag (техническое)	293	0,5—1,1	−0,897	[20]
Ag (99,9%)	83	0,54	−0,895	[30]
	173	0,54	−0,902	[30]
	273	0,54	−0,909	[30]
	573	0,54	−0,949	[30]
	873	0,54	−1,002	[30]
Ag (отожженная)	300	0—1,5	−0,89	[32]
	150	0—1,5	−0,88	[32]
	50	0—1,5	−0,97	[32]
	40	0—1,5	−1,13	[32]
	4	0—1,5	1,12	[32]
Cd (99,9%)	293	0,310—0,842	+0,531	[34]
In	295	1,7—1,8	−0,073	[1]
	78	0,6—2,0	−0,166	[37]
Sn	294,5	0,302—0,812	−0,022	[38]
Cs	293	0,037—1,86	−7,8	[2]

Продолжение табл. 26.2

Металл	T, °K	B, кГс	R, 10^{-12} м³/кл	Литература
La (99,5%)	293	0,56	−0,8	[19]
Ce (99,86%)	293	0,96	+1,81	[9]
Pr (99,0%)	293	0,96	+0,709	[9]
Nd (99,98)	293	0,96	+0,971	[9]
Sm	213	0—0,55	0,08	[13]
	300	0—0,55	−0,21	[13]
Sm $\left(\frac{\rho_{293K}}{\rho_{4,2K}} = 15,3\right)$	4,2	—	+1,5	[14]
	30	—	+2,8	[14]
	170	—	0	[14]
	300	—	0,5	[14]
Tm	60	0—0,55	−5,4	[13]
	120	0—0,55	2,4	[13]
	180	0—0,55	−1,9	[13]
	300	0—0,55	1,5	[13]
Yb	77	0—0,55	3,8	[13]
	180	0—0,55	3,75	[13]
	300	0—0,55	3,7	[13]
Lu	60	0—0,55	0,56	[13]
	180	0—0,55	0,54	[13]
	300	0—0,55	2,13	[13]
Lu (монокристалл $\frac{\rho_{293K}}{\rho_{4,2K}} = 25$)	См. рис. 26.3 [11]			
Li (99,4%)	4,2	—	−0,26	[19]
	100	—	+0,19	[19]
	200		+0,50	[19]
	300	—	+0,42	[19]
Na (99,8%)	83	0,54	+0,973	[8]
	273	0,54	+0,971	[8]
	773	0,54	+0,967	[8]
W	297	1,7—1,8	+1,18	[1]
W (99,9%)	83	0,54	+1,20	[8]
	173	0,54	+1,06	[8]
	273	0,54	+1,11	[8]
	873	0,54	+1,56	[8]
Re	293	4,82	−3,16	[26]
Re $\left(\frac{\rho_{293K}}{\rho_{4,2K}} = 27\right)$	100	0—1,5	+0,4	[18]
	200	0—1,5	0,9	[18]
	300	0—1,5	+1,6	[18]
Ir	293	0,5—1,1	+0,406	[29]
Pt	293	0,5—1,1	−1,27	[29]

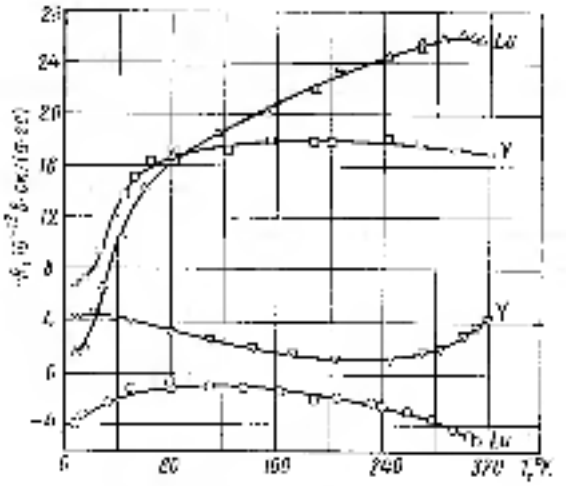


Рис. 26.3. Температурная зависимость коэффициента Холла R для монокристаллических образцов лютеция и иттрия [11]:
△ — Lu (H ∥ оси c); ▽ — Y (H ∥ оси c); ○ — Lu (H ∥ оси b); ▽ — Y (H ∥ оси b).

Продолжение табл. 26.2

Металл	T, °K	B, кГс	R, 10^{-12} м³/кл	Литература
Pt (99,9%)	83	0,54	−0,203	[30]
	173	0,54	0,181	[30]
	273	0,54	−0,214	[30]
	573	0,54	0,255	[30]
	873	0,54	0,276	[30]
Au	290	0,87—0,92	−0,705	[25]
	345	0,87—0,92	−0,696	[25]
Au (отожженная)	300	0—1,5	0,73	[32]
	150	0—1,5	−0,72	[32]
	50	0—1,5	−0,73	[32]
	40	0—1,5	−0,84	[32]
	4	0—1,5	−0,95	[32]
Au (99,9%)	83	0,54	−0,718	[30]
	123	0,54	−0,697	[30]
	273	0,54	0,706	[30]
	573	0,54	−0,721	[30]
	873	0,54	0,735	[30]
Hg	293	1,6—2,24	<0,02	[35]
Tl	295	1,5—1,5	+0,940	[1]
Pb	2,8	0,03**	<+0,06	[40]
	2,8	1,13	+0,13	[40]
	4,2	0,03**	<+0,06	[40]
	4,2	0,10	+0,08	[40]
	4,2	0,50	−0,08	[40]
	4,2	1,13	+0,18	[40]
Tl	293	0,37—0,45	1,2	[20]
U	293—573	0,5—1,7	+0,34	[22]

* В слабых полях чистого металла.
** H ∥ кристаллической оси.
*** H ∥ кристаллической оси.
**** В гексагональном состоянии.

Таблица 26.3

Коэффициенты Холла для поликристаллических образцов [41]

Металл	T, °K	n, см/см³	Число кристаллов	$R_{\parallel}$, 10^{-10} м³/кл (B ∥ [0001])	$R_{\perp}$, 10^{-10} м³/кл (B ⊥ [0001])
Zn	77	1,35	1	+1,97	+0,16
	77	1,35	4	+2,01	+0,18
	77	1,35	5	+1,80	+0,19
	288	1,35	1	+1,44	+0,04
	288	1,35	4	+1,43	−0,06
	288	1,35	5	+1,44	−0,025
Cd	77	1,35	1	+1,86	+0,38
	77	1,35	3	+1,74	+0,27
	288	1,35	1	+1,20	+0,11
	288	1,35	3	+1,32	0

В работе [41] измерения эффекта Холла были проведены на поликристаллических образцах. Диаметр кристаллов.

Таблица 26.4

Коэффициенты Холла для жидких металлов и сплавов

Металл	R, 10^{-11} м³/кл	Литература
Ga	−4,1	[42]
	−3,9	[43]
	−3,87	[44]
In	−0,4	[42]
	−5,3	[44]
In_2Bi	−4,6	[42]
Sn	−4,1	[42]
	−4,4	[44]
Hg	−7,0	[42]
	−7,46	[43]
	−7,6	[44]
Сплав 58% Hg + 42% Sn	−6,75	[42]
Сплав 36% Hg + 64% Sn	−6,2	[42]

Таблица 26.5

Коэффициенты Холла для различных сплавов

Сплав	Атомная концентрация компонента, %	T, °K	R, 10^{-10} м³/кл	Литература
Mg—Li	Li			
	0	293	−0,842	[46]
	0,29	293	−0,693	[46]
	2,68	293	−0,175	[46]
	4,42	293	+0,113	[46]
Mg—Al	Al			
	0,29	293	−0,767	[46]
	0,60	293	−0,707	[46]
	1,31	293	−0,653	[46]
	2,18	293	−0,667	[46]
	2,41	293	−0,669	[46]
Mg—Ag	Ag			
	0,11	293	−0,801	[46]
	0,22	293	−0,770	[46]
	0,33	293	−0,734	[46]
	0,528	293	−0,676	[46]
	0,958	293	0,606	[46]
Mg—Cd	Cd			
	0,56	293	−0,708	[46]
	1,92	293	−0,487	[46]
	3,92	293	−0,290	[46]
	8,64	293	+0,062	[46]
	12,68	293	+0,319	[46]
Mg—In	In			
	0,446	293	−0,731	[46]
	1,46	293	−0,619	[46]
	6,76	293	−0,984	[46]
	10,57	293	−1,466	[46]
Mg—Tl	Tl			
	1,32	293	−0,362	[46]
	2,94	293	−0,173	[46]
	4,84	293	−0,271	[46]
Mg—Sn	Sn			
	0,047	293	−0,837	[46]
	0,29	293	−0,749	[46]
	1,08	293	−0,865	[46]

Продолжение табл. 26.5

Сплав	Атомное содержание компонента, %	T, °K	R, 10^{-10} м³/кг	Литература
Mg—Pb	Pb: 0,24 1,92 2,01	293 293 293	—0,798 —0,732 —0,724	[46] [46] [46]
Al—Cu*	3,03 Cu 0,005 Si 0,02 Fe	293[**] 293[**]	—0,374 0,196	[47] [47]
Al—Ag[*]	Ag 0 10,02 30,01	291,7 291,7 292,2	—0,350 —0,310 —0,301	[48] [48] [48]
Al—Ag	50,19 70,23 80,60 90,41	290,7 290,7 290,7 291,4	—0,226 —0,040 +0,139 +0,306	[48] [48] [48] [48]
Al—Si[*]	0,62 Si 1,00 Fe 0,018 Cu	216	+0,316	[47]
Pd—Tl	Tl 0 4,94	293 293	—1,13 —0,21	[49] [49]
Pd—Re	Re 0,7 2,09 2,91	293 293 293	—1,32 —1,65 —2,11	[49] [49] [49]
Pd—Ag	Ag 20 20 20 40 40 40	4,2[**] 77[**] 293[**] 4,2[**] 77[**] 293[**]	—3,52 —2,87 —2,01 —4,30 —3,77 —3,10	[50] [50] [50] [50] [50] [50]

* $R = 1,7$ см³/кг.
** $B = 0,90—0,92$ см²/кг.
*** Отжигание неизвестно.
**** Резкое охлаждение.

Продолжение табл. 26.5

Сплав	Атомное содержание компонента, %	T, °K	R, 10^{-10} м³/кг	Литература
Cu—Pd	Pd 10[**] 15[**] 25[**] 44[**]	293 293 293 293	—0,871 —0,290 —1,668 —0,99	[51] [51] [51] [51]
Cu—Au	$AuCu_3$[**] $AuCu_3$[**] AuCu[**] $AuCu_3$[**]	293 293 293 293	—0,645 +0,326 —0,736 —0,382	[52] [52] [52] [52]
Cu—Zn	Cu 0 6 67 81,3 100	293 293 293 293 293	+0,830 +0,496 —0,116 —0,406 —0,320	[53] [53] [53] [53] [53]
Cu—Cd[**]	Cu 0 13,9 20,9 30,5 100	290,0 288,7 287,4 285,1 288,4	+0,530 —1,379 —0,986 —0,683 —0,523	[54] [54] [54] [54] [54]
Cu—Sn	Cu 0[**] 9,88[**] 30,60[**] 60,70[**] 100 [**]	294,7 295,7 291,7 290,7 290,2	—0,092 —0,167 —0,209 +0,170 —0,524	[36] [36] [36] [36] [36]
Mo—Nb	Nb 0 0 7,9 7,9 7,9	290 4,2 210 60 4,2	+1,85 —2,61 —2,82 +3,43 +3,64	[57] [57] [57] [57] [57]

** $B = 0,4—1,7$ см²/кг.
*** $B = 0,7—2,0$ см²/кг.
**** Технически чистый сплав.
***** Электролитический сплав.
****** $B = 0,85$ см²/кг.
******* $B = 0,795—0,812$ см²/кг.
******** $B = 0,802—0,812$ см²/кг.
********* $B = 0,809—0,818$ см²/кг.

Продолжение табл. 26.5

Сплав	Атомное содержание компонента, %	T, °K	A, 10^{-12} в²/к	Литература
Mo—Re	Re 7,4 7,4 7,4	290 80 1,2	+1,40 +1,00 +0,82	[57] [57] [57]
Pd—Ta	Ta 3,03 4,89 6,18	250 250 250	+1,45 +1,78 +1,83	[58] [58] [58]
Hf—Sc	Sc 0 33 40 70	250 250 250 250	−0,25 −0,73 −0,90 −1,00	[58] [58] [58] [58]
Ag—Sn	Ag 5,62* 30,43** 81,00*** 100 ***	290,2 289,0 292,2 295,2	+0,02 +0,278 −0,275 −0,802	[55] [55] [55] [55]

Продолжение 26.5

Сплав	Атомное содержание компонента, %	T, °K	A, 10^{-12} в²/к	Литература
Ag—Zn	Zn 50 (β-фаза) 50 (γ-фаза)	290 290	−0,06 +0,06	[61] [61]
Au—Zn	Zn 50	290	+0,11	[61]
Au—Mn		130 180 250	+0,33 −0,21 +0,25	[56] [56] [56]

* $\beta = 0,885$ в/м²;
** $\beta = 0,900 - 0,835$ в/м²;
*** $\beta = 0,900 - 0,835$ в/м².
Для сплавов Al—Cu, Au—Ag, Al—Si, Cu—Ni, Cu—Au, Pd—Ag, Cu—Cd, Cu—Sn, Ag—Sn — содержание компонентов дано в %.

Таблица 26.6

Термомагнитные коэффициенты для металлов

Металл	T, °K	B, в/м²	R, 10^{-7} $\frac{м^3}{а \cdot сек}$	S, 10^{-3} $\frac{м^2}{в \cdot сек}$	Q, 10^{-8} $\frac{м^2}{ом \cdot сек}$	Литература
Ag (технический)	323	0,5—1,4		−4,04	−4,3	[29]
Al (99,5%)	313	2,35	—	−0,03	+0,39	[7]
Au (99,99%)	330	—	-	—	+0,15	[24]
Cu	358,2 358,2 358,2	1,13—1,14 1,13—1,14 1,13—1,14	−1,446 −1,544 −1,674	−2,608 −2,448 −2,272	−2,155 −2,104 2,014	[31] [31] [31]
Zn (технический)	323 310,6 347,6 401,5	0,5—1,1 0,8—2,3 0,6—2,1 0,8—2,3	—	+1,29 +1,66 +0,97 +0,82	2,40 −1,27 −1,38 −1,20	[29] [7] [7] [7]

Металл	T, °K	B, кГс/м²	A, 10^{-8} $\frac{\text{эрг}\cdot\text{м}^2}{\text{К}\cdot\text{сек}}$	S, 10^{-4} $\frac{\text{м}^2}{\text{К}\cdot\text{сек}}$	Q, 10^{-4} $\frac{\text{м}^2}{\text{эрг}\cdot\text{сек}}$	Литература
Mo	333	1,7—1,8	—	—	—1,72	[1]
Pd	299 318 337	0,87—0,92 0,87—0,92 0,87—0,99	+16,2 +17,8 +20,6	—0,487 0,444 —0,378	+3,97 +3,26 +3,46	[28] [28] [28]
Cd	337 320	1,122	— —	+1,1 +0,80	— —1,20	[22] [33]
Y	296	2,5	75·10⁶	—	—	[12]
In	333	1,7—1,8	—	—	+0,32	[1]
Sn	330	1,4	—	—	—0,04	[30]
Tn (99,8%)	83	0,54	—	—	+0,98	[8]
W	333	1,7—1,8	—	—	—10	[1]
	322	1,22	—	+1,5	—	[22]
Tl	323	0,5—1,1	—	+0,56	—0,05	[20]
Pt	323	0,5—1,1	—	—0,21	—	[20]
Au	299 330	0,87—0,92 0,87—0,99	— —	3,00 —2,63	+1,81 —1,81	[28] [28]
Tl	333	1,7—1,8	—	—	—0,37	[1]
Pb	330	1,4	—	—	—0,06	[30]

26.3. ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МЫШЬЯКЕ, ВИСМУТЕ, СУРЬМЕ И ИХ СПЛАВАХ

Коэффициенты гальвано- и термомагнитных эффектов в As, Bi и Sb отличаются от коэффициентов других металлов относительно большими значениями и сложной температурной зависимостью.

В As и Bi кроме особенной температурной зависимости поперечный эффект зависит еще и от магнитной индукции. При низких температурах наблюдается осцилляция эффекта Холла (эффект де Гааза — ван Альфена). Периодическая зависимость коэффициента Холла от обратной магнитной индукции представлена в следующем виде:

$$R(B, T) = \sum_i \left\{ C_i(B, T) + D_i(B, T) \times \right.$$

$$\left. \times \sin\left(2\pi\left(\frac{F_i}{\beta}\right)\frac{1}{B} - \theta_i\right)\right\},$$

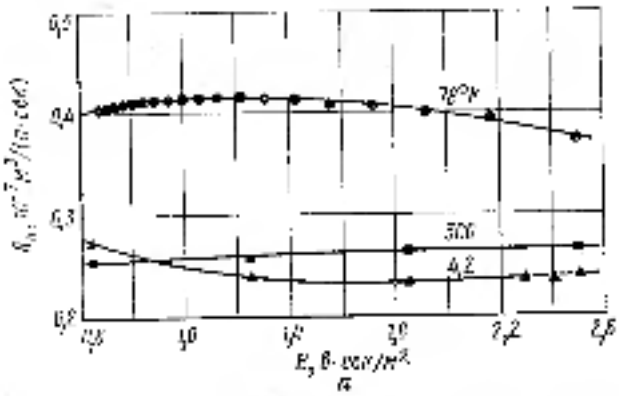
где суммирование производится по носителям различного типа. Здесь B — магнитная индукция; T — абсолютная температура; R — общий коэффициент Холла; C — монотонная часть коэффициента Холла; D — амплитуда осциллаторной части коэффициента Холла; β/F_i — период осцилляции; θ — фаза; F_i — энергия Ферми; $\beta = eh/m^*c$ — эффективный магнетон Бора; m^* — соответствующая эффективная масса носителей.

Таблица 26.7

Коэффициенты гальванов и термомагнитных явлений в мышьяке, висмуте и сурьме

Металл	T, °K	$B, \frac{вб}{м^2}$	$R_H, 10^{-4} \frac{м^3}{к}$	$P, 10^{-8} \frac{ом \cdot см^2 \cdot \Omega}{(в \cdot сек)}$	$S, 10^{-4} \frac{в}{(в \cdot сек)}$	$Q, 10^{-4} \frac{в}{(см^2 \cdot сек \cdot °K)}$	Литература
As	293	0,4 и 0,8	+0,0452	+0,175	+0,465	+0,225	[59]
Sb (99,976%)	291	0,8	+0,219	+1,94	+2,01	+1,76	[10]
	305	1,10		+3,66			[1]
	325	1,10			+2,62		[29]
	291*	0,305—0,083	+0,213	—	—	—	[63]
	289,5*	0,369	+0,232	—	—	—	[63]
	289,5	0,463	+0,232	—	—	—	[63]
	289,5	0,578	+0,234	—	—	—	[63]
	289,5	0,685	+0,232	—	—	—	[63]
	289,5	0,770	+0,229	—	—	—	[63]
	289,5	0,847	+0,217	—	—	—	[63]
Bi	291	0,266	—	—	—	+15,5	[60]
	291	0,263	—6,53	+35,3	—9,05	+17,8	[60]
	291	0,629	—5,90	+51,6	—1,12	+21,4	[60]
	291	0,830	—5,28	+58,3	—0,16	+26,1	[60]
	291	1,057	—4,82	+62,7	—0,79	+27,5	[60]
	325	1,04	—	—	—	+20	[64]
	325	1,09	—	—	—4,05	—	[22]

* Монокристаллическая
* Крупнозернистый поликристалл



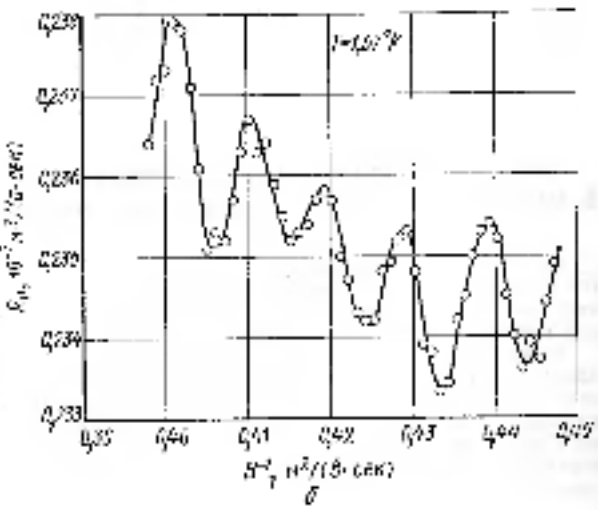


Рис. 26.4. Зависимости коэффициента Холла R_H монокристалла Sb от магнитной индукции [65] (а) и от обратного значения магнитной индукции [65] (б). Тригональная ось перпендикулярна плоскости пластины (т. е. параллельна магнитному полю). Угол между бинарной осью и осью вдоль длины пластины (направление первичного тока) составляет 15°.

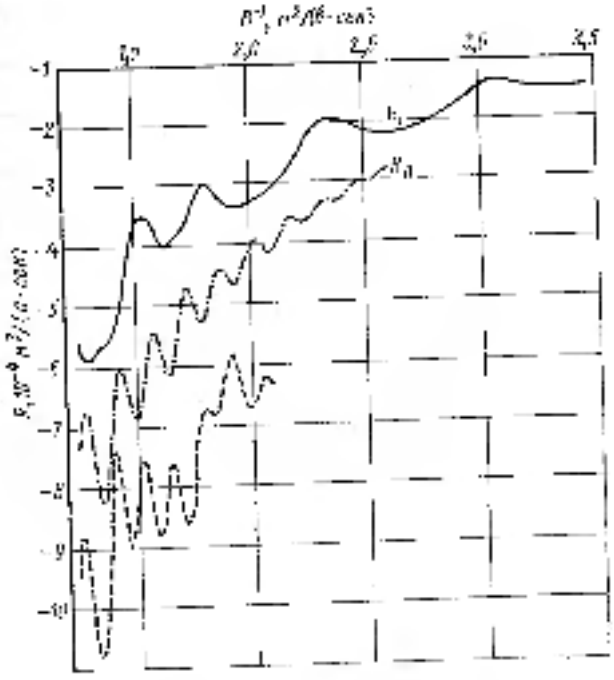


Рис. 26.5. Зависимость коэффициентов Холла ($R_\perp$ и $R_\parallel$) монокристалла висмута от обратного значения магнитной индукции при $T = 1{,}4°$ К [71].

— — — — угол между направлением магнитного поля и трехкратной осью 30°; бесконечный ток направлен вдоль оси; —— магнитное поле перпендикулярно трехкратной оси; —·—·— магнитное поле перпендикулярно трехкратной оси.

Таблица 26.8

Коэффициенты Холла монокристаллических образцов Bi (экстраполированный коэффициент Холла при $B = 0$)

T, °К	$R_\perp^*$, 10^{-9} м³/К	$R_\parallel^{**}$, 10^{-9} м³/К	Литература
20	−180	—	[66]
65	−103	+6	[66]
90	−80	+3	[66]
125	−57	+2	[66]
162	−38	11	[66]
230	−22	0	[66]
290	−15	0	[66]
113	−39	11,7	[67]
203	−27,4	10,0	[67]
273	−16,9	+0,6	[68]
318	−12,1	+0,6	[68]

* $B \perp$ трехкратной оси.
** $B \parallel$ трехкратной оси.

Таблица 26.9

Осцилляции эффекта Холла в Bi

Чистота кристалла, % / ρ, ом·см	B, гс	T, °К	n, см⁻³	Дислокационная часть C, 10^{-4} см²/в·с: *	Дислокационная часть C, 10^{-4} см²/в·с: **	Осцилляции: Период $1/E_0$, см²/в	Осцилляции: Сила	Литература
$1{,}7\cdot10^{-3}$	—	1,4	1,8	−0,5	—	—	—	[69]
$1{,}7\cdot10^{-3}$	—	1,4—4,2	0,3	−4	—	0,4	—	[70]
$1{,}7\cdot10^{-3}$	—	—	1,4	−28	—	—	—	[70]
>99,998% $3\cdot10^{-3}$	—	1,36—4,2	0,2—0,6	—		0,15	—	[71, 72]
99,99%	6,8	4,2	0,840	—	−8,52	—		[73]
	6,8	4,2	0,968	—	−11,09	0,1.7	$1{,}47\ \frac{\pi}{4}$	[73]
	6,8	4,2	1,146	—	−13,26	—	—	[73]
	114	4,2	0,840	—	9,20	—	—	[73]
	114	4,2	0,968	—	−11,09	0,159	$1{,}77\ \frac{\pi}{4}$	[73]
	114	4,2	1,146	—	−13,25	—	—	[73]

* $B \perp$ трехкратной оси.
** $B \parallel$ трехкратной оси.

Таблица 26.10

Коэффициенты Холла в различных сплавах Sb

Легирующий металл	Содержание, %	T, °K	B, вб/м²	R_H, 10^{-10} м³/к	Литература
Ag	0	288	0,464	224	[75]
	2,25	288	0,464	222	[75]
	13,78	285	0,464	216	[75]
	50,07	290	0,464	166	[75]
	70,74	289,5	0,464	1,213	[75]
	89,29	289,5	0,464	−0,864	[75]
	100	295	0,464	−0,858	[75]
Cu	20	289	0,3—0,85	+67,6	[74]
	30	288,1	0,3—0,85	+32,3	[74]
	40	290,2	0,3—0,85	+13,6	[74]
	51,4	294,9	0,3—0,85	+1,50	[74]
	70	291,3	0,3—0,85	+0,111	[74]
	80	296,0	0,3—0,85	−0,324	[74]
Pb	0	291,0	0,305—0,847	+213	[63]
	15	291,0	0,305—0,847	+87,6	[63]
	30	293,5	0,305—0,847	+33,2	[63]
	60	293,5	0,305—0,847	+11,2	[63]
	96	293,5	0,305—0,847	+0,997	[63]
Te	4,26	293		140	[76]
Tl	81	295	—	0,5	[76]
	85,4	295		10	[76]

Таблица 26.11

Коэффициенты Холла в сплавах Bi с малыми добавками других элементов

Легирующий элемент	Атомное содержание, %	T, °K	R_H, 10^{-7} м³/к, при B, вб/м²		Литература
			0,36	0,71	
	0	293	−6,8	−4,08	[77]
S	1	293	−7,0	—	[77]
Zn	0,33	293	−6,4	—	[77]
Ga	0,5	293	6,8	—	[77]
As	1	293	−6,0	−5,6	[77]
Sn	1	293	−5,0	—	[77]
Cd	0,33	293	−6,5	—	[77]
In	0,5	293	6,9	—	[77]
Se	1	293	−2,8	+0,25	[77]
Sb	1	293	−7,2	−4,83	[77]
Te	1	293	−0,6	—	[77]
I	0,5	293	−6,7	—	[77]
Hg	0,33	293	6,7	—	[77]
Tl	0,5	293	−6,8	—	[77]
Pb	1	293	−6,4	—	[77]
As	0,1	293	−7,3	—	[78]
	0,25	293	−6,3	—	[78]
	0,5	293	6,95	—	[78]
	0,75	293	−5,85	—	[78]
Te	0,01	293	6,25	−4,2	[78]
	0,05	293	−3,92	−3,37	[78]
	0,10	293	−2,38	−2,22	[78]
	0,25	293	−1,235	1,23	[78]
	0,50	293	−0,59	−0,53	[78]
Pb—Sc	Pb 0,5; Sc 0,5	293	6,71	−4,57	[78]

Таблица 26.12

Коэффициенты Холла в сплавах Bi с большим количеством примесей

Сплав	Примесь, %	T, °K	B, вб/м²	$R_H \cdot 10^{-7}$ м³/к	Литература
Bi—Cd	1	269 < T < 296	0,842	3,78	[79]
	10	269 < T < 296	0,842	1,22	[79]
	40	289 < T < 290	0,842	1,06	[79]
	85,1	289 < T < 296	0,842	0,000596	[79]
Bi—Sn	0,5	265 < T < 288	0,842	−0,106	[80]
	1	265 < T < 288	0,842	+0,395	[80]
	4	265 < T < 288	0,842	+0,287	[80]
	19	265 < T < 288	0,842	+0,0903	[80]
	32	265 < T < 288	0,842	+0,00470	[80]
	65	265 < T < 288	0,842	+0,000021	[80]
Bi—Tl	30	293	—	$160 \cdot 10^{-9}$	[76]
	37	293	—	$1,7 \cdot 10^{-9}$	[76]
	44	293	—	$1,1 \cdot 10^{-9}$	[76]
Bi—Pb	1	280 < T < 293	0,894	−1,4	[81]
	2	280 < T < 293	0,894	−0,999	[81]
	2,7	286 < T < 293	0,894	+0,852	[81]
	3	286 < T < 293	0,894	+1,1	[81]
	4	286 < T < 293	0,894	−0,267	[81]
	10	286 < T < 293	0,894	+0,0932	[81]
	20	286 < T < 293	0,894	−0,0577	[81]
	30	286 < T < 293	0,894	+0,0150	[81]
	40	286 < T < 293	0,894	−0,00103	[81]
	50	286 < T < 293	0,894	−0,000739	[81]

26.4. ГАЛЬВАНО- И ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

Таблица 26.13

Гальваномагнитные коэффициенты железа и кобальта. Значения термомагнитных коэффициентов см. в сносках

Металл	T, °K	$10^{-6}\rho_{0}$, ом·см	ρ_1, ом/см	R_H, 10^{-10} м³/к	Литература
Fe	293	—	0,3—1,7	+5,5	[82]
См. рис. 26.6, 26.9,	313*	11,65	2,3	+6,43	[83]
	323*	13,21	2,3	+7,27	[83]
	333*	12,77	2,3	+8,10	[83]
	343*	13,33	2,3	+8,94	[83]
26.11	14,23	1,480	0,1—2	+0,350	[84]
	20,37	1,103	0,1—2	+0,346	[84]
	63,6	1,491	0,1—2	+0,286	[84]
	83	1,806	0,1—2	+0,320	[84]
	293	11,11	0,1—2	+6,98	[84]

Металл	T, °K	$\rho \cdot 10^{-8}$, ом·см	D, эв/см²	$R_H \cdot 10^{-10}$, м³/к	Литература
Жидкие электролитические	79	1,07	0,1—2,7	+0,130	[85]
	101	2,03	0,1—2,7	+0,347	[85]
	145	3,08	0,1—2,7	+0,860	[85]
	198	6,01	0,1—2,7	+2,04	[85]
	254	8,74	0,1—2,7	+4,07	[85]
	306	11,9	0,1—2,7	+7,36	[85]
	388	17,0	0,1—2,7	+14,6	[85]
	463	23,7	0,1—2,7	+26,0	[85]
	587	32,7	0,1—2,7	+49,5	[85]
	689	43,7	0,1—2,7	+84,2	[85]
	792	57,7	0,1—2,7	+133	[85]
	873	65,7	0,1—2,7	+162	[85]
Железо Армко	296[1]	—	0,2—3	+0,31	[86]
Co	83	—	0,1—1,6	—1,51	[87]
См. рис. 26.8, 26.9, 26.10	290[2]	—	0,1—2,1	+5,98	[87]
	378	—	0,1—1,6	+8,15	[87]
	457	—	0,1—1,5	+13,6	[87]
	573	—	0,1—1,5	+21,2	[87]
	789	—	0,1—1,5	+48,3	[87]
	933	—	0,1—1,5	+89,4	[87]
	1113	—	0,1—1,5	+159	[87]
	1293	—	0,2—1	+200	[87]
	1303	—	0,86	+170	[97]
	1373	—	0,85	+60	[87]
	310[3]	—	0,2—1,3	+5,88	[88]
	400[4]	—	0,2—1,3	+10,0	[88]
	500[5]	—	0,2—1,3	+16,0	[88]
	600[6]	—	0,2—1,3	+24,6	[88]
	700[7]	—	0,2—1,3	+35,0	[88]
	800[8]	—	0,2—1,3	+46,8	[88]
< 1% примесей	292[9]	—	0,9—0,95	+3,55	[89]
	293[10]	—	0,9—0,97	—3,72	[89]
	321[11]	—	0,9—0,96	+2,44	[89]
	287[12]	—	0,2—3	0,19	[90]

[1] $R_H = -(0,3 \cdot 10^{-8}$ эрстед·см²/(а·с); $S_1 = 3,28 \cdot 10^{-8}$ см²/(а·сек); $Q_1 = -20,6 \cdot 10^{-8}$ см²/(эрстед·сек); [10].

[2] $R_H = -(0,8-2) \cdot 10^{-8}$ эрстед·см²/(а·с); $S_1 = 8,50 \cdot 10^{-8}$ см²/(а·сек); $Q_1 = -25,6 \cdot 10^{-8}$ см²/(эрстед·сек); [88].

[3] $R_H = -21,4 \cdot 10^{-8}$ эрстед·см²/(а·с); $S_1 = 3,50 \cdot 10^{-8}$ см²/(а·сек); $Q_1 = -10,8 \cdot 10^{-8}$ см²/(эрстед·сек); [88].

[4] $R_H = -22 \cdot 10^{-8}$ эрстед·см²/(а·с); $S_1 = 5,81 \cdot 10^{-8}$ см²/(а·сек); $Q_1 = -11 \cdot 10^{-8}$ см²/(эрстед·сек) [88].

[5] $R_H = 0,947 \cdot 10^{-8}$ см²/с [88].

[6] $R_H = 0,4 \cdot 10^{-8}$ см²/с [88], $R_H = -1,55 \cdot 10^{-8}$ см²/с [90].

[7] $Q_1 = 19 \cdot 10^{-8}$ см²/(эрстед·сек) [88].

[8] $Q_1 = 27 \cdot 10^{-8}$ см²/(эрстед·сек) [88].

[9] $Q_1 = 4 \cdot 10^{-8}$ см²/(эрстед·сек) [89].

[10] $Q_1 = -57 \cdot 10^{-8}$ см²/(эрстед·сек) [89].

[11] $Q_1 = -28 \cdot 10^{-8}$ см²/(эрстед·сек) [89].

[12] $Q_1 = 100 \cdot 10^{-8}$ см²/(эрстед·сек) [90].

[13] $Q_1 = 21 \cdot 10^{-8}$ эрстед·см²/(с·к) [91].

[14] $Q_1 = -57 \cdot 10^{-8}$ эрстед·см²/(а·с), $S_1 = 3,77 \cdot 10^{-8}$ см²/(а·сек), $Q_1 = 19 \cdot 10^{-8}$ см²/(эрстед·сек) [92].

[15] $R_H = 100 \cdot 10^{-8}$ эрстед·см²/(а·с), $S_1 = 4,53 \cdot 10^{-8}$ см²/(а·сек), $Q_1 = 22 \cdot 10^{-8}$ см²/(эрстед·сек) [89].

Гальваномагнитные коэффициенты никеля. Значения термодинамических коэффициентов см. в сносках

Металл	T, °K	$\rho \cdot 10^{-8}$, ом·см	D, эв/см²	$R_H \cdot 10^{-10}$, м³/к	$R_H \cdot 10^{-10}$, м³/к	Литература
Ni (технически чистый) См. рис. 26.7, 26.9, 26.12	213[1]	12,15	0,667	—	—15,3	[83]
	323[2]	12,68	0,667	—	—16,0	[83]
	333[3]	13,04	0,667	—	—16,6	[83]
	343[4]	13,46	0,667	—	—17,2	[83]
Ni (электролитический)	14,20	0,391	0,1—2	0,305	—0,568	[84]
	90,37	0,407	0,1—2	—0,301	—0,564	[84]
	68,3	0,621	0,1—2	—0,327	—0,615	[84]
	83,0	1,195	0,1—2	—0,345	—0,645	[84]
	298	7,74	0,1—2	0,55	7,33	[84]
Ni (технически чистый)	81	4,15	0,1—2,7	—	—3,54	[85]
	101	4,60	0,1—2,7	—	—4,08	[85]
	157	6,30	0,1—2,7	—	—5,71	[85]
	207	7,88	0,1—2,7	—	—7,50	[85]
	240	9,39	0,1—2,7	—	—9,49	[85]
	307	11,9	0,1—2,7	—	—12,2	[85]
	408	17,4	0,1—2,7	—	—22,4	[85]
	484	22,5	0,1—2,7	—	—31,0	[85]
	536	26,4	0,1—2,7	—	—38,7	[85]
	569	29,2	0,1—2,7	—	—41,8	[85]
	612	32,9	0,1—2,7	—	—37,3	[85]
Примеси: Co 0,25% Cu 0,12%	292	—	0,2—3	—0,56	—5,21	[90]
Ni (99,99%)[5]	293	7	0,6	—	—7,3	[91]
24,2% $\rho_{300°K}$ — $-10,5 \cdot 10^{-8}$	293	—	2,2	—0,04	—0,92	[92]
	4	—	—	—0,21	—0,17	[92]

[1] $R_H = 67 \cdot 10^{-8}$ эрстед·см²/(а·с), $S_1 = -6,87 \cdot 10^{-8}$ см²/(а·сек), $Q_1 = 59,3 \cdot 10^{-8}$ см²/(эрстед·сек) [83].

[2] $R_H = 110 \cdot 10^{-8}$ эрстед·см²/(а·с), $S_1 = -6,68 \cdot 10^{-8}$ см²/(а·сек), $Q_1 = 96,3 \cdot 10^{-8}$ см²/(эрстед·сек) [83].

[3] $R_H = 127 \cdot 10^{-8}$ эрстед·см²/(а·с), $S_1 = -6,9 \cdot 10^{-8}$ см²/(а·сек), $Q_1 = 101,1 \cdot 10^{-8}$ см²/(эрстед·сек) [83].

[4] $R_H = 144 \cdot 10^{-8}$ эрстед·см²/(а·с), $S_1 = -6,28 \cdot 10^{-8}$ см²/(а·сек), $Q_1 = 80 \cdot 10^{-8}$ см²/(эрстед·сек) [83].

[5] $R_H = -5 \cdot 10^{-8}$ эрстед·см²/(а·с), $S_1 = -4,9 \cdot 10^{-8}$ см²/(а·сек), $Q_1 = 18,2 \cdot 10^{-8}$ см²/(эрстед·сек) [91].

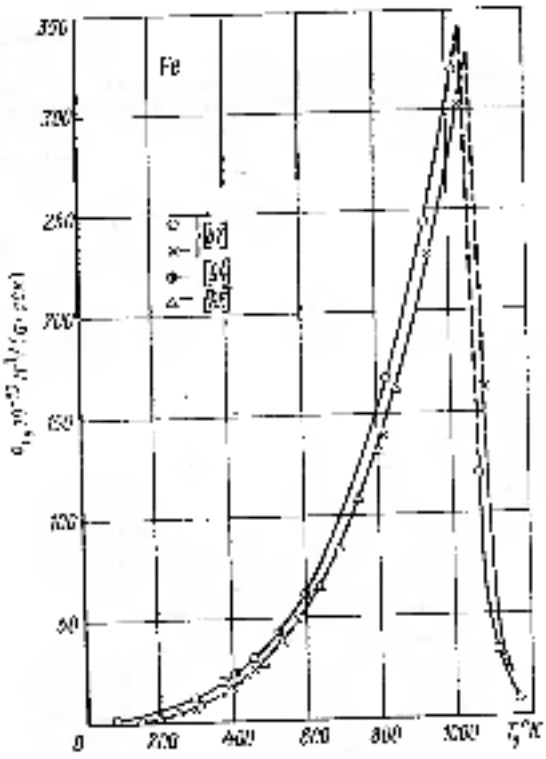


Рис. 26.6. Зависимость аномального коэффициента Холла R_s железа от температуры.

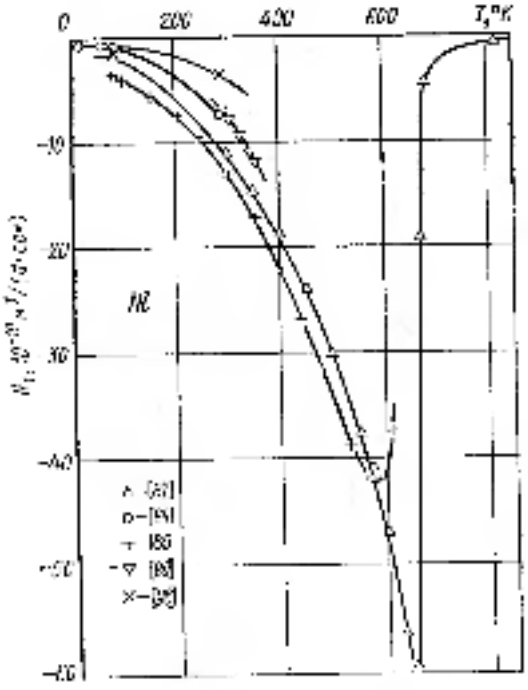


Рис. 26.8. Зависимость аномального коэффициента Холла никеля от температуры.

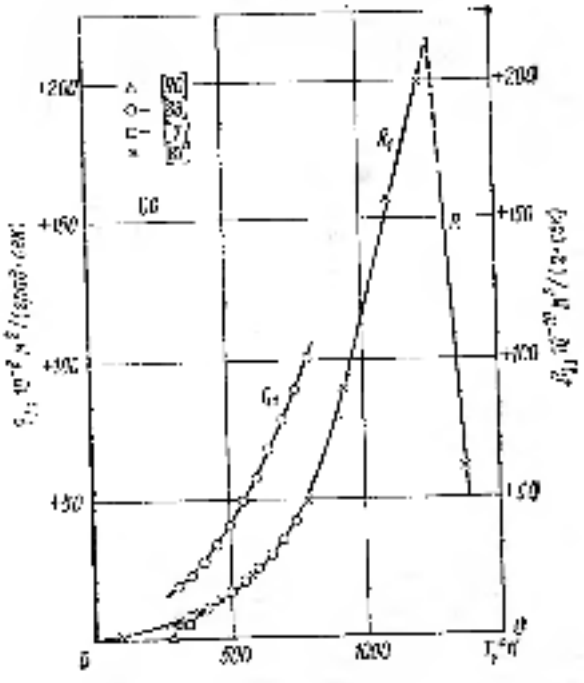


Рис. 26.7. Зависимость аномального коэффициента Холла и аномального коэффициента Эттингсгаузена кобальта от температуры.

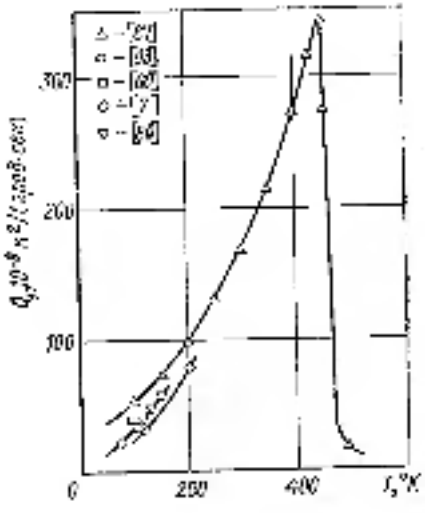


Рис. 26.9. Зависимость аномального коэффициента Эттингсгаузена никеля от температуры.

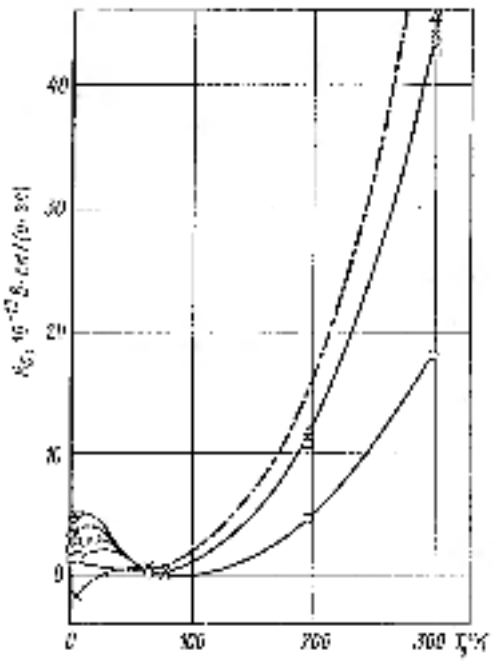


Рис. 26.10. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для усов железа от температуры [98]. (Штрих-пунктирная линия — данные [97] для поликристаллического железа).

Образец	Ось усов [001] и направление внешнего тока	Направление внешнего поля	Направление э. д. с. Холла	$t = \frac{1200°K}{T_c, °K}$
	<111>	<110>	<112>	196
	<111>	<110>	<112>	203
	<102>	<010>	<001>	213
	<101>	<010>	<001>	[illegible]
	<100>	<010>	<001>	180

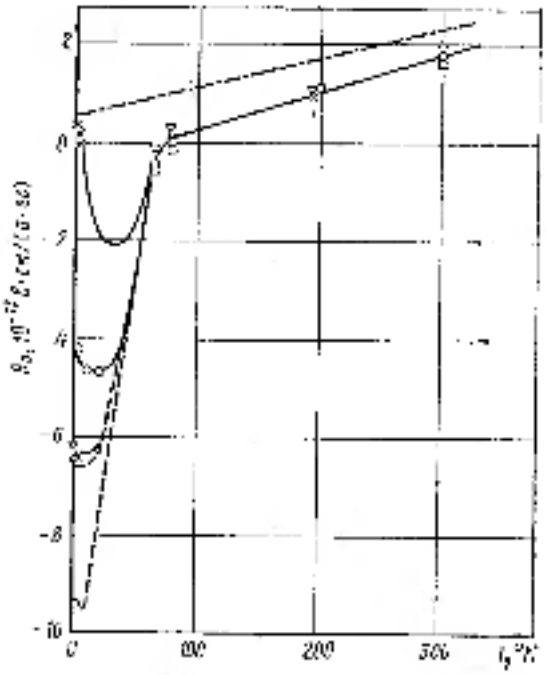


Рис. 26.11. Зависимость обыкновенного коэффициента Холла для усов железа от температуры [98]. Обозначения те же, что на рис. 26.10.

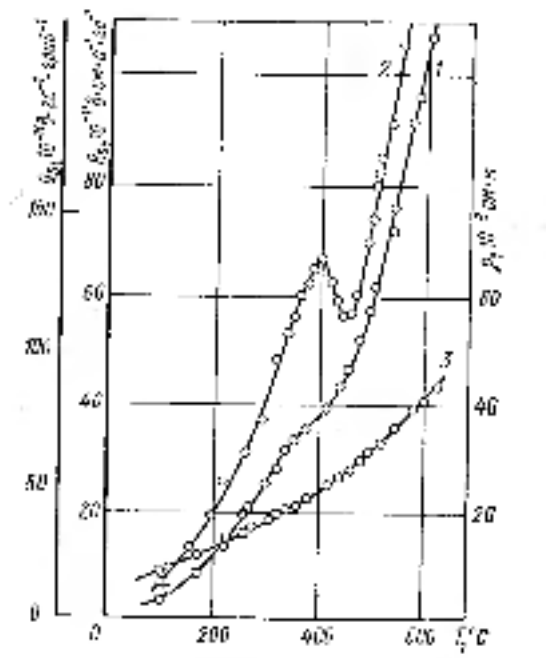


Рис. 26.12. Зависимость ферромагнитных коэффициентов Холла (1) и Нернста — Эттингсгаузена (2) и удельного сопротивления (3) для кобальта от температуры [99].

Гальваномагнитные коэффициенты для сплавов Fe
Значения термомагнитных коэффициентов см. в сносках

Сплав	T, °K	$\rho \cdot 10^{8}$, ом·м	B, в/м²	$R_H \cdot 10^{-10}$, м³/к	$R_L \cdot 10^{-10}$, м³/к	Литература
Fe—Co[1]						
Атомное содержание Co, %						
33	297	—	1,7—1,8	—	−1,33	[100]
Fe—Ni						
Массовое содержание Ni, %:						
0[2]	298	12,0	0,3—2,25	—	+11,2	[102]
1,07[3]	298	14,5	0,3—2,25	—	+10,9	[102]
7,05[4]	298	25,2	0,3—2,25	—	+42,5	[102]
13,11[5]	298	33,1	0,3—2,25	—	+61,6	[102]
67[6]	298	29	0,3—2,25	—	+46,9	[102]
Атомное содержание Ni, %						
20	20	4,6	0,6—1,4	−2,35	−1,95	[96]
33	290	14,4	0,6—1,4	−1,7	−0,75	[96]
84						
Массовое содержание Ni, %						
45	301	—	0,25—3	−1,87	+67,5	[103]
71,6	289	—	0,25—3	−1,68	+3,29	[103]
Атомное содержание Ni, %						
20	100	17	» 3,3	1,8	17	[104]
20	200	99,5	» 3,3	−1,59	26	[104]
20	300	30	» 3,3	−1,1	42	[104]
15	100	17,5	» 3,3	−1,2	20	[104]
15	200	23	» 3,3	−1,35	29	[104]
15	300	30	» 3,3	−1,15	44	[104]
10	100	15	» 3,3	−0,2	17	[104]
10	200	21	» 3,3	0,3	27	[104]
10	300	27,5	» 3,3	−0,3	30	[104]
5	100	11	» 3,3	+0,15	9	[104]
5	200	15	» 3,3	−0,10	17	[104]
5	300	22	» 3,3	0,00	28	[104]
Fe—Ni	См. рис. 26.14					[106]
Fe—C	293		0,5—1,1	—	+13,36	[106]
	323[7]	—		—		[106]
Массовое содержание C, %						
1,18	293	29,6[7]	0,5—3	+5,39	+16,2	[107]
Fe—Si						
Массовое содержание Si, %						
0,25	291	—	0,71	—	+11,6	[94]
0,25	314[8]	—	0,1—2,2		—	[94]
0,25	402	—	0,71	—	+21,4	[94]
0,25	506	—	0,71	—	+44,3	[94]
0,25	580	—	0,71	—	+62,3	[94]
3,50	292	—	0,6	—	+152	[94]

[1] $Q_1 = 25 \cdot 10^{-7}$ м²/(град·сек) [100].
[2] $Q_1 = -0,76 \cdot 10^{-8}$ м²/(сек·сек) [102].
[3] $Q_1 = -4,21 \cdot 10^{-8}$ м²/(сек·сек) [102].
[4] $Q_1 = -3,25 \cdot 10^{-8}$ м²/(град·сек) [102].
[5] $Q_1 = -4,6 \cdot 10^{-8}$ м²/(сек·сек) [102].
[6] $Q_1 = -1,58 \cdot 10^{-8}$ м²/(град·сек) [102].
[7] $S_1 = 0,87 \cdot 10^{-8}$ м²/(с·сек); $Q_2 = -10,7 \cdot 10^{-8}$ м²/(град·сек); $Q_3 = -0 \cdot 10^{-8}$ град·м²/(в·с) [106].
[8] $Q_1 = -0,8 \cdot 10^{-8}$ м²/(град·сек) [94].

Сплав	T, °K	σ, 10^{-6} ом·см	D, см²/с	R_H, 10^{-10} м³/кл	A_H, 10^{-10} м³/кл	Литература
3,80	311*	—	0,1—2,2	—	—	[94]
3,80	403		0,6		+175	[94]
3,80	517	—	0,6	—	+209	[94]
3,80	584		0,6		+226	[94]
Массовое содержание Si, %						
0	298	11,0	—	—	+0,53	[108]
1,3	300	32,5			+49,7	[108]
3,01	298	46,6	—	—	+95,5	[108]
3,91	298	65,7			+161	[108]
5,09	300	76,5		—	+191	[108]
Fe—Si	См. рис. 26.15					[103]
Fe—Cu						
Массовое содержание Cu, %						
0	293	12,0	0,3—2,25	—	+11,2	[102]
0,804	293	13,6	0,3—2,25	—	+12,2	[102]
2,0	293	13,4	0,3—2,25		+19,0	[102]
4,0	293	12,7	0,3—2,25	—	+16,3	[102]
7,05	293	15,8	0,3—2,25	—	+15,2	[102]
Fe—Cr						
Атомное содержание Cr, %						
94,4	77	—	—	—	10,6	[110]
94,4	293	—	—	—	2,5	[110]
90	77		—	—	4,6	[110]
90	293	—	—		2,0	[110]
85	77	—		—	11,6	[110]
65	293	—	—		1,9	[110]
70	293			—	3,8	[110]
0,75	309	14,4	2,109	0,414	11,6	[111]
0,75	231	10,0	2,119	0,924	5,0	[111]
0,75	112	4,6	2,132	0,789	0,542	[111]
0,75	20	2,0	2,137	1,83	2,31	[111]
0,75	4,2	2,6	2,137	1,71	2,03	[111]
2,3	316	21,1	2,064	0,509	22,2	[111]
2,3	231	15,5	2,078	0,402	19,3	[111]
2,3	112	8,3	2,095	1,18	2,78	[111]
2,3	20	4,5	2,101	2,26	0,57	[111]
2,3	4,2	—	2,101	1,75	7,85	[111]
5,1	313	30,4	1,958	0,626	42,8	[111]
5,1	231	2,35	2,00	0,514	22,3	[111]
5,1	1,2	13,8	2,03	1,55	6,19	[111]
5,1	20	—	2,05	2,57	10,6	[111]
5,1	4,2	9,1	2,05	2,23	11,9	[111]

* $\sigma_0 = 0,4 \cdot 10^{-6}$ м²/(град·сек) [94].

Сплав	T, °K	ρ, 10⁻⁸ ом·м	B, вб/м²	R_s, 10⁻¹⁰ м³/к	R_1, 10⁻¹⁸ м²/в	Литература
Fe—Cr						
Атомное содержание Cr, %						
12,7	308	42,3	1,74	0,671	64,2	[111]
12,7	231	33,0	1,75	0,887	39,6	[111]
12,7	112	19,1	1,78	1,64	11,8	[111]
12,7	20	13,7	1,79	4,48	7,08	[111]
12,7	4,2	13,7	1,79	4,08	7,90	[111]
25,1	307	47,4	1,42	0,614	73,3	[111]
25,1	231	36,7	1,45	0,806	45,4	[111]
25,1	112	20,4	1,48	1,78	14,6	[111]
25,1	20	13,5	1,49	1,87	6,61	[111]
25,1	4,2	13,4	1,48	2,07	5,05	[111]
FeCr	См. рис. 26.16					[122]
FeCr	См. рис. 26.17					[122]
FeMn	См. рис. 26.18					[123]
Fe_3Pt	См. рис. 26.19					[124]
FeMn	См. рис. 26.20					[129]
FeV	См. рис. 26.21					[129]

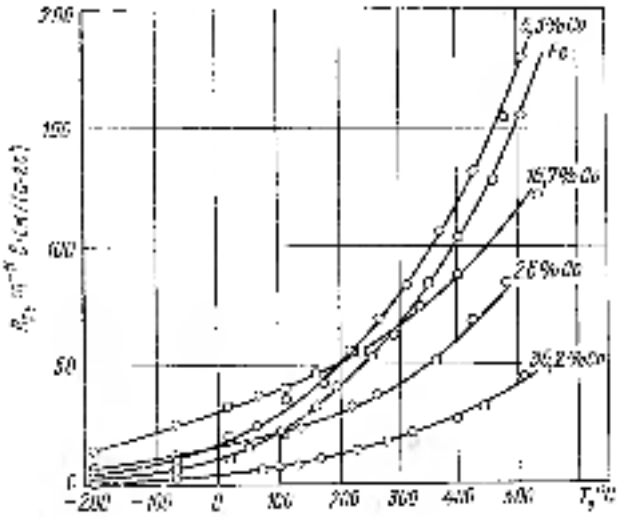


Рис. 26.15. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла от температуры для железо-кобальтовых сплавов [101].

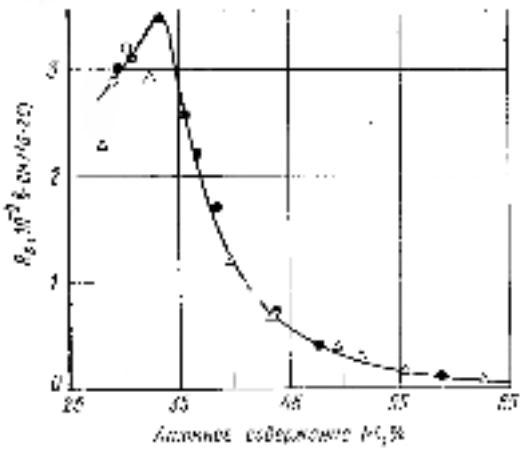


Рис. 26.14. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла сплава Fe—Ni от концентрации Ni [105] (Δ, ●, ○ — данные разных авторов).

Таблица 26.16

Коэффициенты Холла для сплавов кобальта с никелем [115]

Массовое содержание Ni, %	T, °K	B, вб/м²	R_s, 10⁻¹⁰ м³/к	R_1, 10⁻¹⁸ м²/в
0	287	0,2—3	−1,33	+0,10
15	296	0,9—3	−1,64	+1,45
30	285	0,2—3	−1,96	+2,16
45	285	0,9—3	−1,95	+2,73
62	282	0,2—3	−1,00	+1,09
78	284	0,2—3	−1,58	−0,16
88	281	0,2—3	−1,13	−8,25
100	282	0,2—3	−0,76	−5,21

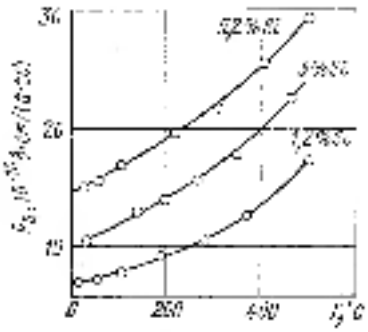


Рис. 26.16. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла от температуры для сплавов Fe—Si различного состава [109].

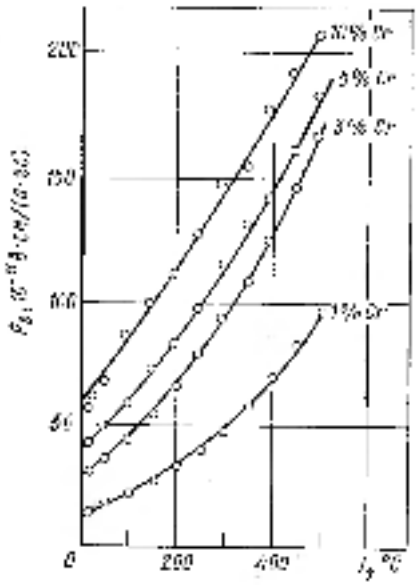


Рис. 26.16. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла от температуры для сплавов Fe — Cr различного состава [112].

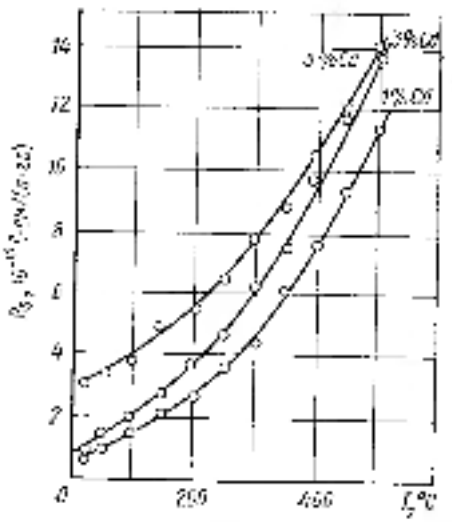


Рис. 26.17. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла от температуры для сплавов Fe — Co различного состава [112].

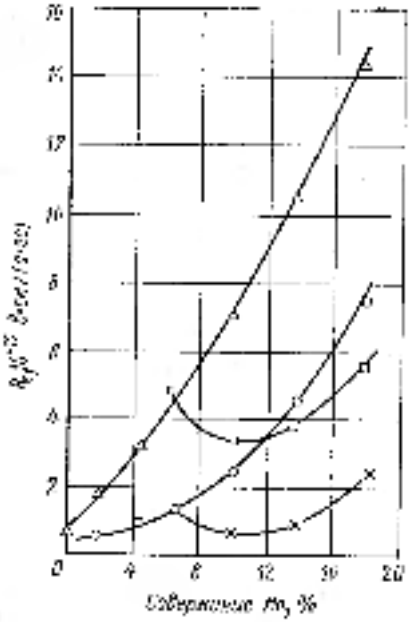


Рис. 26.18. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплавов Fe — Mo от концентрации Mo [113]:

после закалки: 1 — $T = 16$ °C; 2 — $T = -196$ °C; после отжига: 3 — $T = 16$ °C; 4 — $T = 196$ °C.

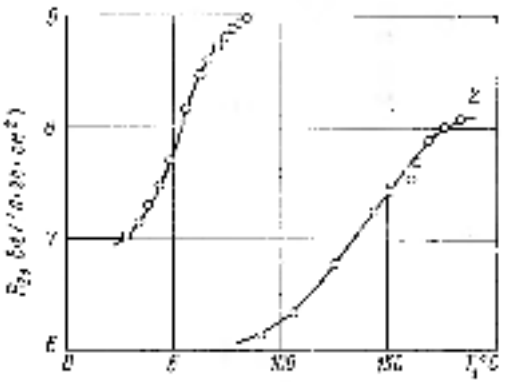


Рис. 26.19. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплавов Fe—Pt от температуры [114]:

1 — для отожженного состояния; 2 — для закаленного состояния.

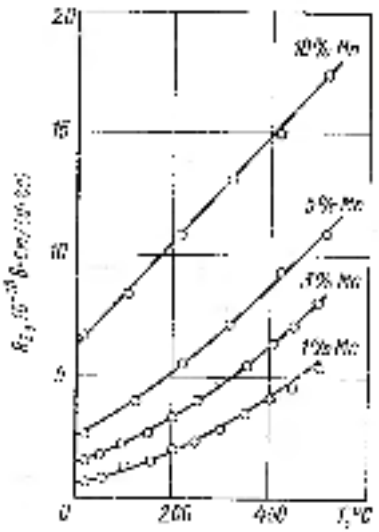


Рис. 26.20. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплавов Fe — Mn различного состава от температуры [109].

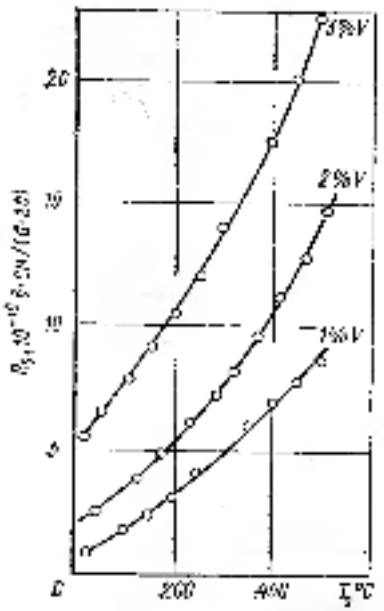


Рис. 26.21. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплавов Fe — V различного состава от температуры [109].

Таблица 26.17

Гальваномагнитные коэффициенты для сплавов с никелем
Значения термомагнитных коэффициентов см. в сноске

Сплав	T, К	σ, 10^{6} ом⁻¹·м⁻¹	R, м³/кл	R_H, 10^{-10} м³/кл	R_S, 10^{-10} м³/кл	Литература
Ni—Al						
Атомное содержание Al, %						
8	20	12,4	—	−1,6	−38	[96]
8	77	17,1	1,4	−1,8	−44	[96]
8	290	24,8		−1,0	66	[96]
Ni—V						
Атомное содержание V, %						
7	20	33,3	—	1,6	−230	[96]
7	77	34,1	1,4	−1,95	−257	[96]
7	250	43,9	—	4,6	−296	[96]
Ni—Cr						
эпитаксия	290	—	—	+5	+190	[94]
	393*	—	0,1—1,*	+4	+290	[94]
Массовое содержание, %						
9,6 Cr+0,2 Mn+0,3 Si	293	67,0	1,7	—	−1,03**	[116]
20,7% Cr+0,6% Mn+0,3%Si	293	104	1,7		−0,402	[116]
29,2%Cr+0,9% Mn+0,6% Si	293	108,5	1,7		−0,182	[116]
Ni—Mo						
Атомное содержание Mo, %						
3	20	20,9	1,4	−1,15	−84	[96]
3	77	21,0	1,4	−1,05	−83	[96]
3	290	30,7	1,4	−1,5	−103	[96]
Ni—Mo	См. рис. 26.22					[143]
Ni—W						
Атомное содержание W, %						
1,6	20	11,0	1,4	0,7	−21	[96]
1,6	77	11,9	1,4	−1,05	−22	[96]
1,6	290	10,6	1,4	−1,1	−40,7	[96]
Ni—Mn						
Атомное содержание Mn, %						
2,5	300	71,9	8	+0,66	+34	[117]
Ni—Pd						
Атомное содержание Pd, %						
93	293	—	—	—	−5,06	[118]
93	368	—	—	—	−2,48	[118]
93	466	—	—		−2,21	[118]
98,5	291	—	—	—	−2,43	[118]
96,5	370	—	—	—	−2,00	[118]
96,5	464	—	—	—	−1,66	[118]
Ni—Cu[ат]						
Массовое содержание Cu, %						
0**	293	—	0,1—2,2	−0,66	−7,66	[102]
5[ат]	293	—	0,1—2,2	−1,45	−29,8	[102]

* G_1 = 86·10⁻⁶ м²/(дж·с·ом) при T = 398° К [94].
** В работе [116] на измерений гальваномагнитных эффектов определен коэффициент $R_H = R/\rho\sigma$.
— Значения R и G для Ni—Cu см. в работах [118, 121].
Значения G_1, 10⁻⁶ м²/(дж·с·ом) [102]: [ат] 34,6; ** 18,8.

Состав	T, °K	ρ, 10^{-8} ом·м	B, мТл	R_H, 10^{-10} м³/кл	D_H, 10^{-19} м²/в	Литература
10[a]	293		0,1—2,2	—1,1	—12,0	[102]
15[a]	293	—	0,1—2,2	—1,1	—59,1	[102]
25[a]	293	—	0,1—2,2	—1,7	—93,7	[102]
30[a]	293		0,1—2,2	—1,6	—41,9	[102]
35	293	—	0,1—2,2	—9,6	—6,71	[102]
Атомное содержание Cr, %						
9	20	6,3	1,4	—2,4	—9,6	[96]
9	77	9,3	1,4	—2,1	—40,3	[96]
9	290	16,5	1,4	—1,15	—28,9	[96]
18	20	15,1	1,4	—2,5	—20	[96]
18	77	16,7	1,4	—2,3	—22,3	[96]
18	290	26,8	1,4	—1,35	—45,4	[96]
40	64	34,12	≈1,55	2,03	—31,86	[119]
40	77	35,34	≈1,55	—1,87	—36,00	[119]
40	112	37,76	≈1,55	—1,75	—35,19	[119]
40	188	42,02	≈1,55	—1,60	—44,60	[119]
40	231	46,33	≈1,55	2,22	—	[119]
40	250	—	≈1,55	—2,10	—	[119]
40	291	—	≈1,55	1,67	—	[119]
40	310	47,29	≈1,55	—1,30	—	[119]
40	342		≈1,55	—1,55	—	[119]
30	64	24,99	≈1,55	—1,96	—32,0	[119][7*]
30	77	25,31	≈1,55	—1,81	—34,4	[119]
30	122	27,66	≈1,55	—1,69	—38,6	[119]
30	160	31,40	≈1,55	—1,48	—47,1	[119]
30	230	38,22	≈1,55	1,47	—57,3	[119]
30	269	39,15	≈1,55	—1,40	—65,4	[119]
30	286	41,85	≈1,55	—1,65	81,6	[119]
30	304	43,55	≈1,55	—1,93	—92,7	[119]
30	316	43,71	≈1,55	—2,32	—203,0	[119]
30	341	44,90	≈1,55	—2,66		[119]
30	359	46,48	≈1,55	—1,83	—	[119]
20	77	16,22	≈1,55	—2,06	—18,5	[119]
20	112	17,36	≈1,55	1,97	20,6	[119]
20	160	20,96	≈1,55	—1,84	—91,4	[119]
20	231	23,82	≈1,55	1,67	51,5	[119]
20	258	—	≈1,55	—1,37	—47,4	[119]
20	302	25,27	≈1,55			[119]
Атомное содержание Ni, %						
100	$T > T_c$	—	—	—0,9	—4,1	[120]
90,62		—	—	—1,2	—38,9	[120]
81,93			—	—1,4	—47,0	[120]
71,68				—1,7	—32,5	[120]
61,87		—	—	—1,6	—95,0	[120]
CuNi-сплавы						
Массовое содержание Ni, % — Монель						
68 — 29,5% Cu	298	—	0,04—1,1	1,1	35,1	[94]
1,5% Fe	329[a]	—	0,04—1,1	—	—	[94]
1% Mn	339		0,04—1,1	2,7	—4,2	[94]
	366[b]	—	0,04—1,1	—		[94]

Значения Q_1, Q_2 [10⁻⁹ м²/(вольт·сек)] [102]: [a] 300; [b] 200, [c] 330; [d] 175.
Значения Q_1, Q_2 [10⁻⁹ м²/(вольт·сек)] [94]: [a] Q_1 — 8, Q_2 — 300; [b] Q_1 — 18, Q_2 — 321.

Сплав		T, K	ρ, 10^{-8} ом·м	Q, эв/ат	R_H, 10^{-10} м³/к	R_1, 10^{-10} м³/к	Литература
		369 400* 412 440**	— — — —	0,04—1,1 0,04—1,1 0,53 0,106	—2,5 — — —	—10 — —2,78[A] —	[94] [94] [94] [94]
40	константан	293	—	1,1	—	—0,90[B]	[60]
37,77	константан 59,62% Cu 1,39% Mn 0,66% Fe	80 293	— —	0,4—1,6 0,4—1,6	— —	—0,91[B] —1,16[B]	[122] [122]
24	нейзильбер 60% Cu 30% Zn	293			—	—0,53[B]	[123]
9,21	нейзильбер 87,35% Cu 2,85% Al 0,10% Fe	80 293	— —	0,4—1,6 0,4—1,6	— —	—0,12[A] —0,35[B]	[122] [122]
4	манганин	423 533 1083	— — —	0,41 0,494 0,492	— — —	—0,569[B] 0,457[B] —0,460[B]	[124] [124] [124]
4,69	манганин 86,88% Cu 12,72% Mn 1,27% Fe	80 293	— —	1,6 —1,0	— —	—0,328[A] —0,62[B]	[122] [124]
4,11	манганин 85,40% Cu 10,03% Mn 0,49% Fe	80 293	— —	1,6 1,6	— —	—0,33[B] —0,57[B]	[122] [122]
Co—Ni		См. рис. 26.23, 26.25					[195, 196]
Ni—Co		См. рис. 26.26, 26.28					[125, 198]
Ni с малыми добавками		См. рис. 26.27					[127]
Ni—Si Атомное содержание Si, %							
3		20	9,5	1,4	—0,7	—19	[96]
3		77	10,1	1,4	—1,0	—20	[96]
3		290	18,0	1,4	—1,1	—40	[96]

Значения G_0, Q_0, R_0 [illegible] (Ni): * G_0=35, Q_0=0,6; ** Q=0,7.
* В работах [121]—[125] на температурные зависимости термоэдс оценены коэффициенты α=Eu/TH и φ=EG/ΔTH.

Сплав	T, K	ρ, 10^{-8} ом·м	B, кГ/м²	R_H, 10^{-10} м³/к	R_H, 10^{-10} м³/к	Литература
Ni—Sn Атомное содержание Sn, %						
3	20	10,9	1,4	—0,85	—19	[96]
3	77	11,4	1,4	—0,9	—19	[96]
3	250	17,2	1,4	—2,0	—36	[96]
Ni—Cu—Fe Атомное содержание, % 97Ni+2Cu+1Fe	300	10,6	4,75	—0,753	—12,3	[129]
	77	5,62	5,18	—0,803	—1,67	[129]
	20	5,06	5,21	—0,978	—1,19	[129]
93Ni+4,5 Cu+2,5Fe	300	15,3	4,84	—1,05	—15,0	[129]
	77	6,06	5,23	—1,42	—39,9	[129]
	20	5,79	5,20	—1,33	—2,78	[129]
88Ni+8,3Cu+4,7Fe	300	23,4	4,49	—1,42	—20,5	[129]
	77	13,6	5,06	—2,10	—6,30	[129]
	20	12,8	5,06	—2,28	—5,49	[129]
70Ni+20Cu+10Fe	300	32,8	4,77	—1,82	+5,06	[129]
	77	18,0	5,15	—2,03	+3,46	[129]
	20	16,7	5,19	—2,72	+2,94	[129]
$Ni_3(Mn,Fe)$ Ni_3Mn	300	—	—	+0,09	0	[130]
75,2Ni+20Mn+4,8Fe	300			—0,41	12,60	[130]
70Ni+16Mn+9Fe	300		—	—1,21	25,58	[130]
73,3Ni+12,4Mn+13,3Fe	300	—	—	—1,65	27,15	[130]
74,6Ni+9,4Mn+16Fe	300	—		—1,98	22,53	[130]
74,3Ni+6,3Mn+19,2Fe	300	—	—	—2,05	14,52	[130]
Ni_3Fe	300	—	—	2,15	4,43	[130]
75Ni+21Mn+4Co	300	—	—	—1,76	27,8	[130]
75,4Ni+16Mn+8,6Co	300	—	—	—1,30	7,69	[130]
70Ni+17,5Mn+12,5Co	300	—	—	—1,59	13,91	[130]
37,5Ni+6,2Cr+56,3Fe (инварный сплав)	4,2	—	—	—	24	[131]

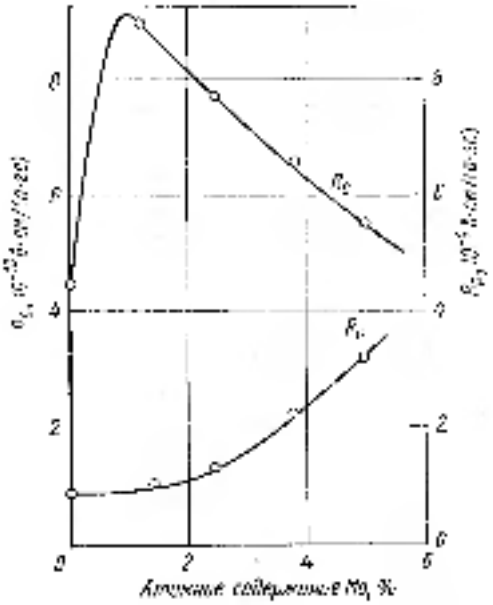


Рис. 26.22. Зависимость коэффициентов Холла R_0 и R_s от содержания Mn в сплавах с Ni в парамагнитной области температур [143].

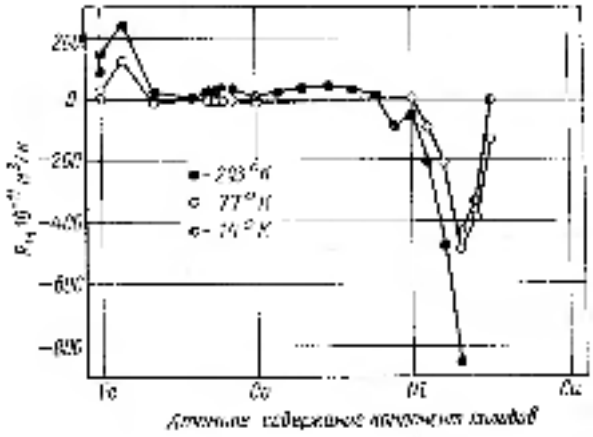


Рис. 26.24. Аномальные коэффициенты Холла для сплавов Fe — Co, Co — Ni, Ni — Cu при температуре 20° С [125].

Рис. 26.23. Обыкновенные коэффициенты Холла для сплавов Fe — Co, Co — Ni, Ni — Cu при температуре 20° С [125].

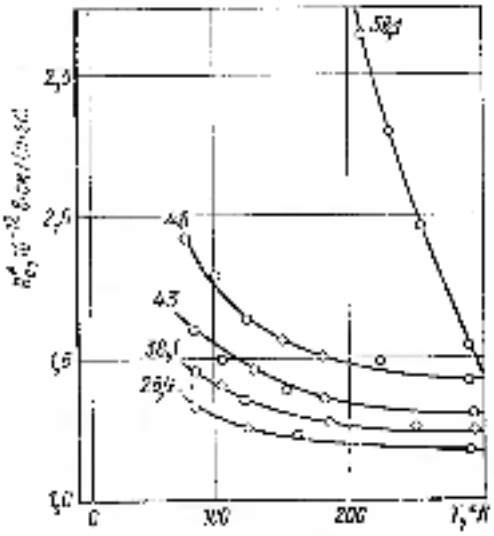
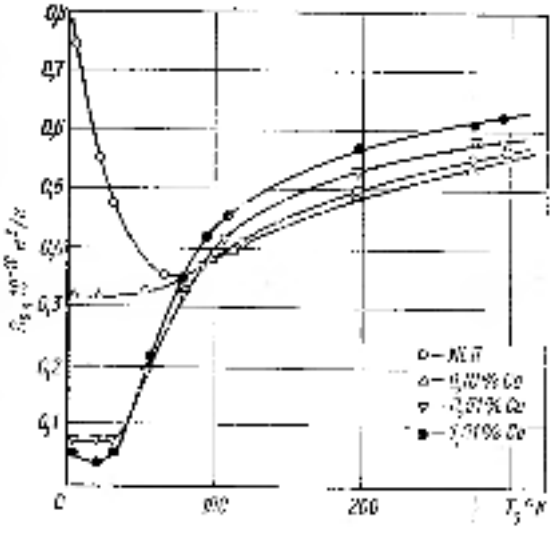


Рис. 26.25. Зависимость обыкновенного коэффициента Холла для сплавов Cu — Ni с большим содержанием никеля от температуры [120]. Цифры у кривых показывают атомное содержание Ni, %.



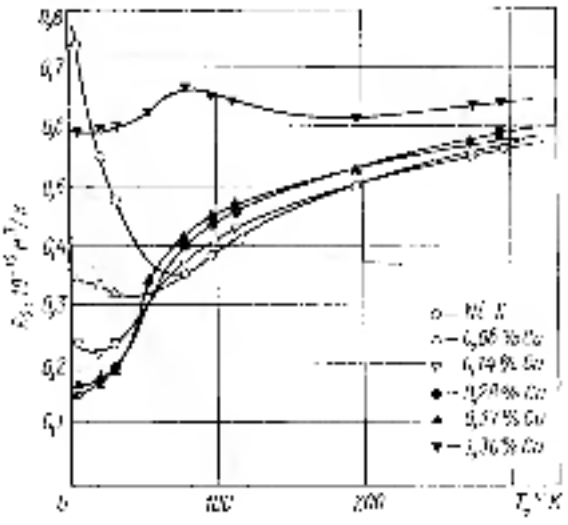


Рис. 26.26. Зависимость от температуры обыкновенного коэффициента Холла для сплавов Ni с малыми добавками Co (а) и с малыми добавками Co (б) [127].

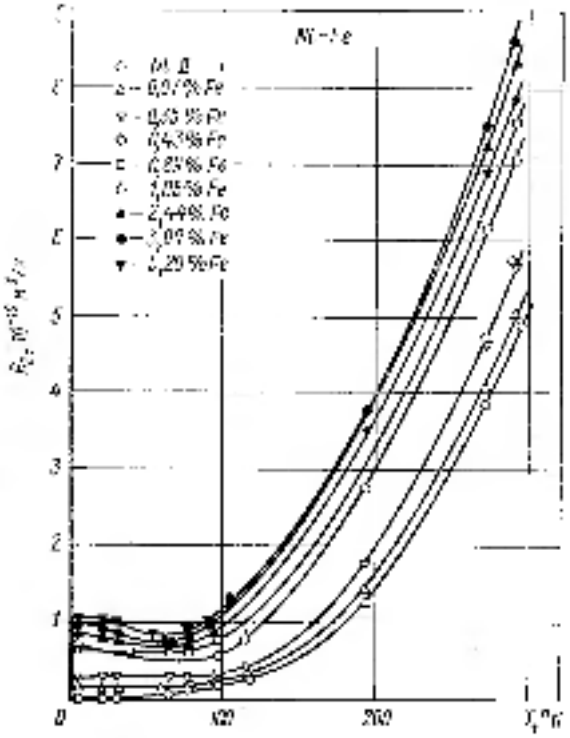


Рис. 26.27. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплавов Ni с малыми добавками Fe от температуры [127].

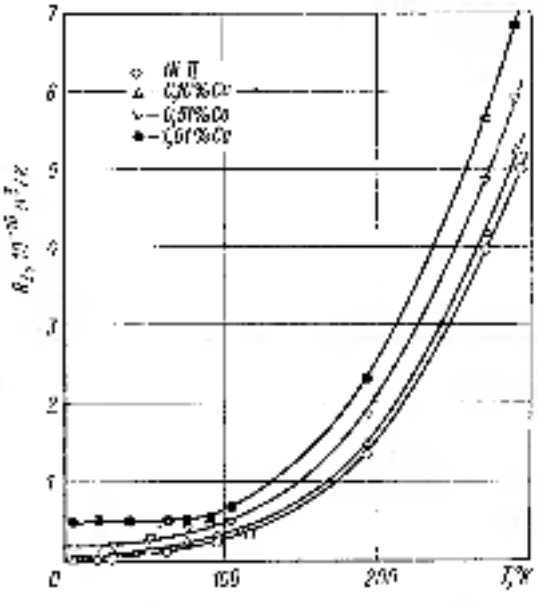


Рис. 26.28. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплавов Ni с малыми добавками Co от температуры [127].

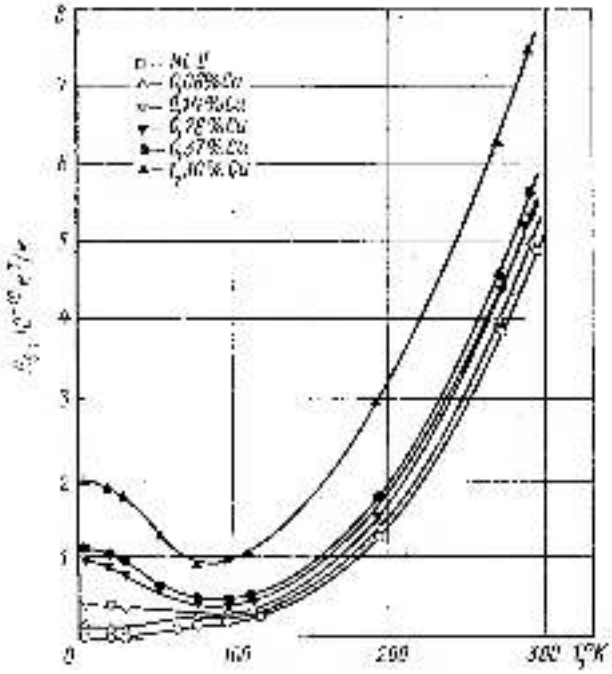


Рис. 26.29. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплавов Ni с малыми добавками Cu [27].

Таблица 26.18

Гальваномагнитные коэффициенты редкоземельных ферромагнетиков и их сплавов. Значения термомагнитных эффектов см. в сноске

Металл	T_c, °K	ρ, 10^{-8} ом·м	R_H, 10^{-10} м³/кл	R_A, 10^{-10} м³/кл	Литература
Gd* $\left(\frac{\rho_{290°K}}{\rho_{4,2°K}} = 50\right)$ $B=0\div5{,}2$ вб/м²	227	117	—	−2000	[132]
	194,5	97	—	−2400	[132]
	182	90	—	−2100	[132]
	168	85	—	−1800	[132]
	146	71	—	−1530	[132]
	110,5	56	—	−885	[132]
	105,3	46	—	−692	[132]
	66	36	—	−410	[132]
	77	32	—	−285	[132]
	56,5	19,5	—	−138	[132]
	40,5	10	—	51	[132]
	32	6	—	−16,3	[139]
	20	2,5	—	3,9	[132]
	>>290	—	−3,0	−2500	[132]
$\left(\frac{\rho_{290°K}}{\rho_{4,2°K}} = 51\right)$	>>290	—	−2,0	−3640	[133]
Монокристалл	>>290	—	—	R_p = −4570 R_c = −2570**	[134]

* $\lambda = 41{,}8 \cdot 10^{-4}$ дрейф-ом/(см·с) (поликрист. Gd), $P = 70 \cdot 10^{-4}$ дрейф-ом²/(см·с) (монокрист. Gd) [19].
** R_p — вдоль оси b, R_c — вдоль оси c.

Металл	T, °К	ρ, 10^{-8} ом·м	R_H, 10^{-10} м³/к	R_H, 10^{-10} м³/к	Литература
Пленка	300	—	−8,0	−1700	[133]
Монокристалл $\left(\frac{\rho_{300°K}}{\rho_{4,2°K}} = 46\right)$	(См. рис. 26.30, 26.31)				[136]
Tb[*] $\left(\frac{\rho_{300°K}}{\rho_{4,2°K}} = 39\right)$ $B = 0 \div 3,2$ вб/м²	195	87	—	+17,5	[132]
	180	79	—	+41,7	[132]
	170	74	—	+37,3	[132]
	160	69	—	+61,1	[132]
	146	62	—	+64,8	[132]
	130	54	—	+62,5	[132]
	115	46	—	+46,5	[132]
	108	43	—	+39,1	[132]
	100	39	—	+30,7	[132]
	90	35	—	+20,6	[132]
	80	30	—	+15,3	[132]
	60	20	—	+4,47	[132]
	50	16	—	−1,28	[132]
	39	11	—	−6,39	[132]
	29,5	8	—	−7,82	[132]
	20	5	—	−10,5	[132]
	>230	—	−4,18	−47,50	[132]
Монокристалл[**] H ∥ <10$\bar{1}$0>	>230	—	−1,0	−40,5	[138][***]
	140	—	—	+22,4	[138]
	205	—	+0,6	—	[138]
	<90	—	−1,0	—	[138]
	30	—	—	0	[138]
H ∥ оси c (см. рис. 26.32)	>230	—	−3,6	−77,0	[138]
$\frac{\rho_{300°K}}{\rho_{4,2°K}} = 39$[*]	>230	—	−1,2	−52	[130][*]
Монокристаллы H ∥ <0001>	>230	—	−1,1	−40	[139]
H ∥ <1210>	150	—	+0	+12	[139]
Dy[**] Монокристалл	>178	—	−1,1	−32,6	[140][***]
$\frac{\rho_{300°K}}{\rho_{4,2°K}} = 10$ H ∥ <10$\bar{1}$0>	>178	—	−0,7	−25,5	[140]

* $\Gamma = 26,3 \cdot 10^{-4}$ дж/(м·°К²) (поликрист. Tb) [12].
** $B = 0 \div 3,2$ вб/м².
*** $H_{\text{кр}} = 3,4$ вб/м².
**** $\Gamma = 26,4 \cdot 10^{-4}$ дж/(м·°К²) (поликрист. Dy) [12].
***** В работах [139] [140] R_H определяется из выражения: $\varepsilon = R_H H + R_H A \sigma^2$ [уравн. (26.2), с. 462].

Металл	T_c, °K	ρ, 10^{-9} ом·м	R_H, 10^{-4} м³/к	S_H, 10^{-18} м²/в	Литература
Монокристалл $\frac{\rho_{263°K}}{\rho_{4,2°K}} = 10$					
H ∥ <[1120]>	> 178	·	−0,3	18	[141]*
H ∥ <[0001]> (см. рис. 26.33)	> 220	—	−3,7	−23	[141]
Tb					
Монокристалл $\frac{\rho_{298°K}}{\rho_{4,2°K}} = 19$	> 160	—	−2,2	−2,6	[142]*
Gd—Y					
Атомное содержание Gd, %					
100	240	79	—	−2400	[144]
100	200	66	—	−1670	[144]
100	150	48	—	−960	[144]
100	100	30	—	−410	[144]
100	50	11	—	−75	[144]
100	20	3	—	−8	[144]
100	> 350	—	—	−2270	[144]
84	240	98	—	−2780	[144]
84	200	85	—	−1960	[144]
84	150	66	—	−1170	[144]
84	100	47	—	−650	[144]
84	50	27	—	−240	[144]
84	20	19	—	−65	[144]
84	> 350	—	·	−219	[144]
72	200	99	—	−2160	[144]
72	150	81	·	−1220	[144]
72	100	61	—	−570	[144]
72	50	38		−182	[144]
72	20	28	—	−50	[144]
72	> 300	—	·	−2130	[144]
55	150	88	—	−2140	[144]
55	100	71	—	−1320	[144]
55	50	51	—	−570	[144]
55	20	43	·	−300	[144]
50	> 250	—	—	−1900	[144]
46	> 200	—	·	−1700	[144]

* См. примеч. ** за с. 493.

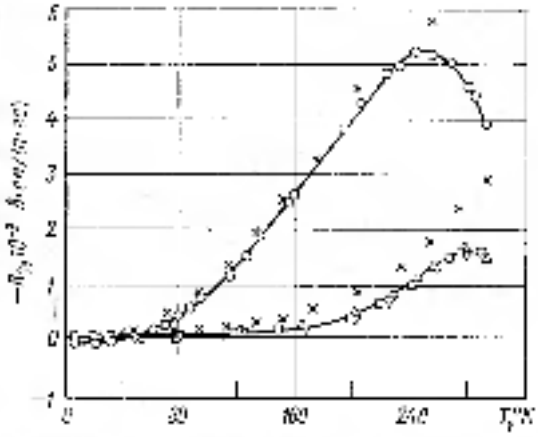


Рис. 26.33. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для монокристаллов гадолиния от температуры [139]:

○ — H ‖ [0001]; □ — H ‖ [1$\bar{1}$00]; ◇ — H ‖ [11$\bar{2}$0]; ▽ — H ‖ [0001]; × — данные [141].

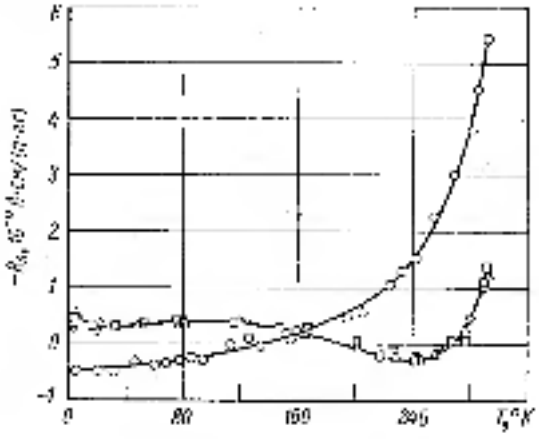


Рис. 26.34. Зависимость обычного коэффициента Холла для монокристаллов гадолиния от температуры [136]:

○ — H ‖ [0001]; □ — H ‖ [1$\bar{1}$00]; ◇ — H ‖ [11$\bar{2}$0]; ▽ — H ‖ [0001].

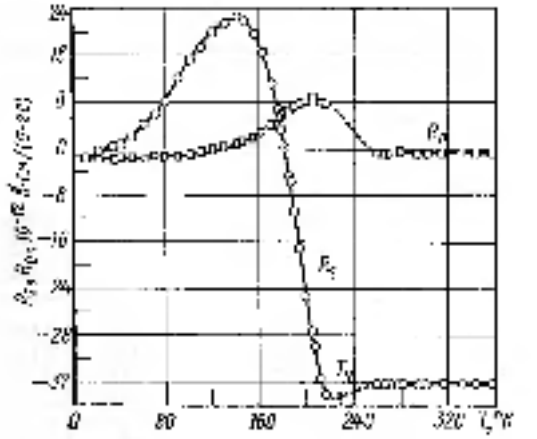


Рис. 26.39. Зависимость обычного и ферромагнитного коэффициентов Холла монокристаллических образцов тербия от температуры H ‖ (1010) [138].

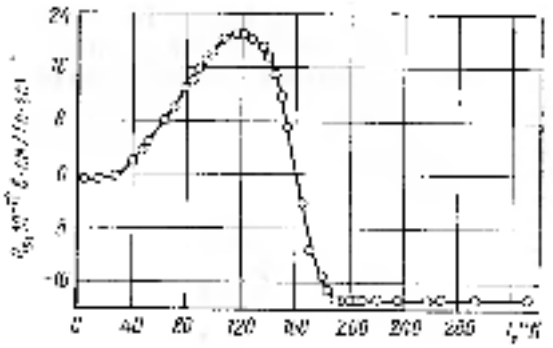


Рис. 26.33. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла монокристалла диспрозия от температуры H ‖ (1120) [141].

Таблица 26.19

Гальваномагнитные коэффициенты ферромагнитных сплавов из неферромагнитных компонентов

Сплав	T_c, °K	λ, 10^{-4} см/°K	σ_0, 10^{-17} ом/см	R_s, 10^{-4} см³/кулон	Литература
14,0% Al + 26,5% Mn + 58,9% Cu (сплав Гейслера)*	83	—	—	+ 6,6	[145]
	291	—		+ 21,4	[145]
	301	—		+ 29,0	[145]
MnSb**	177	35	—	530	[146]
	255	55	—	940	[146]
	293	72	1,8	1 200	[146]
	353	90	—	1 560	[146]
	412	112	—	2 410	[146]
	470	132	—	3 560	[146]
	530	170		6 660	[146]
	590		—	10 500	[146]
$MnBi_2$	295	—	2,19	242	[149]
	297	—		—100	[150]
	450	—	—1,2		[150]
Mn_3Ga_2 (ферромагнетик)**	326	—	—	—11 800	[151]
CrTe	93		—	— 7 600	[147]
	152	—	—	— 8 500	[147]
	273		—	—31 300	[147]
Cr V, ат. % V					
5	293	—	—	2,1	[148]
	77	—	—	5,2	[148]
10	293	—	—	2,7	[148]
	77	—		3,5	[148]

* $B = 6{,}44$ кг/см²; $\sigma_0 = 10^{17}$ см²/(ом·см·сек); σ_1 — 12,0 (293°K), σ_1 — 10,4 (90°K), $\sigma_1 = T_c$ (18,5°K) [64].

** $B = 0 - 0{,}5$ кг/см².

*** $B = 0 - 1{,}0$ кг/см².

26.5. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В таблицах этого раздела приняты обозначения:
R_{HT} — сопротивление при напряженности поля H и температуре T;
R_{CT} — сопротивление при $H = 0$ и при температуре T;

$$r_{273,2} = R_{0T} / R_{0\,273,2}\,;$$

$$r_{293} = R_{CT} / R_{C\,293}\,;$$

$$\Delta R = R_{HT} - R_{CT}\,.$$

Для ферромагнетиков вместо R_{HT} берется R_{BT}, где B — магнитная индукция внутри металла.

Для монокристаллов:

а) для кубического кристалла:

Φ — угол между главной осью и направлением тока;

Ψ — угол между главной осью и направлением магнитного поля;

б) для тетрагональных, гексагональных и ромбоэдрических систем: Φ — угол между осью c и направлением тока; φ — угол между осью c и направлением магнитного поля; Ψ — угол между осью a и направлением магнитного поля.

Таблица 26.20

Изменение сопротивления чистых металлов в магнитном поле (магнитное поле перпендикулярно к направлению электрического тока через образец, так называемый поперечный четный гальваномагнитный эффект)

Металл	Состояние	T, °К	Θ / $r_{273,2}$ / Θ / r_{293}	Угол, град	H, кэ	$\Delta R/R_{CT}$	Литература
Li	Поликристалл (0,1% примесей)	79	б) 0,137	—	100 200 300	0,061 0,082 0,152	[152] [152] [152]
	Поликристалл	20,4	а) 0,0043	—	30,4	0,11	[153]
Be	«	291 36	б) 1 б) 0,33	— —	300 300	0,66 2,28	[152] [152]
	Монокристалл	90,3	а) 0,02775	$\Phi = 90$ $\varphi = 2$ $\Psi = 0$	3,4 10,1 11,7	0,426 2,160 2,720	[154] [154] [154]
		90,3	а) 0,02775	$\Phi = 90$ $\varphi = 2$ $\Psi = 30$	3,4 10,1 11,7	0,408 2,67 3,422	[154] [154] [154]
		90,3	а) 0,02775	$\Phi = 90$ $\varphi = 2$ $\Psi = 90$	3,4 10,1 11,7	0,2835 1,516 1,935	[154] [154] [154]
Na	Монокристалл	80	б) 0,2	—	300	0,07	[152]
		30,4	а) 0,00675	—	9,76 35,1	0,0745 0,703	[153] [153]
Mg	«	291	б) 1	—	100 200 300	0,022 0,062 0,167	[152] [152] [152]
		195	б) 0,68	—	100 200 300	0,046 0,175 0,317	[152] [152] [152]
		78	б) 0,17	—	100 200 300	0,54 1,65 2,82	[152] [152] [152]

Металл	Состояние	T, °K	а) $\rho_{273,2}/\rho_{293}$ б) ρ_{293}	Угол, град	H, кэ	$\Delta\rho/\rho_{4,2}$	Литература
Al	Поликристалл	77,2	а) 0,164	—	5,2 23,5	0,0008 0,0110	[156] [156]
		20,4	а) 0,067		4,1 23,5	0,0033 0,0640	[156] [156]
		14,2	а) 0,066	—	5,2 23,5	0,0066 0,0679	[156] [156]
K	»	20,4	а) 0,0247		15,45 35,1	0,0184 0,0402	[153] [153]
Ti	Монокристалл	20,4 14,2	а) 0,1421 а) 0,1394	—	23,6 23,6	0,002 0,002	[156] [156]
V	Поликристалл	291 80	б) 1 б) 0,275	— —	300 300	<0,01 ~0,04	[152] [152]
Cr	»	291 78	б) 1 б) 0,065	—	300 300	0,3 4,30	[152] [152]
Fe	»	80		—	300	0,055	[152]
	Поликристалл электролитический (0,001% примесей)	293	—		50	0,78	[160]
Co	Поликристалл (1,6% примесей)	290	—	—	6,0 10,0 18,0	0,0004 —0,0011 —0,0016	[161] [161] [161]
Ni	Поликристалл	573	—	—	2 5 10	$3\cdot10^{-4}$ $-8\cdot10^{-4}$ $-21\cdot10^{-4}$	[161] [161] [161]
		291 80	— —	— —	300 300	—0,026 0,095	[152] [152]
Cu	»	78	б) 0,141		100 200 300	0,093 0,274 0,469	[152] [152] [152]
		78 20,4	б) 0,148 б) 0,020	— —	23,6 23,6	0,035 0,192	[156] [156]
	Монокристалл	20,4	а) 0,00092	Ф — 32 Ф — 69 Ф — 0	2,28 4,49 10,89	0,548 0,907 1,803	[156] [156] [156]
Zn	Поликристалл (0,0001% примесей)	291 78	б) 1 б) 0,19	—	300 300	0,06 0,927	[152] [152]
	Поликристалл	77,2	а) 0,202	—	23,6	0,018	[156]

Металл	Состояние	T, °K	ρ(273,2 °K) ρ(T)	Угол, град	H, Ое	Δρ/ρ₀г	Литература
Ga	Поликристалл (0,27% примесей)	195	б) 0,66	—	100 200 300	0,053 0,115 0,173	[152] [152] [152]
	Монокристалл	77,4	·	Φ — 0 ψ — 0	1,200 8,400 23,500	0,00018 0,00349 0,01394	[165] [165] [165]
		77,4	—	Φ — 0 ψ — 90	1,200 8,400 23,500	0,00016 0,00284 0,01279	[165] [165] [165]
Rb	Поликристалл	14	а) 0,0339	—	40	<0,004	[153]
Zr	Поликристалл	195 80	б) 0,63 б) 0,23	— —	300 300	<0,01 0,06	[152] [152]
Nb	0,08% O_2 0,02% Ta	20,4	а) 0,0082	—	40	0,001	[157]
Mo	Поликристалл	195 78	б) 0,61 б) 0,136	—	300 300	0,095 0,915	[152] [152]
Ru	Поликристалл (0,01% примесей)	20,4	б) 0,0083	—	40	0,151	[162]
Rh	Поликристалл	20,4 4,22	б) 0,0038 б) 0,0029	—	30,3 37,6	1,516 1,867	[163] [163]
Pd	Поликристалл (0,01% примесей)	78	б) 0,17		300	0,102	[159]
Ag	Поликристалл	78 20,4	б) 0,181 а) 0,00203	— —	300 10,85	0,376 1,334	[152] [158]
Cd	Поликристалл	291 195 78	б) 1 б) 0,68 б) 0,22	— — —	300 300 300	0,08 0,19 0,927	[152] [152] [152]
	Монокристалл	78	а) 0,2400	ψ — 84 Ψ — 90	4,8 17,3 34,7	0,005 0,014 0,117	[156] [156] [156]
		20,4	а) 0,0218	Φ — 0	10,0 26,5 36,1	0,184 0,672 1,07	[156] [156] [156]
In	Поликристалл	195 80	б) 0,63 б) 0,22	— —	300 300	0,03 0,14	[152] [152]
		78	а) 0,2171		40	0,0084	[166]
Sn	Поликристалл (0,01% примесей)	291 80	б) 1 б) 0,22	—	300 300	0,02 0,23	[152] [152]
	Поликристалл	14,2	—	—	23,5	0,0046	[167]

Металл	Состояние	T, °K	а) $l_{273,2}/l_{293}$ б) l_{273}/l_{293}	Угол, град	H, кэ	$\Delta l/l_{293}$	Литература
Sb	Поликристалл	291 80	б) 1 б) 0,30	— —	300 300	3,5 40,0	[152] [152]
	Монокристалл	77,8	а) 0,1763	Φ — 1,5 Ψ — 90 φ — 90	3,43 0,75 10,1	0,106 0,309 0,598	[168] [168] [168]
		77,8	а) 0,1763	Φ = 1,5 Ψ — 90 φ = 0	3,43 0,75 10,1	0,106 0,295 0,542	[168] [168] [168]
		78,1	а) 0,1820	Φ — 85 Ψ = 50 φ = 88	3,43 0,75 10,1	0,139 0,435 0,812	[168] [168] [168]
Cs	Поликристалл	20,4	а) 0,0746	—	40	0,03	[153]
Ba	»	20,4	а) 0,027	—	8,5 31,2	0,041 0,41	[155] [155]
		14,0	а) 0,015	—	17,6 31,2	0,337 0,909	[155] [155]
		1,86	а) 0,0071	—	29,4 33,9	2,39 3,08	[155] [155]
Ta	Поликристалл (0,1% примесей)	291 80	б) 1 б) 0,3	— —	300 300	0,001 0,01	[152] [152]
	Поликристалл	20,4	а) 0,0144	—	0,67 11,1 17,4 25,4 35,0	0,0007 0,0135 0,0297 0,0580 0,0885	[157] [157] [157] [157] [157]
W	»	28	а) 0,195	—	300	0,939	[152]
		20,4	а) 0,00216	Ψ — 0 Ψ — 0	2,28 12,20	0,861 9,92	[158] [158]
		20,4	а) 0,00216	Φ — 0 Ψ — 45	2,28 12,20	0,915 14,22	[158] [158]
Re	Поликристалл (0,42% примесей)	80 20,4	а) 0,106 а) 0,019	— —	34,3 34,3	0,0796 0,266	[159] [159]
Pt	Поликристалл	78	б) 0,185	—	100 200 300	0,008 0,037 0,102	[152] [152] [152]
		20,4	а) 0,00425	—	2,28 4,49 8,79 12,20	0,012 0,036 0,099 0,157	[158] [158] [158] [158]

Металл	Образец	T, °K	а) $l/2r_0$ б) r_0/a	Угол, град	H, кГ	$\Delta R/R_{ст}$	Литература
Au	Монокристалл (0,001% примесей)	78,5	а) 0,2175	Ф — 38 ϕ — 63	2 4	0,17 0,69 } 10^{-4}	[164]
		20,4	а) 0,0603	—	2 4 10	4,32 11,8 39,3 } 10^{-4}	[164]
	Поликристалл (0,001% примесей)	78	а) 0,219	—	18,5 25,5 40,1	0,0046 0,0086 0,0180	[157] [157] [157]
Ti	Поликристалл	80	б) 0,23	—	300	0,159	[152]
Pb	Поликристалл (0,001% примесей)	291 80	б) 1 б) 0,25	—	900 300	$<0,01$ 0,05	[152] [152]
	Поликристалл	20,4	а) 0,0256	—	39,8	0,0470	[157]
Bi	Поликристалл (0,01% примесей)	291 80	б) 1 б) 0,346	— —	300 300	37 1360	[152] [152]
	Монокристалл	288	—	Ф — 0 ϕ — 90	100 200 300	12,5 31,5 49,5	[62] [62] [62]
		91	—	Ф — 0 ϕ — 90	100 200 300	600 1150 1690	[62] [62] [62]
		288	—	Ф — 0 ϕ — 0	100 200 300	9,5 23,5 36,5	[62] [62] [62]
		91	—	Ф — 0 ϕ — 0	100 200 300	500 1060 1570	[62] [62] [62]
Tl	Поликристалл	195 80	б) 0,06 б) 0,266	—	300 300	0,03 0,157	[152] [152]

Таблица 26.21

Изменение сопротивления металлов в магнитном поле (магнитное поле параллельно направлению электрического тока через образец — продольный четный гальваномагнитный эффект)

Металл	Образец	T, °K	а) $l/2r_0$, б) r_0/a	Угол, град	H, кГ	$\Delta R/R_{ст}$	Литература
Be	Монокристалл	80,3	а) 0,0168	Ф — 90 ϕ — 90	4,85	0,191	[103]
		79,5	а) 0,0164	Ф — 90 ϕ — 0	4,85	0,214	[103]
Na	Поликристалл	78	а) 0,180	—	16,5	0,0006	[103]

Металл	Состояние	T, °K	а) $\rho_{273,2}$ б) ρ_{293}	Угол, град	H, кэ	$\Delta R/R_{0T}$	Литература
Al	Поликристалл	78	б) 0,121	—	300	0,356	[152]
		77,2	а) 0,158		23,5	0,0038	[156]
K	»	14,0	а) 0,0155		35	0,0249	[153]
Fe	Поликристалл электролитический (0,001% примесей)	290	—	—	20	18,0	[171]
Co	Поликристалл (1,6% примесей)	290	—	—	18,0	0,002	[161]
Cu	Поликристалл	78	б) 0,155	—	300	0,23	[152]
		4,2	а) 0,0089	—	30 150	0,357 1,01	[172] [172]
Ga	Поликристалл (0,27% примесей)	78	б) 0,2	—	100 200 300	0,300 0,625 0,900	[152] [152] [152]
	Монокристалл*	20,2	—	Φ — 0	11,8 18,1 22,3	0,00183 0,00419 0,00634	[176] [170] [176]
		20,4	—	Φ — 0	1,8 11,8 18,1 22,3	0,00238 0,00664 0,00897 0,01003	[176] [170] [176] [170]
		20,4	—	Φ — 0 φ — 0	0,0 18,1 22,3	0,00126 0,00452 0,00519	[176] [170] [176]
		20,4	—	Φ — 90 φ — 90	11,8 18,1 22,3	0,00204 0,00463 0,00618	[176] [176] [176]
Mo	Поликристалл	78	б) 0,135	—	300	0,295	[152]
Ag	»	20	а) 0,0056	—	90	0,150	[173]
Cd	»	78	б) 0,22	—	300	0,705	[152]
In	»	20,4	а) 0,023	—	25,74	0,0151	[100]
W	Монокристалл	20,4	а) 0,0055	Φ — 0	9,33	0,12	[170]
Pt	Поликристалл	20,4	а) 0,0006	—	53,4	0,146	[103]
Bi	Монокристалл	283	—	Φ — 0	10,0 20,0	0,07 0,17	[174] [174]
		280	—	Φ — 90 φ — 0	10,0 20,0	0,31 0,66	[174] [174]
		280	—	Φ — 90 φ — 90	10,0 20,0	0,15 0,20	[174] [174]

Металл	Состояние	T, °K	a) 273,2 б) 290	Угол, град	H, кэ	$\Delta R/R_{0T}$	Литература
Bi	Монокристаллы	293	—	φ = 0	2,51 5,02 7,54	0,038 0,039 0,060	[175] [175] [175]
		293	—	φ = 90 ψ = 0	2,51 5,02 7,54	0,029 0,092 0,150	[175] [175] [175]
		293	—	φ = 90 ψ = 90	2,51 5,02 7,54	0,046 0,150 0,264	[175] [175] [175]

[1] В графе $\Delta R/R_{0T}$ приведены значения $\Delta R/R_{0\,273}$.

Таблица 26.22

Изменение сопротивления сплавов в магнитном поле

Сплав	Состояние	T, °K	H, кэ[1]	$\Delta R/R_{0T}$	Литература
Au—Ag	Атомное содержание Ag, %				
	0,1	4,23	1,63 ⊥	0,00028	[180]
	0,1	4,23	8,49 ⊥	0,00286	[180]
	0,1	1,63	1,63 ⊥	−0,00051	[180]
	0,1	1,63	8,49 ⊥	−0,01123	[180]
Cd—Hg	Поликристалл. Атомное содержание Hg, %				
	1	77,2	23,6 ⊥	0,0132	[156]
	1	20,4	23,6 ⊥	0,0549	[156]
	30	77,2	23,6 ⊥	0,005	[156]
	30	20,4	23,6 ⊥	0,018	[156]
	50	20,4	23,6 ⊥	0,0007	[156]
Cr—Fe	Поликристалл	298	5 ∥	$2\cdot10^{-3}$	[106]
		298	10 ∥	$7\cdot10^{-3}$	[106]
		298	15 ∥	$19\cdot10^{-3}$	[106]
Cu_2NiAl (сплав Гейслера)	»	—	4 ∥	$2,3\cdot10^{-5}$	[137]
			6 ∥	$3,2\cdot10^{-5}$	[137]
			4 ⊥	$5,5\cdot10^{-5}$	[137]
			6 ⊥	$7,8\cdot10^{-5}$	[137]

Сплав	Состояние	T, °K	H, кэ[1]	$\Delta R/R_{0T}$	Литература
Cu—Zn	Поликристалл. Массовое содержание Zn, %				
	70	77,2	23,6	0,067	[156]
	70	20,4	23,6 ⊥	0,040	[156]
	70	14,2	23,6 ⊥	0,040	[156]
Al, Mg	Поликристалл неупорядоченный	77	4 ∥	$92\cdot10^{-4}$	[95]
		77	8 ∥	$55\cdot10^{-4}$	[95]
		77	16 ∥	$30\cdot10^{-4}$	[95]
		293	8 ∥	$15\cdot10^{-3}$	[95]
		293	16 ∥	$3\cdot10^{-3}$	[95]
		293	8 ⊥	$-20\cdot10^{-3}$	[95]
		293	16 ⊥	$-25\cdot10^{-3}$	[95]
	Поликристалл упорядоченный	293	4 ∥	$-70\cdot10^{-3}$	[95]
		293	8 ∥	$-155\cdot10^{-3}$	[95]
		293	16 ∥	$-220\cdot10^{-3}$	[95]
		293	4 ⊥	$-100\cdot10^{-3}$	[95]
		293	8 ⊥	$-150\cdot10^{-3}$	[95]
		293	16 ⊥	$-180\cdot10^{-3}$	[95]

[1] ⊥, ∥ — H перпендикулярно к измерительному току или параллельно ему.

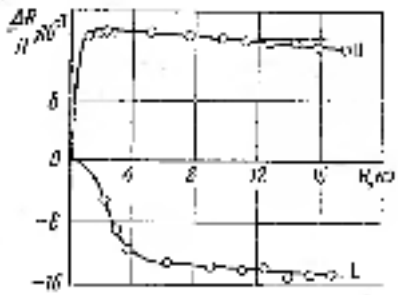


Рис. 26.34. Поперечное и продольное магнетосопротивление никеля при температуре 20° С [181].

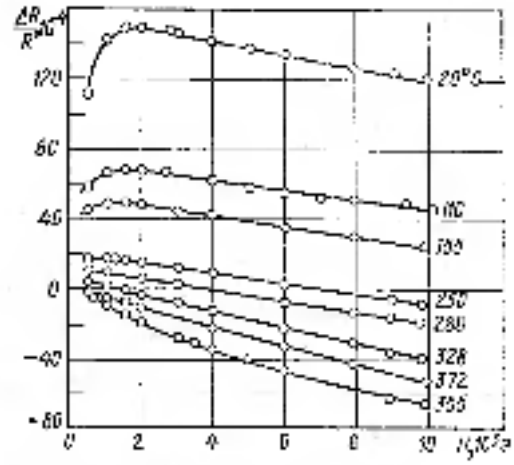


Рис. 26.35. Магнетосопротивление никеля при различных температурах [177].

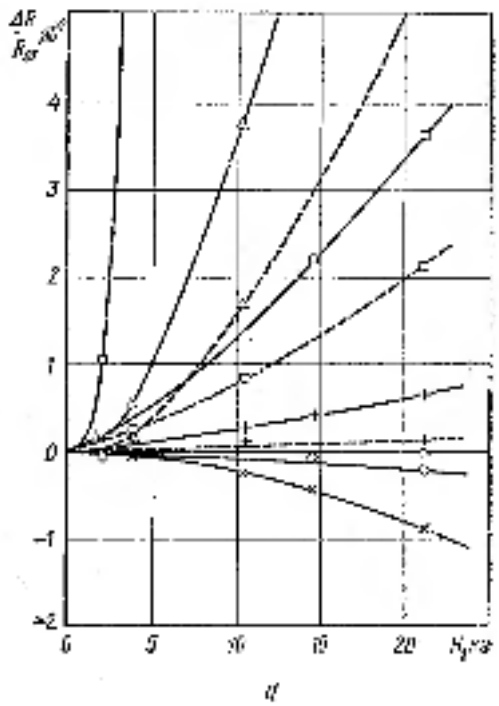
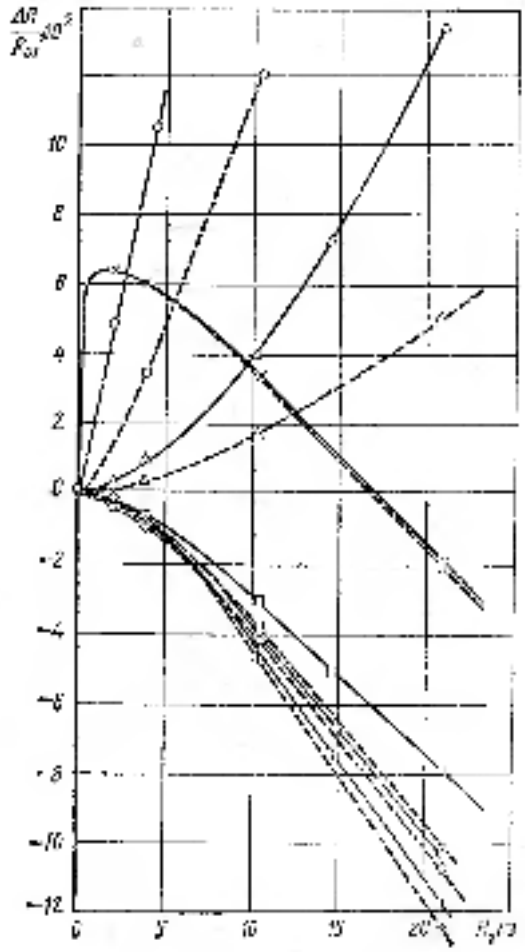


Рис. 26.36. Магнетосопротивление сплава Ag — Mn в поперечном (сплошная кривая) и продольном (пунктир) магнитных полях при 20° (а) и 4,05° К (б) [173] (указано атомное содержание марганца).



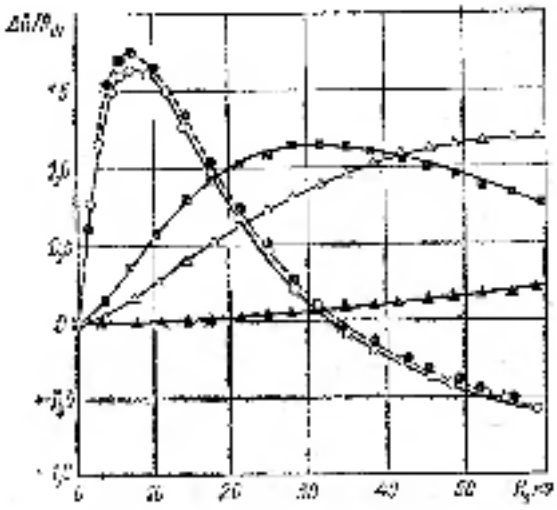


Рис. 26.37. Продольное магнетосопротивление $\Delta R/R_{0T}$ монокристалла сурьмы при различных температурах (главная ось перпендикулярна к направлению тока) [1·8]:

▲ — 99,7 К, △ — 78 К, ■ — 38 К, ○ — 4,99 К, ● — 1,61 К.

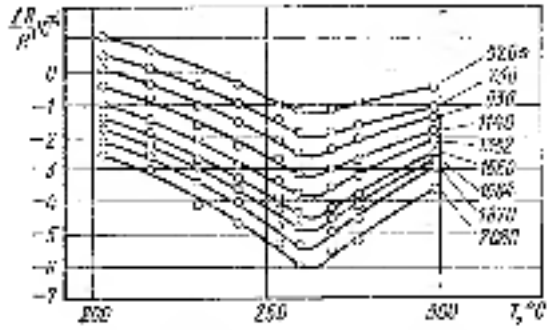
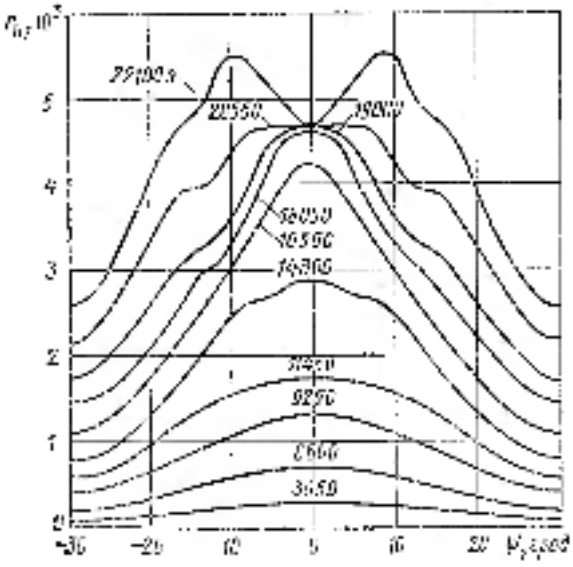
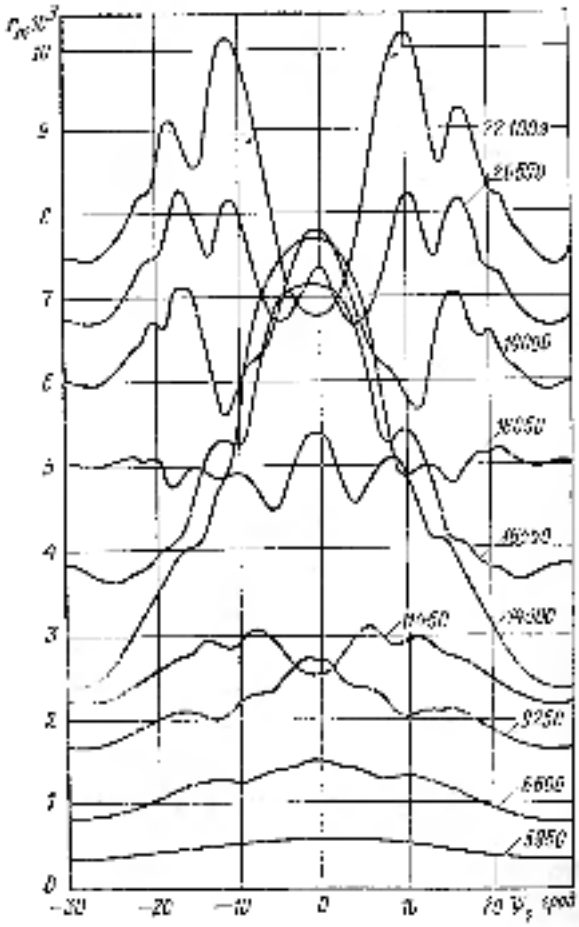


Рис. 26.38. Зависимость магнетосопротивления в области точки Кюри при различных полях для сплава 36% Ni, 64% Fe от температуры [181].



а

Рис. 26.36. Зависимость $r_{yx} = R_{yx}/R_{0\,zx}$ от ориентации магнитного поля относительно бинарной оси для монокристалла висмута при 14,15° (а) и 4,22° К (б) (главная ось параллельна направлению тока [179]).



б

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1916, v. 5 (2), p. 79.
2. Studer F. J., Williams W. D. "Phys. Rev.", 1935, v. 47, p. 291.
3. Фаддеев И. Г. «Докл. АН СССР», 1948, т. 63, с. 123.
4. Борисик Г. С. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1952, т. 23, с. 83.
5. Борисик Г. С. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1954, т. 27, с. 355.
6. Frank V., Jeppesen O. G. "Phys. Rev.", 1953, v. 89, p. 1153.
7. Unwin F. "Proc. Roy. Soc. Edinburgh", 1913, v. 34, p. 208.
8. Frank V. "Appl. Scient. Res.", 1958, v. B7, p. 41.
9. Revaux C. J., Legvold S., Spedding F. H. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1272.
10. Волкенштейн Н. В., Гальванитов В. Б. «Физика металлов и металловедения», 1957, т. 24, № 6, с. 1105.
11. Lee R. S., Legvold S. "Phys. Rev.", 1967, v. 162, N 2, p. 434.
12. Zerdicks L. "Phys. St. Sol.", 1970, v. 42, p. K 153.
13. Anderson G. S., Legvold S., Spedding F. H. "Phys. Rev.", 1955, v. 111, N 5, p. 257.
14. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 3213.
15. Foner S. "Phys. Rev.", 1953, v. 91, p. 447; 1957, v. 107, p. 1513.
16. Scovil G. W. "Appl. Phys. Lett.", 1966, v. 9, p. 24.
17. Roesch L., Willens R. M. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 24, p. 2159.
18. Волков Д. Н., Коллова Т. М., Прудников В. Н. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1958, т. 55, с. 2103.
19. Волкенштейн Н. В., Самошин А. В. «Физика металлов и металловедения», 1964, т. 18, с. 784.
20. Budine J. H. "Phys. Rev.", 1956, v. 102, p. 1459.
21. Анисин Е. Б., Копаневский Ю. А., Кондря Ю. З. «Физика твердого тела», 1967, т. 5, с. 605.
22. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1915, v. 5, p. 35.
23. Beschoten F., Hulsman C. "Physica", 1957, v. 23, p. 704.
24. Zahn H., Schmidt H. "Ber. Deutsch. Phys. Ges.", 1907, Bd 9, S. 95.
25. Aschenbrenn G., Justi E. "Phys. Z.", 1942, Bd 43, S. 207.
26. Justi E. "Z. Naturforsch.", 1949, Bd 4a, S. 472.
27. Gehlhoff P. D., Justi E. "Z. Naturforsch.", 1949, Bd 4a, S. 561.
28. Hall T. H. "Phys. Rev.", 1925, v. 26, p. 820.
29. Zahn H. "Ann. Physik", 1905, Bd 16, S. 148.
30. Frank V. "Appl. Scient. Res.", 1957, v. B6, p. 379.
31. Hall E. H. "Proc. Nat. Acad. Sci.", 1937, v. 23, p. 600.
32. Alderson J. F., Farrel T., Hurd C. M. "Phys. Rev.", 1968, v. 174, p. 729.
34. Unwin F. "Proc. Roy. Soc. Edinburgh", 1920, v. 41, p. 44.
33. Gale S. E., Evans J. «Philos. Mag.», 1935, v. 19, p. 773.
35. Кикоин И. К., Фаддеев И. Г. "Z. Physik", 1931, Bd 71, S. 393.
36. Fakidov J. "Phys. Z. Soviet Union", 1935, v. 7, p. 677.
37. Борисик Г. С. "Изв. АН СССР. Сер. физ.", 1955, т. 19, с. 429.
38. Andrewartha G. G., Evans E. J. "Philos. Mag.", 1941, v. 31, p. 265.
39. Hernst W. "Wiedl. Ann. Physik", 1887, Bd 31, S. 760.
40. Onnes H., Kamerlingh, K. Inf. "Proc. Amsterdam", 1914, v. 17, p. 520.
41. Носков М. М. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1938, т. 8, с. 717.
42. Анареев А. А., Регель А. Р. «Физика твердого тела», 1966, т. 8, с. 3681.
43. Cusack N., Kendall P. "Philos. Mag.", 1961, v. 6, p. 419.
44. Greenfield A. J. "Phys. Rev.", 1964, v. 135, p. 6A.
45. Busch G., Tieche Y. "Phys. Kondens. Mater.", 1963, v. 1, p. 78.
46. Salkovitz E. I., Schindler A. I., Kanner E. W. "Phys. Rev.", 1957, v. 106, p. 887.
47. Köster W., Frei A. "Z. Metallkunde", 1963, Bd 44, S. 495.
48. Powell H., Evans E. J. "Philos. Mag.", 1943, v. 34, p. 125.
49. Olsen J. "Compt. rend.", 1956, v. 243, p. 1105.
50. Allison T. P., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1957, v. 107, p. 103.
51. Сидоров С. К. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1946, т. 16, с. 629.
52. Конар А. П., Сидоров С. К. "Журн. эксперим. и теор. физ.», 1941, т. 11, с. 711.
53. Jeppesen O. J. "Nature", 1954, v. 173, p. 591.
54. Richards W., Evans E. J. «Philos. Mag.», 1939, v. 13, p. 201.
55. John W. G., Evans E. J. "Philos. Mag.", 1937, v. 23, p. 1033.
56. Новогрудский В. Н., Фаддеев И. Г. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 1095.
57. Cox W. R., Hayes D. J. "Phys. Rev." B, 1973, v. 7, p. 3560.
58. Прудников В. Н., Волков Д. Н., Коллова Т. М. «Физика металлов и металловедения», 1970, т. 30, № 1, с. 31.
59. Little N. C. "Phys. Rev.", 1920, v. 28, p. 416.
60. Zahn H. "Ann. Phys.", 1904, Bd 14, S. 886.
61. Muldawer L. "Phys. Rev.", B, 1973, v. 7, p. 4684.
62. Kapitza P. "Proc. Roy. Soc. (London)", 1928, v. A 119, p. 358.
63. Stephens F. "Philos. Mag.", 1930, v. 9, p. 647.
64. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1911, v. 32, p. 178.
65. Steele M. C. "Phys. Rev.", 1955, v. 96, p. 1791.
66. Thompson N. "Proc. Roy. Soc. (London)", 1938, v. A164, p. 24.
67. Okado T. "Memoirs Faculty Sci. Kyushu Univ.", 1955, v. B1, p. 157.
68. Okado T. "J. Phys. Soc. Japan", 1956, v. 11, p. 89.
69. Brodie L. G. "Phys. Rev.", 1954, v. 93, p. 955.
70. Marcus J. A. "Phys. Rev.", 1955, v. 98, p. 1540.
71. Reynolds J. M., Henstreet H. M. "Phys. Rev.", 1954, v. 96, p. 1203.
72. Reynolds J. M., Lehnhardt T. E. "Phys. Rev.", 1954, v. 95, p. 947.
73. Overton V. C., Berlincourt T. G. "Phys. Rev.", 1956, v. 99, p. 1165.
74. Stephens E., Evans E. J. "Philos. Mag.", 1929, v. 7, p. 161.
75. Van Aitel E. "Compt. rend.", 1936, v. 203, p. 614.
76. Кикоин И. К., Лазарев Б. Г. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1935, т. 3, с. 44; "Nature", 1932, v. 129, p. 57; "Phys. Z. Soviet Union", 1933, Bd 3, S. 351; 1935, Bd 4, S. 567.
77. Иванов Г. А., Регель А. Р. «Журн. техн. физ.», 1955, т. 25, с. 35.
78. Иванов Г. А., Регель А. Р. «Журн. техн. физ.», 1955, т. 25, с. 49.
79. Gale S., Evans E. J. "Philos. Mag.", 1935, v. 19, p. 773.
80. Thomas W. R., Evans E. J. "Philos. Mag.", 1934, v. 17, p. 65.
81. Thomas W. R., Evans E. J. "Philos. Mag.", 1933, v. 16, p. 329.
82. Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1928, v. 32, p. 624.

83. Buller E. H., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1940, v. 57, p. 916.
84. Jan J. P., Gijsman H. M. "Physica", 1962, v. 18, p. 339.
85. Jan J. P. "Helv. Phys. Acta", 1952, v. 25, p. 677.
86. Foner S. "Phys. Rev.", 1959, v. 101, p. 1648.
87. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1910, v. 30, p. 1.
88. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1911, v. 33, p. 295.
89. Hall E. H. "Phys. Rev.", 1925, v. 26, p. 820.
90. Foner S., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1953, v. 91, p. 20.
91. Rinehier W., Koch K. M. "Z. Naturforsch.", 1956, Bd 13a, S. 26.
92. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В., Волконский С. В. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1958, т. 35, с. 95.
93. Moreau G. "J. Physica", 1903, v. 9, p. 497.
94. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1913, v. 1, p. 339.
95. Кокар А. П., Порошина Н. И. «Докл. АН СССР», 1948, т. 60, с. 569.
96. Smit J. "Physica", 1955, v. 21, p. 877.
97. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1960, т. 38, с. 61.
98. Dheer P. N. "Phys. Rev.", 1967, v. 156, p. 637.
99. Черемушкина А. В., Васильева Р. П. «Физика твердого тела», 1966, т. 8, с. 892.
100. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1916, v. 8, p. 79.
101. Черемушкина А. В., Корнеева М. И. «Вестн. МГУ», 1966, № 5, с. 118.
102. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1921, v. 17, p. 23.
103. Foner S. "Phys. Rev.", 1956, v. 99, p. 1019.
104. Soffer S. e. a. "Phys. Rev.", 1965, v. 140, p. A6688.
105. Бажанова Н. В. «Физика металлов и металловедения», 1964, т. 17, с. 774.
106. Фаинов И. Г., Гражданкина Н. П., Киконин А. К. «Докл. АН СССР», 1949, т. 68, с. 491.
107. Andres H. P. de, Jellinghaus W. "Inst. Ferro y acero", 1956, v. 9, p. 626.
108. Kool C. "Phys. Rev.", 1954, v. 95, p. 843.
109. Черемушкина А. В., Архипов Ю. Н., Саркисова К. Н. «Изв. вузов. Физика», 1968, т. 6, с. 156.
110. Schröder K. "Phys. Rev.", 1964, v. 135, p. A 140.
111. Carter G. C. Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1960, v. 152, p. 499.
112. Черемушкина А. В., Архипов Ю. Н. «Вестн. МГУ», 1966, № 4, с. 101.
113. Черемушкина А. В. «Вестн. МГУ», 1957, № 2, с. 127.
114. Спирин Е. Н., Сирота З. Д. "Вестн. МГУ», 1960, № 6, с. 27.
115. Pugh E. M., Rostoker H. "Rev. Mod. Phys.", 1955, v. 25, p. 151.
116. Köster W., Rechlin P. "Z. Metallkunde", 1957, Bd 48, S. 485.
117. Foner S., Allison F. E., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 1129.
118. Киконин И. К. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1940, т. 10, с. 1342.
119. Allison F. E., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1956, v. 102, p. 1261.
120. Dutta S. K., Subrahmanyam A. V. "Phys. Rev.", 1960, v. 117, p. 177.
121. Киконин И. К., Фаинов И. Г. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1941, т. 11, с. 113.
122. Ohata J. "Japan J. Physics", 1927, v. 4, p. 42.
123. Ettingshausen A. von, Nernst W., Sitzungsber K. "Akad. Wiss. Wien", 1886, Bd 94, S. 500.
124. Foner S., Pugh E. "Phys. Rev.", 1953, v. 91, p. 20.
125. Beitel A. F., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1958, v. 112, p. 1516.
126. Федоров Г. В., Рабинкин П. М. «Физика металлов и металловедения», 1970, т. 29, с. 89.
127. Huguenin R., Rivier D. "Helv. Phys. Acta", 1966, v. 38, p. 900.
128. Васильева Р. П., Акмуханов Б., Кондирский Е. М. «Вестн. МГУ», 1970, т. 4, с. 469.
129. Sanford T. R., Ehrlich A. C., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1961, v. 123, p. 1947.
130. Жукова В. М., Фадин В. П. «Изв. вузов. Физика», 1970, № 3, с. 21.
131. Спирин Е. Н., Пенчинов Ю. В. «Физика твердого тела», 1967, т. 9, с. 704.
132. Бабушкина Н. А. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 3096.
133. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В. «Физика металлов и металловедения», 1964, т. 18, с. 26.
134. Волкенштейн Н. В., Григорова Н. К., Федоров Г. В. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1966, т. 50, с. 1525.
135. Wald F. J., Jurretschke H. J. "Phys. Rev.", 1971, v. 53, p. 2412.
136. Lee R. S., Legvold S. "Phys. Rev.", 1967, v. 162, p. 431.
137. Potter H. H. "Philos. Mag.", 1932, v. 31, p. 233.
138. Rhyne I. J. "J. Appl. Phys.", 1969, v. 40, p. 1001.
139. Федоров Г. В., Волкенштейн Н. В. «Физика твердого тела», 1970, т. 12, с. 1374.
140. Волкенштейн Н. В., Григорова Н. К., Федоров Г. В. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1966, т. 51, с. 780.
141. Rhyne I. J. "Phys. Rev.", 1965, v. 172, p. 523.
142. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В. «Физика твердого тела», 1966, т. 8, с. 1895.
143. Быков Д. И., Кондрин Т. М. «Физика металлов и металловедения», 1965, т. 20, с. 355.
144. Бабушкина Н. А. «Физика твердого тела», 1971, т. 10, с. 3096.
145. Zahn H., Schmidt. "Der. Deutsch. Phys. Ges.", 1907, Bd 9, S. 99.
146. Киконин И. К., Бабушкина Н. А., Ильясова Т. Н. «Физика металлов и металловедения», 1960, т. 10, с. 488.
147. Киконин И. К., Бурин Е. М., Муромкин Ю. А. «Докл. АН СССР», 1959, т. 125, с. 1011.
148. Schröder K. "Phys. Rev.", 1964, v. 135, p. 149.
149. Новогрудский В. Н., Фаинов И. Г. «Физика твердого тела», 1961, т. 3, с. 2278.
150. Карнецкий А. В., Николаев В. И. «Физика металлов и металловедения», 1961, т. 2, с. 519.
151. Новогрудский В. Н., Фаинов И. Г. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1964, т. 47, с. 40.
152. Kapitza P. "Proc. Roy. Soc. (London)", 1929, v. A 123, p. 292, 342.
153. Justi E. "Ann. Physik", 1946, Bd (6) 3, S. 183.
154. Grüneisen E., Erfling H. D. "Ann. Physik", 1940, Bd (5) 38, S. 399.
155. Justi E., Kramer J. "Physikal Z.", 1940, Bd 41, S. 197.
156. Haas W. J. de, Van Alphen P. M. «Proc. Amsterdam», 1933, v. 36, p. 203; "Comm. Kamerlingh Onnes Lab. Leiden", 1933, Nr. 226a.
157. Justi E. "Physikal Z.", 1940, Bd 41, S. 486.
158. Grüneisen E., Adenstedt A. "Ann. Physik", 1938, Bd 5(31), S. 714.
159. Ascherinann G., Justi E. "Physikal Z.", 1942, Bd 43, S. 207.
160. Stierstadt O. "Z. Physik", 1931, Bd 67, S. 725.
161. Bates L. F. "Proc. Phys. Soc. (London)", 1946, v. 58, p. 153.
162. Justi E. "Z. Naturforsch.", 1949, Bd 4a, S. 472.
163. Schulze R. "Physik. Z.", 1941, Bd 42, S. 207.
164. Meißner W., Scheffers H. "Physik. Z.", 1929, Bd 30, S. 827.
165. Haas W. J. de, Blom J. W. "Physika", 1933/34, v. 1, p. 465.

166. Forrud A., Justi E., Kramer J. "Physikal. Z.", 1940, Bd 41, S. 115.
167. Van Alphen P. M. Diss. Leiden, 1933.
168. Rausch K. "Ann. Physik", 1947, Bd (6)1, S. 190.
169. Erling H. D., Grüneisen E. "Ann. Physik", 1942, Bd (5)41, S. 69.
170. Justi E., Scheffers H. "Physikal. Z.", 1937, Bd 38, S. 881.
171. Stierstadt O. "Z. Phys.", 1930, Bd 65, S. 675.
172. Olsen J. L., Rinderer L. "Nature", 1954, v. 173, p. 682.
173. Gerritsen A. N., Linde J. O. "Physika", 1951, v. 17, p. 573.
174. Kaye G. W. C. "Proc. Roy. Soc.", 1939, v. A 170, p. 561.
175. Stierstadt O. "Z. Phys.", 1933, Bd 80, S. 636.
176. Haas W. J. de, Blom J. W. "Physika", 1937, v. 4, p. 778.
177. Белов К. П. Упругие тепловые и электрические явления в ферромагнетиках. М., Изд-во иностр. лит., 1957.
178. Steele M. C. "Phys. Rev.", 1955, v. 97, p. 1720.
179. Haas W. J. de, Blom J. W., Schubnikov L. "Physika", 1935, v. 2, p. 453.
180. Giauque W. F., Stout J. W., Clark C. W. "Phys. Rev.", 1937, v. 51, p. 1109.
181. Белов К. П. «Журн. эксперим. и теор. физики», 1951, т. 21, с. 809.

ГЛАВА 27

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ДИА- И ПАРАМАГНЕТИКОВ

Магнитная восприимчивость единицы объема χ_v определяется отношением $\chi_v = M/H$, где M — магнитный момент единицы объема, H — напряженность магнитного поля.

Вещества с отрицательной магнитной восприимчивостью называются *диамагнитными* ($\chi < 0$), а с положительной — *парамагнитными* ($\chi > 0$).

Для характеристики магнитных свойств используется *удельная магнитная восприимчивость* вещества (т. е. магнитная восприимчивость на единицу массы) $\chi = \chi_v/\rho$, где ρ — плотность.

Часто магнитную восприимчивость относят к одному моля вещества (χ_m). Между величинами χ и χ_m существует следующее соотношение: $\chi_m = \chi M$; здесь M — относительная молекулярная масс. Значения χ в таблицах даны в системе СГСМ (см³/г). Для перехода к системе СИ нужно значение величины χ, выраженное в системе СГСМ, умножить на 10^{-9}.

Принятые сокращения: газообразный — (г.); жидкий — (ж.); твердый — (тв.); p — концентрация дырок в полупроводнике; n — концентрация электронов в полупроводнике.

Таблица магнитной восприимчивости диа- и парамагнитных веществ

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} см³/г	Литература
H	293	—1,9907	[1]
	90	—1,97	[1]
H_2O*	293	—0,7015 (тв.)	[2]
	273	—0,7177 (ж.)	[2]
	293	—0,7220	[2]
	413	—0,727	[2]
	0—153	—0,699 (тв.)	[3]
	293	—0,72183 (ж.)	[4]
	313	—0,72986	[4]
	373	—0,72454	[4]
D_2O	293	—0,636	[5]
H_3AsO_3	293	—0,405 (тв.)	[6]
H_3PO_3	295	—0,562 (тв.)	[6]
HBr**	300	—0,427	[6]
HCl	300	—0,602	[6]
HI	297	—0,418	[6]
H_3PO_3	297	—0,548	[6]
H_3PO_4	298	—0,481	[6]

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} см³/г	Литература
H_2SO_3	297	—0,325	[6]
H_2SeO_3	290	—0,308 (тв.)	[6]
H_2SeO_4	298	—0,353	[6]
H_2TeO_3	288	—0,24	[7]
H_2TeO_4	291	—0,43	[7]
He	293	—1,906	[1]
	90	—1,91	[1]
Li^+*	14	3,6	[9]
	293	3,6	[9]
	298	3,35	[6]
$LiCH_3COO$	283	—0,013	[6]
Li_2CO_3	296	—0,308	[6]
LiCl	287	—0,587	[5]
LiI	293,5	—0,417	[6]
$LiNO_3$	292	—0,48	[7]
$LiNO_3 \cdot 3H_2O$	291	—0,690	[6]
Li_2O	293	—0,57	[7]
LiOH	283	—0,516	[6]
$Li_2SO_4 \cdot H_2O$	290	—0,43	[7]
Li_2SO_4	281,5	—0,376	[5]
	296	—0,36	[7]
Be (монокристалл) $\chi_\parallel$**	293	—2,38	[10]
Be (монокристалл) $\chi_\perp$**	293	—0,80	[10]
Be (поликристалл)	103	—0,75	[11]
	291	—1,0	[11]
	573	—1,2	[11]
	1200	—1,3	[11]
$BeCO_3 \cdot 2BeO$	288	—0,34	[7]
$BeCl_2$	290	—0,40	[7]
$Be(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$	296	—0,311	[6]
$Be(OH)_2$	290	—0,537	[12]
$BeSO_4$	301	—0,354	[7]
$BeSO_4 \cdot 4H_2O$	299	—0,51	[7]
B	90	—0,63	[13]

* Температурный коэффициент $\frac{\chi}{\chi} \cdot \frac{d\chi}{dT}$ уменьшается от $2{,}9 \cdot 10^{-4}$ при 298°K до $0{,}68 \cdot 10^{-4}$ при 348°K [3].

** Измерения на растворах.

*** При увеличении температуры от 298 до 398°K χ увеличивается на 1,8% [8].

**** См. рис. 27.1.

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} см³/г	Литература
B	293	−0,62	[13]
	291	−0,71	[14]
	373	−0,73	[14]
	503	−0,76	[14]
	1373	−0,77	[14]
BCl_3	295	−0,590 (ж.)	[6]
B_2O_3	289	−0,55	[7]
H_3BO_3	293	−0,52	[15]
C (алмаз)	103	−0,49	[11]
	293	−0,491	[14]
	473	−0,50	[14]
	673	−0,51	[14]
	1173	−0,54	[14]
	1473	−0,56	[14]
C (графит)	14	4,7	[10]
	289	−3,0	[16]
C (монокристалл)	290	−22,8	[17]
∥ гексагон. оси	293	−0,4	
⊥ гексагон. оси	291	−0,442	[6]
CCl_4	293	−0,4930	[19]
CF_4	293	−0,423 (г.)	[18]
CO_2	293	−0,54	[15]
CS_2	293	−0,426 (ж.)	[11]
N	295	−0,528	[20]
	88	−0,507	[20]
NH_3	289	−1,1 (г.)	[19]
NO	296	−48,66 (г.)	[18]
	132	−81,45	[21]
	292	−49,07 (г.)	[21]
NO_2	108	−3,20 (г.)	[18]
N_2O	285	−0,429 (ж.)	[16]
	289	−0,429 (г.)	[18]
N_2O_3	291	−0,206 (ж.)	[16]
N_2O_4	257	−0,276 (тв.)	[18]
N_2O_5	289	−0,332 (тв.)	[18]
HNO_3	295	−0,467	[22]
	296	−0,530	[6]
NH_4Br	285	−0,484 (тв.)	[6]
NH_4Cl	284	−0,610 (тв.)	[6]
NH_4F	298	−0,699 (тв.)	[6]
NH_4I	285	−0,455 (тв.)	[6]
$(NH_4)_2HPO_4$	295	−0,538 (тв.)	[6]
$(NH_4)H_2PO_4$	296	−0,50	[15]
NH_4NO_3	284	−0,421 (тв.)	[6]
NH_4OH	296	−0,784 (ж.)	[6]
$(NH_4)_2SO_4$	287	−0,479	[6]
$(NH_4)_2S_2O_8$	294	−0,440	[6]
$(NH_4)_2SiBr_6$	293	−0,690	[23]
O I-я модификация	14	54 (тв.)	[24]
	33	60 (тв.)	[24]
O II-я модификация	43	118 (тв.)	[24]
	45	115 (тв.)	[24]
	51	113 (тв.)	[24]
O (ж.)	14	310	[24]
	60	296	[24]
	90	273	[24]
	77	260	[24]
	293	104,1 (г.)	[18]
	293	107,7 (г.)	[25]
O_3 (озон)	90	0,15 (г.)	[26]
	90	0,14 (ж.)	[26]
Ne	293	−0,33 (г.)	[27]

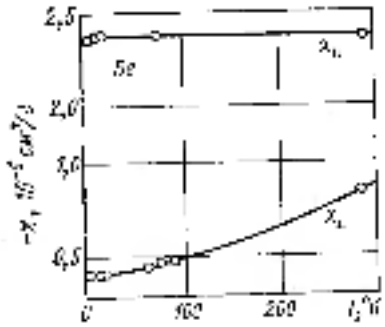


Рис. 27.1. Зависимость $\chi_\parallel$ и $\chi_\perp$ для Se от температуры [10].

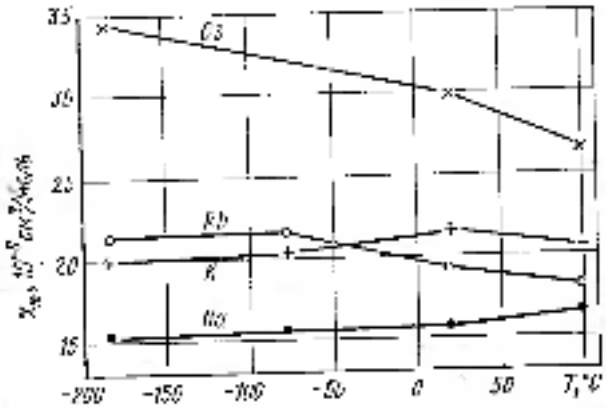


Рис. 27.2. Зависимость χ_m для Cs, Rb, Na, K от температуры [103, 165].

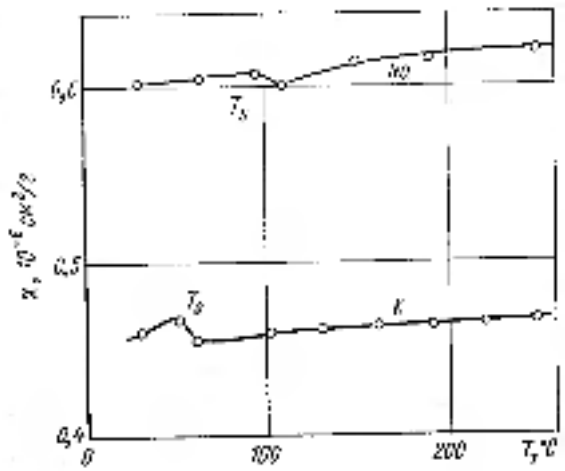


Рис. 27.3. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Na, K от температуры [28, 103].

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} см³/г	Литература
Na[a]	298	0,610	[8]
	78	0,582	[8]
	203	0,600	[28]
	523	0,620	[29]
NaOH	280	0,59	[7]
	300	—0,305[a]	[6]
NaF	302	0,465 (тв.)	[6]
	294	—0,51	[7]
NaCl	123	0,501	[29]
	262	—0,505 (тв.)	[6]
	291	—0,499	[29]
	615	—0,499	[29]
	1000	—0,505	[29]
$NaClO_3$[b]	298	0,376[b]	[6]
NaBr	291	—0,47	[7]
$NaBr \cdot 2H_2O$[b]	291	0,420	[6]
$NaI \cdot 2H_2O$[b]	300	—0,405	[6]
$NaHCO_3$	295	—0,21	[15]
$NaHPO_4$	293	—0,309	[12]
$NaHPO_4 \cdot H_2O$	296	—0,435 (тв.)	[6]
NaH_2PO_4	293	—0,381	[12]
$NaNO_3$	295	—0,28	[15]
	297	—0,301	[6]
$NaPO_3$	292	—0,332	[6]
$NaCH_3COO \cdot 3H_2O$	292	—0,481	[6]
$NaC_2H_3O_2 \cdot 3H_2O$	293	—0,50	[15]
Na_2HPO_4	293	—0,457	[12]
Na_2CO_3	284	—0,412 (тв.)	[6]
	290	—0,24	[7]
$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	290	—0,58	[7]
$Na_2SO_3 \cdot 7H_2O$	295	—0,462	[12]
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	295	0,66	[15]
	296	—0,385 (тв.)	[6]
$Na_2S_2O_3$	295	—0,397	[12]
$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$	290	—0,368 (тв.)	[6]
$Na_2S_2O_4$	294	—0,352	[6]
Na_2TeO_3	284	—0,328 (тв.)	[6]
$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	295	—0,59	[15]
$CH_3AsO(ONa)_2 \cdot H_2O$	293	—0,599	[19]
$SiO(ONa)_2 \cdot 3H_2O$	293	—0,370	[12]
Mg^{2+} (поликристалл)	1,2	0,25	[31]
	14	1,13	[16]
	295	0,49	[16]
	291	0,26	[11]
	293	0,25	[31]
	293	0,46	[30]
Mg (монокристалл) $\chi_{\parallel}$	293	0,46	[30]
Mg (монокристалл) $\chi_{\perp}$	293	0,46	[30]
$MgBr_2$	291	—0,57	[7]
$MgCO_3$	286	0,381	[6]
$MgCO_3 \cdot 3H_2O$	293	—0,525	[12]
$Mg(C_2H_5SO_4)_2 \cdot 2H_2O$	295	0,035	[19]
$MgCl_2$[b]	288	—0,620	[6]
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	291	0,57	[7]
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$[b]	291	—0,287	[6]
MgO	290	0,25	[7]

[a] См. рис. 27.2, 27.3.

[b] Измерения на растворе.

[c] См. рис. 27.4.

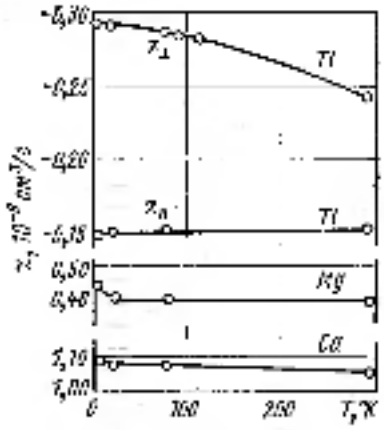


Рис. 27.4. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Ca, Mg, Tl от температуры [30].

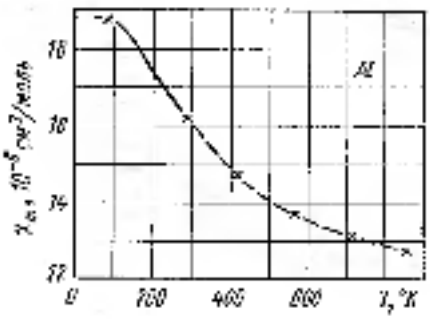


Рис. 27.5. Зависимость χ_m для Al от температуры [30].

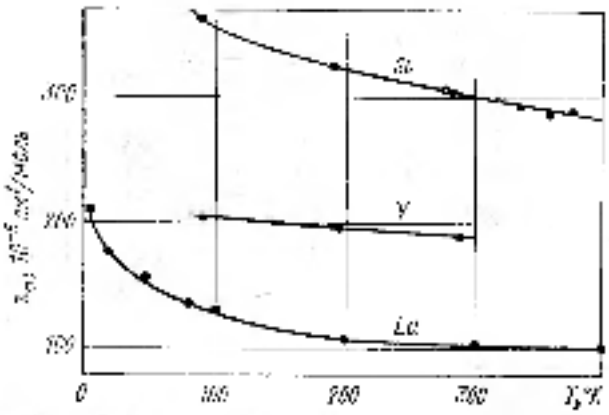


Рис. 27.6. Зависимость χ_m для La, Sc, Y от температуры: La [46, 123]; Sc, Y [46, 106].

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} см³/г	Литература
$Mg(OH)_2$	288	−0,377	[6]
$MgSO_3$*	209	−0,45	[32]
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	284	−0,342	[6]
Al^{3+}, 3^+	293	0,60	[30]
	291	0,65	[14]
$AlBr_3$	292	−0,32	[7]
$AlCl_3$	292	−0,60	[7]
Al_2O_3	293	−0,088	[14]
$Al_2O_3 \cdot 9H_2O$	293	−0,337	[34]
$Al_2(SO_4)_3$	291	−0,46	[7]
Si, $p=5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$	300	−0,111	[35]
$n=6,4 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$	141	$-1,23 \cdot 10^{-3}$	[36]
$n=5,4 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$	297	$-8,5 \cdot 10^{-3}$	[36]
$p=2,8 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$	141	$-8,0 \cdot 10^{-3}$	[36]
$n=2,8 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$	297	$-3,9 \cdot 10^{-3}$	[36]
$p=8,48 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$	141	$+5,18 \cdot 10^{-3}$	[36]
$p=8,48 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$	297	$+3,74 \cdot 10^{-3}$	[36]
$p=5,6 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$	141	$+3,34 \cdot 10^{-3}$	[36]
$p=5,6 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$	297	$+2,2 \cdot 10^{-3}$	[36]
$p=4,7 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$	141	$4,22 \cdot 10^{-3}$	[36]
$p=4,7 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$	297	$3,92 \cdot 10^{-3}$	[36]
$p=4,31 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$	141	$3,42 \cdot 10^{-3}$	[36]
$p=4,31 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$	297	$6,7 \cdot 10^{-3}$	[36]
$p=5 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$	297	$-1,22 \cdot 10^{-3}$	[36]
$SiCl_4$	292	−0,514	[6]
SiO_2	293	−0,493	[37]
$SiO(OH)_2$	295	−0,427	[37]
$Si_2O(OH)_6$	293	−0,429	[37]
$SiOH_4$	293	−0,443	[37]
$Si(OC_2H_5)_4$	293	−0,663	[37]
$Si_2O(OC_2H_5)_6$	293	−0,635	[37]
P черный	293	−0,88	[12]
P белый	109	−0,90	[11, 14]
	317	−0,90	[11, 14]
P красный	293	−0,67	[14]
	318	−0,90 (ж.)	[14]
	393	−0,90 (ж.)	[14]
PCl_3	292	−0,463	[6]
PCl_5	298	−0,490	[6]
P_2O_5	291	−0,46	[7]
$POCl_3$	286	−0,449	[6]
S (ромбическая)	293	−0,287	[38]
S (моноклинная)	293	−0,462	[38]
SCl_2	283	−0,479	[6]
ST_2	293	−0,301 (ж.)	[39]
$SOCl_2$	287	−0,451	[6]
SO_2Cl_2	283	−0,402	[6]
Cl	913	−0,57 (ж.)	[15]
Ar	90	−0,49 (т.)	[1]
	293	−0,48 (г.)	[1]
K^{1+}	103—330	0,69	[11, 14]
	336	0,52 (ж.)	[14]
	403	0,52 (ж.)	[14]
	293	0,532	[40]

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} см³/г	Литература
K	303	0,460	[28]
	523	0,417 (ж.)	[28]
	293	0,46	[8]
KF	298	−0,443	[6]
KCl	283	−0,481	[6]
$KClO_3$	293	−0,30	[10]
KBr	296	0,404	[6]
$KBrO_3$	295	−0,393	[6]
KI	291	−0,405	[6]
KIO_3	295	−0,292	[6]
$KClH^+$	288,5	−0,330	[6]
KHF_2	293	−0,426	[32]
KCNO	290	−0,405	[41]
KH_2PO_4	290	−0,435	[6]
KH_2AsO_4	296	−0,300	[6]
KNO_3	293	−0,396	[6]
$(KSO_3) \cdot NOH$	295	−0,401	[12]
K_2CO_3*	286	−0,412	[6]
K_2SO_4	289	−0,365	[6]
$K_2S_2O_7$	290	−0,383	[6]
$K_2S_2O_8$	295	−0,398	[6]
$K_2S_2O_6$	296	−0,412	[12]
$K_2S_3O_6$	295	−0,358	[6]
$K_2S_4O_6$	290	−0,371	[12]
K_2SiO_3*	299	−0,383	[6]
$K_2SO_4 \cdot Al_2(SO_4)_3$	113,4	−0,480	[29]
	189	0,476	[29]
	290	−0,470	[29]
$K_2SO_4 \cdot Al_2(SO_4)_3 \cdot 24H_2O$	290	−0,579	[43]
$K_4Mo(CN)_8$	292,1	13,46	[107]
$K_4Fe(CN)_6 \cdot CO$	295	−0,20	[44]
$K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$	293	−0,420	[79]
KCH_3COO*	293	−0,495	[6]
$KNa(C_4H_4O_6)$	293	−0,54	[42]
Ca^{2+} (поликристалл)	291	1,1	[11]
Ca (монокристалл) $\chi_\parallel$	293	1,05	[30]
$CaCO_3$	294	−0,354	[6]
$Ca(CH_3COO)_2$	283	−0,446	[6]
$CaCl_2$	290	−0,49	[7]
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	295	−0,462	[6]
CaF_2	293	−0,360	[12]
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	291	−0,282	[6]
CaO	289	−0,27	[7]
$Ca(OH)_2$	298	−0,266	[6]
$CaSO_4$	293	−0,364	[12]
$CaSO_4 \cdot H_2O$	293	−0,384	[12]
$CaSO_4 \cdot 1/2(H_2O)$	288	−0,344	[6]
Sc^{3+}	90	8,2	[46]
	292	7,0	[46]
$Sc_2(C_2O_4)_3$	293	−0,25	[15]
Sc_2O_3	293	−0,018	[15]
$Sc_2(SO_4)_3$	293	−0,33	[47]
Ti (поликристалл)**	293	3,16	[48]
Ti (монокристалл) $\chi_\parallel$	298	3,85	[49]
	573	3,65	[49]
Ti (монокристалл) $\chi_\perp$	298	5,47	[49]

* Измерения из раствора.
** См. рис. 27.5.
*** При повышении (993°К) χ понижается от $0,87 \cdot 10^{-6}$ до $0,4 \cdot 10^{-6}$ см³/г [40].
**** См. рис. 27.2, 27.3. При понижении температуры от 300 до 78°К, χ увеличивается на 0,2% [6].

***** См. рис. 27.4.
****** См. рис. 27.6.
******* См. рис. 27.2.

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} см³/г	Литература
	573	3,38	[49]
TiC[a]	293	0,6	[50]
$TiCl_3$	308	−0,287	[52]
TiF_3	300	11,9	[51]
TiN[b]	293	1,00	[50, 53]
TiO_2	293	0,066	[54]
Ti_2O_3	293	8,1	[54]
TiS_2	293	0,50	[54]
Ti_2S_3	293	0,91	[54]
V[c]	293	5,30	[55]
VCl_4NO	296	5,0	[56]
V_2Cl_3NO	296,5	10,594	[57]
$V_2Cl_3(NO)_2$	296,5	10,596	[57]
Co[d]	296,5	5,044	[57]
	296	−0,0860	[58]
	295	−0,0830	[58]
	500	−0,0833	[58]
	900	−0,0767	[58]
CuCl	266	−0,085	[6]
Cu_2O	293	−0,185	[60]
Cu_3P_2	291	−0,23	[7]
CuS	293	−0,03	[61]
Cu_2S	291	−0,18	[7]
CuSe	293	−0,14	[61]
Cu_2Se	291	−0,15	[7]
Zn[e] (поликристалл)	293	−0,14	[62]
Zn (монокристалл) $\chi_{\parallel}$	293	0,169	[62]
Zn (монокристалл) $\chi_{\perp}$	293	−0,194	[62]
ZnO	293	−0,33...0,66	[65]
	293	−0,369	[52]
$ZnBr_2$	292	−0,40	[7]
$Zn(CH_3\cdot COO)_2\cdot 2H_2O$	286	−0,419	[6]
$ZnCl_2$[f]	288	−0,427	[6]
$Zn(NO_3)_2$[g]	283	−0,333	[6]
$Zn(OH)_2$	291	−0,76	[64]
$ZnSO_4\cdot 7H_2O$	292	−0,277	[6]
Ga[h] (поликристалл)	80	−0,35	[65]
	290	−0,31	[65]
Ga (монокристалл)	300	+0,036 (ж.)	[65]
Ga (монокристалл)	303	+0,0003 (ж.)	[66]
∥ оси a χ_a	80	−0,240	[65]
∥ оси b χ_b	80	−0,407	[65]
∥ оси c χ_c	80	−0,315	[65]
∥ оси a χ_a	290	−0,190	[65]
∥ оси b χ_b	290	−0,306	[65]
∥ оси c χ_c	290	−0,278	[65]
∥ оси a χ_a	298	−0,12	[66]
∥ оси b χ_b	298	−0,42	[66]
∥ оси c χ_c	298	−0,23	[66]
GaAs	293	−0,224	[2]
$GaCl_3$	293	−0,45	[67]
GaI_3	293	−0,33	[67]
GaN	293	−0,332	[2]
GaP	293	−0,274	[2]
GaSb	297[i]	−0,201	[2]

[a] χ зависит от размеров [50].
[b] См. рис. 27.8.
[c] См. рис. 27.9.
[d] См. рис. 27.10.
[e] Измерения на ростовых.
[f] См. рис. 27.11.
[g] Концентрация дырок $p=6,4\cdot10^{14}$ см$^{-3}$.

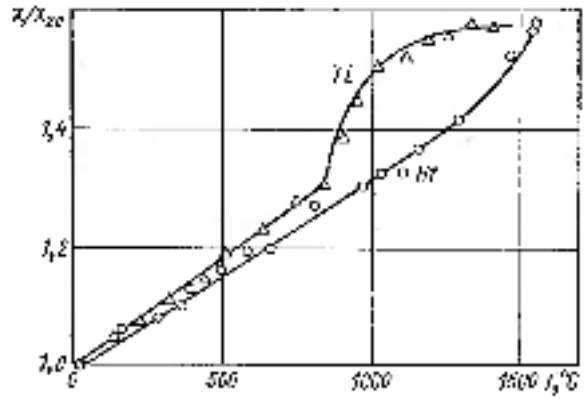


Рис. 27.7. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для Ti, Hf от температуры (χ_{20} — восприимчивость при 20° С) [18].

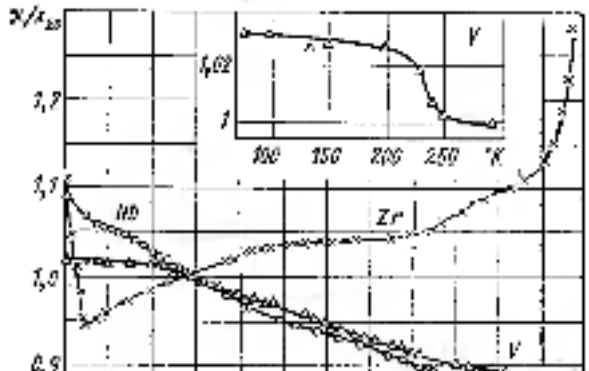


Рис. 27.8. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для V, Zr, Nb от температуры (χ_{20} — восприимчивость при 20° С) [55].

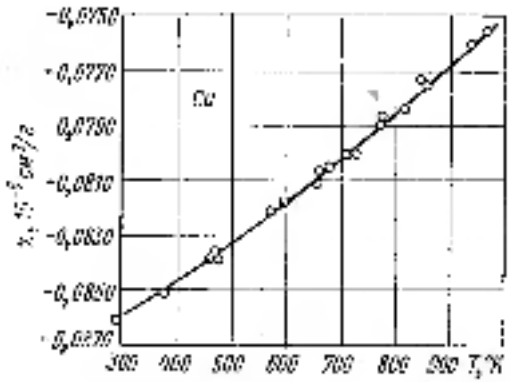


Рис. 27.9. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Cu от температуры [59].

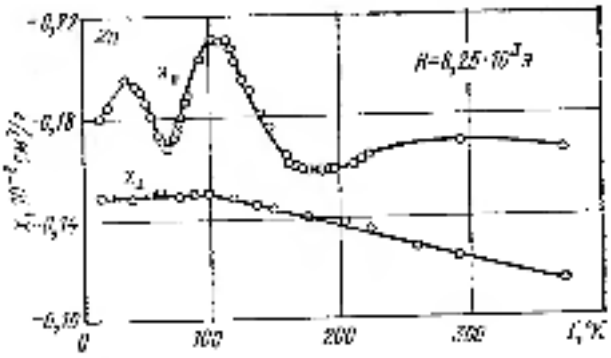


Рис. 27.10. Зависимость $\chi_\parallel$ и $\chi_\perp$ для Zn (по отношению к гексагональной оси) от температуры [62, 103].

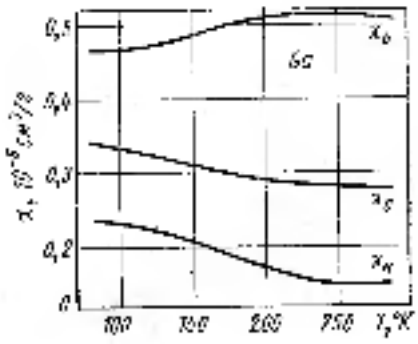


Рис. 27.11. Зависимость χ_a, χ_b, χ_c для Ge от температуры [65].

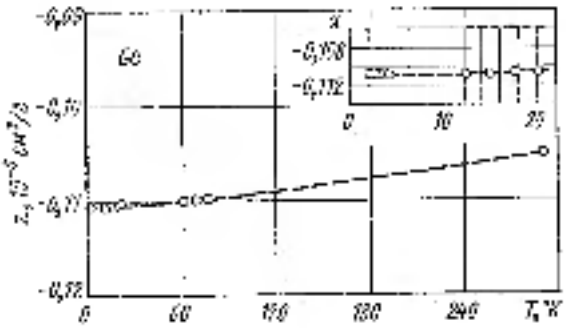


Рис. 27.12. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Ge от температуры. Удельное сопротивление 44—46 ом·см; концентрация примеси Sb $<$ $<10^{14}$ см$^{-3}$ [69].

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} см³/г	Литература
Ge[1]	298	−0,1060	[68]
	4,2	−0,1102	[69]
	77,3	−0,1055	[69]
	293	−0,1060	[69]
Ge, $n<5\cdot10^{13}$ см$^{-3}$	293	−0,106	[35]
$n<10^{15}$ см$^{-3}$	293	−0,104	[70]
$n<10^{16}$ см$^{-3}$	293	−0,106	[70]
$n=8\cdot10^{17}$ см$^{-3}$	293	−0,105	[70]
$n=2,8\cdot10^{18}$ см$^{-3}$	293	−0,106	[70]
$n=6,6\cdot10^{18}$ см$^{-3}$	293	−0,110	[70]
$n=1,5\cdot10^{19}$ см$^{-3}$	293	−0,121	[70]
$n=10^{14}$ см$^{-3}$	1,3—100	−0,110	[71]
$n=1,1\cdot10^{17}$ см$^{-3}$	1,3—100	−0,113	[71]
$n=3\cdot10^{17}$ см$^{-3}$	1,3—100	−0,116	[71]
$n=2\cdot10^{18}$ см$^{-3}$	1,3—100	−0,140	[71]
$n=10^{19}$ см$^{-3}$	1,3—100	−0,180	[71]
$n=3,2\cdot10^{19}$ см$^{-3}$	1,3—100	−0,218	[71]
Ge[2]	295	−0,1055	[68]
	293	−0,1061	[69]
	293	0,1066	[69]
	293	−0,1105	[68]
Ge, $p=1,5\cdot10^{15}$ см$^{-3}$	141	$6,7\cdot10^{-4}$	[68]
$p=6,5\cdot10^{15}$ см$^{-3}$	297	$-2,62\cdot10^{-5}$	[68]
$p=5,2\cdot10^{14}$ см$^{-3}$	141	$6,71\cdot10^{-4}$	[68]
$p=5,2\cdot10^{15}$ см$^{-3}$	297	$-2,54\cdot10^{-5}$	[68]
$p=4\cdot10^{13}$ см$^{-3}$	141	$-1,2\cdot10^{-3}$	[72]
$p=4\cdot10^{17}$ см$^{-3}$	297	$-1,06\cdot10^{-5}$	[72]
$p=3,6\cdot10^{13}$ см$^{-3}$	141	$-1,3\cdot10^{-3}$	[72]
$p=3,6\cdot10^{17}$ см$^{-3}$	297	$3,29\cdot10^{-6}$	[72]
As	90	+0,01	[73]
As (поликристалл)	298	−0,07	[73]
	84	+0,120	[74]
	141	+0,152	[74]
	296	+0,016	[74]
	564	0,034	[74]
	461	−0,067	[74]
As (монокристалл) $\chi_\parallel$	82	+1,005	[74]
	194	+0,765	[74]
	292	+0,576	[74]
	311	+0,547	[74]
	391	+0,435	[74]
	561	+0,273	[74]
As (монокристалл) $\chi_\perp$	82	−0,238	[74]
	180	−0,262	[74]
	292	−0,279	[74]
	413	−0,302	[74]
	510	−0,302	[74]
As (аморфный)	90	0,30	[73]
	248	−0,31	[73]
$AsCl_3$	291	0,406 (ж.)	[6]
As_2O_3	291	−0,27	[7]
As_2S_3	291	−0,03	[7]
Se (гексагональный)[3]	293	−0,336	[75]

[1] См. рис. 27.32, 27.33, 27.34.
[2] См. рис. 27.18.

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} см³/г	Литература
Se (поликристаллический)	293	—0,280	[76]
Se (аморфный)	293	—0,306	[75]
	293	0,290	[76]
	300	—0,270	[77]
	513 (ж.)	0,307	[78]
	613	0,308	[78]
	689	—0,306	[78]
Er	103	—0,40 (тв.)	[11]
	265	0,40 (тв.)	[11]
	266	—0,40 (ж.)	[11]
	291	0,40 (ж.)	[11]
Kr	291	—0,39 (ж.)	[79]
	—	0,35 (т.)	[80]
Rh[*]	298	0,21	[8]
	303	0,196	[81]
	373	0,198	[81]
Rb_2CO_3	293	—0,321	[37]
RbCl	291	—0,327	[37]
$RbNO_3$	293	0,281	[37]
Rb_2SO_4	291	—0,331	[37]
Sr	273	1,02	[82]
	293	1,06	[82]
	338	1,09	[82]
	533	0,71	[82]
$SrTiO_3$	292	—0,39	[7]
	293	0,51	[83]
$SrCr_2 \cdot 6H_2O$[**]	286	—0,356	[6]
$SrCO_3$	293	0,300	[6]
$Sr(CH_3 \cdot COO)_2$	284	—0,335	[6]
SrCl	293	—0,56	[7]
$SrCl_2 \cdot 6H_2O$[**]	289	—0,387	[6]
SrF_2	293	0,298	[12]
SrI_2	292	—0,44	[7]
	293	—0,36	[6]
$Sr(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	290	—0,392	[6]
SrO	293	—0,060	[7]
$SrSO_4$	296	—0,316	[6]
$Sr(OH)_2 \cdot 8H_2O$	282	0,264	[6]
Y[*]	292	2,1	[46]
Zr[**]	293	1,38	[55]
	293	1,33	[48]
ZrC	293	—0,22	[50]
ZrN[**]	293	0,67	[50]
ZrO_2	288	—0,112	[7]
$ZrSO_4$	292	—0,215	[6]
Nb[***]	293	2,34	[55]
	299	2,30	[56]
	14	2,34	[10]
	269	2,26	[10]
$NbH_{0,08}$	81	0,62	[84]
	291	0,70	[84]
Mn[†]	293	0,62	[48]
$MoBr_3$	293	1,34	[86]
$MoBr_4$	293	1,62	[87]
$Mo(CO)_6$	293	—0,28	[88]

[*] См. рис. 27.2; при увеличении температуры от 298 до 387 К χ увеличивается на 8,5% [8].
[**] Измерено на частицах.
[***] См. рис. 27.8.
[†] См. рис. 27.9, 27.10.
[††] Магнитное поле H=194 э.
[‡‡] См. рис. 27.7.
[§§] См. рис. 27.17.

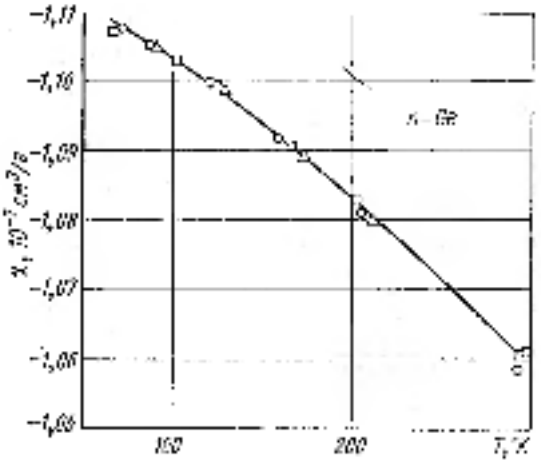


Рис. 27.13. Зависимость удельной магнитной восприимчивости в Se от температуры. Концентрация носителей в образцах: 1 — 10^{16} см$^{-3}$; 2 — 10^{14} см$^{-3}$ [35, 103].

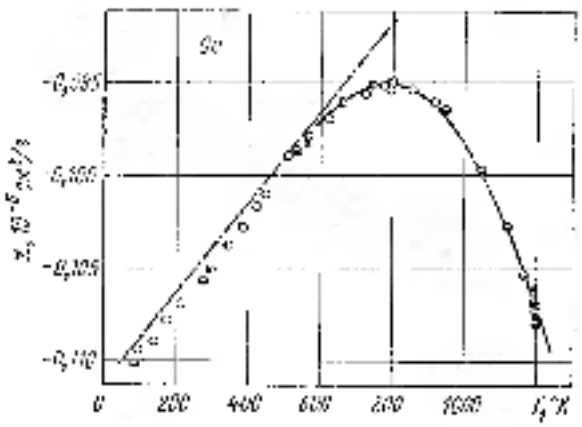


Рис. 27.14. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Se от температуры [35, 103].

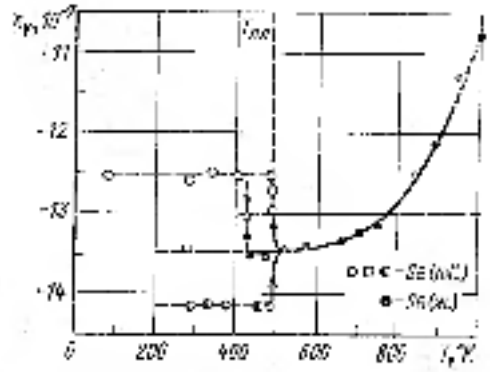


Рис. 27.15. Зависимость χ_p твердого и жидкого Se от температуры [77].

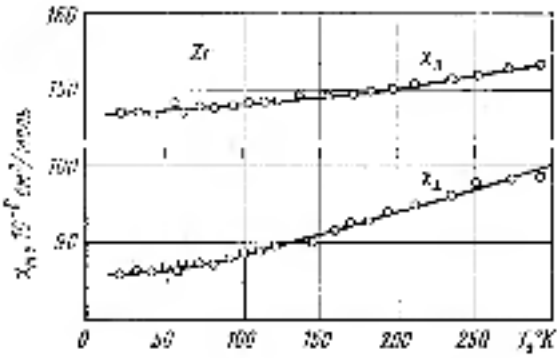


Рис. 27.16. Зависимость $\chi_\parallel$ и $\chi_\perp$ для Zr от температуры [166] ($\parallel$ и $\perp$ гексагональной оси; H — 11 кэ).

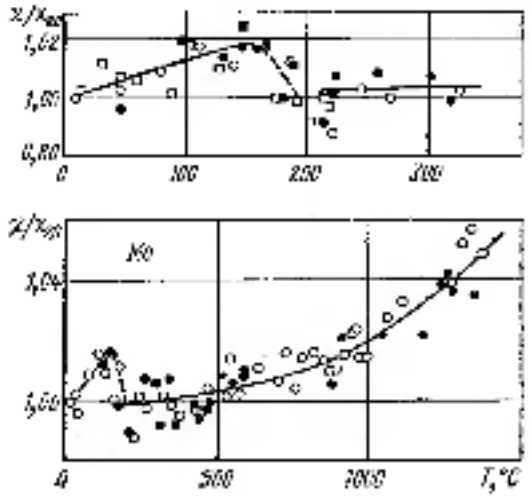


Рис. 27.17. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} Mo от температуры [48] (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20° С).

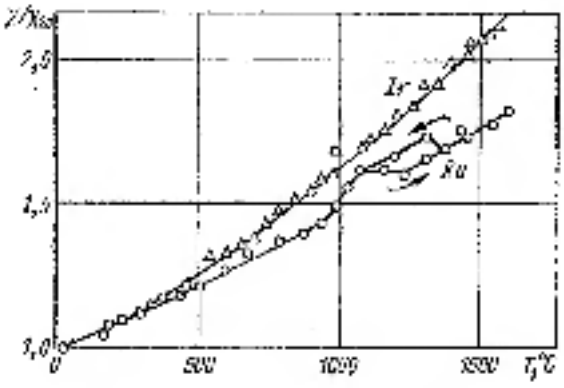


Рис. 27.18. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для Ru, Ir от температуры [91] (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20°С).

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} см³/г	Литература
MoF_6	293	−0,12	[39]
MoO_2	293	0,33	[54]
	293	0,31	[85]
MoO_3	293	0,85	[54]
	293	0,62	[86]
Mo_2O_3	289	0,35	[7]
Mo_4O_6	293	0,93	[86]
Mo_2O_5	289	0,30	[54]
MoS_2	289	−0,21	[7]
	293	0,81	[85]
H_2MoO_4	289	−0,015	[7]
Tc	78	2,9	[89]
	208	2,7	[89]
	402	2,5	[89]
$TcO_2 \cdot 2H_2O$	78	3,4	[89]
	197	1,86	[89]
	256	1,63	[89]
	300	1,46	[89]
	348	1,40	[89]
	388	1,34	[89]
Ru*	18	0,41	[1]
	103	0,55	[1]
	173	0,50	[1]
	233	0,46	[1]
	293	0,34	[48]
$RuCl_3$	298	7,21	[90]
	423	5,19	[90]
RuO_2	298	1,21	[90]
	623	1,46	[90]
Ru**	293	1,03	[48]
	20	0,926	[91]
	40	0,926	[91]
	60	0,930	[91]
	80	0,932	[91]
	100	0,935	[91]
	200	0,960	[91]
	290	0,988	[91]
	623	1,17	[91]
RuO_4	298	0,408	[90]
	623	0,308	[90]
RhF_3	293	2,99	[40]
Pd***	293	5,4	[48]
	20	7,32	[91]
	40	7,37	[91]
	60	7,49	[91]
	70	7,54	[91]
	80	7,56	[91]
	90	7,54	[91]
	100	7,50	[91]
	150	7,06	[91]
	200	6,44	[91]
	250	6,79	[91]
	270	5,53	[91]
	290	5,27	[91]
	291	5,8	[14]
	473	4,6	[14]
Pd	1023	2,6	[14]
	1503	1,7	[14]

* См. рис. 27.16.
** См. рис. 27.18.
*** См. рис. 27.20.

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} см³/г	Литература
Ag*	296	−0,181	[58]
	290	0,192	[92, 93]
	63,8	−0,190	[94]
	289	−0,188	[94]
	14	−0,19	[16]
	293	−0,1807	[59]
	400	−0,1792	[59]
	600	−0,1769	[59]
	975	−0,1786	[59]
AgBr	291	−0,33	[7]
AgCN	290	−0,322	[6]
Ag_2CO_3	295	−0,292	[6]
AgCl	290	−0,36	[7]
AgI	292	−0,37	[7]
$AgNO_3$	300	−0,274	[6]
Ag_2SO_4	289	−0,352	[6]
Cd** (поликристалл)	14	−0,286	[96]
	289	−0,183	[99]
	293	−0,175	[96]
Cd (монокристалл) ⊥ гексагональной оси	14	0,130	[97]
	293	−0,142	[97]
Cd ∥ гексагональной оси	14	−0,679	[97]
	293	−0,243	[97]
$CdBr_2 \cdot 4H_2O$	288	−0,343	[6]
$Cd(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$	291	−0,366	[6]
$Cd(CN)_2$	290	−0,292	[6]
$CdCO_3$	296	−0,305	[6]
$CdCl_2 \cdot H_2O$	285	−0,268	[6]
CdI_2	294	−0,308	[6]
$Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	292	−0,205	[6]
CdO	293	0,234	[96]
CdS	293	−0,346	[96]
CdSb	291	−0,213	[100]
	283	−0,30	[101]
$3CdSO_4 \cdot 8H_2O$	286	−0,281	[6]
In (поликристалл)***	293	−0,11	[11]
	110	−0,14	[11]
	293	−0,077	[102]
	295	−0,089	[103]
In (монокристалл) $\chi_{\parallel}$	290	−0,151	[102]
	293	−0,158	[104]
In (монокристалл) $\chi_{\perp}$	290	−0,064	[102]
	293	−0,078	[104]
InAs	296**	0,301	[35]
$InCl_2$	291	−0,30	[7]
InN	290**	−0,320	[105]
InP	293**	−0,313	[35]
$InP_{0,2}As_{0,8}$	290	−0,292	[35]
In_2S_3	293	−0,19	[7]
InSb	293**	−0,281	[35]
	293**	−0,294	[105]

* См. рис. 27.21; при давлении (5×10⁴) К χ изменяется от −0,2·10⁻⁶ до −0,5·10⁻⁶ см³/г [93].
** См. рис. 27.20.
*** См. рис. 27.23.
+ $n = 7 \cdot 10^{19}$ см⁻³.
++ Концентрация носителей $\chi_{\perp}$.
** $n = 1,0 \cdot 10^{18}$ см⁻³.
** Концентрация электронов $n = 5,2 \cdot 10^{18}$ см⁻³.
** $n = 4 \cdot 10^{18}$ см⁻³.

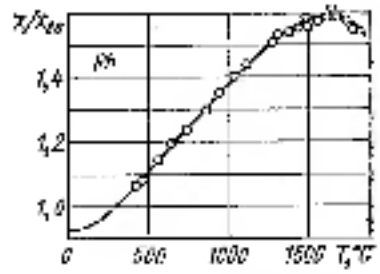


Рис. 27.19. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для Rb от температуры [48] (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20° С).

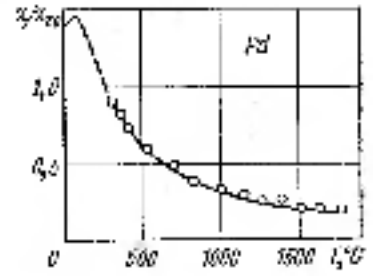


Рис. 27.20. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для Pd от температуры [48] (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20° С).

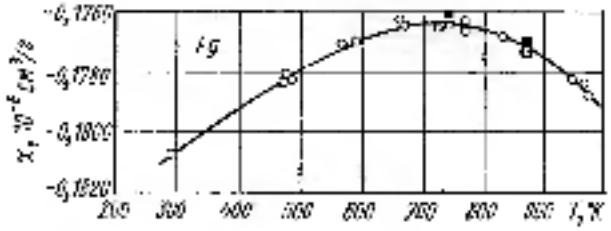


Рис. 27.21. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Ag от температуры [59]:
○ — исходный образец; ■ — выдержан в течение 12 ч при температуре измерения; □ — обезгазенный образец.

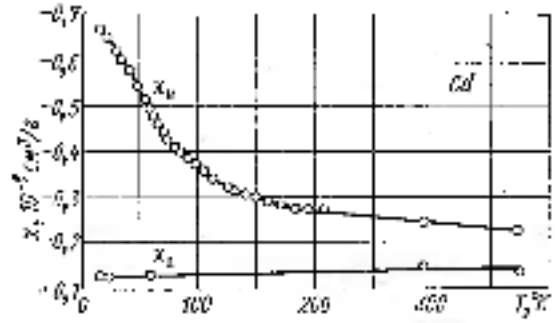


Рис. 27.22. Зависимость $\chi_{\parallel}$ и $\chi_{\perp}$ для Cd от температуры [97, 106]

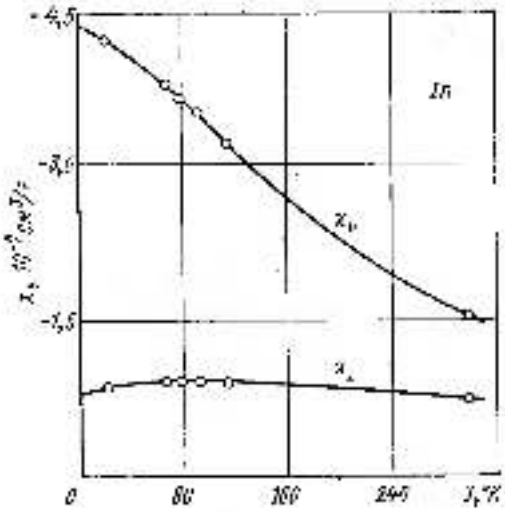


Рис. 27.23. Зависимость $\chi_\parallel$ и $\chi_\perp$ для Ir от температуры [104].

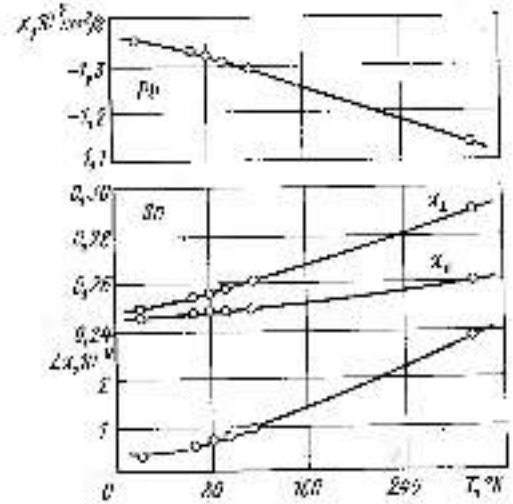


Рис. 27.24. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Sn, Pb и $\Delta\chi = \chi_\perp - \chi_\parallel$ для Sb от температуры [104].

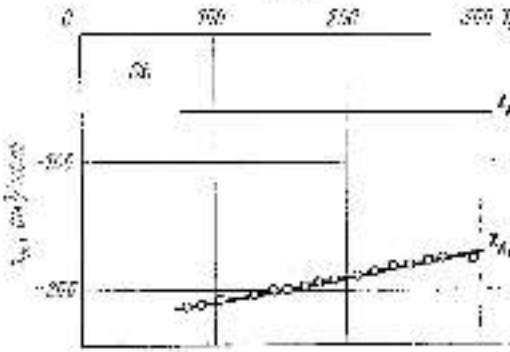


Рис. 27.25. Зависимость $\chi_{\parallel}$ и $\chi_{\perp}$ для Sb от температуры [100, 113].

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} см³/г	Литература
Sn-α	20	−0,20	[94]
	269	−0,25	[94]
	80	−0,26	[107]
	268	−0,31	[107]
	273*	−0,310	[108]
	273**	−0,265	[108]
Sn-β (монокристалл)***	4,9	+0,023	[69]
	293	+0,026	[69, 94]
Sn-β (монокристалл) $\chi_\parallel$	293	+0,0241	[109]
	293	+0,026	[104]
Sn-β (монокристалл) $\chi_\perp$	293	+0,0270	[109]
	293	+0,029	[104]
$SnBr_4$	293	−0,304	[19]
$Sn(CH_3)_4$	293	−0,218	[110, 123]
$Sn(C_2H_5)_4$	293	−0,158	[110, 112]
$Sn(C_3H_7)_4$	290	−0,095	[110, 112]
$SnCl_2$	291	−0,37	[7]
$SnCl_4$	297	−0,438	[6]
$SnCl_2 \cdot 2H_2O$	284	−0,343	[6]
SnO	290	−0,11	[7]
SnO_2	288	−0,160	[7]
Sn_2O_3	290	−0,33	[7]
$SnO_2(OH)_2$	293	−0,278	[12]
$Sn(OH)_4$	293	−0,321	[12]
$SnO_2(OH)(CH_3)$	293	−0,324	[12]
$SnSO_4$	291	−0,26	[7]
Sb (монокристалл)***	297	−0,50	[113]
Sb (монокристалл) $\chi_\parallel$	90	−1,73	[114]
	293	−1,42	[114]
Sb (монокристалл) $\chi_\perp$	90	−0,50	[114]
	293	−0,90	[114]
$SbBr_3$	293	−0,275	[6]
SbCl	293	−0,213	[116]
$SbCl_3$	284	−0,376	[6]
$SbCl_5$	293	−0,360 (ж.)	[6]
SbF_3	293	−0,255	[12]
Sb_2O_3	287	−0,19	[7]
Sb_2Se_3**	130—500	−0,388	[115]
Sb_2Te_3	130—500	−0,398	[115]
	293	−0,153	[116]
	293	−0,040 (ж.)	[116]
SbZn	293	−0,285	[116]
Sb_2Zn_3	293	−0,261	[116]
		−0,107 (ж.)	[116]
Te (монокристалл)***	14,2	−0,293	[94]
	289	−0,280	[94]
	293	−0,290	[76]
	300	−0,288	[77]
	293	−0,307	[116]

* $n \cdot 10^{10}$ см⁻³.
** Поликристалл.
*** См. рис. 27.24.
**** См. рис. 27.25.
***** p-Проводимость.
****** См. рис. 27.25.

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10⁻⁶ см³/г	Литература
Te (монокристалл)* $\chi_{\parallel}$	293	—329	[116]
Te (монокристалл) $\chi_{\perp}$	293	—0,296	[116]
	> 713	—0,099 (ж.)	[100]
TeO_2	291	—0,14	[7]
$Te(OH)_4$	293	—0,353	[6]
I	14	—0,315	[95]
	269	—0,330	[34]
	290	—0,35	[77]
	293	—0,35	[14]
	368	—0,38	[14]
	368	—0,39 (ж.)	[14]
	473	—0,33 (ж.)	[14]
TCl	287	—0,376 (ж.)	[6]
TCl_3**	288	0,387	[6]
Xe	292	—0,51	[117]
	293	—0,53	[118]
Cs***	293	0,256	[40]
	293	0,22	[119]
Cs	296	0,23	[6]
$Cs_2AlgAlnCl_6$	293	—0,33	[120]
Cs_2CO_3	293	—0,320	[12, 37]
CsCl	293	—0,363	[12, 37]
$CsNO_3$	290	0,412	[12, 37]
Cs_2SO_4	293	—0,322	[12, 37]
$CsSO_4Al_2(SO_4)_3$	282	—0,51	[7]
$2H_2O$-$CsSO_4Al_2(SO_4)_3$	287	—0,49	[7]
Ba	103—291	0,9	[11]
	293	0,147	[121]
	573	0,316	[121]
	673	0,415	[121]
$Ba_3(AsO_4)_2$	293	—0,280	[12]
$BaBr_2$	293	—0,26	[7]
$BaBr_2 \cdot 2H_2O$	293	—0,371	[22]
$BaCO_3$	282,5	—0,270	[6]
$BaCl_2$	293	—0,41	[7]
$BaCl_2 \cdot 2H_2O$	284	—0,723	[6]
BaF_2	293	—0,281	[37]
BaI_2**	295	—0,79	[122]
$BaI_2 \cdot 2H_2O$	292	—0,38	[7]
$Ba(NO_3)_2$	293	—0,354	[22]
BaO	293	—0,13	[7]
$Ba(OH)_2$	291	—0,39	[7]
$Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$	290	—0,497	[37]
BaS	291	—0,32	[7]
$BaSO_4$	293	—0,306	[12]
$BaS_2O_3 \cdot 2H_2O$	290	—0,369	[123]
La**	293	0,73	[123]
$LaCl_3$	288	5,6	[7]
$La(NO_3)_3 \cdot 2NH_4NO_3$	288	—0,29	[7]
La_2O_3	297	—0,40	[124]
LaS_2	293	—0,63	[124]

* При понижении температуры $\chi_{\parallel}$ увеличивается, а $\chi_{\perp}$ почти постоянно; при 15°K $\chi_{\parallel} = \chi_{\perp}$.

** В жидкости из раствора.

*** При понижении температуры от 2,6°K до 75°K χ увеличивается на 12% [8].

**** См. рис. 27.С.

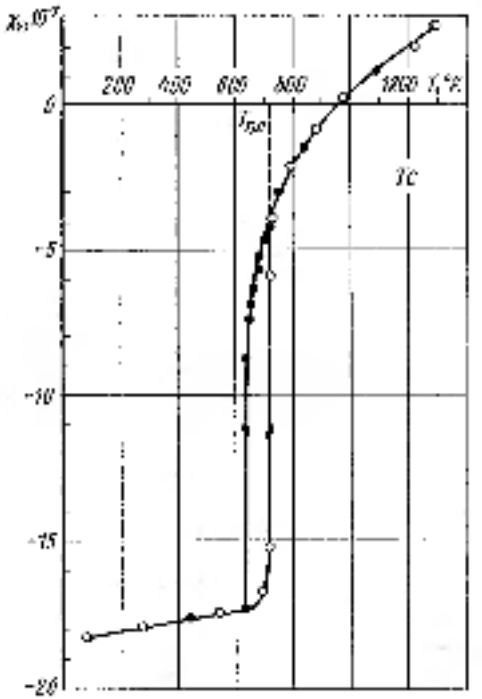


Рис. 27.26. Зависимость χ_V твердого и жидкого Te от температуры [77].

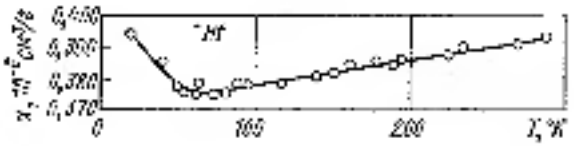


Рис. 27.27. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Hf от температуры [126].

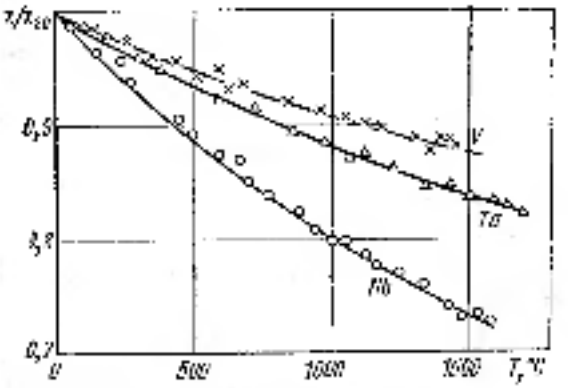


Рис. 27.28. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для V, Ta, Nb от температуры (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20° C) [48].

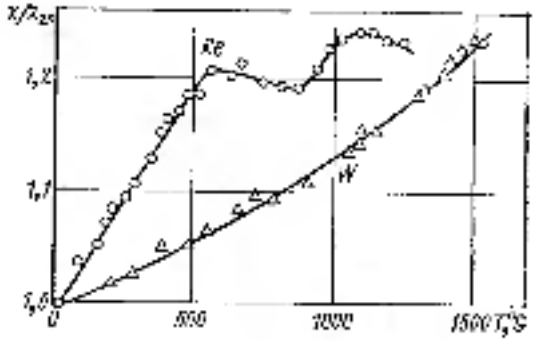


Рис. 27.29. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для Re, W от температуры (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20°С) [48].

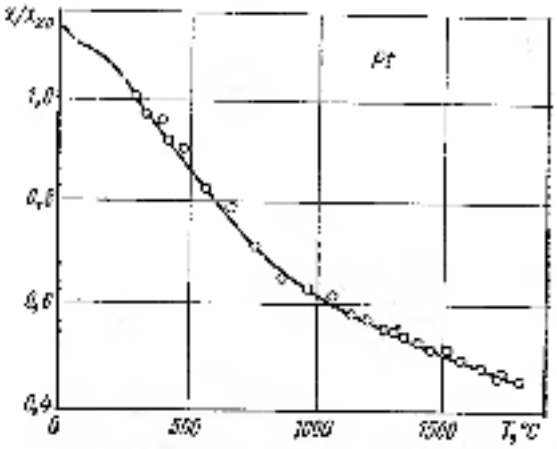


Рис. 27.30. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для Pt от температуры (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20° С) [48].

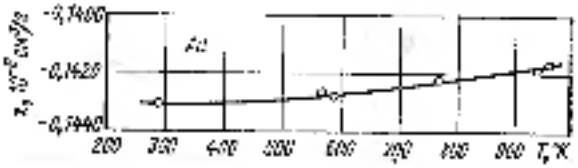


Рис. 27.31. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Au от температуры [59].

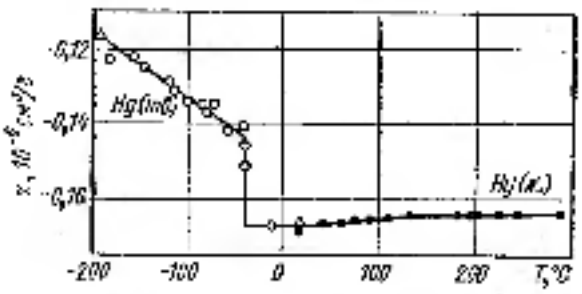


Рис. 27.32. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Hg от температуры [103].

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} см³/г	Литература
Li_2S_4	290	−0,26	[124]
$Li_2(SO_4)_3$	293	−0,30	[47]
Hf[14]	4,2	0,40	[125]
	77	0,40	[195]
	295	0,42	[125]
	293	0,37	[126]
	293	0,35	[48]
Ta (поликристалл)[15]	293	0,827	[56]
	295	0,840	[127]
	293	0,85	[48]
Ta (монокристалл) $\chi_{\parallel}$	303	−0,329	[103, 116]
	493—693	−0,310	[116]
Ta (монокристалл) $\chi_{\perp}$	303	−0,290	[103, 116]
	493		
	633	−0,260	[116]
W[16]	297	0,29	[48]
	293	0,291	[128]
WBr_2	293	0,130	[129]
WBr_4	293	0,03	[129]
WCl^{IV}	293	0,16	[50]
WF_4	293	−0,134 (∞)	[39]
WO_2	293	0,11	[129]
W_2O_5	293	0,20	[129]
WO_3	288	0,81	[54]
Re[17]	293	0,35	[48]
	194—295	0,309	[130]
ReO_2	79—296	0,073	[89]
Re_2O_7	293	0,2	[131]
Re_2O_3	293	0,16	[131]
ReO_4K	290	−0,119	[130]
ReO_4NH_4	293	0,150	[130]
Os	296	0,062	[132]
Ir[18]	293	0,14	[8]
	291	0,15	[14]
	473	0,17	[14]
	1123	0,26	[14]
	1423	0,31	[14]
$IrCl_3$	298	−0,114	[133]
IrO_2	298	+0,097	[133]
	623	+0,026	[133]
Pt[19]	293	0,07	[48]
	20	1,094	[91]
	100	1,066	[91]
	200	1,028	[91]
	290	0,872	[91]
	296	0,582	[90]
	573	0,755	[90]
	973	0,45	[14]
	1493	0,30	[14]

[14] См. рис. 27.7, 27.27.
[15] См. рис. 27.30.
[16] См. рис. 27.29.
[17] При $H = 3000$ э $\chi = 0,07 \cdot 10^{-6}$ см³/г для $T = 20$°К, $\chi = 0,06 \cdot 10^{-6}$ см³/г для $T = 50$°К, $\chi = 0,02 \cdot 10^{-6}$ см³/г для $T = 77$°К [90].
[18] См. рис. 27.29.
[19] См. рис. 27.18.
[20] См. рис. 27.30.

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} см³/г	Литература
PtCl	296	−0,51	[90]
$PtCl_2CO$	296	−0,29	[88]
$PtCl_2 \cdot 2CO$	293	−0,37	[88]
K_2PtCl_4	293	0,393	[134]
K_2PtCl_6	293	−0,350	[134]
$K_2Pt(C_2O_4)_2 \cdot 2H_2O$	293	−0,31	[134]
Au*	296	−0,142	[59]
	14	−0,132	[96]
	295	−0,1410	[59]
	975	−0,1417	[59]
AuBr	293	−0,22	[135]
$AuCl_3$	294	−0,37	[131]
AuCl	289	−0,268	[6]
AuI	293	−0,28	[135]
$AuKCl_4$	293	−0,4	[135]
Hg (поликристалл)**	500,5	−0,1637 (ж.)	[136]
	291,5	−0,1681 (ж.)	[136]
	293	−0,167 (ж.)	[40]
	80	−0,118 (тв.)	[137]
Hg (монокристалл) $\chi_{\parallel}$	80	−0,112	[137]
Hg (монокристалл) $\chi_{\perp}$	80	−0,121	[137]
Hg_2Br_2	293	0,30	[7]
$Hg(CH_3)_2$	293	−0,100	[37]
$Hg(C_2H_5)_2$	293	−0,158	[37]
$Hg(C_3H_7)_2$	293	−0,116	[37]
$Hg(C_6H_{11})_2$	293	−0,108	[37]
$Hg(CH_3COO)_2$	301	−0,317	[6]
$Hg_2(CH_3COO)_2$	300	−0,270	[6]
$Hg(CN)_2$	294	−0,268	[6]
HgCl	292	−0,23	[7]
$HgCl_2$	298	−0,298	[6]
Hg_2Cl_2	299	−0,253	[6]
HgI	289	−0,296	[6]
HgI_2	299	−0,245	[6]
$Hg(NO_3)_2$	287	−0,291	[6]
$Hg_2(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$	299	−0,296	[6]
HgO	289	−0,24	[7]
HgS	289	−0,23	[7]
$HgSO_4$	297	−0,218	[6]
Hg_2SO_4	299	−0,247	[6]
Tl (поликристалл)	293	−0,247	[138]
	14,2	−0,206	[94]
	289	−0,215	[94]
Tl (монокристалл)*** $\chi_{\parallel}$	293	−0,412	[139]
	293	−0,420	[139]
	293	−0,150	[90]
Tl (монокристалл) $\chi_{\perp}$	293	−0,166	[138]
	293	−0,164	[139]
	293	−0,244	[139]
Pb (поликристалл)	14,2	−0,132	[94]
	289	−0,111	[94]
	289	0,107	[138]
	291—603	−0,12	[14]
	600—873	−0,08 (ж.)	[14]

* См. рис. 27.31; при понижении (1336 °K) χ изменяется от −0,16·10⁻⁶ до −0,21·10⁻⁶ см³/г [16].
** См. рис. 27.32.
*** См. рис. 27.4.

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} см³/г	Литература
Pb (монокристалл)*** $\chi_{\parallel}$	293	−0,114	[104]
$PbBr_2$	293	−0,28	[7]
$PbCl_2$	266	−0,264	[6]
	298	−0,32	[7]
PbF_2	289	−0,24	[7]
PbI_2	292	−0,33	[7]
$Pb(NO_3)_2$	293	−0,248	[43]
PbO	293	0,19	[140]
	291	−0,13	[7]
PbO_2	293	−0,09	[140]
Pb_3O_4	291	−0,24	[7]
PbSe**	290	−0,447	[115]
PbTe	293	−0,446	[110]
	293	−0,150 (тв.)	[141]
	293	−0,061 (ж.)	[141]
Bi (поликристалл)***	14	−1,55	[87]
	264	−1,31	[149]
	300	−1,30	[87]
Bi (монокристалл)*** $\chi_{\parallel}$	14	−1,20	[87]
	85	−1,295	[143]
	290	−1,06	[143]
	294	−1,05	[142]
Bi (монокристалл) $\chi_{\perp}$	14	−1,77	[87]
	85	−2,04	[143]
	290	−1,49	[143]
	294	−1,48	[142]
$BiBr_3$	293	−0,328	[144]
$BiCl_3$	293	−0,352	[144]
BiI_3	293	−0,49	[7]
$HBiO_3$	296	−0,22	[7]
$Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$	293	−0,365	[144]
Bi_2O_3	293	−1,170	[22]
Bi_2S_3	293	−0,385	[144]
	293	−0,342	[144]
Bi_2Se_3	130—600**	−0,410	[115]
Bi_2Te_3	130—600**	−0,402	[115]
BiTe	293	−0,293	[100]
Th	90	0,66	[13]
	293	1,92	[145]
	130—300	0,410	[146, 147]
$Th(CO_3)_2$	293	$\chi < 0$	[152]
$Th(NH_4)(CO_3)_2 \cdot 4NH_3$***	293	$\chi < 0$	[152]
ThO_2***	83—298	−0,056	[148]
ThS	293	$\chi < 0$	[149]
Th_2S_3	293	$\chi < 0$	[149]
Th_7S_{12}	293	$\chi < 0$	[149]
ThS_2	293	$\chi < 0$	[149]
$ThSe_2$**	293	$\chi > 0$	[150]
Th_2Se_3	293	$\chi < 0$	[151]

* См. рис. 27.31; экстраполяция χ в нулевое поле (600 см³/г) [104].
** Полупроводник 92,5% γ.
*** См. рис. 27.33.
**** В точке плавления (540 °K) $\chi_{\parallel} = -0,98 \cdot 10^{-6}$ см³/г, $\chi_{\perp} = -0,05 \cdot 10^{-6}$ см³/г.
***** n-Проводимость.
****** p-Проводимость.
******* Не следует путать со диамагнетизмом.
******** Приведено значение χ, средние для интервала температур 83—298 °K.
********* χ не зависит от T [150].

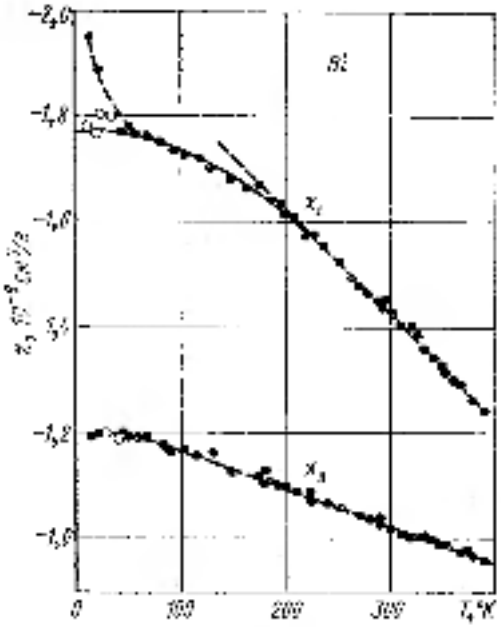


Рис.27.33. Зависимость $\chi_\perp$ и $\chi_\parallel$ для Bi от температуры [103]:
● — $H = 0,5$ кэ; ○ — $H = 4,85$ кэ.

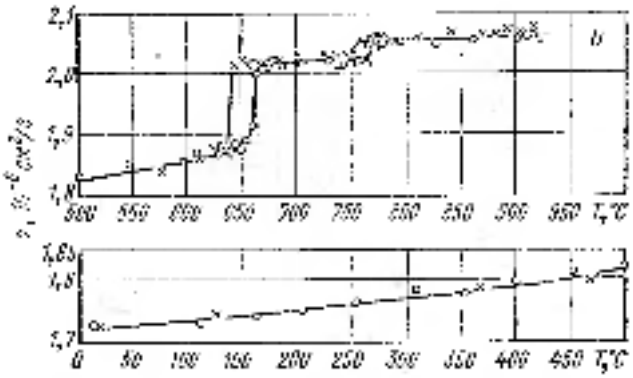


Рис. 27.34. Зависимость удельной магнитной восприимчивости U от температуры [103, 154].

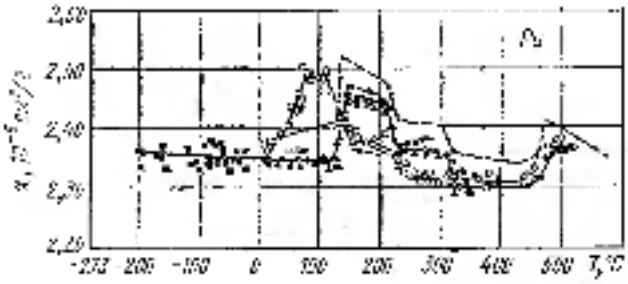


Рис. 27.35. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Pu от температуры [103, 104].
▲,● — измерения при нагреве; △,○ — при охлаждении.

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} см³/г	Литература
α-U*	80	1,65	[154]
	293	1,72	[154]
β-U**	286—1196	2,42	[154]
γ-U***	286—1193	2,36	[154]
$UO_2(C_2H_3O_2)\cdot H_2O$	298	$\chi < 0$	[155]
UF_3****	90	0,01	[39]
	293	0,12	[39]
$U(C_2O_4)_2$	293	6,066	[153]
UOS	290,5	10,527	[159]
UO_2Se	291	7,607	[156]
US	290	15,481	[149]
	293	17,031	[156]
U_2S_3	296	7,307	[149]
	293	4,545	[157]
U_3S_5	293	4,179	[157]
US_2	293	6,093	[162]
α-US_2	290,5	10,387	[115]
β-US_2	290,5	11,490	[159]
γ-US_2	293	12,317	[160]
USe_2	293	6,554	[161]
U_2Se_3	293	3,367	[158]
α-Pu[5,6]*	78—293	2,36	[164]
β-Pu[5,7]**	78—293	2,44	[164]
γ-Pu[5,8]***	78—293	2,36	[164]
δ-Pu[5,9]****	78—293	2,31	[164]
ε-Pu[5]	78—293	2,30	[164]

* См. рис. 27.34.
** α-U переходит в β-U при T=938°K; значение χ для β-U — приближенно для приблизительного температурного интервала.
*** β-U переходит в γ-U при T=1049°K; значение χ для γ-U — среднее для приблизительного температурного интервала.
**** χ не зависит от T.
* См. рис. 27.35; α-Pu переходит в β-Pu при T=452°K.
** Приведено среднее значение χ для интервала температур 78—293°K [164].
*** β-Pu переходит в γ-Pu при T=488°K.
**** γ-Pu переходит в δ-Pu при T=591°K.
* δ-Pu переходит в ε-Pu при T=749°K.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Havens G. "Phys. Rev.", 1933, v. 43 (2), p. 992.
2. Cabrera B., Fahlenbrach H. "Ann. Soc. espan. fis. quim.", 1934, v. 32, p. 525.
3. Ishiwara T. "Sci. Repts Tôhoku Univ., Ser. I", 1914, v. 3, p. 127, 303; 1918; v. 5, p. 53; 1920, v. 9, p. 233.
4. Auer H. "Ann. Phys.", 1933, Bd. 18, S. 598.
5. Cabrera B., Fahlenbrach H. "Naturiersch.", 1934, Bd. 22, S. 417.
6. Kido K. "Sci. Repts Tôhoku Univ.", 1932, v. 21, p. 149, 396, 665.
7. Meyer St. "Phys. Z.", 1925, Bd. 26, S. 61.
8. Collings E. W. "J. Phys. Chem. Solids", 1965, v. 26, p. 940.

9. **Starr C., Kaufmann A. R.** "Phys. Rev.", 1941, v. 59, p. 476.
10. **Берман Е. Н., Дмитренко Н. М., Сысоарен Н. В.** «Укр. физ. журнал», т. 7, № 3, с. 370.
11. **Owen M.** "Ann. Phys.", 1912, Bd 37, S. 657.
12. **Pascal P.** "Compt. rend.", 1921, v. 173, p. 144, 712; 1922, v. 174, p. 487, 1606; 1923, v. 175, p. 1062.
13. **Klemm L.** "Z. Elektrochem.", 1939, Bd 46, S. 364.
14. **Honda K.** "Ann. phys.", 1910, v. 32, p. 1027.
15. **Meslin J.** "Ann. de chim. et de phys.", 1906, v. 7, p. 165.
16. **De Haas W., van Alphen P. M.** "Proc. Koninkl. nederl. Acad. wet. Amst.", 1933, v. 36, p. 265.
17. **Krishnan K. S.** "Phys. Rev.", 1934, v. 45, p. 115.
18. **Sone I.** "Sci. Repts Tôhoku Univ., Ser. I", 1919, v. 8, p. 116; 1922, v. 11, p. 139.
19. **Pascal P.** "Compt. rend.", 1908, v. 147, p. 56, 249, 742; 1909, v. 148, p. 413; 1910, v. 150, p. 1167. "Ann. de chimie et de phys.", 1910, v. 19, p. 5.
20. **Bitter F.** "Phys. Rev.", 1930, v. 35, p. 1572.
21. **Wiersma E. C., de Haas W., Capel W. H.** "Proc. Koninkl. nederl. Akad. wet. Amst.", 1930, v. 33, p. 1119.
22. **Endo H.** "Sci. Repts Tôhoku Univ. Ser. I", 1925, v. 14, p. 479.
23. **Elliot N.** "J. Chem. Phys.", 1934, v. 2, p. 298.
24. **Ouvrard H., Parrier A.** "Proc. Roy. Acad. Sci. Amst.", 1910, v. 12, p. 709; 1911, v. 14, p. 115; 1912, v. 14, p. 674; 1914, v. 16, p. 894, 901.
25. **Bauer E., Weiss P., Piccard A.** "Compt. rend.", 1913, v. 157, p. 484.
26. **Laire P.** "Compt. rend.", 1933, v. 196, p. 910.
27. **Hector L. G.** "Phys. Rev.", 1924, v. 24, p. 418.
28. **Venkateswarlu K., Sriramam S.** "Z. Naturforsch.", 1958, Bd 13a, S. 445, 451.
29. **Ishiwara T.** "Sci. Repts Tôhoku Univ. Ser. I", 1914, v. 3, p. 302; 1916, v. 5, p. 63; 1920, v. 9, p. 233.
30. **Берман Е. Н., Сысоарен Н. В.** «Укр. физ. журнал», 1962, т. 7, № 3, с. 322.
31. **Thomas J. G., Mendoza E.** "Philos. Mag.", 1951, v. 42, p. 900.
32. **Studley J.** "Phys. Rev.", 1907, v. 24, p. 22.
33. **Lingelbach R., Vogt E.** "Acta Metall.", 1960, v. 7, p. 441.
34. **Wilson J.** "Proc. Roy. Soc.", 1921, v. A 98, p. 274; 1923, v. 103, p. 186.
35. **Busch G., Kern R.** "Helv. phys. acta", 1959, v. 32, p. 24.
36. **Geist D.** "Z. Physik", 1960, Bd 157, v. 453.
37. **Pascal P.** "Compt. rend.", 1913, v. 156, p. 323; 1914, v. 158, p. 57.
38. **Bhatnagar S. S., Mathur R. M.** "Philos. Mag.", 1929, v. 7 (9), p. 1041.
39. **Henkel P., Klemm W.** "Z. anorganische und allgemeine Chemie", 1935, Bd 222, S. 70.
40. **Klemm W., Hanschulz B.** "Z. Elektrochem.", 1939, Bd 45, S. 346.
41. **Pascal P.** "Compt. rend.", 1923, v. 176, p. 1897; 1923, v. 177, p. 765; 1925, v. 180, p. 1509.
42. **Lark C. T.** "Phys. Rev.", 1934, v. 45 (2), p. 69.
43. **Voigt N., Kinoshita S.** "Ann. Physik", 1907, Bd 24, S. 492.
44. **Klemm W., Jacobi H., Tilk W.** "Z. anorg. Chem.", 1931, Bd 202, S. 209.
45. **Nyholm R. S., Sharpe A. G.** "J. Chem. Soc.", 1952, p. 3579.
46. **Bommer H.** "Z. Elektrochem.", 1939, Bd 45, S. 337.
47. **Wedekind E.** "Z. anorg. Chem.", 1926, Bd 27, S. 87.
48. **Kojima H., Tebble R. S., Williams D. E. G.** "Proc. Roy. Soc., Ser. A", 1961, v. 260, p. 237.
49. **Rédé J., Yao Y. L.** "Proc. Phys. Soc. (London)", 1956, v. B 69, p. 467.
50. **Klemm W., Schüth W.** "Z. anorg. Chem.", 1931, Bd 201, S. 24.
51. **Ehrlich P., Pietzka G.** "Z. anorg. Chem.", 1964, Bd 275, S. 121.
52. **Vaidyanathan V. L.** "Nature", 1931, v. 128, p. 189.
53. **Münster A., Segel K.** "Z. Physik", 1956, Bd 144, S. 139.
54. **Wedekind E., Horst C.** "Ber. Dtsch. chem. Ges.", 1912, Bd 45, S. 262; 1915, Bd 48, S. 105.
55. **Suzuki H., Miyahara S.** "J. Phys. Soc. Japan", 1965, v. 20, p. 2102.
56. **Kriessman C. J.** "Rev. Modern. Phys.", 1953, v. 25, p. 122; "Phys. Rev.", 1954, v. 14, p. 887.
57. **Whitaker A. G., Yost Don. M.** "J. Amer. Chem. Soc.", 1949, v. 71, p. 3185.
58. **Henry W. G., Rogers J. L.** "Philos. Mag.", 1958, v. 1, p. 225.
59. **Garber M., Henry W. G., Hoare H. G.** "Canad. J. Phys.", 1960, v. 38, p. 1595.
60. **Khanna M. L.** "J. Scient. and Industr. Res. (India)", 1947, v. 6B, p. 4.
61. **Klemm W., Schüth W.** "Z. anorg. Chem.", 1931, Bd 203, S. 104.
62. **Marcus J. A.** "Phys. Rev.", 1940, v. 70, p. 418, 621.
63. **Hüttig G., Tolscher K.** "Z. anorganische und allgem. Chem.", 1932, Bd 207, S. 273.
64. **Hüttig G. F., Tolscher K.** "Z. anorg. Chem.", 1932, Bd 207, S. 273.
65. **Marchand A.** "Compt. rend.", 1955, v. 241, p. 469.
66. **Pochey T.** "J. Appl. Phys.", 1960, v. 31, p. 1802.
67. **Klemm W., Tilk W.** "Z. anorg. Chem.", 1932, Bd 207, S. 175.
68. **Stevens D. K. e. a.** "Phys. Rev.", 1955, v. 100, p. p. 1084.
69. **Van Uitert A., Dunhnlean W.** "Physica", 1956, v. 22, p. 640; 1957, v. 23, p. 169.
70. **Holstead T. T.** "J. Electronics", 1957, v. 2, p. 513.
71. **Bowers R.** "Phys. Rev.", 1957, v. 106, p. 663.
72. **Geist D.** "Z. Physik", 1960 Bd 157, S. 430.
73. **Stähr H.** "Z. anorganische und allgem. Chem.", 1938, Bd 242, S. 138.
74. **Bennett S. L., Heyding R. D.** "J. Phys. Chem. Solids", 1966, v. 27, p. 471.
75. **Prasad M., Dharmatti S. S.** "Indian J. Phys.", 1937, v. 11, p. 2.
76. **Busch G., Vogt O.** "Helv. phys. acta", 1957, v. 30, p. 224.
77. **Busch G., Risi M., Yuan S.** "Helv. phys. acta", 1960, v. 33, p. 1002.
78. **Curie P.** "Ann. chim. et phys.", 1895 (7), v. 5, p. 325.
79. **Honda K., Ishiwara T.** "Sci. Repts Tôhoku Univ.", 1915, v. 4, p. 215.
80. **Abrahams I.** "Compt. rend.", 1939, v. 208, p. 609.
81. **Venkateswarly K., Sriraman S.** "J. Scient. and Industr. Res. (India)", 1955, v. 14, p. 611.
82. **Rao S. R., Sastiri K.** "Proc. Indian Acad. Sci.", 1961, v. 44A, p. 364.
83. **Hermeyer K.** "Ann. Phys.", 1999, v. 1, p. 109.
84. **Trzebiatowski W., Stalinski B.** "Bull. Acad. polon. sci., C.", 1953, v. 111, p. 317.
85. **Tjabbes B. Ph.** "Proc. Koninkl. nederl. acad. wet. Amst.", 1932, v. 35, p. 693.
86. **Dentins H.** Dissert., Hannover, 1931.
87. **Shoenberg D., Uddin M. Z.** "Proc. Roy. Soc.", 1936, v. A 156, p. 687.
88. **Klemm W., Jacobi H., Tilk W.** "Z. anorg. Chem.", 1931, Bd 201, S. 1.
89. **Nelson C. M., Boyd E. E., Smith Wm. T.** "J. Amer. Chem. Soc.", 1954, v. 76, p. 348.

90. **Goudrie A. N., Bourland L. T.** "Phys. Rev.", 1931, v. 37, p. 303.
91. **Moore F. E., Mathews J. C.** "Proc. Roy. Soc.", 1952, v. A 212, p. 137.
92. **Scott A. B., Cromwell T. M.** "J. Amer. Chem. Soc.", 1948, v. 70, p. 3981.
93. **Vogel E., Friedewald H.** "Ann. Phys.", 1950, Bd 17, S. 291.
94. **De Haas W. J., van Alphen P. M.** "Acad. Sci. (Amsterdam)", 1933, v. 36, p. 168.
95. **Shinkai Y.** "Sci. Repts Tôhoku Univ.", 1932, v. 21, p. 826; 1936, v. 25, p. 921.
96. **Rao S. R., Sriraman S.** "Proc. Indian. Acad. Sci.", 1937, v. 5 A, p. 343.
97. **Marcus J. A.** "Phys. Rev.", 1949, v. 76, p. 413, 621.
98. **Prasad M.** e. a. "Proc. Indian. Acad. Sci.", 1950, v. 31 A, p. 269.
99. **De Haas W., Gorter C. J.** "Proc. Koninkl nederl. acad. wet. Amst.", 1931, v. 34, p. 317.
100. **Endô H.** "Sci. Repts Tôhoku Univ.", 1927, v. 16, p. 201.
101. **Pilat J. M.** "Физика металлов и металловедение", 1957, т. 4, с. 232.
102. **Verhaegue H., Vandermeersche G., le Compte C.** "Phys. Rev.", 1959, v. 80, p. 758.
103. **Landolt-Börnstein.** Zahlenwerte und Funktionen. II Bd, 9 teil, 1962.
104. **Александров Б. Н., Верхин Б. И., Сосинарев Н. В.** Электр. сопротив. и теор. физ., 1966, т. 39, с. 37.
105. **Stevens D. K., Crawford J. H.** "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 487.
106. **Yuza R., Hahn H.** "Z. anorgan. und allgem. Chem.", 1940, Bd 244, S. 111, 113.
107. **Busch G., Moser E.** "Z. phys. Chem.", 1951, Bd 198, S. 23.
108. **Busch G., Kern R.** "Helv. phys. acta", 1959, v. 32, p. 24.
109. **Hoge J. H.** "Phys. Rev.", 1935, v. 48, p. 615.
110. **Pascal P.** "Compt. rend.", 1911, v. 152, p. 862, 1010.
111. **Pascal P.** "Bull. Soc. chim. France", 1910, v. 9, p. 6, 79, 134, 177, 336; 1911, v. 10, p. 849, 868; 1912, v. 11, p. 159, 201, 636.
112. **Pascal P.** "Ann. de chim. et de phys.", 1912, v. 26, p. 289.
113. **Brewer S. H., Lane C. T.** "Phys. Rev.", 1941, v. 60, p. 896, 899.
114. **Boulewski W., Franczak S., Witkowski R.** "Arr. Phys.", 1938, v. 10, p. 5.
115. **Malyás M.** "Cseh. J. Phys.", 1958, v. 8, p. 301.
116. **Endô H.** "Sci. Repts Tôhoku Univ.", 1927, v. 16, p. 201.
116a. **Rao S. R., Govindarajan S. R.** "Proc. Indian. Acad. Sci.", 1960/46, v. A 10, p. 285, 290.
117. **Mann K. E.** "Z. Physik", 1936, Bd 98, S. 546.
118. **Akomenc L.** "Compt. rend.", 1939, v. 208, p. 986.
119. **Lane C. T.** "Philos. Mag.", 1929, v. 8, p. 354.
120. **Elliot N.** "J. Chem. Phys.", 1934, v. 2, p. 419.
121. **Lane C. T.** "Phys. Rev.", 1933, v. 44, p. 46.
122. **König H.** "Ann. Phys.", 1897, Bd 31, S. 273.
123. **Lack J. M.** "Proc. Phys. Soc. (London)", 1957, v. B 70, p. 476, 566.
124. **Klemm W., Meisel R., Uy. Vogel H.** "Z. anorg. Chem.", 1930, Bd 190, S. 143.
125. **Kreissman C. Y., McGuire T. R.** "Phys. Rev.", 1955, v. 98, p. 636.
126. **Волкенштейн Н. В., Гапонцева З. В.** Физика металлов и металловедение, 1964, т. 18, с. 784.
127. **Asmussen R. W., Soling H.** "Acta chem. scand.", 1964, v. 8, p. 583.
128. **Asmussen R. W., Potts-Jensen J.** "Acta chem. scand.", 1957, v. 11, p. 1271.
129. **Tendins H.** Dissert., Hannover, 1931.
130. **Perakis N., Capolas L.** "Compt. rend.", 1934, v. 198, p. 1905; 1933, v. 196, p. 611.
131. **Biltz W.** "Z. anorg. Chem.", 1930, Bd 214, S. 227.
132. **Guthrie A. N., Bourland L. T.** "Phys. Rev.", 1931, v. 37, p. 303.
133. **Goudrie A. N., Bourland L. T.** "Phys. Rev.", 1931, v. 37, p. 303.
134. **Feytis.** "Compt. rend.", 1911, v. 152, p. 708; 1912, v. 153, p. 668; 1913, v. 156, p. 886.
135. **Klemm W., Tilk U. W.** "Z. anorg. Chem.", 1932, Bd 207, S. 175.
136. **Bates L. F., Baker C. I. W.** "Proc. Phys. Soc. (London)", 1936, v. 50, p. 409.
137. **Vogt E.** "Ann. Phys.", (5), 1962, Bd 14, S. 1.
138. **Rao S. R., Subramanian K. C.** "Philos. Mag.", 1936, v. 21, p. 690.
139. **Rao S. R., Narayanaswamy A. S.** "Philos. Mag.", 1938, v. 26, p. 1018.
140. **Pascal P., Mirc P.** "Compt. rend.", 1931, v. 193, p. 1303.
141. **Endô H.** "Sci. Repts Tôhoku Univ.", 1927, v. 16, p. 201.
142. **Goetz A., Focke A. B.** "Phys. Rev.", 1934, v. 45, p. 170.
143. **Kapitza P.** "Proc. Roy. Soc.", 1931, v. A 131, p. 243.
144. **Cursotto, Binghinolin.** "Atti. Ist. veneto sci. Torino", 1910, v. 69, p. 1343; 1916, v. 72, p. 1515; 1914, v. 74, p. 95; 1915, v. 75, p. 353.
145. **McKay H. A. C., Nalin J. S., Waldron M. B.** Proc. of the Second United Nations Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy. V. 28. 1958, p. 209.
146. **Smith J. F., Gelner J. D.** "Phys. Rev.", 1959, v. 115, p. 884.
147. **Watt G. W., Sowards D. M., Malhotra S. C.** "J. Amer. Chem. Soc.", 1958, v. 79, p. 4908.
148. **Trzebiatowski W., Selwood P. W.** "J. Amer. Chem. Soc.", 1950, v. 72, p. 4505.
149. **Eastman E. D.** e. a. "J. Amer. Chem. Soc.", 1950, v. 72, p. 4019.
150. **Dawson J. K.** "J. Chem. Soc.", 1951, v. 28, p. 80.
151. **Dawson J. K.** "Nucleonics", 1959, v. 10, N 9, p. 39.
152. **Watt G. W., Sowards D. M., Malhotra S. C.** "J. Amer. Chem. Soc.", 1958, v. 79, p. 4906.
153. **Bose D. M., Bhar H. G.** "Z. Physik", 1928, Bd 48, S. 718.
154. **Bates L. F., Hughes D.** "Proc. Phys. Soc. (London)", 1934, v. B 67, p. 29.
155. **Conyers A. E., Gatehouse B. M., Wait E.** "J. Chem. Soc.", 1958, v. 40, p. 55.
156. **Picon M., Flahaut J.** "Compt. rend.", 1966, v. 241, p. 655.
157. **Picon M., Flahaut J.** "Compt. rend.", 1966, v. 240, p. 784.
158. **Khodadad P.** "Compt. rend.", 1958, v. 247, p. 1206.
159. **Picon M., Flahaut J.** "Compt. rend.", 1953, v. 237, p. 1160.
160. **Picon M., Flahaut J.** "Bull. Soc. chim. France", 1956, v. 772.
161. **Khodadad P., Flahaut J.** "Compt. rend.", 1957, v. 244, p. 492.
162. **Picon M., Flahaut J.** "Compt. rend.", 1957, v. 244, p. 1777.
163. **Khodadad P.** "Compt. rend.", 1957, v. 245, p. 2286.
164. **Seguin M.** e. a. "Compt. rend.", 1958, v. 246, p. 3943.
165. **Biltz B., Klemm W.** "Z. anorgan. und allgem. Chem.", 1939, Bd 243, S. 69.
166. **Волкенштейн Н. В., Гапонцева З. В., Шепелевич В. Г.** Физика металлов и металловедение, 1968, т. 25, с. 180.

ГЛАВА 28

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

28.1. ВВЕДЕНИЕ

Ферромагнетиками называют вещества, магнитная проницаемость μ которых зависит от напряженности магнитного поля [1]. *Намагничивание индукции* $B(H)$ ферромагнетиков при первом намагничивании изменяется по так называемой *первой кривой* или *кривой намагничивания* (кривая OA рис. 28.1); при циклическом изменении поля процесс протекает по одному из двух S-образных отрезков, которые ограничивают некоторую площадь и образуют *петлю гистерезиса* (см. рис. 28.1).

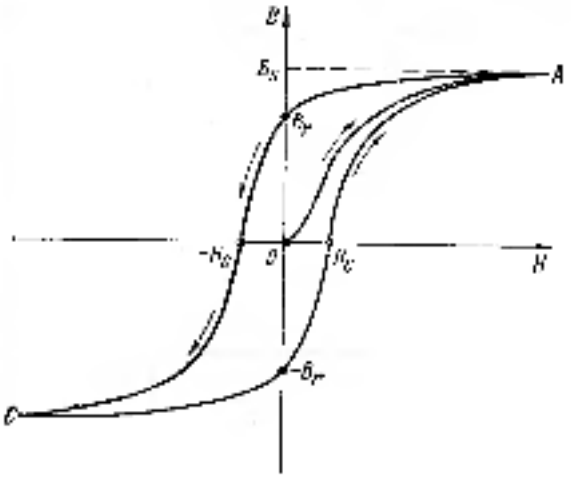


Рис. 28.1. Схематическое изображение петли гистерезиса.

Намагниченность насыщения $J_s = (B - \mu_0 H)_s/4\pi$ — предельное значение *намагниченности* J при возрастании H. (Здесь μ_0 — *абсолютная магнитная проницаемость* вакуума, или индукционная постоянная.)

Остаточная индукция B_r (точка пересечения петли гистерезиса с ординатой) есть *индукция* на 4π остаточная намагниченность при $H = 0$.

Коэрцитивная сила H_c (точка пересечения петли гистерезиса с абсциссой) есть напряженность магнитного поля, необходимая для устранения остаточной индукции. Вместо индукции и намагниченности в технике легко намагничиваемые (магнитомягкие) материалы характеризуются магнитной проницаемостью μ.

Вводятся следующие величины, характеризующие магнитную проницаемость: *дифференциальная* $\mu_d = \frac{1}{\mu_0} \times \frac{dB}{dH}$, *начальная* $\mu_н = \mu_d(H = 0)$; *максимальная* $\mu_{макс} = \max \mu_d$; *эффективная* $\mu_э$ — средняя наклон петли гистерезиса, измеренной при постоянном намагничивании, в случае переменных токов; *обратимая* μ_r — предельное значение μ_d для малых напряженностей поля; *полная* μ_c — отношение значения индукции B к соответствующему значению напряженности магнитного поля H в данной точке кривой намагничивания:

$$\mu_c = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{H}.$$

Намагниченность насыщения, как и остаточная индукция и коэрцитивная сила, уменьшается с повышением температуры и приближается к нулю вблизи *ферромагнитной точки Кюри* Θ_f.

В случае ферромагнетиков эффективное магнитное поле $H_{эф}$, действующее на диполи, состоит из приложенного поля H плюс внутреннее поле, которое пропорционально намагниченности J (молекулярное поле Вейсса):

$$H_{эф} = H + \gamma J.$$

Намагниченность определяется уравнением $J = N\tilde{\mu} L\left[\tilde{\mu}(H + \gamma J)/kT\right]$, где N — число атомов в единице объема; $\tilde{\mu}$ — дипольный момент атома; $L(x) = \operatorname{cth} x - 1/x$ — функция Ланжевена.

Исчезающее решение для J при $H = 0$ существует, когда $T < \Theta_f$, где $\Theta_f = N\tilde{\mu}^2\gamma/3k$ — ферромагнитная точка Кюри.

Для $T > \Theta_f$ восприимчивость определяется законом Кюри—Вейсса:

$$\varkappa = \frac{N\tilde{\mu}^2}{3k(T - \Theta_f)} = \frac{C}{T - \Theta_f}.$$

При $T \gg \Theta_f$ он заменяется в виде

$$\varkappa = C/(T - \Theta_p),$$

где Θ_p, называемая *парамагнитной точкой Кюри*, меньше, чем Θ_f.

Восприимчивость многих твердых тел подчиняется закону Кюри—Вейсса.

28.2. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Намагниченность насыщения и точка Кюри

Намагниченность единицы массы вещества называется *удельной намагниченностью* σ. Удельную намагниченность насыщения σ_s можно экстраполировать к 0° К и по значению σ_s по формуле

$$n_B = \frac{\sigma_s M_0}{5585}\ (\mu_B)$$

(M_0 — молекулярная масса) определять число магнетонов Бора на молекулу n_B.

Таблица 28.1

Намагниченность насыщения и точки Курие (Θ_f) ферромагнитных элементов [2, 4]

z	Элемент	при 0°С			σ_s, $\frac{ac\cdot cm^3}{c}$	σ_0	Θ_f, °С
		σ_s, $\frac{ac\cdot cm^3}{c}$	I_s, ac	$\sigma_s J_s$, ac			
26	Fe	218,0	1714	21580	221,9*	2,219*	770
27	Co	161	1422	17500	162,5	1,715	1131
28	Ni	54,39	484,1	6084	57,5*	0,60*	358
64	Gd	0	0	0	253,5	7,55	20
65	Tb	0	0	0	173,5	5,24	50
						9,10	—30
66	Dy	0	0	0	235	10,20	186
67	Ho	0	0	0	250	10,34	257
68	Er	0	0	0	—	8,0	—253
69	Tm	0	0	0	—	7,0	—235

* Согласно данным работы [3], для Fe $\sigma_s = 221,71 \pm 0,18$ ас·см³/г, $\sigma_0 = 2,219 - 0,1023 \cdot 10^{-3}T$, а для Ni $\sigma_s = 58,57 + 0,30$ ас·см³/г, $\sigma_0 = 0,6155 \pm 0,0008$.

Таблица 28.2

Относительная самопроизвольная удельная намагниченность σ_s/σ_0 Fe, Co, Ni как функция относительной температуры T/Θ_f [2]

T/Θ_f	σ_s/σ_0		T/Θ_f	σ_s/σ_0	
	Fe	Co, Ni		Fe	Co, Ni
0	1	1	0,70	0,85	0,83
0,1	0,996	0,996*	0,80	0,77	0,73
0,2	0,99	0,99	0,85	0,70	0,66
0,3	0,975	0,95	0,90	0,61	0,50
0,4	0,96	0,95	0,95	0,46	0,40
0,50	0,93	0,94	1,0	0	0
0,60	0,90	0,90			

* Только для никеля.

Таблица 28.3

Удельная намагниченность насыщения σ_s и точка Курие бинарных сплавов железа [2]

Добавка	Атомное содержание, %	σ_s, $\frac{ac\cdot cm^3}{(ac\cdot C)}$	σ_0 (на атом)	Θ_f, °С
Al	7,1	207	2,05	778
	16,7	184	1,74	664
	24,9	134	1,29	441
	28,0	140	1,40	494
Au	6,2	174	2,08	767
	10,5	164	2,02	768
Co	20	230	2,42	950
	33	238	2,52	970
	50	233	2,42	980
	75	203	2,14	870
	80	184	1,94	910
Cr	17,7	196	1,70	678
	47,5	90	0,98	453
	67,8	35	0,53	268
Cu	4,0	200	2,25	790
	15,0	120	1,67	—
Ni	10	217	2,26	750
	20	209	2,22	720
	40	152	1,82	330
	60	136	1,45	560
	80	98	1,04	360
Os	8,1	158	1,97	—
	12,5	50	0,69	—
Pd	5,5	203	2,19	754
	40,0	129	1,69	—
	74,8	45	0,97	—260
Pt	8,1	191	2,36	—
	12,4	177	2,43	—
	24,8	104	2,23	104
	50,0	72	0,75	—
Rh	10,0	209	2,32	—
	25,0	192	2,39	724
	40	161	2,20	624
Ru	7,0	200	2,18	668
	12,6	105	1,17	—
Sn	2,0	208	2,18	766
	6,0	197	2,16	768
Si	8,5	204	2,00	720
	16,9	174	1,67	653
	23,5	141	1,32	587
V	0,5	204	2,09	815
	10,6	181	1,91	846
	18,6	149	1,56	785

Таблица 28.4

Удельная намагниченность насыщения и точка Кюри бинарных сплавов кобальта [2]

Добавка	Атомное содержание, %	σ_s, $\frac{гс \cdot см^3}{г}$ (20°С)	B_s (по этому)	θ_c, °С
Cr	5,6	131	1,42	—
	10,6	100	1,07	—
	16,7	59,5	0,64	—
	22,1	15	0,24	—
Mn	4,2	144	1,53	—
	11,9	109	1,16	—
	17,3	64	0,55	—
	22,5	48	0,57	—
Ni	10	124	1,33	900
	20	90	0,97	680

Таблица 28.5

Удельная намагниченность насыщения и точка Кюри бинарных сплавов никеля [2] (см. также рис. 28.2 и 28.3(б))

Добавка	Атомное содержание, %	σ_s, $\frac{гс \cdot см^3}{г}$ (20°С)	B_s (по этому)	θ_c, °С
Al	3,0	43,1	0,64	293
Au	3,4	46,0	0,58	321
Cr	1,7	49,8 (— 123°С)	0,50	296
	0,7	55,4 (— 193°С)	0,30	72
Cu	1,9	42,2	0,51	200
	4,2	23,1	0,37	120
Mn	25 (условл.)	90	1,02	470
Pd	12,1	-	0,10	350
	40,2	—	0,57	217
	91,3	—		—116
Pt	9,1	37,7	0,55	245
	25,0	16,4	0,44	80
	45,0	—	0,25	— 71
Sb	7,5	12,6	0,24	23
Si	3,7	40,2	0,42	231
	6,5	25,7	0,26	117
	8,6		0,28	19
Sn	2,7	40,1	0,45	234
	9,0	9,5	0,30	225
Ta	3,6	—	0,41	—
	6,3		0,28	
Ti	4,8	34,5	0,43	307
	10,0		0,22	30
W	2,1	39,2	0,49	270
	3,9	19,9	0,34	150
V	5,5	15,3	0,29	67
Zn	4,1	45,0	0,52	300
	10,8	25,4	0,37	157

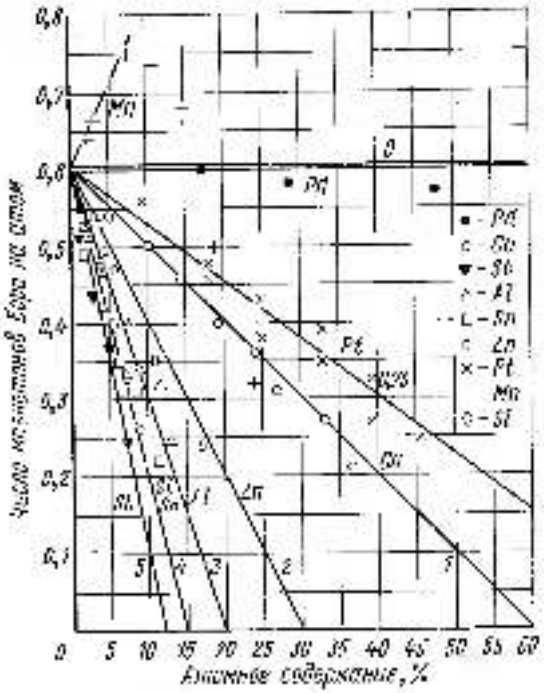


Рис. 28.2. Изменение среднего насыщения Ni с увеличением концентрации переходного компонента при заполнении электронов на внешних оболочках второго элемента (1, 2, 3, 4, 5) [6].

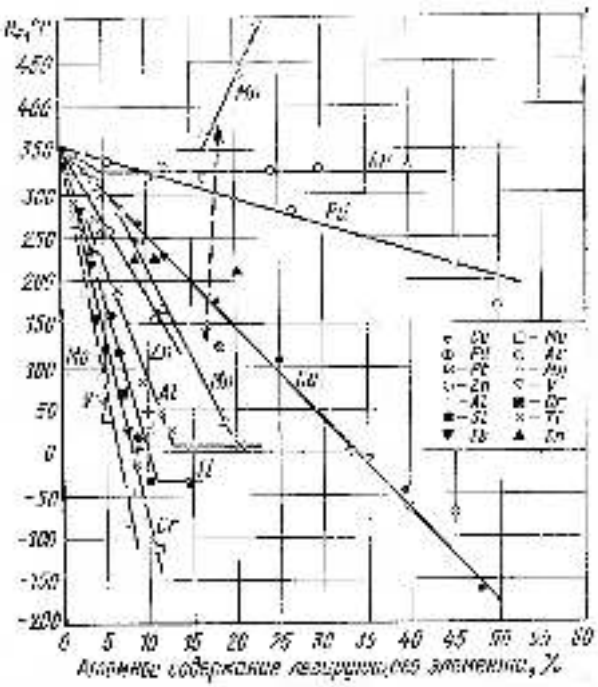


Рис. 28.3. Зависимость точки Кюри от состава никелевых сплавов [3].

Таблица 28.6

Намагниченность насыщения и точка Курие некоторых бинарных соединений

Вещество	$4\pi J_s$, гс (при °С)	μ_B (при нормальных условиях)	θ_p, °С	Литература
Co_2B	—	—	510	[3]
Co_3N	—	10,4	—	[5]
Co_2P	—	—	920	[3]
Co_2P	—	10,4	—	[5]
CrPt	7200—0	—	< 600	[2]
CrS_2	—	0,84	—163	[2]
Cr_2Se	—	6,6	—	[5]
Cr_2Sm	—	7,7	—	[5]
Cr_2Y	—	7,8	—	[5]
CoZn	—	—	105	[2]
Co_2Zn	—	—	490	[2]
CrO_2	—	2,1	—	[2]
CrS	—	—	30	[2]
CrTe	3400	2,4; 2,5	66	[2]
$EuH_{1,8}$	—	6,0	—249	[3]
EuO	—	7	—176	[2]
Fe_3Al	11 000	5,2	500	[2]
Fe_2B	15 100	5,7	739	[2]
$FeBe_2$	—	—	520	[2]
$FeBe_9$	—	—	0	[2]
Fe_3C	12 400	5,3	213	[2]
Fe_2Ce	—	—	110	[2]
FeCo	24 000	4,8	970	[2]
Fe_4N	17 500	8,9	490	[2]
$FeNi_3$	12 200	7,0	600	[2]
Fe_2U	—	—	420	[3]
FeS	—	—	320	[6]
FeS_2	—	—	>0	[6]
Fe_7S_8	780	2,0	300	[2]
Fe_3Si_2	—	—	90	[6]
Fe_3Si	—	4,8	530	[2]
Fe_2U	—	1,02	—101	[7]
$GdCo_2$	6700	6,7	160	[2]
$GdCr_2$	5500	0,85	615	[2]
$GdFe_2$	1600	3,4	530	[2]
$GdFe_3$	5600	4,9	210	[2]
$GdMn_2$	2700	2,8	30	[2]
MnAs	8400	3,4	45	[2]
$MnAu_4$	—	4,16	90	[8]
MnO	1850	—	200	[2]
MnBi	7800	3,3	360	[3]
Mn_3N	2900	0,97	470	[2]
MnP		1,2	25	[5]
$MnPt_3$	5000	—	—	[2]
Mn_2Sb	2600	1,9	277	[2]
MnSb	8000	3,6	314	[2]
Mn_2Sn	1250	—	150	[2]
Mn_3Sn	—	2,7	—10	[2]
Ni_3Mg	—	—	235	[2]
NiMn	9000	4,1	460	[2]

Таблица 28.7

Зависимость намагниченности J железа от температуры T и напряженности магнитного поля H [9, 10]

T, °С	H, э	J, гс
—273	4 350	1730,1
	8 020	1735,2
	11 980	1735,0
	19 900	1735,0
—173	4 350	1726,4
	8 020	1731,5
	11 980	1731,3
	19 900	1732,2
—73	4 350	1714,7
	8 020	1719,8
	11 980	1719,5
	19 900	1714,7
+7	4 350	1700,2
	8 020	1703,5
	11 980	1705,5
	19 900	1705,8
+15	4 350	1688,6
	8 020	1693,7
	11 980	1701,0
	19 900	1704,1
523,5	2880—6500	1390
620,5	3010—7250	1210
663	3470—7710	1100
716	307	833
	2125	871,4
	3310	879
	4300	881,2
	4880	884,8
	5490	886,8
	5885	887,8
	6490	890,0
	7610	892,8
	8570	896
730	702	757,5
	2525	773,8
	3900	783,3
	4750	787,8
	5350	790,0
	5870	792,2
	6260	793,5
	6950	796
	7970	799
	8930	802
734	847	712
	2735	726
	4110	735
	4980	740,4
	5770	743,0
	6080	745,5
	6490	747
	7080	749
734	8200	752,8
	9160	755,5
744,5	1307	611
	3115	632
	4460	642,5
	5340	649
	5920	652,5
	6810	658
	7410	661,5
	8510	667
	9430	672
747	1357	577
	3255	598,5
	4630	612
	5490	619
	6070	623,2
	6570	630
	7570	633,5
	8670	639,5
	9620	644
756	596	350,5
	2087	385,5
	3855	417,0
	5180	438,4
	6020	449
	6350	456
	7450	505,5
	8070	511,8
	9110	521,2
	10 100	529,0
778	470	206
	1459	296,4
	2463	337,7
	4110	354
	5465	412
	6300	425
	6867	433
	7305	438,5
	7755	443,0
	8300	451,5
	9412	463,0
	10 349	471,0
768,5	450	62,8
	860	114,2
	1850	190,3
	2640	243,1
	4440	299,8
	5720	331,0
	6510	348
	7150	360
	8002	375
	8580	382
	9660	399,5
	10 330	410

Намагниченность ферромагнетиков как функция напряженности магнитного поля и температуры (табл. 28.7 и 28.8; рис. 28.4—28.16)

Продолжение табл. 28.7

T, °C	H, э	J, кс	T, °C	H, э	J, кс
773	1140	46,7	791	6 800	76,6
	2280	89,8		8 300	94,8
	3300	125,3		9 700	109,3
	5000	172,2		11 600	129,0
	6250	206,0			
	7100	226			
	7700	237			
	8500	256,7	811	9 000	61,2
	9000	266,5		11 900	71,6
	10 100	282,7			
	11 000	296,2			
			817	9 000	52,8
				12 000	62,7
781	3 570	73,6			
	5 300	100	823,5	10 000	48,1
	6 000	131		12 100	56,3
	7 450	140,5			
	8 000	158,4			
	8 870	174			
	9 400	183	826	20 000	45,4
	10 420	199		19 100	54,3
	11 400	210			

Таблица 28.8

Зависимость удельной намагниченности σ гипсов от напряженности поля и температуры [12]

T, °C	$\sigma_s, \frac{кг \cdot см^3}{г}$			$\sigma_r, \frac{кг \cdot см^3}{г}$
	H = 8 100 э	H = 12 000 э	H = 18 000 э	
−273	—	—		57,53
18,4	—			54,5
20,0	54,55	54,63	54,73	—
55,8	53,48	53,53	54,03	53,4
76,3	52,63	52,68	52,76	52,4
104,0	51,38	51,63	51,06	51,4
137,9	50,44	50,51	50,62	50,2
161,0	49,09	49,17	49,30	49,0
173,3	47,74	47,83	47,97	47,6
184,3	47,02	47,07	47,23	—
195,1	46,13	46,25	46,34	45,9
206,7	45,26	45,38	45,50	—
216,3	44,28	44,40	44,57	44,0
226,7	43,26	43,39	43,60	—
237,1	42,17	42,32	42,53	—
237,3	—			41,9
247,3	41,07	41,19	41,42	—
257,0	39,81	39,96	40,14	39,5
267,6	38,43	38,62	38,90	—
277,5	36,99	37,21	37,61	36,6
281,5	36,48	36,61	36,94	—
285,4	36,74	36,93	36,27	—
286,5	35,06	35,28	35,64	—
289,2	34,37	34,59	34,94	—
297,1	33,61	33,86	34,28	—
301,0	32,89	33,15	33,62	32,3
304,9	32,06	32,36	32,78	—

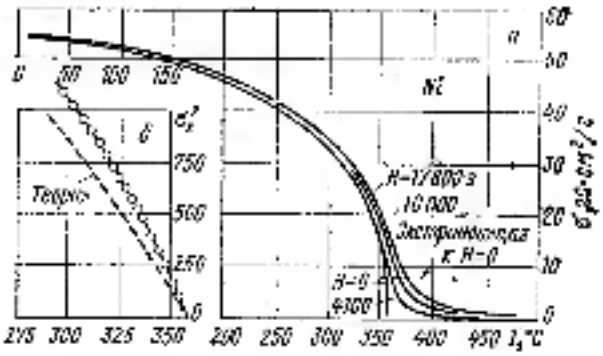


Рис. 28.4. Зависимость удельной намагниченности σ (а) и квадрата самопроизвольной намагниченности насыщения σ_s^2 (б) N от температуры [6].

Продолжение табл. 28.8

T, °C	$\sigma_s, \frac{кг \cdot см^3}{г}$						$\sigma_r, \frac{кг \cdot см^3}{г}$
	H = 1070 э	H = 2300 э	H = 4000 э	H = 8000 э	H = 12 000 э	H = 18 000 э	
308,6	—		30,93	31,21	31,58	32,00	—
312,7	—		29,94	30,37	30,71	31,14	—
316,5	26,30	28,65	29,00	29,43	29,87	30,26	25,7
320,3	—	—	27,85	28,44	28,83	29,33	—
324,2	—		26,85	27,36	28,26	28,35	—
328,0	—	25,31	25,70	26,28	26,74	27,35	—
331,8	—	24,00	24,36	25,04	25,50	26,28	
333,7	—	—	—	—	—	—	23,1
335,6	22,08	22,40	22,91	23,06	24,27	25,04	—
339,4	20,42	20,78	21,36	22,21	22,86	23,75	—
341,2	—	—	—	—		—	19,8
343,1	18,36	18,56	19,55	20,60	21,39	22,36	—
346,9	16,01	16,62	17,53	18,83	19,81	20,97	16,4
350,7	12,83	13,82	15,12	16,75	17,93	19,37	—
352,5	—	—	—	—	—		10,7
354,4	8,36	10,19	12,23	14,46	15,99	17,66	—
356,1	3,68	6,02	8,83	11,95	13,80	15,77	—
361,8	1,78	3,41	5,98	9,41	11,67	13,65	—
365,4	—	2,13	4,13	7,30	9,56	12,06	—
369,1		1,51	2,97	5,39	7,72	10,25	
372,8	—	1,15	2,28	4,43	6,36	8,75	—
376,5	—	0,91	1,82	3,60	5,24	7,38	—
380,1	—	0,71	1,49	2,97	4,36	6,33	—
387,5	—	—	1,11	2,18	3,25	4,80	—
394,8	—	—	—	1,71	2,54	3,79	—
405,7	—	—	0,64	—	1,88	2,83	

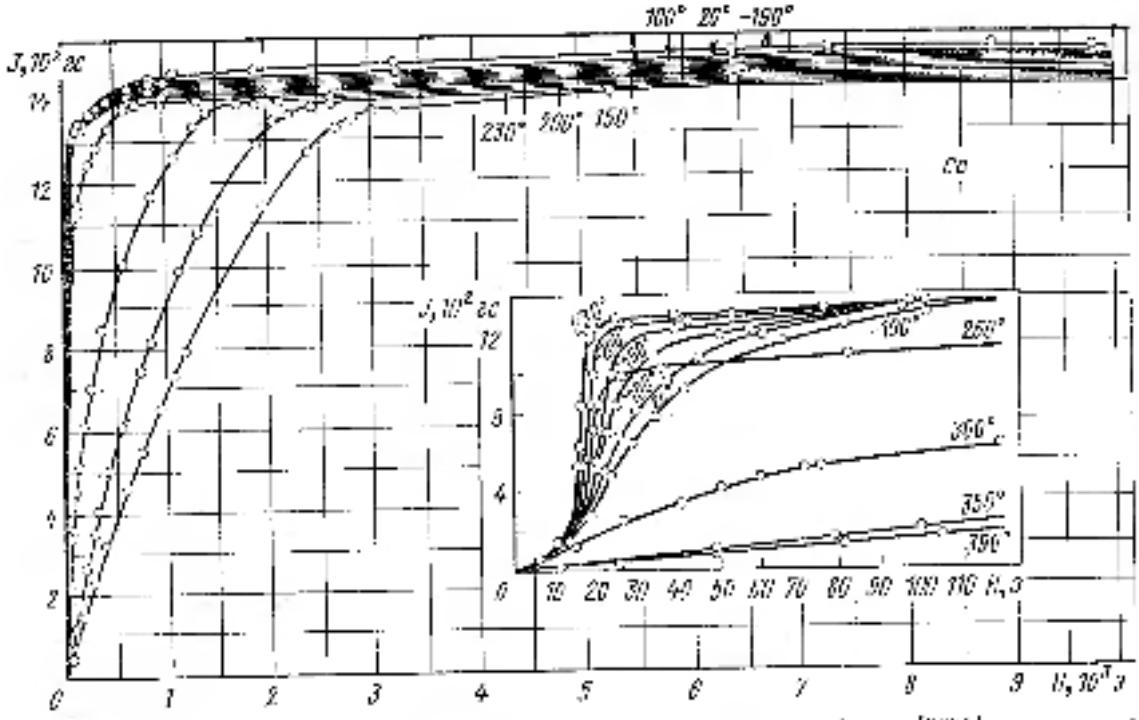


Рис. 28.5. Кривые намагниченности монокристалла Co для гексагональной оси [0001] при различных температурах [1].

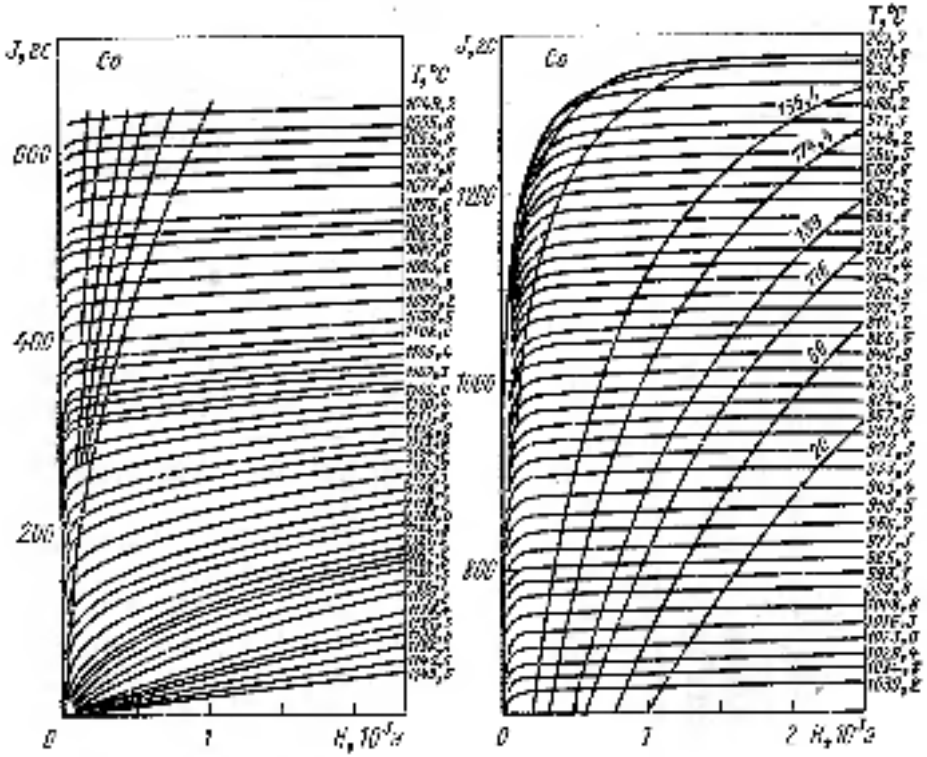


Рис. 28.6. Зависимость намагниченности поликристаллического Co от напряженности поля магнитного поля и температуры [1].

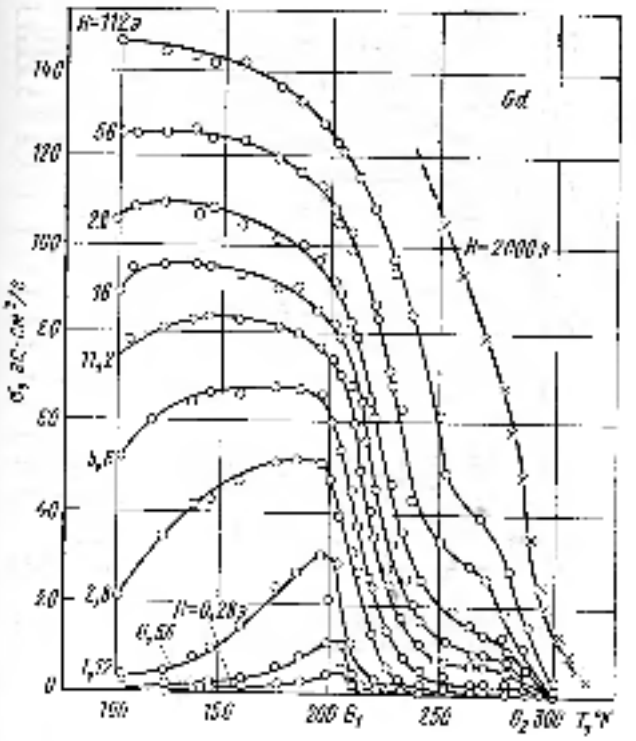


Рис. 28.7. Зависимость удельной намагниченности Gd для различных значений напряженности магнитного поля от температуры [13]. Отмеченные на оси абсцисс точки θ_1 и θ_2 означают соответственно температуры перехода ферромагнетик — антиферромагнетик и антиферромагнетик — парамагнетик [13]

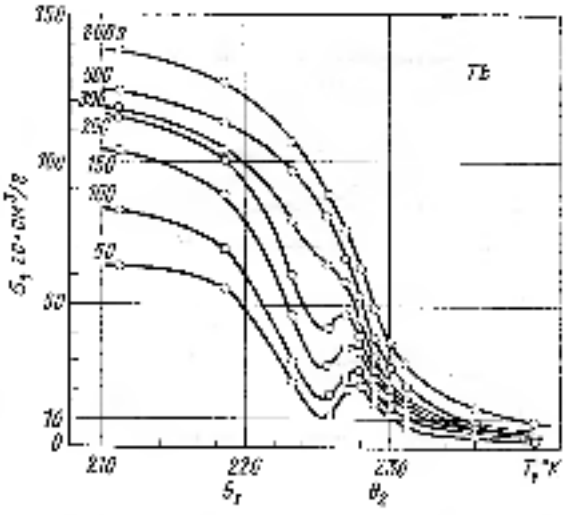


Рис. 28.8. Зависимость удельной намагниченности монокристалла Tb для различных значений напряженности магнитного поля, приложенного в базисной плоскости образца вдоль оси *a*, от температуры [13].

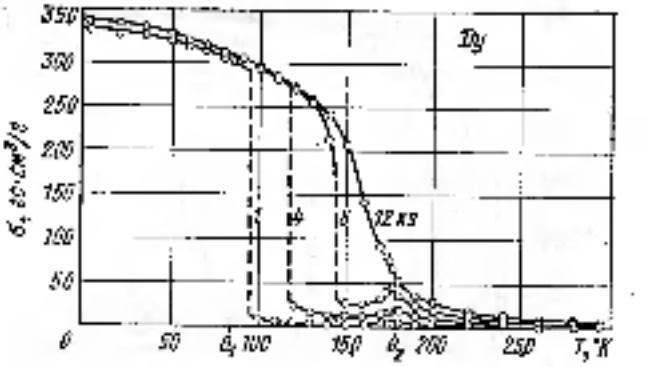


Рис. 28.9. Зависимость удельной намагниченности монокристалла Dy для различных значений напряженности магнитного поля, приложенного вдоль оси *a* в базисной плоскости образца, от температуры [13]

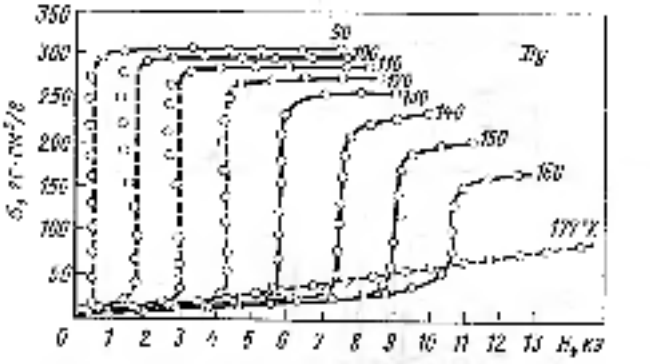


Рис. 28.10. Изотермы удельной намагниченности монокристалла Dy, полученные при направлении магнитного поля вдоль оси *a* в базисной плоскости образца [13]

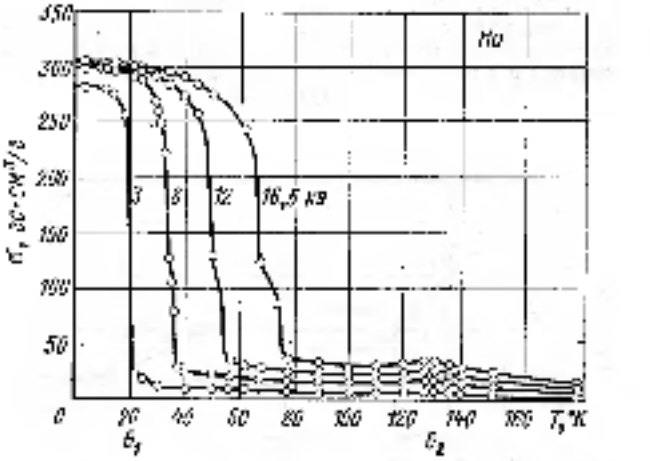


Рис. 28.11. Зависимость удельной намагниченности монокристалла Ho, полученные для различных значений напряженности магнитного поля в базисной плоскости образца вдоль оси *a*, от температуры [13]

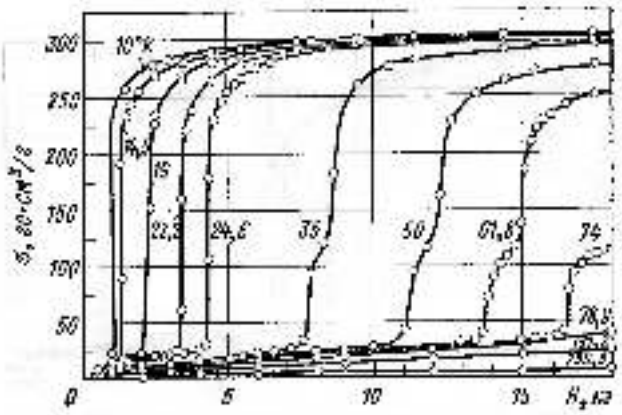


Рис. 28.12. Изотермы удельной намагниченности монокристалла Ho (вектор напряженности магнитного поля направлен вдоль оси c в базисной плоскости образца) [13]

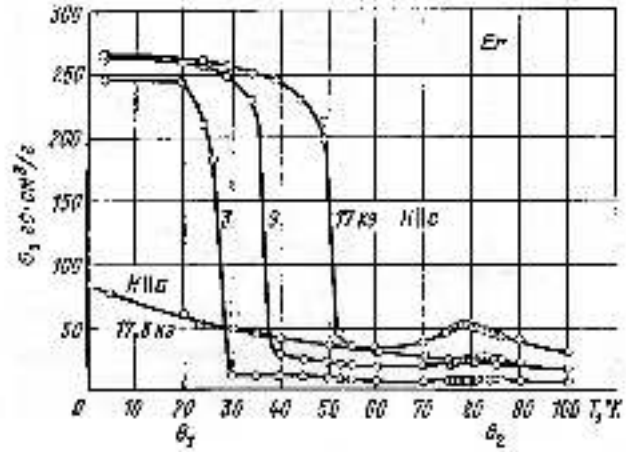


Рис. 28.13. Зависимость удельной намагниченности монокристалла Er для различных значений напряженности магнитного поля, направленного вдоль кристаллографической оси c и в базисной плоскости (вдоль оси a), от температуры [13]

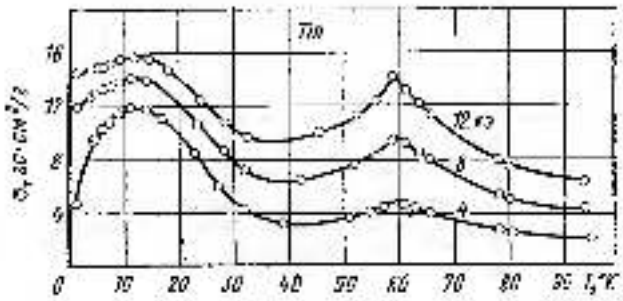


Рис. 28.14. Зависимость удельной намагниченности поликристаллического Tm от температуры при различных значениях напряженности магнитного поля [13]

Зависимости удельной намагниченности для ферромагнитных сплавов (рис. 28.15,28.16)

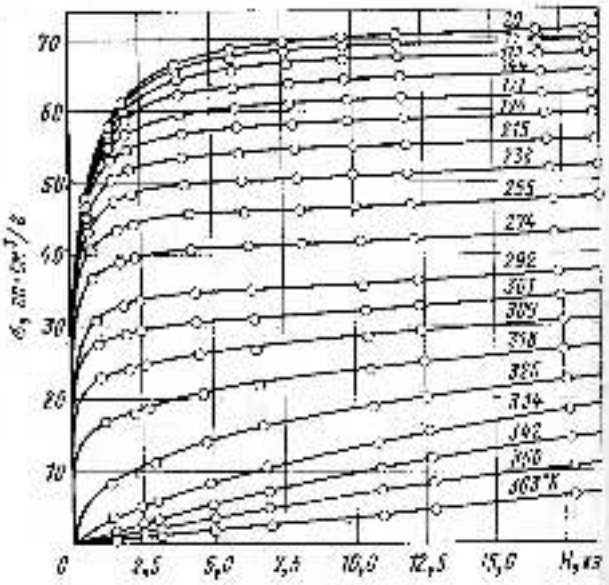


Рис. 28.15. Изотермы удельной намагниченности ферромагнитного сплава Cr — Tc [14]

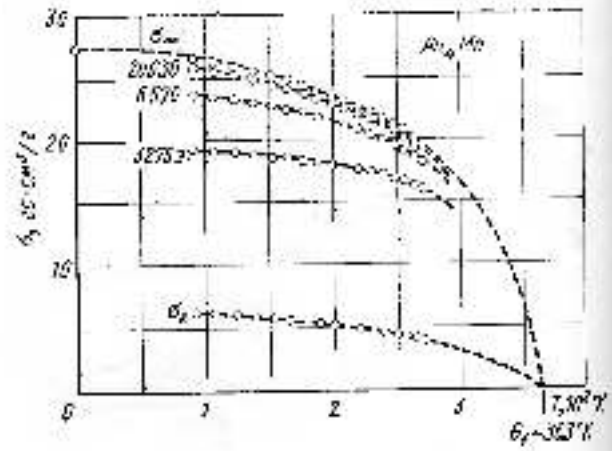


Рис. 28.16. Зависимость удельной намагниченности (при различных значениях напряженности магнитного поля) и остаточной намагниченности ферромагнитного сплава Au₂Mn от температуры [8]

Магнитная анизотропия

На рис. 28.17—28.19 приведены кривые намагниченности $J(H)$ для основных кристаллографических направлений монокристаллов железа, никеля и кобальта.

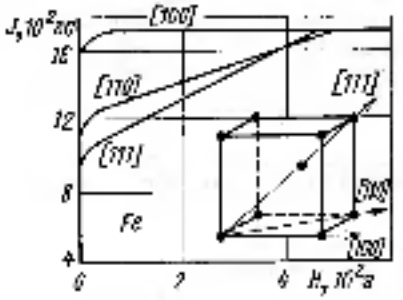


Рис. 28.17. Кривые намагниченности для основных кристаллографических направлений монокристалла Fe [1]

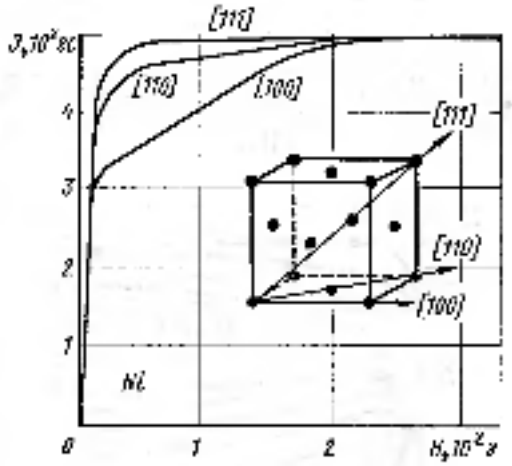


Рис. 28.18. Кривые намагниченности для основных кристаллографических направлений монокристалла Ni [1]

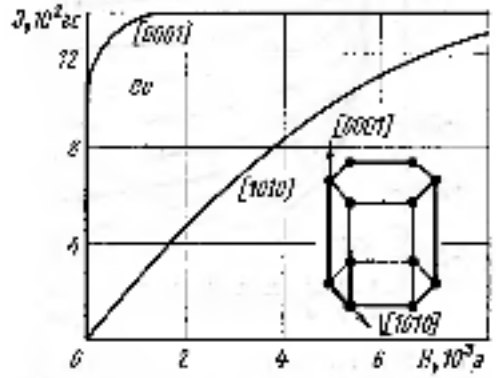


Рис. 28.19. Кривые намагниченности для основных кристаллографических направлений монокристалла Co [1]

Площадь между кривой намагничивания кристалла $J(H)$ и осью J представляет работу, требуемую для намагничивания до насыщения. Направления, в которых эта работа оказывается наименьшей, называют *направлениями легкого намагничивания*. Из рис. 28.17 видно, что в монокристаллах железа направления ребер куба (тетрагональные оси) [100] являются направлениями легкого намагничивания. Направления диагоналей граней [110] (диагональные оси) — *направления промежуточного намагничивания* и направления диагоналей куба [111] (тригональные оси) являются *направлениями трудного намагничивания*.

В случае кристаллов никеля (рис. 28.18) последовательность направлений по трудности намагничивания следующая: легкое направление — ось [111], промежуточное — ось [110] и трудное — ось [100].

В кобальте (рис. 28.19) легким направлением является гексагональная ось [0001], а трудным — любое направление в плоскости базиса.

При количественном рассмотрении магнитной анизотропии кристаллов удобно пользоваться константами магнитной анизотропии K_1, K_2, ... Она определяется с помощью формул, описывающих зависимость свободной энергии магнитной анизотропии E_a от направления вектора намагниченности по отношению к кристаллографическим осям. Общие выражения для E_a в наиболее важных кристаллических системах имеют вид:

1) *для кубических кристаллов* (с точностью до членов, не зависящих от направляющих косинусов α_1, α_2, α_3)

$$E_a = K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2 + K_3(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2)^2 + \ldots;$$

2) *для гексагональных кристаллов*

$$E_a = K_1\sin^2\varphi + K_2\sin^4\varphi + K_3\sin^6\varphi + K_4\sin^6\varphi\cos^6\psi + \ldots,$$

где φ — угол между направлением намагничивания и гексагональной осью [0001]; ψ — угол между направлением намагниченности и осью [100];

3) *для тетрагональных кристаллов*

$$E_a = K_1\sin^2\delta + K_2\sin^4\delta + K_3\cos^2\alpha\cos^2\beta + \ldots,$$

где δ — угол между направлением намагниченности и тетрагональной осью [001]; α и β — углы между направлением намагниченности и осями [100] и [010] соответственно.

Коэффициенты K_i ($i = 1, 2, \ldots$) зависят от температуры и химического состава ферромагнитного материала (рис. 28.20—28.23). На рис. 28.24 показано, как изменяется направление оси легкого намагничивания в кристалле гадолиния с изменением температуры. В интервале от 0 до 170° К направления легкого намагничивания располагаются под углом к гексагональной оси («конус» направлений легкого намагничивания); при этом угол раствора конуса изменяется от 32 до 90°. В области температур 170—230° К направления легкого намагничивания лежат в базисной плоскости («плоскость» направлений легкого намагничивания). В интервале температур 230—290° К конус разрушается и возникает одно направление легкого намагничивания.

Особенностью магнитокристаллической анизотропии гадолиния является также ее сильная зависимость от магнитного поля. На рис. 28.25 приведена зависимость константы магнитной анизотропии K_1 гадолиния от напряженности магнитного поля H при различных температурах T, °С.

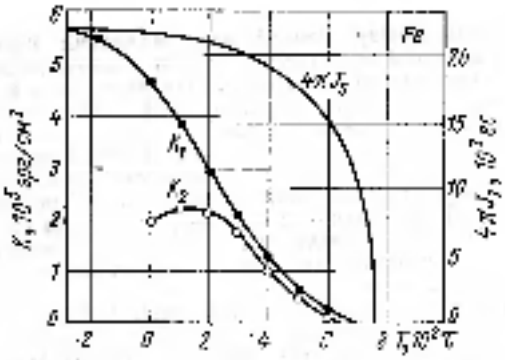


Рис. 28.20. Зависимость констант магнитной анизотропии Fe от температуры [1]

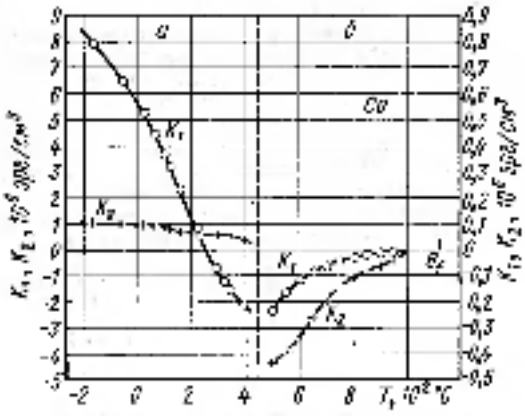


Рис. 28.21. Зависимость констант магнитной анизотропии Co от температуры для гексагональной (а) и кубической гранецентрированной (б) структур [8]

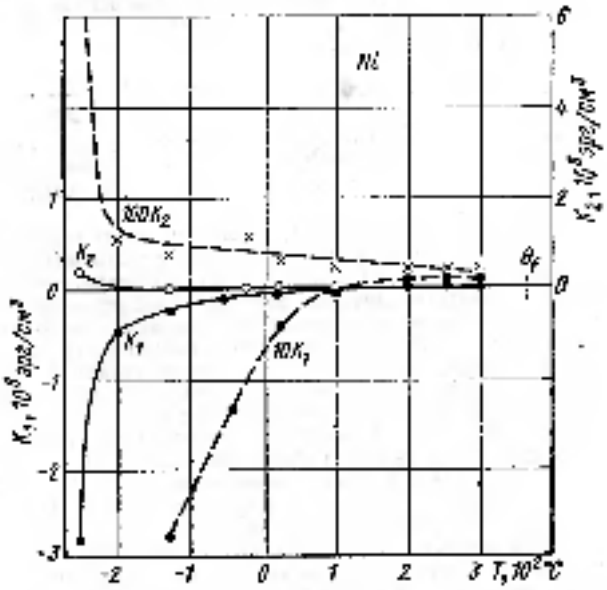


Рис. 28.22. Зависимость констант магнитной анизотропии Ni от температуры [1]

Рис. 28.23. Зависимость констант K_1 и K_2 магнитной анизотропии Gd от температуры [13]

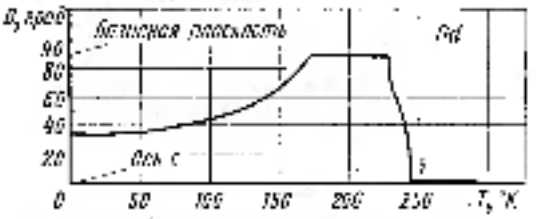


Рис. 28.24. Изменение направления легкого намагничивания Gd с ростом температуры (угол θ отсчитывается от гексагональной оси c кристалла) [13]

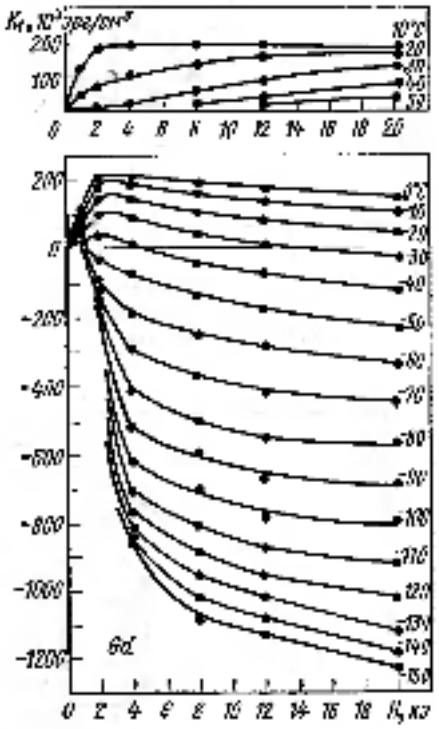


Рис. 28.25. Зависимость констант K_1 магнитной анизотропии Gd от напряженности магнитного поля при различных температурах [13]

Направления легкого намагничивания в гербии и диспрозии лежат в базисной плоскости, а в гольмии и эрбии — под углом к гексагональной оси [18].

Для сплавов Fe — Co, Fe — Ni, Co — Ni и Fe — Co — Ni значения констант магнитной анизотропии K_1 и K_2 при различных температурах T, °C, приведены в табл. 28.9. Из этой таблицы видно, что значения нулевой анизотропии находятся вблизи 70% Ni, 30% Fe для железоникелевого сплава, вблизи 65% Co, 35% Fe для железокобальтового сплава и вблизи 100% Ni для кобальтникелевого сплава. Для тройных сплавов Fe—Co—Ni ход кривой $K_1 = 0$ точно не определен, но полагают, что эта кривая проходит вблизи точки, соответствующей сплаву перминдур (30% Fe, 25% Co, 45% Ni), подвергнутому обычной для этих сплавов термообработке (отжиг при температуре 900—700° C). По измерениям на монокристалле. Для этого сплава $K_1 = -3000$ *эрг/см*³ [6].

В табл. 28.10 приведена последовательность типовых направлений легкого, промежуточного и трудного намагничиваний кубических кристаллов в зависимости от знаков и соотношения значений констант магнитной анизотропии K_1 и K_2.

Таблица 28.9

Зависимость констант магнитной анизотропии K_1 и K_2 (10^3 *эрг/см*³) для сплавов Fe—Co, Fe—Ni, Co—Ni и Fe—Co—Ni от температуры T [6, 8]

Состав, %			20° C		200° C		300° C		500° C	
Fe	Co	Ni	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2
100	—	—	420	150	300	92	—	—	—	—
70	30	—	102	160	—	—	—	—	—	—
60	40	—	45	—110	—	—	—	—	—	—
50	50	—	68	—390	—	—	—	—	—	—
30	70	—	—433	50	—	—	—	—	—	—
50	—	50	33	180	25	—80	18	—7	—	—
35	—	65	15	—70	12	—40	10	—32	—	—
30	—	70	7	—17	2	—4	0	0	—	—
10	—	90	—7	—23	2	—10	0	—8	—	—
—	—	100	—34	53	5	20	—	—	—	—
—	65	35	—258	150	—	—	—	—	—	—
—	50	50	108	10	—	—	—	—	—	—
—	40	60	—74	40	—	—	—	—	—	—
—	20	80	—4	8	—	—	—	—	—	—
—	10	90	16	—40	—	—	—	—	—	—
—	3	97	10	5	—	—	—	—	—	—
50	10	40	61	—160	15	4	—	—	7	—60
25	25	50	4	16	4	2	—	—	—3	22
20	15	65	9	110	1	—18	—	—	—3	2
15	25	60	—26	34	—10	—43	—	—	—3	—15
10	40	50	72	4	—54	41	—	—	—9	—102
10	30	60	—32	—80	—17	—50	—	—	—12	—37
10	20	70	—25	17	—25	70	—	—	—14	29
10	10	80	—2	—30	—2	—20	—	—	—2	0

Таблица 28.10

Направления легкого, промежуточного и трудного намагничиваний кубических кристаллов в зависимости от констант магнитной анизотропии K_1 и K_2 [1, 6]

K_1	+	+	+	—	—	—
K_2	От $+\infty$ до $\frac{9}{4}K_1$	От $-\frac{9}{4}K_1$ до $-9K_1$	От $-9K_1$ до $-\infty$	От $-\infty$ до $\frac{9}{4}\lvert K_1\rvert$	От $\frac{9}{4}\lvert K_1\rvert$ до $9\lvert K_1\rvert$	От $9\lvert K_1\rvert$ до $+\infty$
Легкое	[100]	[100]	[111]	[111]	[110]	[110]
Промежуточное	[110]	[111]	[100]	[110]	[111]	[100]
Трудное	[111]	[110]	[110]	[100]	[100]	[111]

Значения констант магнитной анизотропии для сплавов железа с другими ферромагнетиками приведены на рис. 28. 26—28.28 и в табл. 28.11 и 28.12.

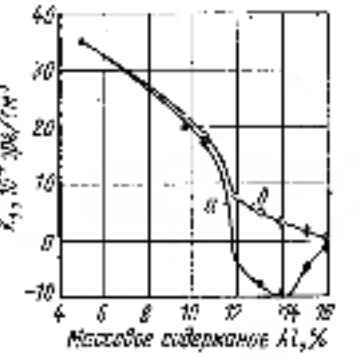


Рис. 28.26. Зависимость константы магнитной анизотропии при комнатной температуре от состава сплавов Fe—Al [8]:

а — после медленного охлаждения (упорядоченный сплав); б — после закалки от 900° C (неупорядоченный сплав)

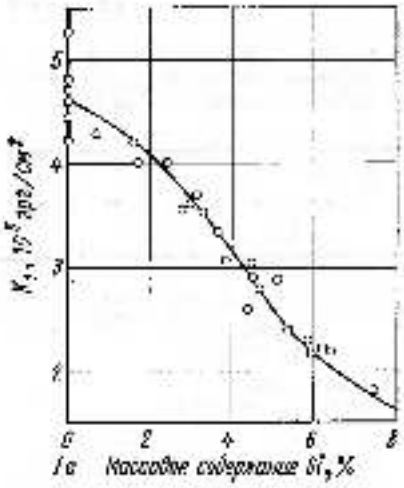


Рис. 28.27. Зависимость константы анизотропии K_1 для сплавов Fe — Si при температуре 20° С от содержания кремния по данным разных авторов [8]

Таблица 28.11

Зависимость констант магнитной анизотропии K_1 и K_2 от температур сплавов Fe—Si [8]

Содержание Si, %	T, °C	$K_1 \cdot 10^6 \frac{эрг}{см^3}$	$K_2 \cdot 10^6 \frac{эрг}{см^3}$
0	−196	52,0±1,0	0±5
0	−78	50,5±1,0	0±5
0	27	48,0±1,0	0±5
3,1±1	−196	42,5±1,0	—
3,1±1	−78	40,5±1,0	—
3,1±1	27	38,5±1,0	—
5,1±1	−196	35,5±1,0	−5±5
5,1±1	−78	32,5±1,0	−5±5
5,1±1	27	28,5±1,0	−5±5

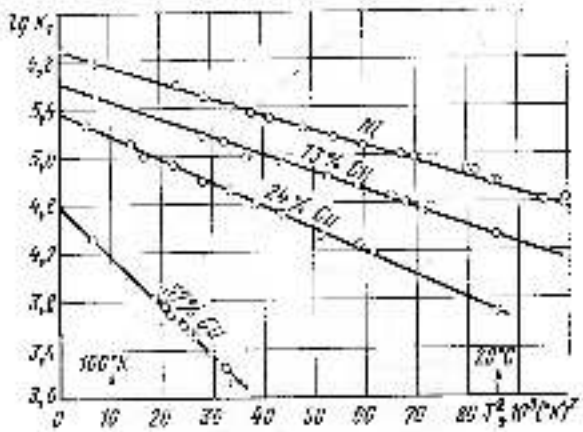


Рис. 28.28. Зависимость константы магнитной анизотропии сплавов Ni — Cu от квадрата абсолютной температуры и состава [6]

Таблица 28.12

Константы магнитной анизотропии K_1 соединений кобальта с редкоземельными элементами при температуре 27 и −196°С [5]

Соединение	Co_5Ce	Co_5Nd	Co_5Pr	Co_5Sm	Co_5Y
$K_1 \cdot 10^7$ эрг/см³ (27°С)	2,1	1,2	7,0	4,7	5,7
$K_1 \cdot 10^5$ эрг/см³ (−196 °С)	—	−23,9	−6,0	—	—

Зависимость $K = K_1 + K_2$ для гексагонального кристалла MnBi от T см. на рис. 28.29.

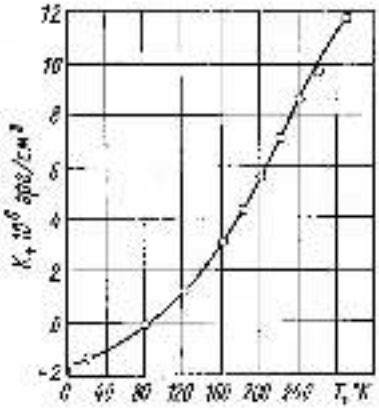


Рис. 28.29. Зависимость константы $K = K_1 + K_2$ для гексагонального кристалла MnBi от температуры. При температуре 20 °С $K_1 = 9,1 \cdot 10^6$ эрг/см³, $K_2 = -3,6 \cdot 10^6$ эрг/см³ [8]

Магнитострикция

Изменения размеров тела, вызванные изменениями его намагниченности, называют *магнитострикцией*. Изменение объема тела называют *объемной магнитострикцией*, а изменение размеров тела вдоль постоянного объема — *линейной магнитострикцией*.

Объемная магнитострикция. Относительное изменение объема $\Delta V/V = \omega$ при изменении намагниченности в общем случае складывается из трех составляющих различного происхождения [6]:

$$\omega = \omega_J + \omega_K + \omega_\lambda.$$

Член ω_J зависит только от величины намагниченности ($J = J_s > 0$). Изменение объема ω_J может происходить под воздействием температуры (изменение самопроизвольной намагниченности) и при изотермическом изменении истинной намагниченности во внешнем поле. В сильных магнитных полях, когда изменение ориентации вектора намагниченности уже не происходит, ω_J в общем изменяется линейно с напряженностью магнитного поля. В сильных полях $(d\omega_J/dH)_T$ зависит только от материала и температуры. Член ω_K описывает изменение объема кристалла в зависимости от ориентации

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ самопроизвольной намагниченности по отношению к кристаллографическим осям при постоянной температуре. Эффект формы ω_f зависит только от формы образца и от общей намагниченности s, таким образом, не является свойством материала.

Линейная магнитострикция. Относительное изменение длины $\lambda_{\alpha\beta} = (\Delta l/l)_{\alpha\beta}$ в направлениях $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ при изотермическом намагничивании ферромагнитного кристалла до насыщения в направлениях $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ называют *магнитострикцией насыщения* при условии, что в начальном состоянии намагниченность кристалла была ориентирована по направлению легкого намагничивания (идеально размагниченное состояние).

Для кубических кристаллов λ_s дается выражением

$$\lambda_s = h_1\left(\alpha_1^2\beta_1^2 + \alpha_2^2\beta_2^2 + \alpha_3^2\beta_3^2 - 1/3\right) +$$

$$+2h_2(\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2 + \alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3 + \alpha_3\alpha_1\beta_3\beta_1) + h_3\left(\alpha_1^4\beta_1^2 +\right.$$

$$\left.+\alpha_2^4\beta_2^2 + \alpha_3^4\beta_3^2 + \frac{2}{3}s - 1/3\right) + 2h_4(\alpha_1\alpha_2\alpha_3^2\beta_1\beta_2 +$$

$$+\alpha_2\alpha_3\alpha_1^2\beta_2\beta_3 + \alpha_3\alpha_1\alpha_2^2\beta_3\beta_1) + \ldots +$$

$+h_5s$ — (если ось [100] является направлением легкого намагничивания) или

$+h_5(s-1/3)$ — (если направлением легкого намагничивания является ось [111]). (28.1)

Здесь $h_1, \ldots, h_6$ — константы и $s = \alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2$. Направляющие косинусы α_i, β_i относятся к кубическим осям. Этого приближения достаточно, чтобы описывать экспериментальные результаты.

Из уравнения (28.1) можно получить член объемной магнитострикции ω_K:

$$\omega_K = 3\lambda_s s$$

(если ось [100] является направлением легкого намагничивания),

$$\omega_K = 3\lambda_s(s - 1/3) \qquad (28.2)$$

(если направлением легкого намагничивания является ось [111]) и продольную магнитострикцию ($\alpha_i = \beta_i$) по главным кристаллографическим осям [100], [110] и [111]:

$$\lambda_{100} = \frac{2}{3}h_1 + \frac{2}{3}h_3; \quad \lambda_{110} = \frac{1}{6}h_1 + \frac{1}{2}h_2 + \frac{1}{12}h_3;$$

$$\lambda_{111} = \frac{2}{3}h_2 + \frac{2}{9}h_3. \qquad (28.3)$$

При $h_2 = h_4 = h_5 = 0$ получается упрощенное выражение

$$\lambda_s = \frac{3}{2}\lambda_{100}\left(\alpha_1^2\beta_1^2 + \alpha_2^2\beta_2^2 + \alpha_3^2\beta_3^2 - 1/3\right) +$$

$$+3\lambda_{111}(\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2 + \alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3 + \alpha_3\alpha_1\beta_3\beta_1) \qquad (28.4)$$

только с двумя константами λ_{100} и λ_{111}, которых часто достаточно для описания экспериментальных результатов.

Для поликристаллического материала с произвольным распределением ориентации кристаллических осей из соотношений (28.3) можно получить линейную магнитострикцию в виде:

$$\lambda_l = \frac{3}{2}\lambda_s\left(\cos^2\theta - \frac{1}{3}\right), \qquad (28.5)$$

где

$$\lambda_s = \frac{2\lambda_{100} + 3\lambda_{111}}{5}. \qquad (28.6)$$

Здесь θ — угол между направлением измерения и направлением намагниченности. Из уравнения (28.1) получаем выражение для объемной магнитострикции поликристалла:

$$\omega_K = (3/5)\,h_3,$$

если оси [100] являются направлениями легкого намагничивания, или

$$\omega_K = -(2/5)\,h_3, \qquad (28.7)$$

если оси [111] являются направлениями легкого намагничивания.

Магнитострикции насыщения гексагональных кристаллов описываются выражением

$$\lambda_\varphi = \lambda_A\left[(\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)^2 - (\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)\,\alpha_3\beta_3\right] +$$

$$+\lambda_B\left[(1 - \alpha_3^2)(1 - \beta_3^2) - (\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)^2\right] +$$

$$+\lambda_C\left[(1 - \alpha_3^2)\beta_3^2 - (\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)\,\alpha_3\beta_3\right] +$$

$$+4\lambda_D(\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)\,\alpha_3\beta_3 \qquad (28.8)$$

с четырьмя константами $\lambda_A, \ldots, \lambda_D$. Направляющие косинусы α_i, β_i относятся к системе прямоугольных координат, где ось z совпадает с гексагональной осью [001], а оси x, y — с направлениями [100] и [120] соответственно. Объемная магнитострикция монокристалла дается выражением

$$\omega_K = (\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C)(1 - \alpha_3^2). \qquad (28.9)$$

Для поликристаллического материала с произвольно ориентированными кристаллическими осями *продольная магнитострикция насыщения* (измеряемая параллельно направлению намагничения, т. е. $\alpha_i = \beta_i$) может быть получена из уравнения (28.8):

$$\lambda_s = \lambda_A + \frac{2}{5}\lambda_A + \frac{8}{15}\lambda_D. \qquad (28.10)$$

Поперечная магнитострикция насыщения определяется формулой

$$\lambda_t = -\frac{2}{15}\lambda_A + \frac{1}{3}(\lambda_B + \lambda_C) - \frac{4}{15}\lambda_D, \qquad (28.11)$$

а объемная определяется соотношением

$$\omega_K = \frac{2}{3}(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C). \qquad (28.12)$$

В сильных полях (выше технического насыщения, т.е. при $J > J_s$) зависимость $(\Delta l/l)_{\alpha\beta}$ от напряженности магнитного поля в основном линейна. Эта уже называемая *вынужденная магнитострикция* описывается для кубических кристаллов выражением

$$\frac{\partial(\Delta l/l)_{\alpha\beta}}{\partial H} = h_0' + h_1'\left(\alpha_1^2\beta_1^2 + \alpha_2^2\beta_2^2 + \alpha_3^2\beta_3^2 - \frac{1}{3}\right) +$$

$$+2h_2'(\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2 + \alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3 + \alpha_3\alpha_1\beta_3\beta_1) + \ldots \qquad (28.13)$$

с константами h_0', h_1' h_2'. Здесь $h_0' = \frac{1}{3}\left(\frac{\partial\omega_J}{\partial H}\right)$ — изменение длины, соответствующее члену ω_J спонтанной объемной магнитострикции.

Константы, входящие в уравнения (28.1)—(28.13), определяются экспериментально (см. табл. 28.13—28.23 и рис. 28.30—28.64).

Таблица 28.13

Производная $(\partial\omega_i/\partial H)_T$ для металлов и сплавов в сильных магнитных полях [5]

Вещество	ϑ, °C	$\left(\frac{\partial\omega_i}{\partial H}\right)_T$, 10^{-10} с$^{-1}$	Вещество	ϑ, °C	$\left(\frac{\partial\omega_i}{\partial H}\right)_T$, 10^{-10} с$^{-1}$
Fe	20	−6	40%Ni+ +60%Fe	20	−32
Ni	20	−0,55	50%Ni+ +50%Fe	20	−4
Ni	280	−6	3%Al+ +97%Fe	20	6
Ni	348	36	8,1%Al+ +91,9%Fe	20	9
Co	20	−5	11,9%Al+ +88,1%Fe	20	7
20%Ni+80%Fe	20	−20	15%Al+ +85%Fe	20	14
30%Ni+70%Fe	20	−300	16,9%Al+ +83,1%Fe	20	30

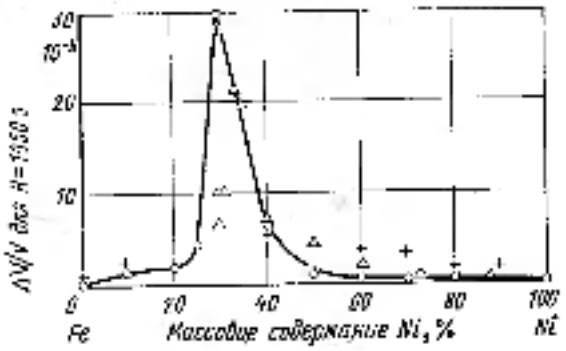


Рис. 28.30. Изменение объема $\Delta V/V$ сплавов Fe — Ni (при температуре 20 °C) при изменении напряженности магнитного поля от 0 до 1050 э по данным разных авторов [6]

Таблица 28.14

Константы магнитострикции железа при 20 °C [8]

λ_{100}, 10^{-6}	λ_{111}, 10^{-6}	Вычислено по формуле (28.6) λ_s, 10^{-6}	Измерено при 20 °C λ_s, 10^{-6}
20,3	−21,1	−4,5	10±2

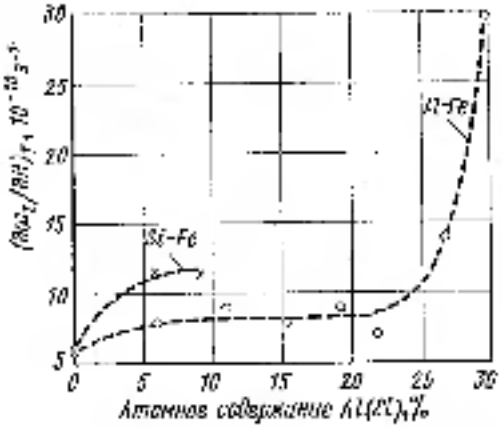


Рис. 28.31. Зависимость производной $(\partial\omega_i/\partial H)_T$ для сплавов Si — Fe и Al — Fe от концентрации Al(Si) [6]

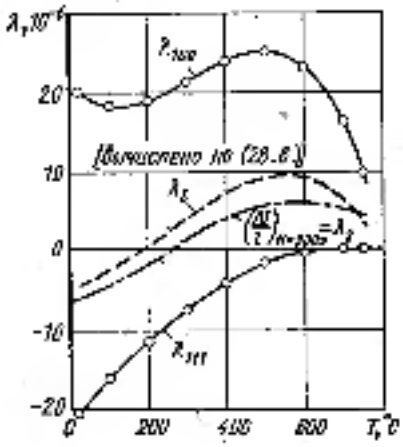


Рис. 28.32. Зависимость константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} Fe от температуры [8]

Таблица 28.15

Константы магнитострикции монокристалла кобальта [8]

λ_A, 10^{-6}	λ_B, 10^{-6}	λ_C, 10^{-6}	λ_D, 10^{-6}	σ_K, 10^{-6}
−45	−95	+110	−100	−30 $\left(1-\frac{\alpha_3^2}{3}\right)$ [см. уравнение (28.9)]

Таблица 28.16

Константа магнитострикции поликристаллического кобальта (см. также рис. 28.33)

λ_s, 10^{-6} [см. уравнение (28.10)]	σ_K, 10^{-6} [см. уравнение (28.12)]
−71,4	−20

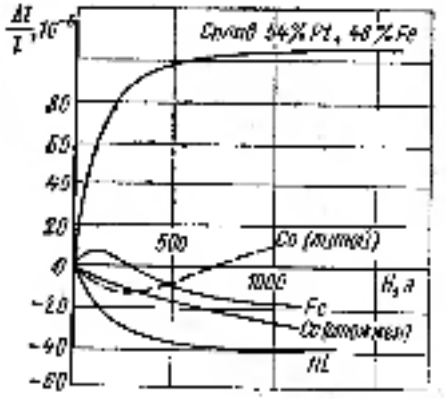


Рис. 28.33. Зависимость относительного изменения длины ($\Delta l/l$) поликристаллических образцов Fe, Co, Ni и сплава (54% Pt+46% Fe) при температуре 20 °C от напряженности магнитного поля [15]

Таблица 28.17

Константы магнитострикции никеля при температуре 20°C [8]

λ_{111}, 10^{-6}	λ_{100}, 10^{-6}	λ_{111}, 10^{-6}	a_{111}, 10^{-6}	b_{111}, 10^{-6}
−48,8±3,8	−36,5±1,9	−2,8±3,1	−7,7±5,2	7,7±3,1

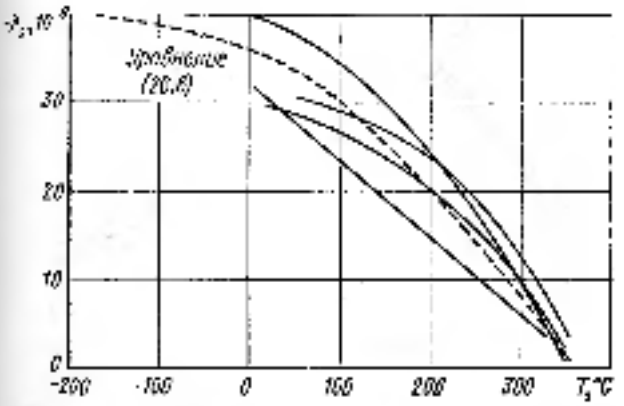


Рис. 28.34. Зависимость константы магнитострикции λ_s поликристаллического Ni от температуры по данным работ различных авторов [8]

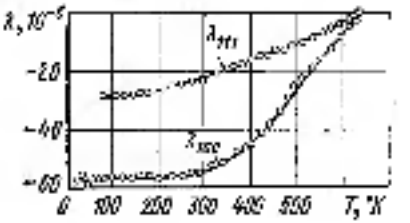


Рис. 28.35. Зависимость констант магнитострикции λ_{100} и λ_{111} Ni от температуры [8]

Таблица 28.18

Константы магнитострикции сплава 22% Fe + 78% Ni (пермалой) при температуре 20°C [8]

Состояние	λ_{111}, 10^{-6}	b_{111}, 10^{-6}	λ_{100}, 10^{-6}	b_{111}, 10^{-6}	b_{111}, 10^{-6}
Быстрорез.	13,7 (±1,0)	2,6 (±0,5)	−0,8 (±0,8)	1,1 (±1,4)	−0,1 (±0,6)
Медленное	20,9 (±0,7)	2,8 (±0,3)	1,7 (±0,6)	−1,4 (±1,0)	−0,2 (±0,5)

Таблица 28.19

Температурная зависимость константы λ_s некоторых поликристаллических сплавов железо — никель [8] (см. также рис. 28.36 и 28.37)

Содержание Ni в сплаве, %	λ_s, 10^{-6}	
	20°C	−180°C
36	20,3	30,5
46	25,4	30,7
50	24,3	26,8
70	11,6	12,6

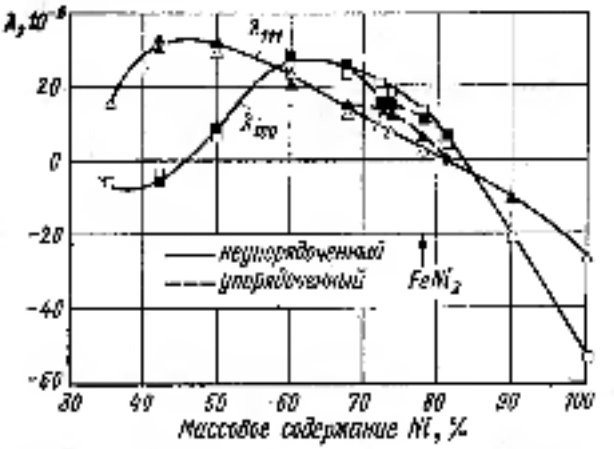


Рис. 28.36. Зависимость констант магнитострикции λ_{100} и λ_{111} кубических гранецентрированных сплавов Fe — Ni при температуре 20 °C от концентрации никеля [8]

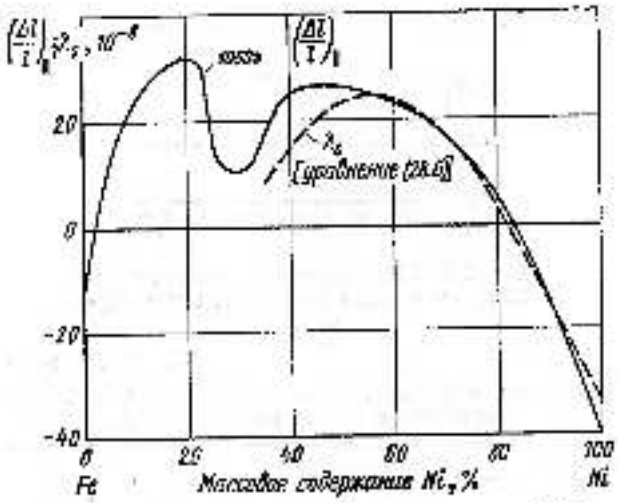


Рис. 28.37. Относительное изменение длины $(\Delta l/l)_{\parallel}$ в магнитном поле напряженностью 1050 *а* и константа λ_s, вычисленная по формуле (28.6) на основании данных рис. 28.36 для монокристаллических сплавов Fe — Ni различных составов при температуре 20°С [8]

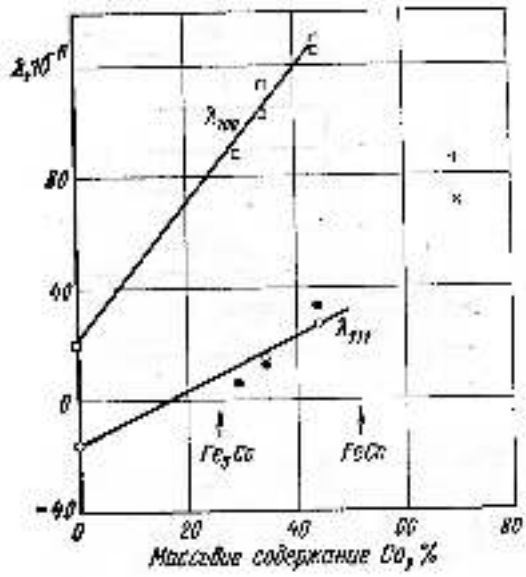


Рис. 28.38. Константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} кубических объемноцентрированных сплавов Fe — Co различных составов при температуре 20°С по данным работ различных авторов [8]

Таблица 28.20

Влияние структурного упорядочения на константу λ_s сплава Ni_3Fe при температуре 20°С [8]

λ_s, 10^{-6} (данные различных авторов)

Неупорядоченный сплав	Упорядоченный сплав
1,9 7,1 8,5	4,10 10,1 10,7

Характеристики моно- и поликристаллических сплавов железо — кобальт (рис. 28.38 и 28.39)

В ряде областей техники находят применение магнитострикционный сплав железа с кобальтом марки К 65, для которого в поле насыщения $\Delta l/l \approx 10^{-6}$ [10].

Таблица 28.21

Химический состав сплава К-65 [16]

Элемент	Co	C	Si	Mn	S	P	Fe
Содержание, %	63,0—65,0	0,03	0,15—0,30	0,30—0,60	0,025	0,02	Остальное

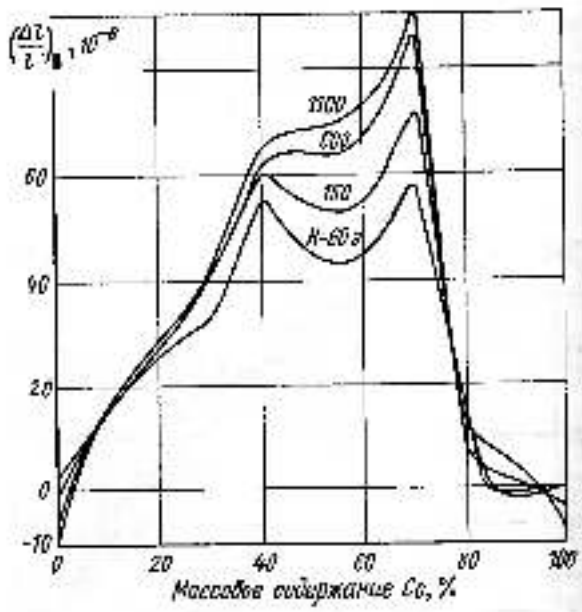


Рис. 28.39. Зависимость относительного изменения длины $(\Delta l/l)_{\parallel}$ поликристаллических сплавов Fe — Co в магнитных полях напряженностью от 60 до 1100 *а* от содержания Co при температуре 20°С [8]

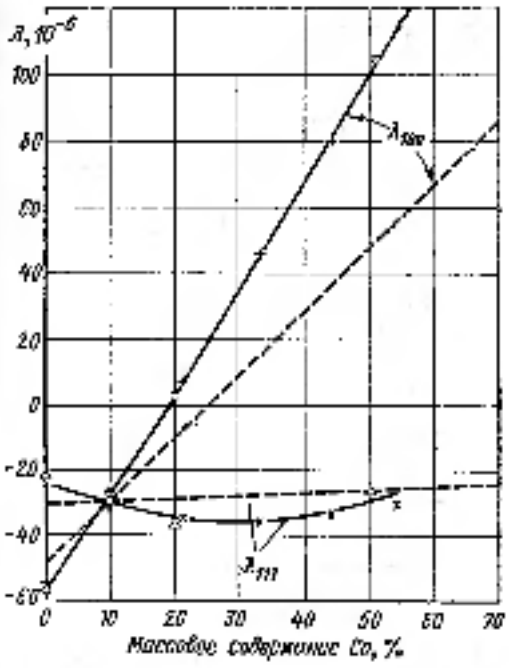


Рис. 28.40. Константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} кубических гранецентрированных сплавов Ni — Co различных составов при температуре 20 °C [8]

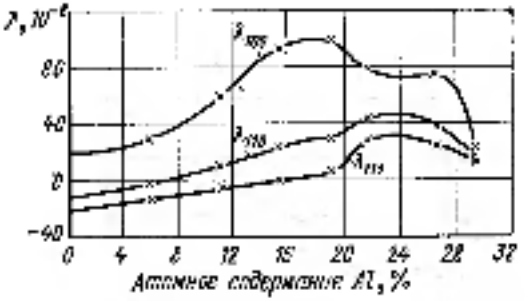


Рис. 28.42. Константы магнитострикции λ_{100}, λ_{110} и λ_{111} медленно охлажденных (упорядоченных) сплавов Fe — Al при температуре 20°C [8]

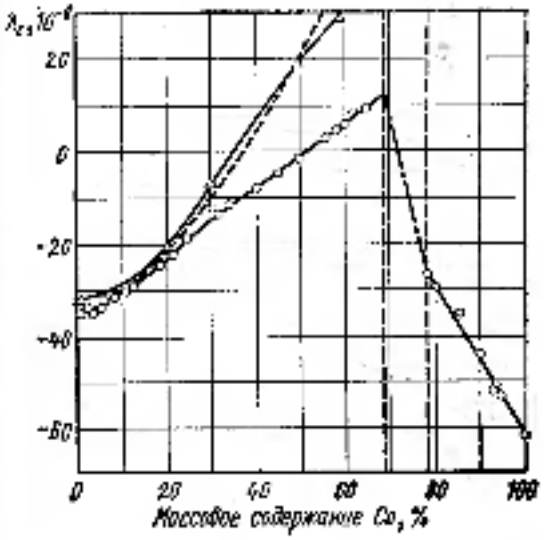


Рис. 28.41. Константа магнитострикции λ_s поликристаллических сплавов Ni — Co различных составов при температуре 20 °C. Обозначения ○ и △ соответствуют данным работ различных авторов. Пунктир — вычисления по данным рис. 28.40 [8].

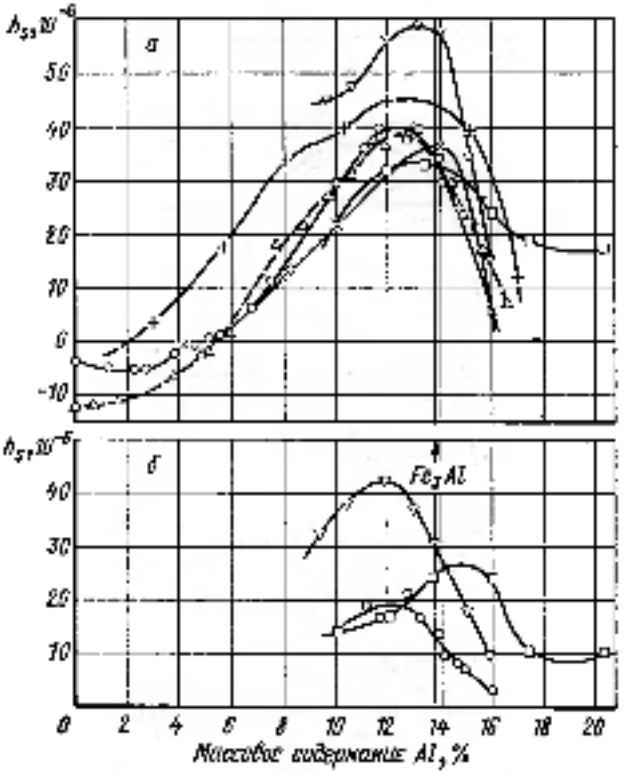


Рис. 28.43. Константа магнитострикции k_s упорядоченных (а) и неупорядоченных (б) поликристаллических сплавов Fe — Al при температуре 20°C, по данным работ различных авторов [8]

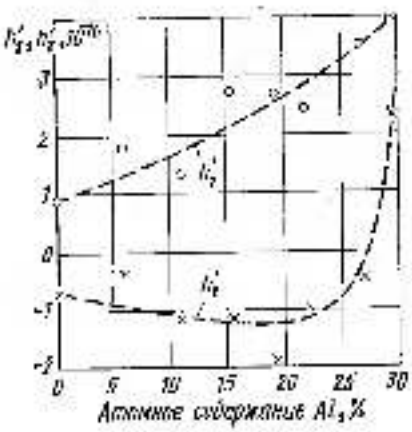


Рис. 28.44. Константы h'_1 и h'_2 индуцированной магнитострикции сплавов Fe — Al при температуре 20° С [8]

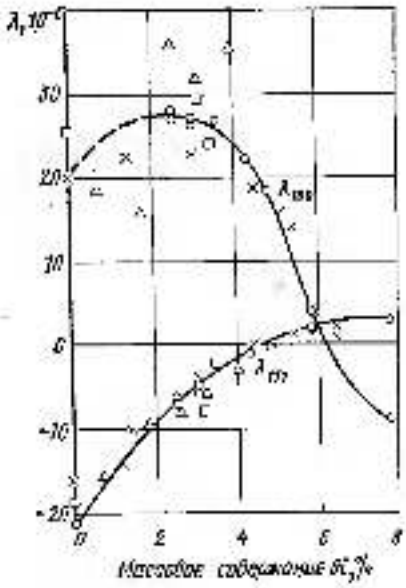


Рис. 28.45. Константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} сплавов Fe — Si при температуре 20°С по данным работ различных авторов [8]:

x — неупорядоченные сплавы; □, Δ, ○ — упорядоченные сплавы

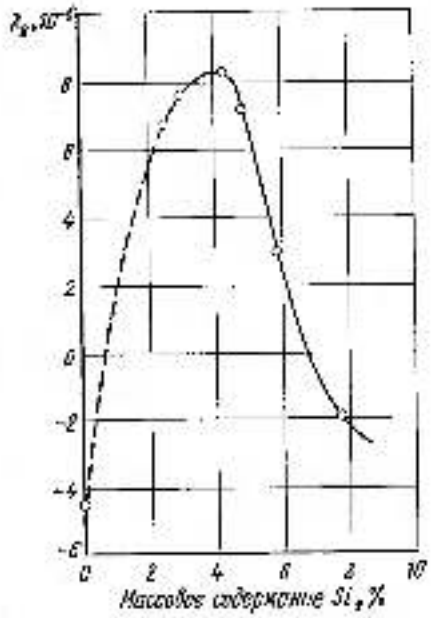


Рис. 28.46. Константа магнитострикции λ_s поликристаллических сплавов Fe — Si при температуре 20 °С. Значения λ_s вычислены по (28.6). Пунктир соответствует области, для которой нет экспериментальных данных [8].

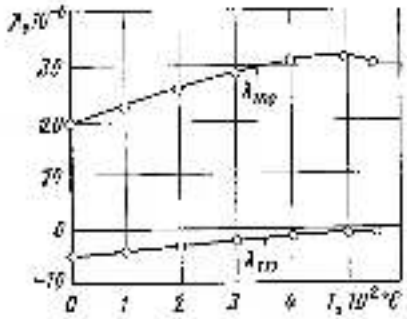


Рис. 28.47. Зависимость констант магнитострикции λ_{100} и λ_{111} сплава Fe + 3,5% Si от температуры [8].

Рис. 28.48. Константа магнитострикции λ_s поликристаллических бинарных сплавов Fe с Ti, Mo и W при температуре 20° С [8]

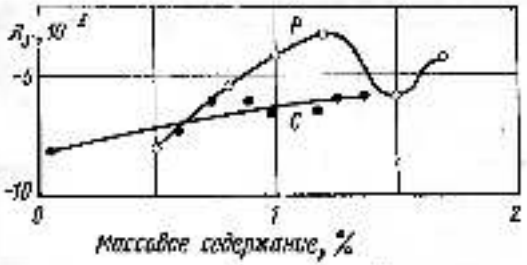


Рис. 28.49. Константа магнитострикции λ_s монокристаллических бинарных сплавов Fe с C и P при температуре 20 °C [8]

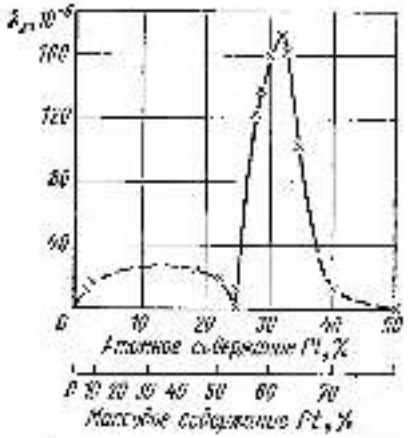


Рис. 28.50. Константа магнитострикции λ_s системы Fe — Pt при комнатной температуре [8]

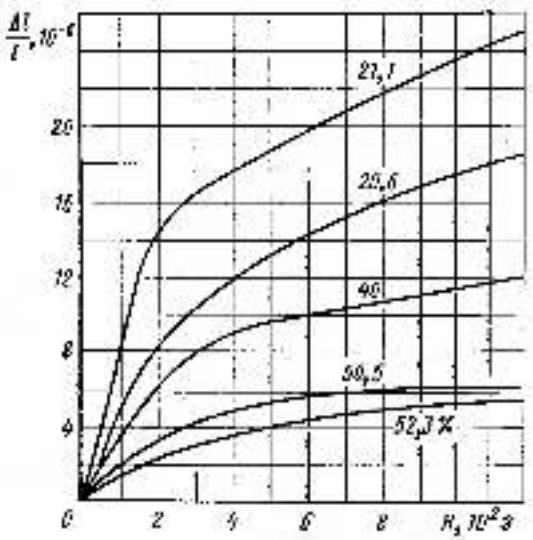


Рис. 28.51. Относительное изменение длины ($\Delta l/l$) сплавов Fe — Cr после закалки от 1050°C в масле в зависимости от содержания Cr и напряженности магнитного поля [16]

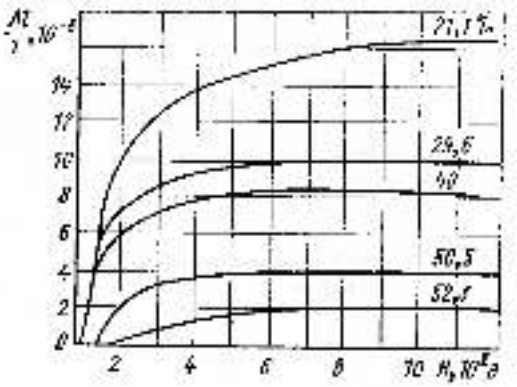


Рис. 28.52. Относительное изменение длины ($\Delta l/l$) сплавов Fe — Cr после отжига при 900 °C в течение 2 ч в зависимости от содержания Cr и напряженности магнитного поля [16]

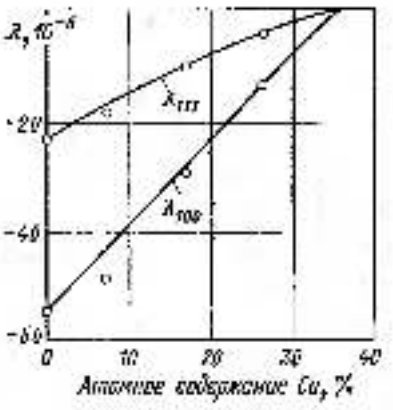


Рис. 28.53. Константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} сплавов Ni — Cu различных составов при температуре 20°C [8]

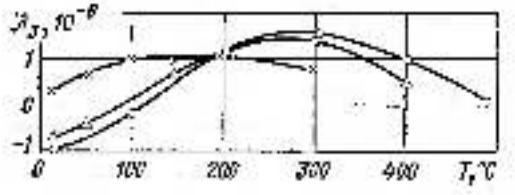


Рис. 28.54. Зависимость константы магнитострикции λ_s сплава Ni$_3$Mn от температуры при различных степенях упорядочения [8]:

○ — упорядоченный; △ — закаленный от 400°C; ×—закаленный от 800°C

Таблица 26.22

Константа магнитострикции λ_s поликристаллических бинарных сплавов никеля [8]

Атомный состав, %				λ_s, 10^{-6}			θ_p, °C	Термообработка
Ni	Co	A	Остальное	17°C	—100°C	—273°C		
99,3	0,5	—	0,2	—32,5	—35	—36	357	
91,0	0,4	8,3Al	0,3	—7,1	—14,5	—16	137	
87,0	0,5	12,5Al	0	0	—8,0	—9,2	22	1 ч 700°C медленное охлаждение
94,5	0,5	15,1Al	0,1	0	—5,0	—8,5	—78	
94,9	1,0	4,1Si	0,2	—15,5	—22	—22,5	243	
85,5	1,0	9,2Si	0,3	—1,2	—7,0	—9,5	94	
96,3	0,7	3,0V	0,5	—15,6	—23	—24	219	
93,0	0,4	6,4V	0,2	—1,7	—11,5	—14	52	
89,7	0,4	9,6V	0,3	0	—1,2	—2,2	—150	
98,1	0,6	1,1Cr	0,3	—26	—32	—33	317	
94,3	0,5	4,05Cr	0,2	—9,6	—18	—19	167	
89,8	0,5	9,3Cu	0,4	—24	—32	—33	263	
80,7	0,6	18,7Cu	0	—12,5	—21,5	—23	177	
71,3	0,4	28,1Cu	0,2	—3,2	—13,6	—14,5	74	
97,5	0,5	1,85Mo	0,2	—22,5	—29,5	—30	277	
94,4	0,5	5,0Mo	0,1	—8,5	—12	—14	82	
97,6	0,5	1,4Sn	0,5	—27,5	—32,6	—33	314	
96,4	0,5	3,0Sn	0,1	—22	—29	—30	264	
94,7	0,4	4,9Sn	0	—15,5	—23	—23,6	209	
97,1	0,75	1,65W	0,5	—22,5	—29	—30	242	
95,8	0,8	3,35W	0,3	—11,5	—16	—19	164	
93,5	0,9	5,05W	0,6	—2,5	—11,5	—13	127	
93,2	0,5	6,05Li	0,3	—18,5	—24,5	—24,5	297	1 ч, 800°C, медленное охлаждение
87,9	0,6	11,4Mn	0,2	—8,0	—13,6	—13,5	205	
88,0	0,8	13,7Mn	2,0	—0,6	—7,6	—9	127	Упоряд. 2 ч 450°C
78,8	0,3	19,7Mn	1,2	+1,3	—0,5	—0,7	—	
77,1	0	22,7Mn	0,2	+1,8	—0,5	—1,3	—	
83,3	0,8	13,7Mn	2,0	—0,85	—7,4	—7,8	—	Неупоряд. 1/2 ч 800°C
76,8	0,3	19,7Mn	1,2	—	0	—0,6	—	
77,1	0	22,7Mn	0,2	—	—0,16	—0,25	—	Закаленный
60	—	20Pd	—	—30,0	—40,0	—46	302	
90	—	10Pd	—	—36,0	—40,0	—41	—	
85,6	0,5	10Fe, 3,9Cr	0	—4,9	—6,0	—6,0	361	
85,1	0,6	10,1Fe, 3,9W	0,4	—2,2	—3,1	—3,2	330	
66	—	16Pd, 19Fe	—	0	+0,7	—	502	

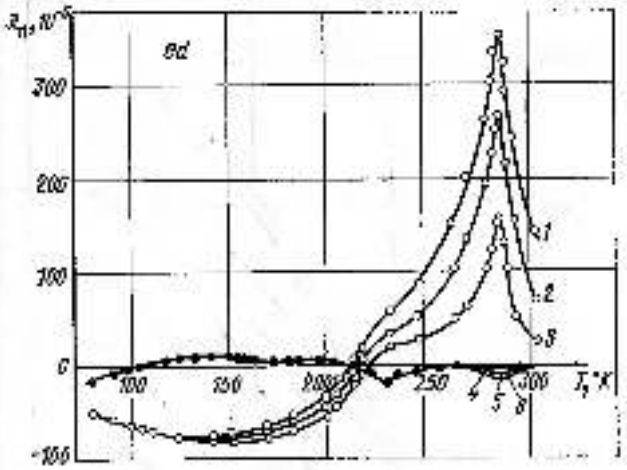


Рис. 28.56. Зависимость продольной магнитострикции монокристалла Gd вдоль осей c (кривые 1, 2, 3) и a (кривые 4, 5, 6) при различных значениях напряженности магнитного поля от температуры [13]:

1, 6 — H = 1000 э; 2, 5 — H = 4000 э; 3, 4 — H = 8200 э

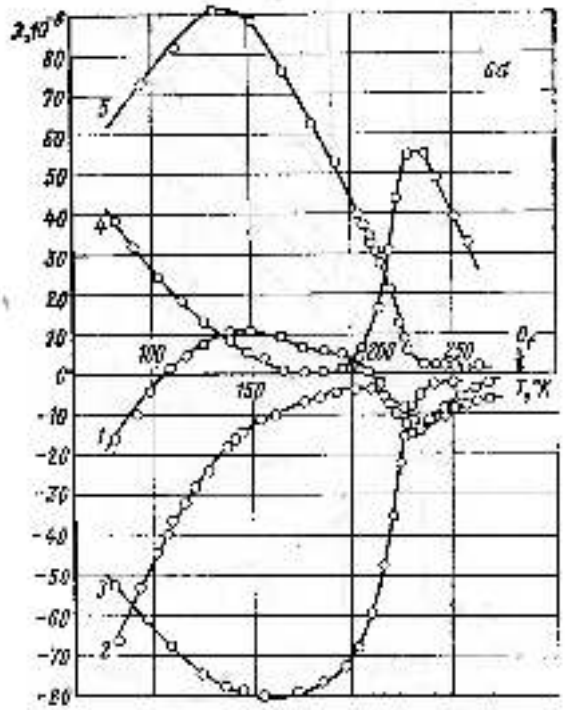


Рис. 28.57. Зависимость константы магнитострикции насыщения λ_s Gd от температуры [13]:

1 — H ∥ [1,1,0]; 2 — H ∥ b, λ ∥ c; 3 — H ∥ λ, c; 4 — H ∥ a, λ ∥ c; 5 — H ∥ c, λ ∥ a

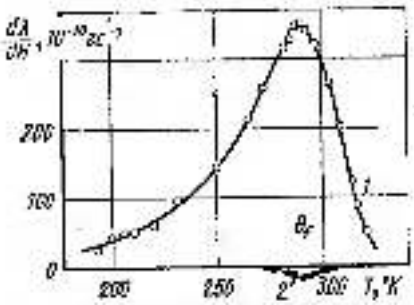


Рис. 28.56. Зависимость $d\lambda/dH$ для монокристалла Gd от температуры [13]:

1 — вдоль оси c; 2 — вдоль оси a

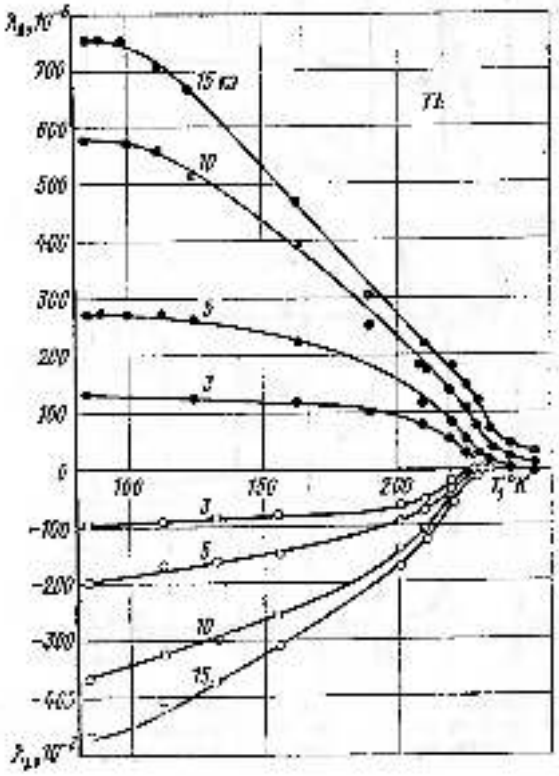


Рис. 28.58. Зависимость продольной $\lambda_{\parallel}$ (черные кружки) и поперечной $\lambda_{\perp}$ (светлые кружки) магнитострикции поликристаллического Th при различных значениях напряженности магнитного поля от температуры [13]

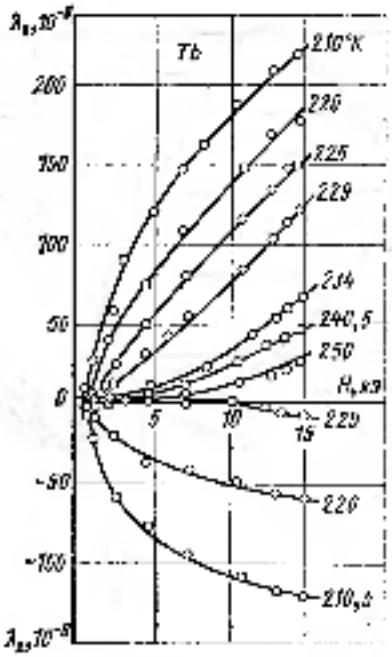


Рис. 28.59. Изотермы продольной $\lambda_{\parallel}$ и поперечной $\lambda_{\perp}$ магнитострикции поликристаллического Tb [13].

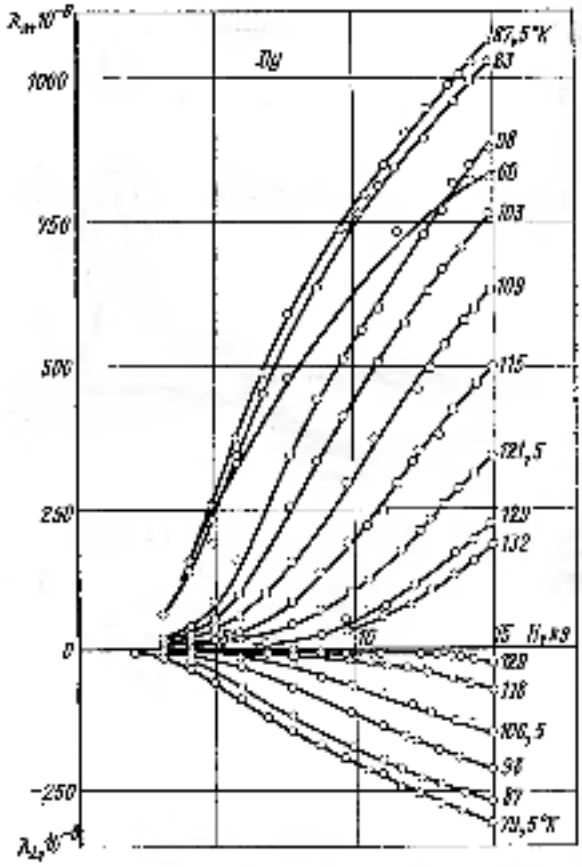


Рис. 28.61. Изотермы продольной $\lambda_{\parallel}$ и поперечной $\lambda_{\perp}$ магнитострикции поликристаллического Dy [13]

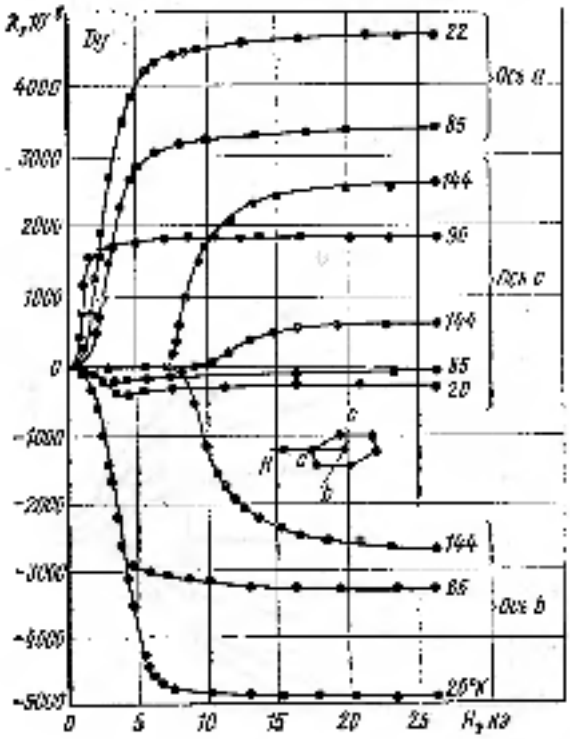


Рис. 28.60. Зависимость магнитострикции в Dy вдоль осей a, b и c от напряженности магнитного поля, приложенного вдоль оси a [13]

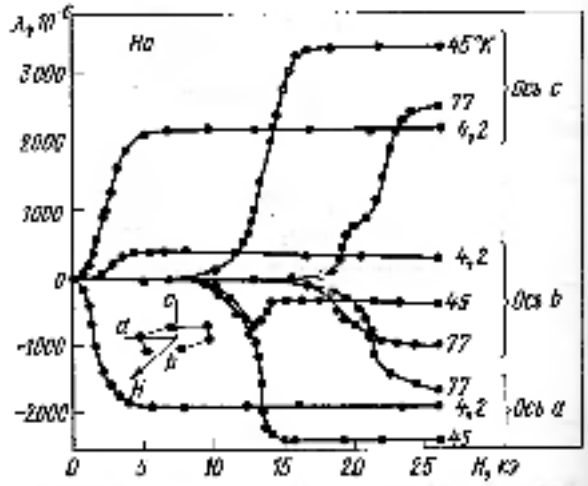


Рис. 28.62. Зависимость магнитострикции монокристалла Ho вдоль осей a, b и c от напряженности магнитного поля, приложенного вдоль оси b, для различных значений температуры T [13]

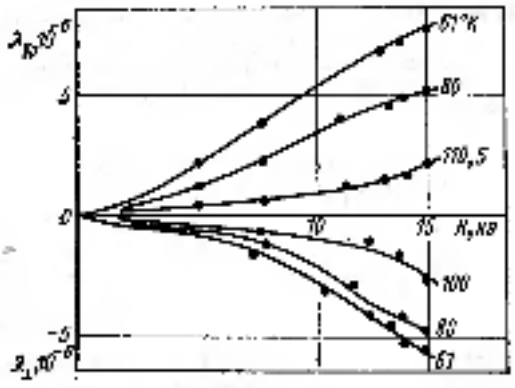


Рис. 28.63. Изотермы продольной $\lambda_\parallel$ и поперечной $\lambda_\perp$ магнитострикции поликристаллического Ho [13]

Таблица 28.23

Магнитострикция насыщения ферромагнитных сплавов на основе марганца при температуре 20°С [15] (см. также рис. 28.64)

Сплав	Магнитострикция насыщения $(\Delta l/l)_s$, 10^{-6}
31%Mn + 69%Sb	—65
30,9% Cu + 14% Mn + 55,1% Bi	—140

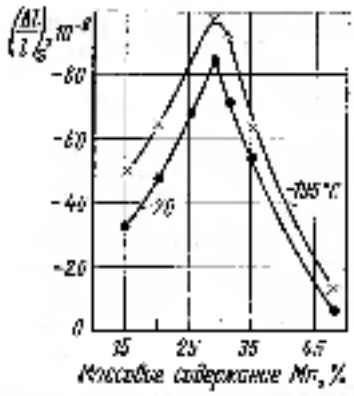


Рис. 28.64. Относительное изменение длины $(\Delta l/l)_s$ сплавов Mn—Sb в зависимости от состава и температуры [15]

Коэффициент размагничивания

При намагничивании эллипсоидальных образцов во внешнем магнитном поле напряженностью H_e напряженность истинного (внутреннего) магнитного поля H в каком-либо сечении образца представляет собой сумму напряженностей H_e и $-\Delta H$ внешнего и размагничивающего полей:

$$H = H_e - \Delta H.$$

В первом приближении напряженность размагничивающего поля ΔH пропорциональна намагниченности образца:

$$\Delta H = NJ = \frac{N}{4\pi}(B - H).$$

Коэффициент пропорциональности N называется *коэффициентом размагничивания*. Значение коэффициента размагничивания зависит от формы образца. Значения $N/4\pi$ приведены в табл. 28.24 и на рис. 28.65 и 28.66.

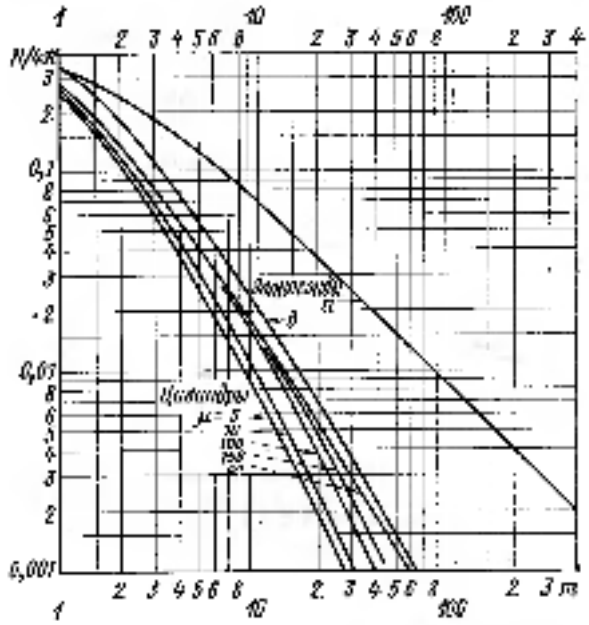


Рис. 28.65. Коэффициент размагничивания эллипсоидов и цилиндров для m, лежащих в интервале от 1 до 400:

а — вытянутые эллипсоиды, б — вытянутые эллипсоиды. В том же масштабе отложены m — отношение длины большой оси к длине малой оси (для эллипсоидов) или длины к диаметру (для цилиндров) [6]

Отношение B/H_e, т. е. отношение индукции в образце к напряженности внешнего магнитного поля называется кажущейся проницаемостью μ'. В тех случаях, когда $1/\mu \ll 1$, для определения истинной проницаемости можно пользоваться следующей формулой:

$$1/\mu = (1/\mu') - (N/4\pi).$$

Связь истинной магнитной проницаемости с кажущейся μ' для цилиндров с различным отношением m длины к диаметру показана на рис. 28.67.

В цилиндрическом образце индукция распределена неравномерно: она максимальна в средней части и убывает к концам. Только у образцов, имеющих форму эллипсоидов и находящихся в однородном магнитном поле, индукция однородна по всему объему образца. Коэффициент размагничивания эллипсоидов с заданным отношением длин их трех осей можно точно рассчитать; для них можно определить также направление индукции. Ниже приводятся формулы для описанных случаев: 1) вытянутого эллипсоида вращения (сфероида), имеющего одну большую полуось, отношение которой к малой

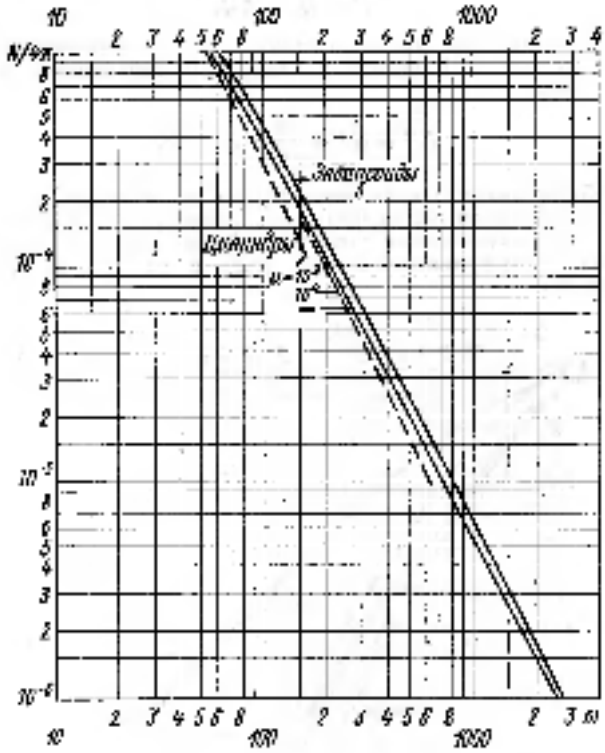


Рис. 28.66. Коэффициент размагничивания эллипсоидов и цилиндров для m, лежащих в интервале от 10 до 4000 (обозначения те же, что и на рис. 28.65) [6]

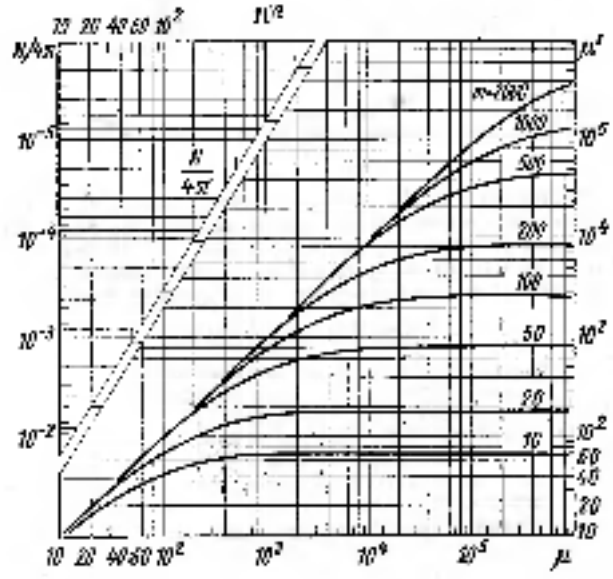


Рис. 28.67. Связь между истинной магнитной проницаемостью μ и кажущейся магнитной проницаемостью μ' для эллипсоидов с различным отношением длины к диаметру [6]

равно m, и 2) сжатого эллипсоида вращения (сфероида), имеющего одну малую полуось, отношение которой к большой равно $1/m$. В том и другом случае предполагается, что образец намагничивается параллельно большой оси:

$$\frac{N}{4\pi} = \frac{1}{m^2-1}\left[\frac{m}{\sqrt{m^2-1}}\ln\left(m+\sqrt{m^2-1}\right)-1\right];$$

$$\frac{N}{4\pi} = \frac{1}{2}\left[\frac{m^2}{(m^2-1)^{3/2}}\arcsin\frac{\sqrt{m^2-1}}{m}-\frac{1}{m^2-1}\right].$$

Таблица 28.24

Коэффициент размагничивания $N/4\pi$ для цилиндров и эллипсоидов, намагничиваемых параллельно большой оси [6]

Отношение длины к диаметру m	Цилиндры	Эллипсоиды	
		вытянутые	сплющенные
0	1,0	1,0	1,0
1	0,27	0,3333	0,3333
2	0,14	0,1736	0,2364
5	0,040	0,0556	0,1248
10	0,0172	0,0203	0,0696
20	0,00817	0,00875	0,0369
50	0,00129	0,00144	0,01472
100	0,00030	0,000320	0,00776
200	0,000090	0,000125	0,00390
500	0,000014	0,0000236	0,001567
1000	0,0000036	0,0000060	0,000784
2000	0,00000.9	0,0000019	0,000392

28.3. ФЕРРОМАГНЕТИКИ, ИМЕЮЩИЕ ВАЖНОЕ ЗНАЧЕНИЕ В ТЕХНИКЕ

Магнитомягкие материалы

Сталь электротехническая нелегированная. *Нелегированной электротехнической сталью* называют стальные железа, содержащие менее 0,1% углерода и минимальное количество марганца, кремния и других примесей (табл. 28.25—28.27, рис. 28.68).

Наименование «железо» условно дано низкоуглеродистой стали, полученной с применением электродитического, карбонильного процессов или каким-нибудь способом восстановления наиболее чистых руд.

Таблица 28.25

Химический состав железа [16]

Изделие	Химический состав, % (не более)					
	C	Si	Mn	S	P	Cu
Кипящая низкоуглеродистая электротехническая сталь («Армко»)	0,025	0,05	0,085	0,025	0,015	0,08
Электролитическое железо	0,004	0,004	0,002	0,004	0,003	—
Карбонильное железо	0,01	0,01	0,01	0,005	0,005	—

Таблица 28.26

Магнитные свойства железа [6,16]

Название	H_c, э	μ_0	μ_{max}	B_s, гс
Низкоуглеродистая сталь с минимальным содержанием примесей	0,01	—	350 000	—
Электролитическое железо (после переплавки в вакууме и последующего отжига)	0,36	600	15 000	1600
Карбонильное железо	0,09	2000—3000	20 000—21 500	5000—6000

Таблица 28.27

Магнитные свойства электротехнической нелегированной стали (ГОСТ 3836—73)*

Марка**	H_c, э (не более)	μ_{max} (не менее)
10 895 20 895	1,2	3000
10 880 20 880	1,0	4000
10 864 20 864	0,8	4600
10 848 20 848	0,6	4800
20 832	0,4	5000

* Химический состав: C с 0,04%; Si с 0,3%; Mn с 0,3%.

** B_s, кгс, при напряженности (в ампере, а/м) не менее: B_{800} — 13,5; B_{1000} — 15,0; B_{2000} — 16,2; B_{4000} — 17,1; B_{10000} — 18,1; B_{20000} — 19,2.

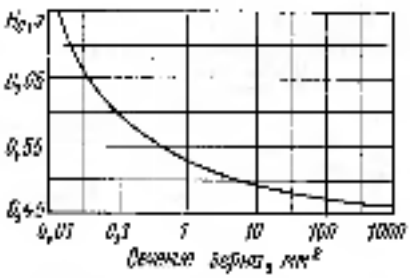


Рис. 28.66. Влияние размера зерна на коэрцитивную силу стали с содержанием углерода 0,02% [16]

Сплавы железа с кремнием. Листовая электротехническая сталь. Сплавы железа, содержащие от 0,8 до 5,00% кремния, изготовляются в виде листов и лент различных толщин при изготовлении листовой и ленточной электротехнической стали. В СССР в соответствии с ГОСТ 802—58 изготавливаются шесть групп этой стали, отличающихся содержанием кремния и методом изготовления (табл. 28.28).

По степени легирования кремнием, легирующим и электрическим свойствам листовая электротехническая сталь подразделяется на марки. Буквы и цифры в марках условно означают: Э — электротехническая сталь; первая цифра после буквы Э (1, 2, 3, 4) — степень легирования стали кремнием: 1 — слаболегированная сталь, 2 — среднелегированная сталь, 3 — повышенно-легированная сталь, 4 — высоколегированная сталь; вторая цифра (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) — гарантированные электрические и магнитные свойства стали: 1, 2, 3 — удельные потери при перемагничивании стали с частотой 50 гц и магнитная индукция в сильных полях (1 — с нормальными удельными потерями, 2 — с пониженными, 3 — с низкими), буква А после цифры обозначает особо низкие удельные потери, 4 — удельные потери при перемагничивании стали с частотой 400 гц и магнитная индукция в средних полях, 5, 6 — магнитная проницаемость в слабых полях — от 0,002 до 0,008 а/см (5 — с нормальной магнитной проницаемостью, 6 — с повышенной), 7,8 — магнитная проницаемость в средних полях от 0,03 до 10 а/см (7 — с нормальной магнитной проницаемостью, 8 — с повышенной);

третья цифра (0) обозначает, что сталь холоднокатаная текстурованная;

третья и четвертая цифры (00) обозначают, что сталь холоднокатаная и малотекстурованная.

Указанные выше обозначения марок относятся к стали нормальной точности проката и нормальной отделки поверхности.

Для стали повышенной точности проката и повышенной отделки поверхности в обозначение марки вводится в конце буква П.

Электротехническая листовая сталь, изготовляемая отечественной промышленностью, согласно ГОСТ 802—58, должна обладать магнитными свойствами, указанными в табл. 28.29—28.32.

Условные индексы: $B_{2,0/50}$; $B_{0,1/50}$; $B_{0,2/50}$; $B_{0,4/50}$; $B_{0,8/50}$; $B_{0,8/5}$; $B_{0,8/8}$; $B_{0,8/10}$; $B_{0,8/15}$; B_1; B_2; B_5; B_{10}; B_{20}; B_{50}; B_{100}; B_{200} — обозначают магнитную индукцию в кгс на основной коммутационной кривой намагничивания при напряженности магнитного поля в амперах на 1 см (а/см), равной соответствующей цифре при букве В (0,002, 0,004 и т. д.);

$P_{10/50}$, $P_{15/50}$, $P_{17/50}$ обозначают полные удельные потери в ваттах на 1 кг стали (вт/кг) при перемагничивании ее с частотой 50 гц и максимальных значениях индукции — 10, 15, 17 кгс; $P_{7,5/400}$, $P_{10/400}$ — полные удельные потери в ваттах на 1 кг стали при перемагничивании ее с частотой 400 гц и максимальных значениях индукции 7,5 и 10 кгс соответственно, отнесенных к синусоидальному изменению индукции.

Потери на гистерезис за цикл определяются площадью петли:

$$W_h = \frac{1}{4\pi} \oint HdB = \oint HdI.$$

W_h выражается в *эрг/см³*, если B и H выражены соответственно в гауссах и эрстедах. Потери на гистерезис P измеряют также в *вт/кг*, относя их к определенной частоте переменного магнитного поля f. Связь между P в этих единицах и в *эрг/см³* за цикл имеет вид

Таблица 28.28

Содержание кремния в листовой электротехнической стали (ГОСТ 802—58)

Сталь	Содержание кремния, %
Слаболегированная:	
а) горячекатаная	0,8—1,8
б) холоднокатаная	1,0—1,8
Среднелегированная	1,8—2,8
Повышенолегированная:	
а) горячекатаная	2,8—3,8
б) холоднокатаная	2,8—3,5
Высоколегированная	3,8—4,8

$$P\ (вт/кг) = \frac{10^{-4} \cdot W_h}{\delta},$$

где δ — плотность, г/см³.

Согласно ГОСТ 802—58, удельные потери стали после старения не должны превышать потерь, указанных в табл. 28.29 и 28.30, на следующие величины:

высоколегированная сталь	5%
средне- и повышенолегированная сталь	6%
слаболегированная сталь марок Э11, Э1100	7%
слаболегированная сталь марок Э12, Э13, Э1200, Э1300	9%

Таблица 28.29

Магнитная индукция и удельные потери при высокой напряженности поля и частоте 50 гц (ГОСТ 802—58)

Марка стали	Номинальная толщина, мм	Магнитная индукция (не менее), гс, при напряженности магнитного поля (а/см)					Удельные потери (не более), вт/кг, при индукции и частоте (гс/гц)		
		H_{50}	B_{50}	B_{75}	B_{100}	B_{150}	$P_{10/50}$	$P_{15/50}$	$P_{17/50}$
Горячекатаная сталь									
Э11	1,0	—	15,3	16,3	17,6	20,0	5,6	13,4	—
Э12	1,0	—	15,0	16,2	17,5	19,6	5,5	12,0	—
Э11	0,5		15,3	16,4	17,6	20,0	3,3	7,7	—
Э12	0,5	—	15,0	16,2	17,5	19,6	3,2	7,0	—
Э13	0,5		15,0	16,2	17,5	19,6	2,8	6,5	—
Э21	0,5	—	14,8	15,9	17,3	19,5	2,5	6,1	—
Э22	0,5	—	14,8	15,9	17,3	19,5	2,2	5,3	—
Э31	0,5	—	14,6	15,7	17,2	19,4	2,0	4,4	—
Э32	0,5	—	14,6	15,7	17,1	19,2	1,8	3,9	—
Э31	0,35	—	14,0	15,7	17,1	19,2	1,6	3,6	—
Э32	0,35	—	14,6	15,7	17,1	19,2	1,4	3,2	—
Э41	0,5	13,0	14,0	15,7	17,0	19,0	1,55	3,5	—
Э42	0,5	12,9	14,5	15,6	16,9	18,9	1,4	3,1	—
Э43	0,5	12,9	14,4	15,5	16,9	18,9	1,25	2,9	—
Э43А	0,5	12,9	14,4	15,5	16,9	18,9	1,15	2,7	—
Э41	0,35	13,0	14,0	15,7	17,0	19,0	1,35	3,0	—
Э42	0,35	12,9	14,5	15,6	16,9	18,9	1,2	2,8	—
Э43	0,35	12,9	14,4	15,5	16,9	18,9	1,05	2,5	—
Э43А	0,35	12,9	14,4	15,5	16,9	18,9	0,9	2,2	—

Продолжение табл. 28.29

Марка стали	Номинальная толщина, мм	Магнитная индукция (не менее), гс, при напряженности магнитного поля (а/см)					Удельные потери (не более), вт/кг, при индукции и частоте (гс/гц)		
		H_{50}	B_{50}	B_{75}	B_{100}	B_{150}	$P_{10/50}$	$P_{15/50}$	$P_{17/50}$
Холоднокатаная малотекстурованная сталь									
Э1100	0,5		16,3	16,4	17,6	20,0	3,3	7,6	—
Э1200	0,5	—	15,3	16,4	17,6	20,0	2,8	6,5	—
Э1300	0,5		15,5	16,4	17,6	20,0	2,5	5,8	—
Э3100	0,5	—	15,0	16,0	17,3	19,6	1,7	3,7	—
Э3200	0,5	—	14,8	16,8	17,2	19,5	1,5	3,4	—
Холоднокатаная текстурованная сталь									
Э310	0,50	16,0	17,5	18,3	19,1	19,8	1,1	2,45	3,2
Э320	0,50	16,5	18,0	18,7	19,2	20,0	0,95	2,1	2,8
Э330	0,50	17,0	18,5	19,0	19,5	20,0	0,8	1,75	2,5
Э310	0,35	16,0	17,5	18,3	19,1	19,8	0,8	1,70	2,5
Э320	0,35	16,5	18,0	18,7	19,2	20,0	0,7	1,5	2,2
Э330	0,35	17,0	18,5	19,0	19,5	20,0	0,6	1,3	1,9
Э330А	0,35	17,0	18,5	19,0	19,5	20,0	0,5	1,1	1,6

Примечания. 1. Сталь из горячекатаной и холоднокатаной малотекстурованной стали указана для проб, не подвергавшихся полному отжигу. Сталь из текстурованной холоднокатаной стали указана для проб, подвергнутых полному отжигу для снятия напряжений.

2. Для малотекстурованной холоднокатаной стали допуск в значениях магнитной индукции B_h, проверяемых в поперечном листе не должен превышать для марок Э1100, Э1200, Э1300—1,20 гс, а для марок Э3100, Э3200—1,0 гс.

Таблица 28.30

Магнитная индукция и удельные потери при частоте 400 гц (ГОСТ 802—58)

Марка стали	Толщина листа, мм	Магнитная индукция, гс (не менее)			Удельные потери (не более)	
		B_8	B_{10}	B_{25}	$P_{7,5/400}$	$P_{10/400}$
Э44	0,35	12,1	13,0	14,4	10,7	19,0
Э44	0,20	12,0	12,9	14,2	7,2	12,5
Э44	0,10	11,9	12,8	14,0	6,0	10,5
Э340	0,20	15,0	16,0	17,0	7,0	12,0

Таблица 28.31

Магнитная индукция листовой электротехнической стали при малой напряженности магнитного поля (ГОСТ 802—58)

Марка стали	Толщина листа, мм	Магнитная индукция, гс (не менее) при напряженности магнитного поля (а/см)		
		$B_{0,002}$	$B_{0,005}$	$B_{0,010}$
Э46	0,35	1,2	2,6	7,7
Э46	0,35	1,5	3,3	8,8
Э46	0,20	1,3	2,8	7,0
Э46	0,20	1,6	3,5	8,8

Таблица 28.32

Магнитная индукция при средней напряженности поля (ГОСТ 802—58)

Марка стали	Толщина листа, мм	Магнитная индукция, кгс (по номер), при напряженности поля (а/см)										
		$B_{0,01}$	$B_{0,05}$	$B_{0,1}$	$B_{0,2}$	$B_{0,3}$	$B_{0,5}$	B_1	B_2	B_3	B_5	B_{10}
347	0,35	—	—	0,35	1,4	4,6	6,1	7,7	9,2	12,1	13,0	
348	0,35	—	—	0,45	1,7	5,7	7,1	8,7	10,2	12,0	13,0	
347	0,20	—	—	0,3	1,0	3,8	5,8	6,6	9,0	11,8	12,9	
348	0,20	—	—	0,4	1,4	4,8	6,2	7,4	9,2	12,0	12,9	
3370	0,50	0,14	0,4	2,5	8,0	12,0	13,0	14,5	15,5	16,5	17,0	
3380	0,50	0,2	0,55	4,2	10,2	13,8	14,7	16,2	16,8	16,7	17,0	
3370	0,35	0,12	0,25	2,0	7,0	11,0	12,0	13,5	14,5	16,0	17,0	
3380	0,35	0,18	0,45	4,0	10,0	13,6	14,6	16,0	16,5	16,5	17,0	
3370	0,20	0,1	0,2	1,4	5,0	9,0	10,4	11,6	14,2	15,7	16,7	
3380	0,20	0,18	0,45	2,0	7,0	11,0	12,0	13,6	14,5	16,0	17,0	

Магнитные характеристики сталей различных марок (рис. 28.69—28.72)

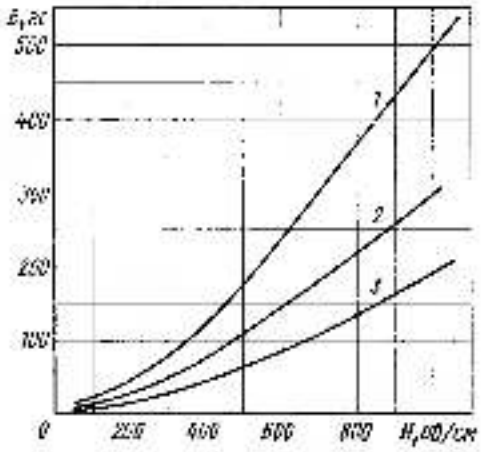


Рис. 28.69. Кривые намагничивания стали некоторых марок при постоянном токе:
1 — 34Н (ВП-2); 2 — 3Ф2(3ПА); 3 — 5ЭЛ (ЭА) [10]

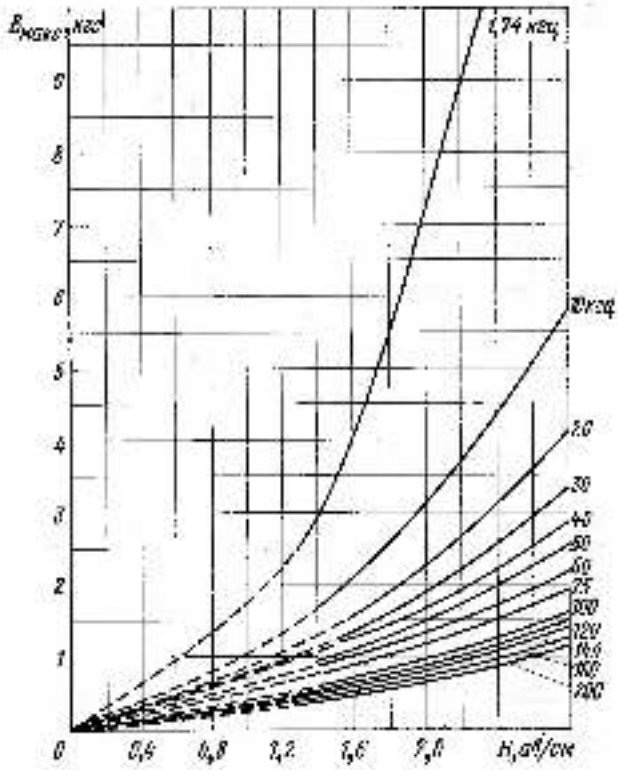
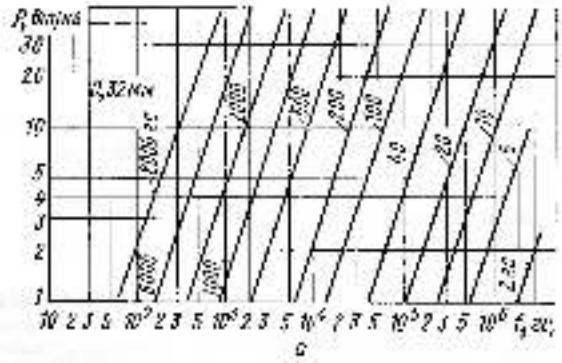


Рис. 28.70. Кривые намагничивания трансформаторной стали с содержанием 4% Si при частотах до 200 гц [16]

Для повышенных и высоких частот разработана и освоена горячекатаная тонкостенная сталь марки ВПТ (высокая проницаемость, тонкая). Эта сталь (не попадает в ГОСТ) изготовляется толщиной 0,1—0,2 мм. При частоте 50 гц сталь ВПТ имеет потери P_{10} — 1,0 вт/кг, P_{15} — 2,5 вт/кг, а при частоте 400 гц: P_{10} — —0,5 вт/кг (рис. 28.73).

Магнитные свойства стали ВПТ в слабых полях показаны на рис. 28.73, 28.74.

На рис. 28.75 показано влияние углерода и кремния на гистерезисные потери электротехнической стали. При содержании в стали 5—6% кремния, углерода в



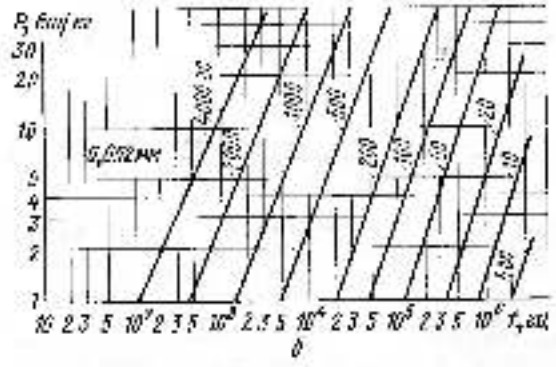


Рис. 28.71. Потери в трансформаторной стали толщиной листа 0,32 (а) и 0,052 мм (б) при различных частотах и индукциях [16]

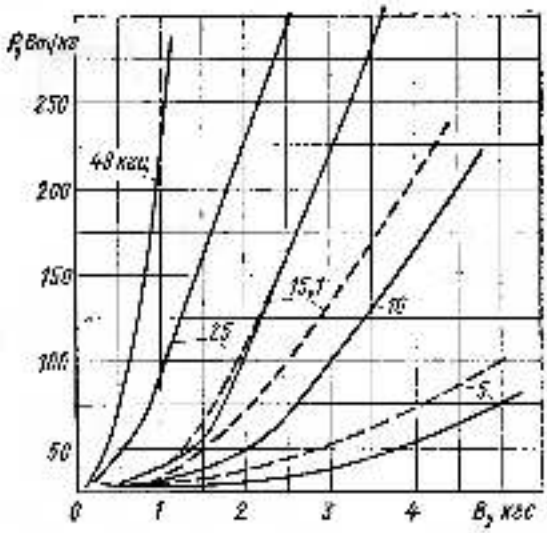


Рис. 28.72. Потери в трансформаторной стали толщиной листа 0,35 мм при различных частотах: изменение потерь на гистерезис (пунктирные линии) и вихревые токи (сплошные линии) [16]

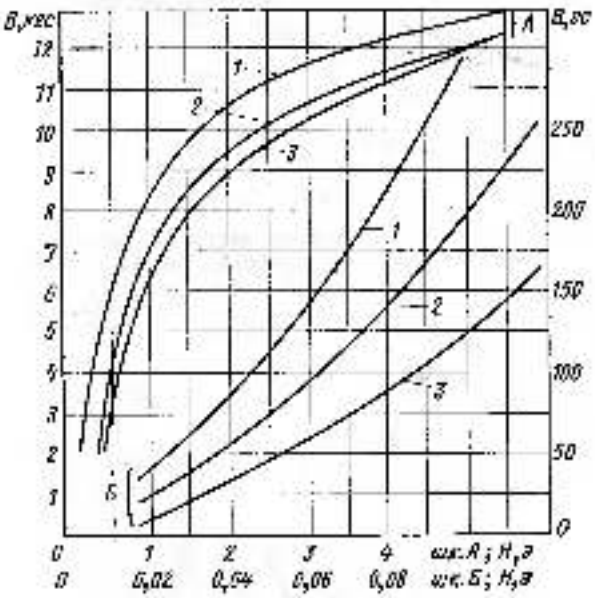


Рис. 28.73. Магнитные свойства стали ВПТ в слабых полях [10]:

1 — толщина 0,2 мм после термокомпенсационного отжига; 2 — толщина 0,1 мм после обычного отжига; 3 — толщина 0,2 мм после обычного отжига. Содержание Si=4,1÷4,0%

виде карбидов останется всего около 0,008% и он уже не оказывает существенного влияния.

Другие примеси в электротехнической стали оказывают меньшее влияние на ее магнитные свойства, чем углерод (рис. 28.70).

Альсиферы. Сплавы железа с более высоким содержанием кремния (до 10%) и сплавы, легированные алюминием (до 7%), выпускают в виде литых магнитных

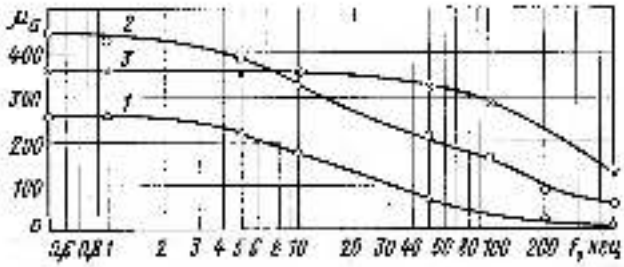


Рис. 28.74. Зависимость начальной магнитной проницаемости стали марок 341 и ВПТ в поле H = 0,01 э от частоты [16]:

1 — 341 толщиной листа 0,35 мм; 2 — ВПТ толщиной листа 0,1 мм; 3 — ВПТ толщиной листа 0,35 мм

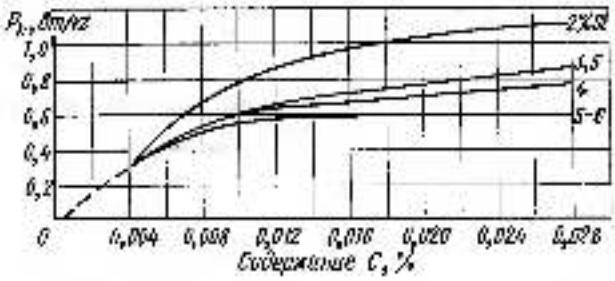


Рис. 28.75. Гистерезисные потери в электротехнической стали в зависимости от содержания углерода и кремния [16]

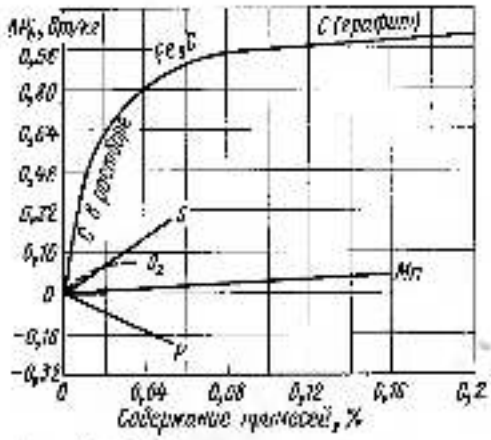


Рис. 28.76. Влияние примесей на гистерезисные потери электротехнической стали с 4% кремния при B = 10 кгс. На оси ординат отложено приращение потерь по сравнению с потерями в электротехнической стали, содержащей только 4% Si [16]

элементов или в виде порошков. Эти сплавы называют *альсиферами*. Альсиферы представляют собой твердые растворы алюминия, кремния и железа; обладают большой твердостью (твердость по шкале Роквелла 45—50) и большой хрупкостью.

Из приведенной диаграммы на рис. 28.77 видно, что наиболее высокое значение магнитной проницаемости альсифер имеет в очень узком интервале содержания в сплаве кремния и алюминия. Сплав оптимального состава содержит 9,6% кремния и 5,4% алюминия.

Таблица 28.33

Магнитные свойства альсифера оптимального состава [16]

λ_s	ρ_{max}	$P_{гр}$, вт/кг	B_r, гс	H_c, э	$4\pi J_s$, гс
35 100	117 000	0,022	3,35	0,022	11

(Магнитострикция и константа анизотропии сплавов железо — кремний — алюминий при оптимальном составе близки к нулю.)

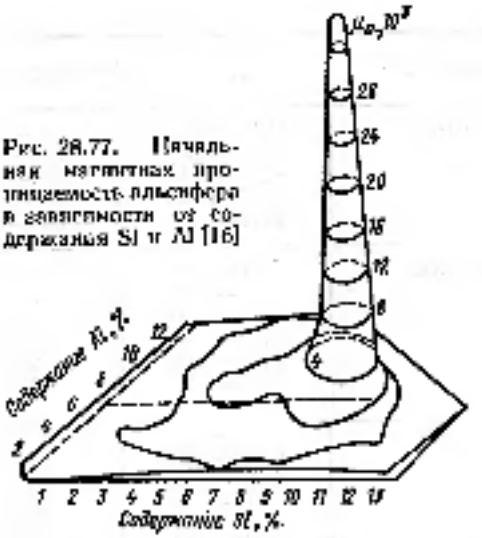


Рис. 28.77. Начальная магнитная проницаемость альсифера в зависимости от содержания Si и Al [16]

Железоникелевые сплавы с высокой магнитной проницаемостью. Химический состав и магнитные свойства железоникелевых сплавов

Таблица 28.34а

Химический состав и точка Кюри железоникелевых сплавов (ГОСТ 10160—62, ГОСТ 10994—74)

Марка сплава	Содержание, % (остальное — железо)							
	Ni	Si	C	Mo	Mn	Co	Cu	θ_p, °C
45Н	45,0—46,5	0,15—0,30	—	—	0,00—1,10	—	—	440
50Н	49,0—50,5	0,15—0,30	—	—	0,30—0,60	—	—	500
50НП	49,0—50,5	0,15—0,30	—	—	0,30—0,60	—	—	500
65НП	64,5—66,0	0,15—0,30	—	—	0,30—0,60	—	—	600
34НКМП	33,5—35,0	0,15—0,30		2,80—3,20	0,30—0,60	26,5—30,0	—	—
50НХС	49,5—51,0	1,10—1,40	2,80—4,20	—	0,60—1,10	—	—	300
79НМ	78,5—80,0	0,30—0,50		3,8—4,1	0,60—1,10	—	—	450
80НХС	79,0—81,0	1,10—1,50	2,60—3,00	—	0,60—1,10	—	—	330
76НХД	75,0—76,5	0,15—0,30	1,80—2,20	—	0,30—0,60	—	4,60—5,20	430

Таблица 28.34б

Магнитные свойства железоникелевых сплавов с высокой начальной проницаемостью (ГОСТ 10160—62)

Марка сплава	Толщина листа, мм	μ_0 (не менее)	ρ_{max} (не менее)	H_c, э (не более)	B_r, гс (не менее)
45П	0,35—2,50	2 800	25 000	0,20	16
	0,20—0,30	2 500	23 000	0,25	
	0,10—0,18	2 000	20 000	0,30	
	0,05—0,08	1 800	18 000	0,30	
	0,02—0,04	1 700	16 000	0,40	
50П	1,1—2,5	2800	25 000	0,16	15
	0,65—1,00	3000	30 000	0,15	
	0,35—0,50	3000	35 000	0,12	
	0,20—0,30	2000	30 000	0,15	
	0,10—0,18	2300	25 000	0,20	
	0,05—0,08	2000	20 000	0,25	
	0,02—0,04	1800	20 000	0,30	
50НП*	0,05	500—1000	35 000	0,23	15 $B_r/B_s \geq 85\%$ $H = 10$ э
	0,02	600—1000	35 000	0,25	

Марка сплава	Толщина ленты, мм	μ_a (не менее)	μ_{max} (не менее)	H_c, э (не более)	B_s, кс (не менее)
65НП*	0,35—0,50	500—2000	300 000	0,03	13 $B_r/B_s \geq 90\%$ при H — 10 э
	0,20—0,30	500—2000	250 000	0,03	
	0,10—0,18	500—2000	200 000	0,035	
	0,05—0,08	500—2000	100 000	0,04	
	0,02—0,01	300—1500	70 000	0,08	
50НХС	0,65—1,0	3000	20 000	0,12	10
	0,35—0,50	3200	30 000	0,10	
	0,20—0,30	3000	29 000	0,12	
	0,10—0,18	2500	25 000	0,10	
	0,05—0,08	2000	20 000	0,20	
	0,02—0,04	1500	15 000	0,25	
79НМ	1,1—2,5	22 000	130 000	0,02	7,5
	0,35—1,00	25 000	150 000	0,02	
	0,20—0,30	22 000	130 000	0,02	
	0,10—0,18	20 000	120 000	0,03	
	0,05—0,08	16 000	90 000	0,04	
	0,02—0,04	10 000	70 000	0,05	
80НХС	1,10—2,50	25 000	150 000	0,010	6,5
	0,55—1,0	20 000	170 000	0,012	
	0,35—0,50	35 000	150 000	0,015	
	0,20—0,30	28 000	130 000	0,02	
	0,10—0,18	22 000	120 000	0,03	
	0,05—0,08	20 000	50 000	0,04	
	0,02—0,04	18 000	70 000	0,05	

* Производится факультативно.

На рис. 28.78 и 28.79 представлены кривые намагничивания для сплавов тех же марок.

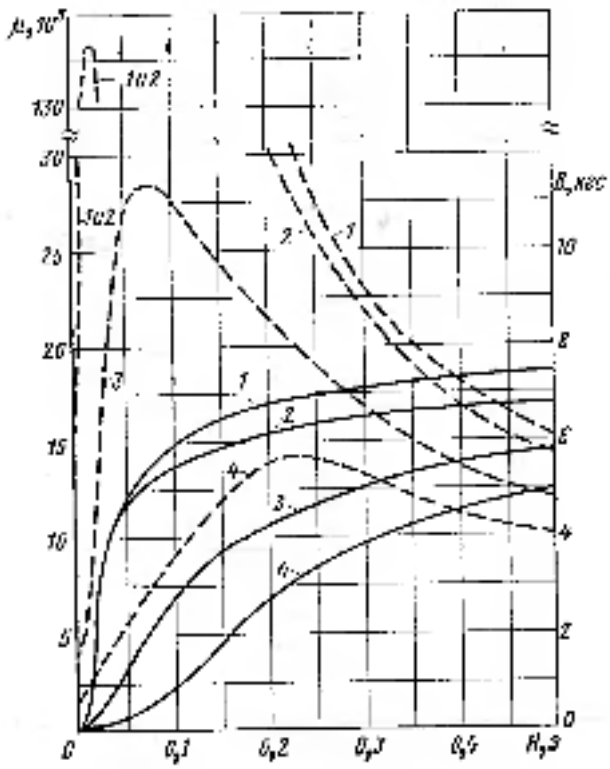


Рис. 28.78. Кривые намагничивания (сплошные) и магнитной проницаемости (пунктирные) в слабых полях для промышленных сплавов Fe — Ni в лентах различной толщины [16]:

1 — сплав 79НМ; 2 — сплав 50НХС; 3 — сплав 80НХС при l = 7,5 толщина ленты от 0,35 до 0,1 мм; 4 — сплав 80НХС, толщина ленты 0,02 мм; 5 — сплав 50Н

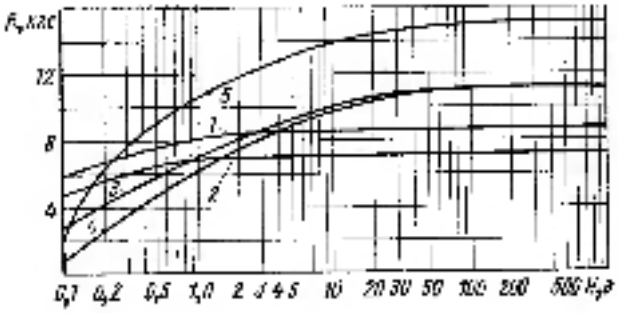


Рис. 28.79. Кривые намагничивания промышленных сплавов Fe — Ni в сильных полях [16]:

1 — сплав 79НМ; 2 — сплав 50НХС; 3 — сплав 80НХС при l = 7,5 толщина ленты от 0,35 до 0,1 мм; 4 — сплав 80НХС, толщина ленты 0,02 мм; 5 — сплав 50Н

Свойства промышленных железоникелевых сплавов в переменных полях

Зависимость эффективной проницаемости и тангенса угла потерь на вихревые токи ферромагнитного материала от частоты при напряженности поля H_a, близкой к нулю, обычно учитывается следующими уравнениями:

$$\mu_{f_{\sim 0}} = \frac{\mu_a}{p}\,\frac{\operatorname{sh} p + \sin p}{\operatorname{ch} p + \cos p} \qquad (28.14)$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\operatorname{sh} p - \sin p}{\operatorname{sh} p + \sin p}, \qquad (28.15)$$

где $p = 2\pi d\sqrt{\mu_a f/\rho \cdot 10^9}$; d — толщина пластин сердечника, *см*; μ_a — начальная проницаемость; f — частота, *гц*; ρ — удельное сопротивление материала сердечника, *ом·см*.

Выражения (28.14) и (28.15) относятся к материалу с однородной структурой и не учитывают влияния потерь на последействие. Поэтому $\mu_{f_{\sim 0}}$ и $\operatorname{tg}\delta$, вычисленные по формулам (28.14) и (28.15) при значениях $p \gg 1$, существенно отличаются от наблюдаемых на практике (рис. 28.80—28.83).

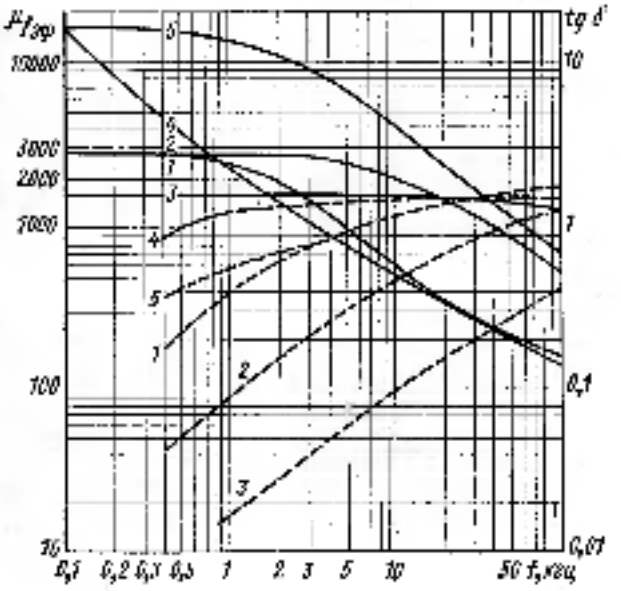


Рис. 28.80. Зависимость эффективной магнитной проницаемости (сплошные линии) и тангенса угла потерь (пунктирные) от частоты при напряженности переменного поля, близкой к нулю [16]:

1 — сплав 50НХС, толщина ленты 0,35 *мм*; 2 — сплав 50НХС, толщина ленты 0,1 *мм*; 3 — сплав 50НХС, толщина ленты 0,05 *мм*; 4 — сплав 79НМ, толщина ленты 0,10 *мм*; 5 — сплав 79НМ, толщина ленты 0,10 *мм*

Наиболее резкое падение обратимой магнитной проницаемости при низкой частоте наблюдается для сплава 79НМ — 0,10 *мм*; при частотах порядка 10 *кгц* и выше размагничивающее действие вихревых токов приводит к менее резкому изменению μ_f при изменении напряженности поля, причем различие между сплавами 79НМ и 50НХС становится незначительным.

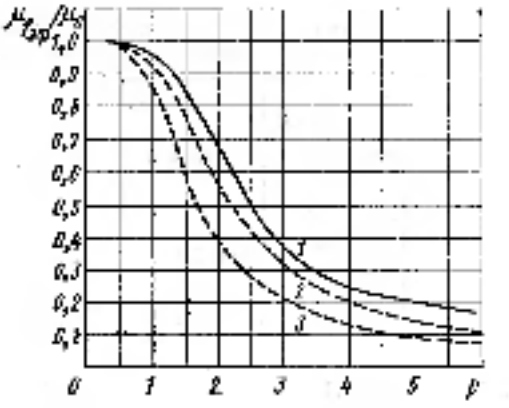


Рис. 28.81. Зависимость относительной магнитной проницаемости $\mu_{f_{\sim 0}}/\mu_a$ от параметра p при напряженности магнитного поля H_a, близкой к нулю [см. формулы (28.14) и (28.15)] [16]:

1 — расчетная кривая. Экспериментальные кривые: 2 — для сплавов 50НХС с толщиной ленты 0,35 *мм* и 79НМ 0,10 *мм*; 3 — для сплавов 50НХС — 0,10 и 0,05 *мм* и 79НМ — 0,35 *мм*

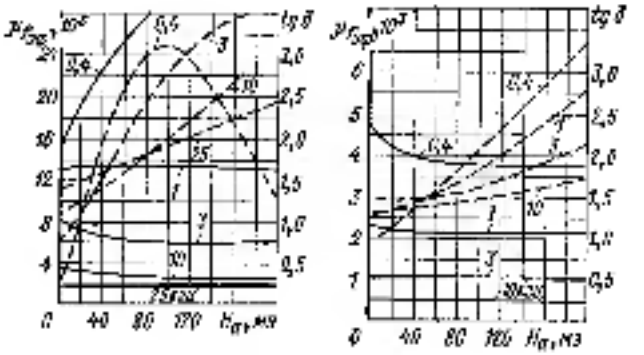


Рис. 28.82. Зависимость эффективной магнитной проницаемости (сплошные линии) и тангенса угла потерь (пунктирные) от напряженности переменного поля для сплава 79НМ в лентах толщиной 0,10 и 0,35 *мм* при различных частотах [16]

Листовые железоникелевые сплавы в большинстве случаев применяются не в виде торoидов, а в виде Ш-образных сердечников. При сборке сердечников из Ш-образных пластин с прорезкой среднего языка приблизительно на 0,5—1 *мм* полностью и при толщине изоляционного слоя на пластинах порядка 5—7 *мкм* характеристики Ш-образных сердечников на частотах выше 500—1000 *гц* можно считать идентичными приведенным выше характеристикам торoидальных сердечников (см. рис. 28.80, 28.82—28.84).

При сборке Ш-образных сердечников с зазором эффективная магнитная проницаемость их резко падает, одновременно уменьшаются эффективное значение тангенса угла потерь, его зависимость от напряженности поля и влияние подмагничивающего поля на обратимую магнитную проницаемость.

Таблица 28.35

Эффективная магнитная проницаемость и тангенс угла потерь для Ш-образных сердечников с зазором, собранных из пластин сплавов 79НМ и 50НХС [16]

Марка сплава	Толщина пластины, мм	Тип пластины	Зазор, мм	$\mu_{н}$	Частота, кгц	$\mu_{f_{эф}}$ при H_{0}, э		$\operatorname{tg}\delta_{эф}$ при H_{0}, э		μ_{r} при $H_{0}=0$ э
						0	0,1	0	0,1	
79НМ	0,35	ШП-20	0,5	470	1	470	—	—	—	—
					10	370	380	0,29	0,30	290
					100	180	180	0,59	0,61	170
50НХС	0,35	ШП-20	0,5	400	1	450	—	—	—	—
					10	330	340	0,25	0,26	320
					100	160	190	0,39	0,42	158
50НХС	0,1	ТПП-20	0,6	450	1	450	—	—	—	—
					10	400	400	0,07	0,10	420
					100	330	340	0,38	0,39	320

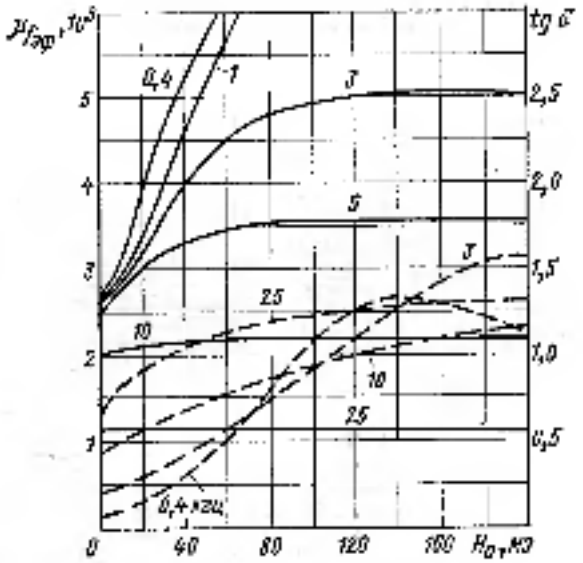


Рис. 28.83. Зависимость эффективной магнитной проницаемости (сплошные линии) и тангенса угла потерь (пунктирные) от напряженности переменного поля для сплава 50НХС в лентах толщиной 0,10 мм [16]

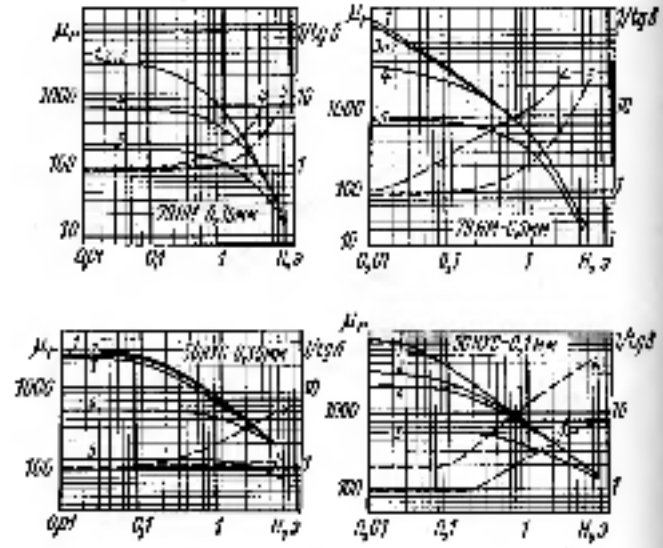


Рис. 28.84. Зависимость обратимой проницаемости (сплошные линии) и 1/tg δ (пунктирные) для сплавов 79НМ и 50НХС в лентах толщиной 0,35 и 0,1 мм от напряженности подмагничивающего поля [16]:

1 — f = 1 кгц, H_a = 100 мэ; 2 — f = 1 кгц, H_a = 50 мэ; 3 — f = 1 кгц, H_a = 5 мэ; 4 — f = 10 кгц, H_a = 5 мэ; 5 — f = 100 кгц, H_a = 5 мэ

Магнитомягкие металлы и сплавы со специальными магнитными свойствами

К магнитомягким металлам и сплавам со специальными магнитными свойствами относят: а) железокобальтовые сплавы, обладающие высокой индукцией насыщения (рис. 28.85, 28.86); б) железоникелькобальтовые сплавы, особенностью которых является постоянство магнитной проницаемости в поле до 1—2 э; в) термомагнитные сплавы с резко изменяющейся проницаемостью в зависимости от температуры; г) так называемые магнитострикционные металлы и сплавы.

Сплавы железа с кобальтом с высокой индукцией насыщения.

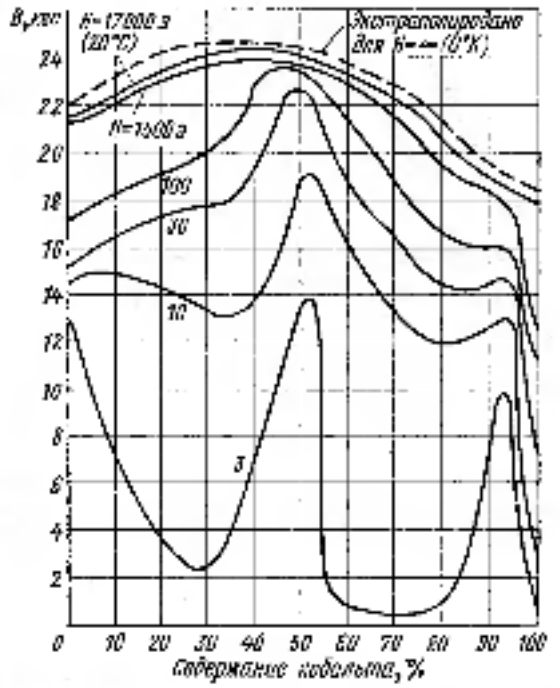


Рис. 28.85. Магнитная индукция сплавов Fe — Co в зависимости от содержания Co и напряженности поля [16]

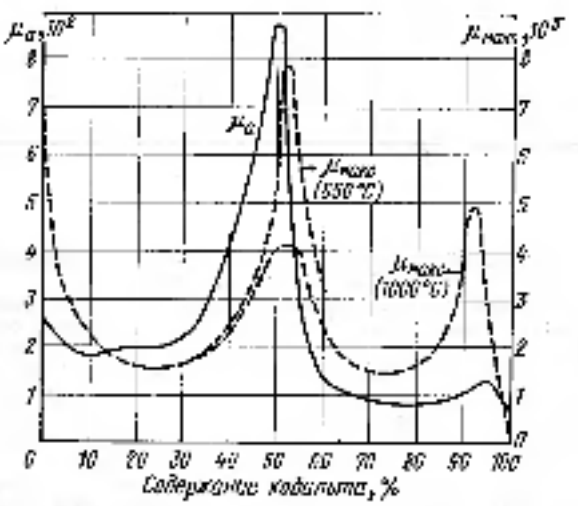


Рис. 28.86. Начальная и максимальная магнитные проницаемости сплавов Fe — Co в зависимости от содержания кобальта и температуры отжига [16]

Пермендюр — железокобальтовый сплав, легированный 2% ванадия (рис. 28.87 и 28.88).

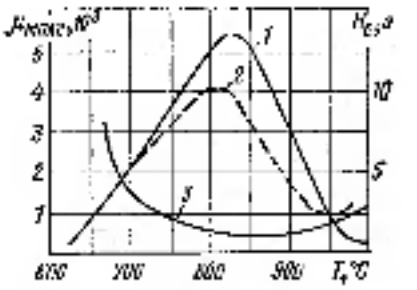


Рис. 28.87. Влияние температуры отжига на магнитные свойства пермендюра с 2% V [16]:

1 — максимальная магнитная проницаемость после быстрого охлаждения; 2 — максимальная магнитная проницаемость после медленного охлаждения; 3 — коэрцитивная сила после быстрого охлаждения

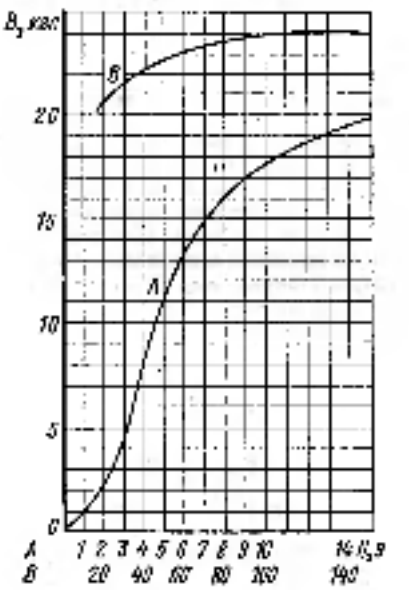


Рис. 28.88. Кривая намагничивания пермендюра с 1,8% V [16]

Сплавы с повышенным постоянством магнитной проницаемости в слабых полях. Сталь электротехническая. На рис. 24.89 представлено изменение начальной магнитной проницаемости электротехнической стали с содержанием 3,25% кремния в зависимости от температуры отжига и напряженности поля.

Высоким постоянством μ_a в слабых полях обладают некоторые сплавы системы железо — никель — кобальт, получившие название *перминдюр*. Содержание основных элементов в перминдюре может варьироваться в широких пределах, но обычно он содержит 30% Fe, 45% Ni и 25% Co (перминдюр 45—25). Данные по магнитным свойствам сплавов типа перминдюр приведены на рис. 28.90 — 28.94 и в табл. 28.30. (См. также ГОСТ 10994—74).

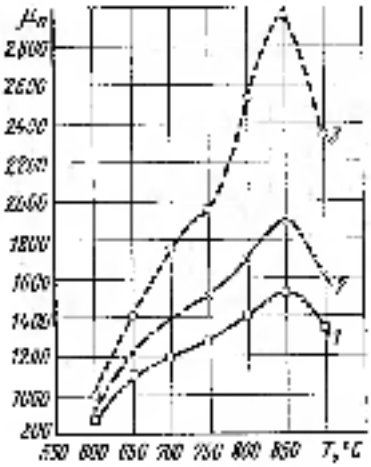


Рис. 28.89. Магнитная проницаемость электротехнической стали с содержанием 3,25% Si в зависимости от температуры отжига [16]: 1 — при напряженности поля 0,01 *ав*; 2 — то же при 20 *ав*; 3 — то же при 100 *ав*

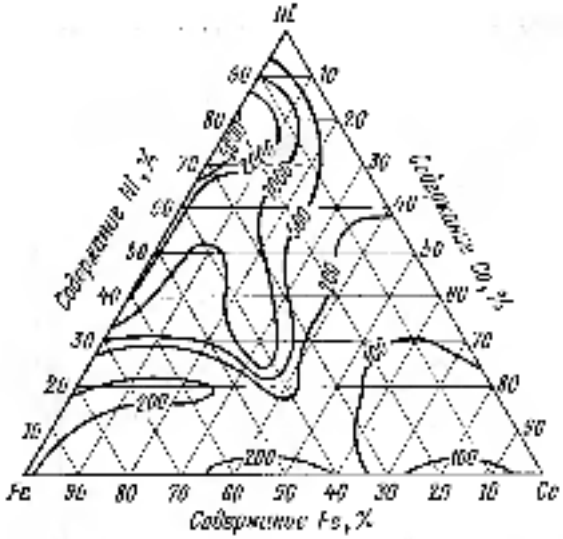


Рис. 28.91. Начальная магнитная проницаемость сплавов Fe — Ni — Co после отжига при 1000° С, охлаждении с печью до 600° С, а затем на воздухе [16]

После низкотемпературного длительного отжига перминдюра 45—25 увеличение напряженности поля от 0 до 2 *а* приводит к изменению его магнитной проницаемости примерно на 1%. Потери на гистерезис для индукции 100 *гс* составляют около $8 \cdot 10^{-4}$ *дж/см³* [16].

Чрезвычайно эффективна термическая обработка перминдюра в магнитном поле. Она значительно повышает магнитную проницаемость сплава и несколько снижает его коэрцитивную силу (рис. 28.94). Магнитное поле оказывает эффективное действие на перминдюр только при охлаждении сплава от 800 до 400°С.

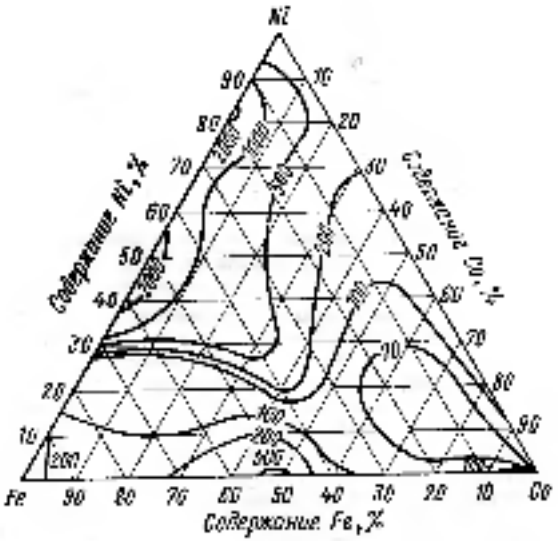


Рис. 28.90. Начальная магнитная проницаемость сплавов Fe — Ni — Co после отжига при 1000° С с медленным охлаждением [16]

Таблица 28.36

Максимальная магнитная проницаемость сплавов типа перминдюр [16]

Химический состав, %			μ_{max}		T_{max}, °С
Fe	Co	Ni	Отжиг при 1000°С, охлаждение с печью	Закалка на воздухе	
30	15	55	2800	12 400	700
30	20	50	2400	19 500	725
25	20	55	2500	18 200	720
30	25	45	2000	25 000	725
35	20	45	4200	22 300	700
35	25	40	2400	25 900	715
35	30	35	2000	13 800	725

Термомагнитные сплавы. Основными критериями практической ценности термомагнитного сплава, считают: 1) магнитную индукцию; 2) обратимость и прямолинейность зависимости магнитных свойств от температуры в диапазоне от +50 до —70° С; 3) стабильность структуры сплава при воздействии отрицательных температур; 4) малую изменяемость магнитных свойств от колебаний химического состава.

К термомагнитным сплавам относятся, например, некоторые марки монель-металла. В табл. 28.37 приведен химический состав монель-металла, изготовляемого в СССР согласно ГОСТ 492—73.

Таблица 28.37

Химический состав монель-металла, % (ГОСТ 492—78*)

Марка сплава	Fe	Mn	Cu	Ni+Co	Si	C
НМЖМц 28-2,5-1,5	2—3	1,2—1,8	27—29	Остальное	Не более 0,06	Не более 0,1

Примечания. Общее содержание примесей (Cu, Sn, Pb, S, P, As, Bi) должно быть не более 0,6%.

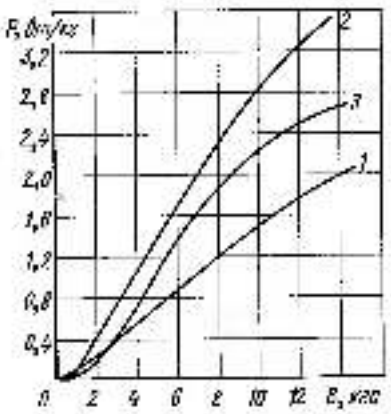


Рис. 28.92. Потери на гистерезис сплава 45-25 после термической обработки [16]:

1 — 1000° С, медленное охлаждение до 600° С, быстрое с 600° С; 2 — 1000° С, медленное охлаждение до 450° С; 3 — 1000° С, медленное охлаждение до нормальной температуры

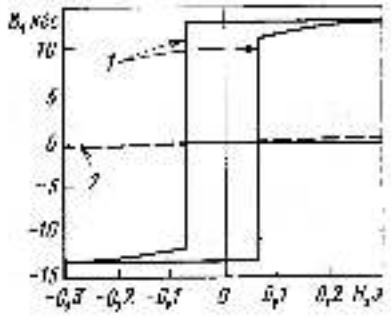


Рис. 28.94. Петля гистерезиса пермаллоя 45-25 после термической обработки в магнитном поле [16].

1 — поле при измерении направлено параллельно магнитному полю при обработке; 2 — поле при измерении направлено перпендикулярно магнитному полю при обработке

Магнитотвердые материалы

Магнитотвердые сплавы мартенситного класса. Мартенсит представляет собой нестабильный твердый раствор углерода в α-железе с тетрагональной объемноцентрированной решеткой.

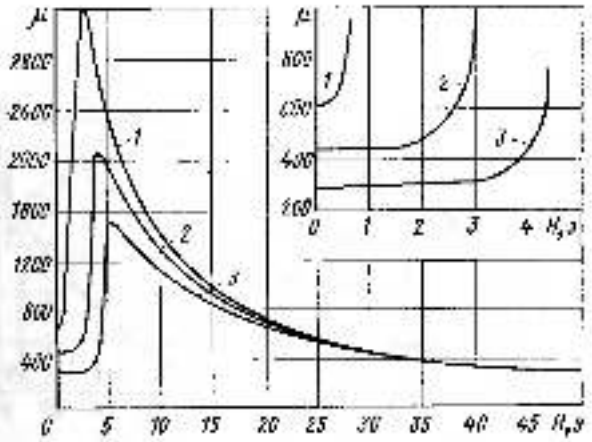


Рис. 28.93. Зависимость магнитной проницаемости пермаллоя 45-25 от термической обработки [16]:

1 — нормальная на воздухе; 2 — отпуск; 3 — изотермический (400—450° С) для сплавов отпуск

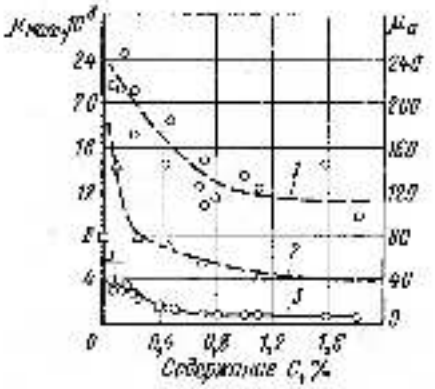


Рис. 28.95. Магнитная проницаемость углеродистой стали в зависимости от содержания углерода и характера термической обработки [16]:

1 — μ_0 после закалки; 2 — μ_a после закалки; 3 — μ_{max} после закалки

К магнитотвердым сплавам мартенситного класса относятся углеродистые стали, а также стали, легированные хромом, вольфрамом, кобальтом и молибденом, подвергающиеся закалке и прокатке при высоких температурах. Коэрцитивная сила этих сплавов составляет от 50 до 280 э; остаточная индукция — от 7 до 10 кгс и удельная энергия — от 10 000 до 40 000 *эрг/см³* [16].

Углеродистые стали. В настоящее время углеродистая сталь в качестве магнитотвердого материала находит ограниченное применение в промышленности. Магнитные свойства углеродистой стали находятся в зависимости от содержания в ней углерода и структурной формы расположения его в твердой фазе (рис. 28-95 и 28-96).

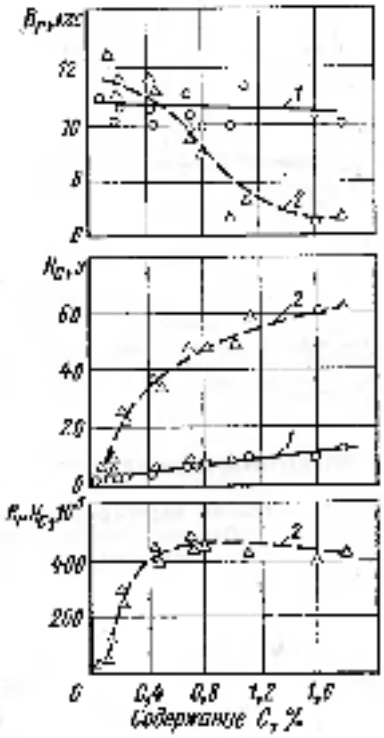


Рис. 28-96. Зависимость остаточной индукции (B_r), коэрцитивной силы (H_c) и $B_r \cdot H_c$ углеродистой стали от содержания углерода и термической обработки [16]:

1 — после отжига; 2 — после закалки.

Легированные стали. Марки легированной стали, применяемые для изготовления постоянных магнитов, определены в табл. 28-33 (см. также рис. 28-97, 28-98).

Вольфрамовая сталь имеет магнитные свойства, несколько лучшие, чем сталь, содержащая хром (рис. 28-99). Магнитные свойства вольфрамовой стали ухудшаются при нагревании в интервале температур 700—750° С и могут быть восстановлены нагреванием ее до 1200—1300° С с последующим ускоренным охлаждением на воздухе.

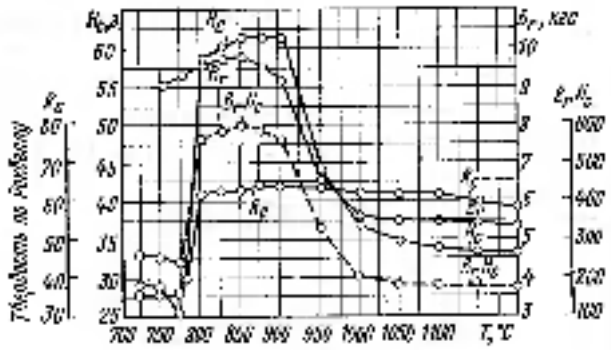


Рис. 28-97. Магнитные свойства и твердость по Роквеллу стали с 1,04% С и 1,58% Cr после прокатки (нагрев под чистовую прокатку при 1100° С) и закалки при различных температурах в масле [16]

Таблица 28.33

Магнитные свойства легированной стали (ГОСТ 6862—71) [17]

Марка стали	Напряженность магнитающего поля 10^3 э	B_r, 10^3 гс (Не ниже)	H_c, э (Не ниже)
ЕХ3	5	95	60
ЕН6	5	100	60
ЕХ5К6	16	85	90
ЕХ9К15М2	16	80	160

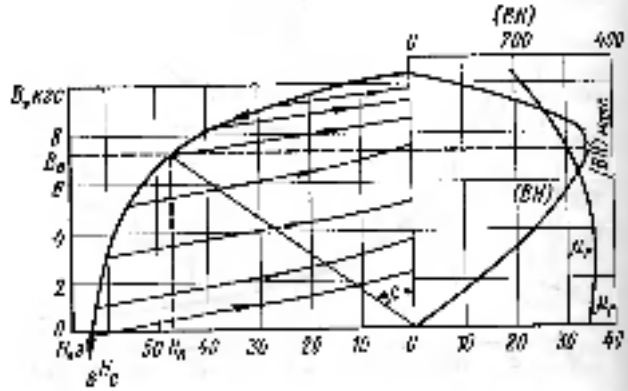


Рис. 28-98. Кривые размагничивания, магнитной энергии и обратимой магнитной проницаемости хромистой стали (1,0% С и 3,6% Cr). Сечение 20 × 20 мм. Температурный коэффициент магнитной индукции равен —(2÷3)·10^{-4} *град*$^{-1}$ [16]

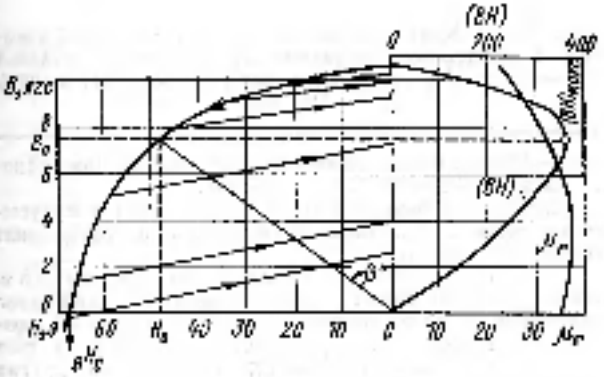


Рис. 28.99. Кривые размагничивания, магнитной энергии и обратимой магнитной проницаемости (возврата) вольфрамовой стали (0,55—0,8% C и 5,0—6,5% W). Сечение 10 × 10 мм. Значение температурного коэффициента индукции равно —(2 ÷ 4)·10⁻⁴ град⁻¹ [16]

Магнитотвердые сплавы дисперсионного твердения. Магнитные свойства *сплавов дисперсионного твердения* зависят не только от химического состава, но в большей мере и от строения их в твердом состоянии. Важнейшим фактором, определяющим строение магнитного сплава дисперсионного твердения, являются процессы распада составляющих его элементов, которыми управляют посредством термической обработки.

В практике производства постоянных магнитов находят применение три основные группы сплавов дисперсионного твердения: а) сплавы, деформируемые (ковка и прокатка) в горячем состоянии; б) сплавы, применяемые в виде фасонных отливок; в) сплавы, деформируемые в холодном состоянии.

Сплавы, деформируемые в горячем состоянии. Распространены *железокобальтомолибденовые сплавы*. Наибольшую магнитную твердость эти сплавы приобретают после их быстрого охлаждения (закалки) при температуре 650—700° С (рис. 28.101, 28.102).

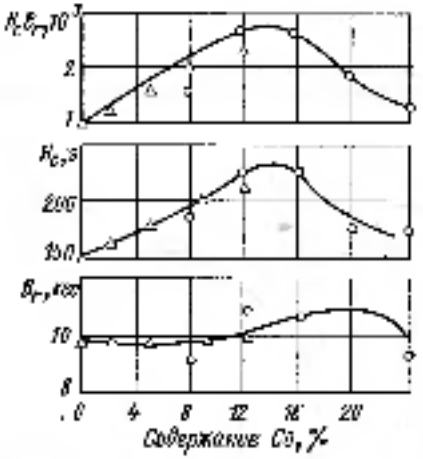


Рис. 28.100. Зависимость H_c, B_r и $H_c B_r$ в сплавах типа ренталой от содержания Co (кривые относятся к сплавам, содержащим 16% молибдена) [16]

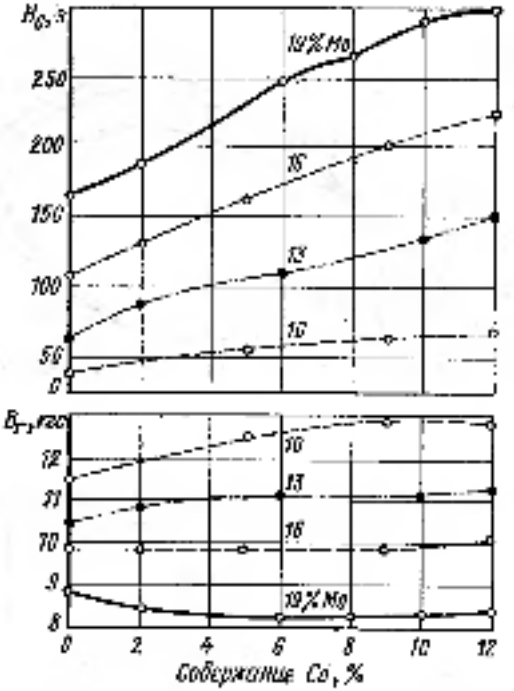


Рис. 28.101. Зависимость H_c и B_r Fe — Co — Mo-сплавов, термически обработанных на максимум этих свойств, от содержания Co (до 12%) и Mo (до 19%) [16]

Таблица 28.39

Зависимость магнитных свойств сплава типа ренталой (22% Fe, 12% Co и 18% Mo) от температуры закалки и отпуска в течение одного часа [16]

Температура закалки, °С	Температура отпуска, °С	B_r, кгс	H_c, э	$H_c B_r$, 10³	$B_{гпр}$, кгс
900	—	6,0	7	36	16,7
900	725	6,8	45	306	14,7
1100	—	3,0	7	21	16,5
1100	675	8,5	130	1105	—
1100	725	9,6	240	2260	13,8
1200	675	11,2	250	2800	—
1300	—	3,0	7	21	16,6
1300	610	11,0	40	440	17,3
1300	675	10,9	255	2780	—
1300	725	10,0	260	2600	14,8
1300	825	11,0	100	1160	15,3

Практическое применение получило также сплавы с содержанием 13—15% молибдена и 10—12% кобальта, известные под названием *ренталой* или *кожель* (рис. 28.100).

Сплавы типа ренталой подвергаются горячей механической обработке, закалке на воздухе или в масле от

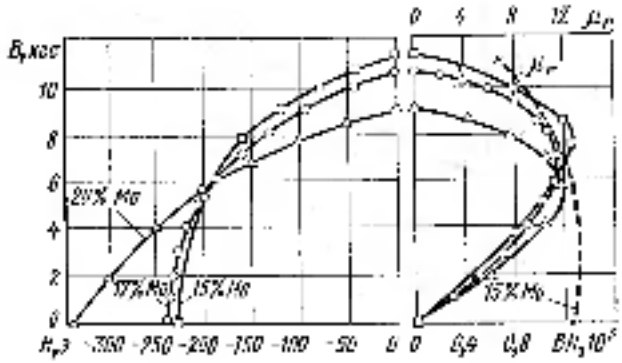


Рис. 28.102. Кривые размагничивания, магнитной энергии и обратимой магнитной проницаемости сплавов Fe — Co — Mo при содержании 12% Co, 15,17 и 20% Mo [16]

1200—1300° С и последующему отпуску в течение одного часа от 650—700° С (табл. 28.39).

Сплав типа ренталлой мало чувствителен к нарушениям режима термической обработки и содержания основных элементов.

Сплавы, применяемые в литом состоянии. К этой группе магнитотвердых материалов относятся α-сплавы системы железо — никель — алюминий, а также их модификации, получаемые за счет введения в них кремния, меди, кобальта и других элементов.

Таблица 28.40

Химический состав и магнитные свойства некоторых сплавов на основе Fe, Ni, Al (ГОСТ 17809—72)[1,2]

Марка[3]	Состав, %[4]	B_r, кгс	H_{cB}[5]	$(BH)_{max}$, кгс/см²	H_c/H_{cB}[6]
		не менее			
ЮНДК	13,5Al; 24,5Ni; 3,0Cu; 0,25 Ti	5 000	500	36 000	9,6—12,7
ЮНД8	11Al; 28Ni; 8Cu	6 000	650	51 000	10,3—12,7
ЮНДК15	9Al; 19,5Ni; 3,5Cu; 14,5Co; 0,25 Ti	7 500	600	68 000	12,3—14,3
ЮНДК18	9,5Al; 18,5Ni; 3,0Cu; 18,5Co	9 000	700	97 000	12—16
ЮН14ДК24Т2	8,5Al; 14,5Ni; 3,5Cu; 24Co; 2,0Ti	11 000	700	150 000	12,7—15,1
ЮН13ДК25А	8Al; 13Ni; 3,5Cu; 25Co	14 000	550	280 000	22—24

[1] Ю — железо; Н — никель; Д — медь; К — кобальт; Т — титан; А — кристаллическая анизотропия.
[2] Данные в скобках (БН)$_{max}$ — по заказу потребителя.
[3] В скобках (БН)$_{max}$.
[4] ГОСТ 17809—72 содержит данные еще двенадцати марок литых сплавов, предназначенных для постоянных магнитов.

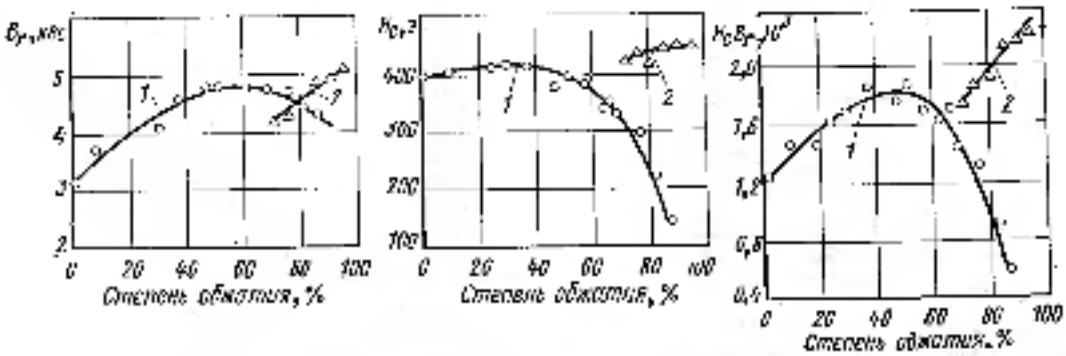


Рис. 28.103. Влияние степени обжатия при прокатке на магнитные свойства сплава, содержащего 60% Co, 20% Ni, 20% Fe [16]:

1 — после однократного отпуска при 650 °С и прокатки; 2 — после отпуска, прокатки и повторного отпуска (горячий)

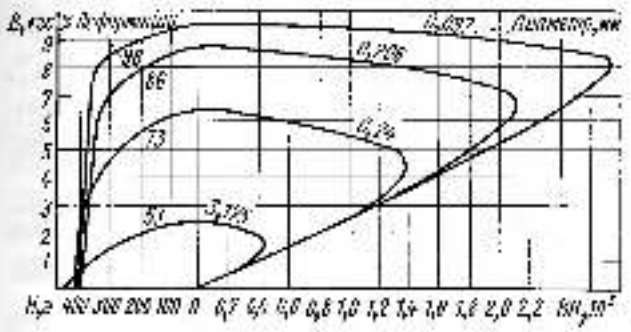


Рис. 28.104. Влияние деформации прокаткой на свойства никалоя 67 разных размеров и магнитную энергию [10]

Все литые магнитотвердые сплавы имеют крупнозернистое строение, высокую твердость и большую хрупкость.

Литые магнитотвердые сплавы обладают высокой устойчивостью на старение. Улучшение твердости и вязкости сплавов достигается при помощи сплавления их по следующему режиму:

а) медленный нагрев до 960—1000°С в печи с нейтральной или слабоокислительной атмосферой;

б) выдержка в печи около прогрева не менее 5—7 ч;

в) охлаждение вместе с печью до 500°С со скоростью не более 50—70 в 1 ч, дальнейшее охлаждение на воздухе.

Таблица 28.41

Влияние обработки на магнитные свойства сплава 60% Cu, 20% Ni, 20% Fe [10]

Режим обработки	B_r, кгс	H_c, э	$(BH)_{max}$, кгс·э	$(BH)_{max}$ — 10⁶ эрг/см³
Литье, гомогенизация, закалка от 1000°С	2,0	200	400	—
Старение при 650°С	2,9	400	880	
Последующая холодная прокатка до 50% обжатия и старение при 650°С	3,0	440	2200	—
Литье, гомогенизация, ковка (обжатие на 95%), закалка от 1070°С, холодная вытяжка до окончательного размера, старение при 600°С (аустенс)	3,8	600	3300	2,0
Прокатанный материал (аустенс)	5,4	550	3000	1,7

Таблица 28.42

Магнитные свойства никалоя

Марка сплава	ТУ 14-1-4-55-71 (Чехословакия)			ТУ 14-1-436-74 (СССР)		
	H_c, э	B_r, кгс	$(BH)_{max}$, кгс·э	H_c, э	B_r, кгс	$(BH)_{max}$, кгс·э
52К13Ф(.ЯКФА)	—	—	—	350	6,0	$2,3 \cdot 10^3$
52К12Ф(52КОФ5)	350	8,5	$3 \cdot 10^3$	300	7,5 10,0	$2,4 \cdot 10^3$
52К11Ф(52КОФ)	300	10,0	$3 \cdot 10^3$	220		$2,4 \cdot 10^3$

* Содержание основных компонентов см. в табл. 28.43.

** Допускается снижение H_c на 10% или B_r на 5% при условии сохранения постоянства произведения $B_r H_c$.

Сплавы, деформированные холодным способом. К этой группе магнитотвердых материалов относятся сплавы следующих систем: медь — никель — железо, медь — никель — кобальт, железо — марганец, легированные алюминием или титаном, и также сплавы железо — кобальт — ванадий — вольфрам (рис. 28.104, табл. 28.42, 28.43).

В системе медь — никель — железо имеется ряд сплавов, которые после термической обработки и холодной деформации могут приобрести высокие магнитные свойства (H_c — 6 *э* при H_c 500 *э*).

Среди сплавов этой системы лучшими свойствами обладает сплав, содержащий 60% меди, 20% никеля и 20% железа, называемый *купифе* (рис. 28.103, табл. 28.41).

Таблица 28.43

Содержание основных компонентов (массовые содержания, %) в сплавах 52 КФ (ГОСТ 10994-74)

Марка сплава	Co	Cu
52К13Ф	12,6—13,5	52—54
52К12Ф	11,6—12,5	52—54
52К11Ф	10,6—11,5	52—54

Химический состав, основные технические характеристики и примерные области применения сплавов различных марок (сплавы марки сплавов табл. 28.42, 28.43) содержатся в ГОСТ 10994—74.

Металлокерамические магнитотвердые материалы

Таблица 28.44

Свойства металлокерамических постоянных магнитов (ГОСТ 15396—68)*

Марка	B_r, гс (не менее)	H_c, э (не менее)	$\frac{(BH)_{max}}{2}$, гсэ (не менее)	$\frac{B}{H_c}$	$\frac{B}{H_{max}}$
ММК1	6000	300	3 000	3500	300
ММК2	4800	500	3 500	3000	300
ММК3	5200	550	4 000	3000	350
ММК4	5500	500	4 500	3000	350
ММК5	6000	550	4 700	3500	350
ММК6	6500	540	5 000	4000	300
ММК7	9500	550	10 500	8000	450
ММК8	11000	500	14 000	8000	450
ММК9	7500	1000	12 000	4500	670
ММК10	8000	1200	15 000	5000	700
ММК11	7000	1400	16 000	4000	1000

* Изготовляются методом порошковой металлургии.
** $\frac{(BH)_{max}}{2}$ — произведение 2 основных характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вонсовский С. В., Шур Я. С.** Ферромагнетизм. М. — Л., Гостехиздат, 1948.
2. **American** Institute of Physics Handbook. New York—Toronto — London, McGraw-Hill Book Co., Inc., 1963.
3. **Danan H., Herr A., Meyer A. J. P.** "J. Appl. Phys.", 1968, v. 39, N 2, pt 1, p. 669.
4. **Волосовский Г. В.** Магнетизм. М., «Наука», 1971.
5. **Takamoto E. e. a.** International Conference on Magnetism. Grenoble, France, September 14—19, 1970. Program and Abstracts, 1970.
6. **Бозорт Р.** Ферромагнетизм. Пер. с англ. Под ред. Е. И. Кондорского и Б. Г. Лившица. М., Изд-во иностр. лит., 1956.
7. **Lin S. T., Ogilvie R. E.** "J. Appl. Phys.", 1968, v. 34, p. 1372.
8. **Landolt-Börnstein.** Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Geophysik, Technik. II Bd. 9 Teil. Springer-Verlag, Berlin-Göttingen—Heidelberg, 1962.
9. **Weiss P., Forrer R.** "Ann. Phys.", 1929, v. 12, p. 279.
10. **Potter H. H.** "Proc. Roy. Soc.", 1934, v. 146A, p. 362.
11. **Magnetismus,** Struktur und Eigenschaften magnetischer Festkörper, Leipzig, 1967.
12. **Техническая** энциклопедия. Справочник физических, химических и технологических величин. Т. 4. М., «Советская энциклопедия», 1930.
13. **Белов К. П.** и др. Редкоземельные ферромагнетики и антиферромагнетики. М., «Наука», 1965.
14. **Guillaud Ch.** "Compt. rend. Acad. sci.", 1946, v. 222, p. 1224.
15. **Белов К. П.** Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках. Изд. 2-е, доп. М., Гостехиздат, 1957.
16. **Справочник** по электротехническим материалам. Под ред. К. А. Андрианова, П. П. Богородицкого, Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. Т. II. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
17. **Готман П. Е., Березин В. Б., Хайкин А. М.** Электротехнические материалы. Справочник. Изд. 2-е, дот. и перераб. М., «Энергия», 1969.

ГЛАВА 29

ФЕРРИТЫ

29.1. ФЕРРИТЫ-ШПИНЕЛИ

Ферриты-шпинели имеют кристаллическую структуру типа минерала шпинели $MgAl_2O_4$ и химическую формулу $Me^{2+}Fe_2^{3+}O_4$, где Me^{2+} — ион двухвалентного металла, а ионы железа Fe^{3+} трехвалентны. В случае простых ферритов Me представляет собой один из двухвалентных ионов переходных элементов, например Mn, Ni, Co или Mg; возможна также комбинация этих ионов (твердые растворы ферритов, или смешанные ферриты). Трехвалентные ионы железа в $MnFe_2O_4$ могут быть полностью или частично замещены другими трехвалентными ионами, например Al^{3+} или Cr^{3+} (смешанные ферриты-алюминаты или ферриты-хромиты).

В структуре типа шпинели ионы кислорода образуют гранецентрированную кубическую решетку с ребром a. В промежутках между ионами кислорода находятся ионы металлов, причем эти ионы окружены четырьмя или шестью ионами кислорода. Такие окружения называются соответственно тетраэдрическими (или A) и октаэдрическими (или B) узлами. Шпинели, в которых Me^{2+} находится в тетраэдрических узлах, а ионы Fe^{3+} — в октаэдрических, называются нормальными. Если ионы Me^{2+} и половина ионов Fe^{3+} находятся в октаэдрических узлах, то шпинель называют обращенной.

Принято ионы, занимающие тетраэдрические узлы, записывать в формуле феррита перед квадратными скобками, а ионы, занимающие октаэдрические узлы — в скобках. Тогда, например, формула феррита цинка, имеющего структуру нормальной шпинели, запишется $Zn^{2+}[Fe_2^{3+}]O_4$, а никелевого феррита по структурой обращенной шпинели — формулой $Fe^{3+}[Ni^{2+}Fe^{3+}]O_4$. Структура шпинели изображена схематически на рис. 29.1.

Рис. 29.1. Дно октанта шпинельной структуры.

Большие светлые кружки обозначают ионы кислорода, малые сплошные и частичные кружки — ионы металлов в октаэдрических и тетраэдрических узлах соответственно [9]

Ферриты представляют собой нескомпенсированные антиферромагнетики или ферримагнетики. Согласно Неелю [1] кристаллическая решетка ферритов состоит из двух подрешеток: ионы образуют ионами, занимающими тетраэдрические узлы (подрешетка A), а другая — ионами, расположенными в октаэдрических узлах (подрешетка B). Между магнитными ионами подрешеток преобладает антиферромагнитное обменное взаимодействие, что приводит к антипараллельному расположению магнитных моментов подрешеток. При этом результирующая намагниченность насыщения (на 1 см³ вещества) M_s можно рассматривать как разность намагниченностей подрешеток:

$$M_s = M_b - M_a. \qquad (29.1)$$

Значение величины M_s уменьшается с ростом температуры и стремится к нулю в точке Кюри T_c; при $T > T_c$ вещество становится парамагнитным. Для некоторых ферритов существует температура компенсации $T_{комп}$, при которой намагниченности подрешеток становятся равными, и результирующая намагниченность M_s обращается в нуль. В смешанных ферритах могут иметь место точки компенсации и при изменении состава.

Удобнее вместо удельной намагниченности насыщения σ_s, связанную с M_s равенством $\sigma_s = M_s/\rho$, где ρ — плотность. Предел σ_s при температуре, стремящейся к 0 К, обозначим σ_s^0. Связь между σ_s^0 и числом магнетонов Бора на одну формульную единицу $MeFe_2O_4$ n_B дается выражением:

$$n_B = \frac{M}{M_{Fe_2O_4}} \sigma_s^0, \qquad (29.2)$$

где μ_B — магнетон Бора; M — молекулярная масса, соответствующая одной молекуле, точнее, формульной единице $MeFe_2O_4$, а N — число Авогадро.

Как следствие (29.1) и (29.2) магнитный момент на молекулу μ_m^0, определенный из намагниченности насыщения при 0° К,

$$\mu_m^0 = n_B \mu_B = (2n_b - n_a)\mu_B, \qquad (29.3)$$

где n_a и n_b — числа магнетонов Бора, приходящиеся на ионы, расположенные в A- и B-узлах соответственно. В частности, для обращенной шпинели

$$\mu_m^0 = (n_{Fe^{3+}} + n_{M^{2+}} - n_{Fe^{3+}})\mu_B = n_{M^{2+}}\mu_B. \qquad (29.3a)$$

Энергию магнитного взаимодействия, зависящую от ориентации намагниченности относительно кристаллографических осей, называют *энергией магнитной кристаллографической анизотропии*. Для кубического кристалла эту энергию E_a обычно записывают в виде [2]

$$E_a = K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_1^2\alpha_3^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2 + \ldots, \qquad (29.4)$$

где K_1, K_2, ... — константы анизотропии, а α_1, α_2, α_3 — направляющие косинусы вектора намагниченности относительно осей, совпадающих с ребрами куба.

Благодаря явлению магнитострикции при изменении намагниченности в кристалле происходит деформация кристаллической решетки. В частном случае феррита кубической структуры относительная магнитострикционная деформация может быть представлена в виде

$$\frac{\Delta l}{l} = \lambda_s - \frac{3}{2}\lambda_{100}\left(\alpha_1^2\beta_1^2 + \alpha_2^2\beta_2^2 + \alpha_3^2\beta_3^2 - \frac{1}{3}\right) + 3\lambda_{111}(\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2 + \alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3 + \alpha_3\alpha_1\beta_3\beta_1). \qquad (29.5)$$

где λ_{100} и λ_{111} — константы магнитострикции насыщения в направлениях [100] и [111] соответственно, а β_1, β_2, β_3 — направляющие косинусы оси, вдоль которой измеряется деформация.

Феррит, помещенный в постоянное магнитное поле H_0 и перпендикулярное к нему переменное СВЧ-магнитное поле, поглощает СВЧ-энергию. Это поглощение носит резонансный характер (ферромагнитный резонанс) и максимально на частоте ω_0, определенным образом связанной с полем H_0. Зависимость резонансной частоты ω_0 от H_0 имеет сложный характер и определяется магнитной кристаллографической анизотропией, анизотропией формы, упругим напряжением состоянием образца и т. п. [3]. В наиболее простом случае изотропной сферы

$$\omega_0 = \gamma H_0. \qquad (29.6)$$

Здесь γ — гиромагнитное отношение, равное

$$\gamma = g\frac{e}{2mc}, \qquad (29.7)$$

где e — заряд электрона; m — масса покоя электрона; c — скорость света; g — фактор спектроскопического расщепления. Для ферритов со структурой шпинели при наличии двух подрешеток значение g-фактора дается выражением [4]

$$g = \frac{M_b - M_a}{M_b/g_b - M_a/g_a}, \qquad (29.8)$$

где g_a и g_b — факторы спектроскопического расщепления для ионов в A- и B-узлах соответственно.

Интенсивность и форма резонансной кривой поглощения определяются процессами релаксации. Наличие их приводит к тому, что компоненты тензора магнитной проницаемости становятся комплексными величинами. Ширина резонансной кривой ферромагнитного резонанса ΔH обычно определяется как разность полей, при которых мнимая часть диагональной компоненты тензора проницаемости $\mu^{\prime\prime}$ составляет половину своего значения $\mu^{\prime\prime}_{max}$ в точке резонанса. При отсутствии внешнего магнитного поля магнитная проницаемость скалярна. Зависимости ее вещественной μ' и мнимой μ'' частей от частоты называют *магнитными спектрами*. Для магнитных спектров ферритов характерно наличие двух областей дисперсии. Низкочастотная область дисперсии обусловлена смещением границ доменов, а более высокочастотная — *естественным* ферромагнитным резонансом в эффективных полях анизотропии и размагничивающих полях.

В таблицах используется система единиц СГСМ.

В имеющихся значениях табулированных параметров возможны некоторые неточности, связанные с неопределенностью состава и физического состояния образцов, на которых производились измерения. Различная термическая обработка также может изменять такие параметры, как распределение катионов между A- и B-узлами, пористость и т. д. Поэтому во всех случаях, когда необходима более подробная информация, следует обращаться к оригинальной литературе.

Основные параметры простых ферритов

Параметр*	$NiFe_2O_4$	Литература	$MgFe_2O_4$	Литература	$MnFe_2O_4$	Литература
Постоянная решетки a, Å	8,30	[5]	8,36	[50]	8,517	[23]
Распределение ионов металлов	$Fe[Fe^{3+}Fe]$	[6]	$Mg_{0,1}Fe_{0,9}$ $[Mg_{0,9}Fe_{1,1}]$	[50, 51]	$Mn_{0,8}Fe_{0,2}$ $[Mn_{0,2}Fe_{1,8}]$	[23]
Кислородный параметр u	0,379	[6]	0,381	[50]	0,385	[23]
Рентгеновская плотность ρ_x, г/см³	5,94	[6]	4,52	[50]	5,0	[23]
Точка Курие T_C, °C	585	[5]	440	[5]	300	[5]
Магнитный момент на молекулу $p_{эф}^{B}$, μ_B	2,1(0°K)	[6]	1,1(25°K)	[52]	4,6(0°K)	[23]
Удельная намагниченность насыщения σ_s, гс·см³/г	98(0°K) 52(300°K)	[5] [5]	30(0°K) 27(300°K)	[5] [5]	112(0°K) 80(300°K)	[5] [5]
Индукция насыщения $4\pi M_s$, гс	6200(0°K) 6000(300°K)	[5] [5]	1800(0°K) 1500(300°K)	[5] [5]	7000(0°K) 5000(300°K)	[5] [5]
Первая константа анизотропии K_1, 10^6 эрг/см³	10,7	[7]	−3,3 −2,5	[53] [54]	−0,7(77°K) 2,8(300°K)	[24] [24]
Вторая константа анизотропии K_2, 10^6 эрг/см³	−2,8	[7]	—	—	0,3(77°K) −0,2(300°K)	[24] [24]
Константа магнитострикции λ_s, 10^{-6}	77,6[111] 57,1[110] −19,5[100]	[8] [8] [8]	$-6(\lambda_s)$	[17]	[111] −39[100] $5(\lambda_s)$	[19] [19] [1]
Фактор спектроскопического расщепления g	2,03(125°K) 2,12(294°K)	[9] [9]	2,03—2,06 (поликр.)	[55]	2,019(77°K) 2,002(300°K)	[24] [24]
Ширина линии ферромагнитного резонанса ΔH, э	—	—	20	[53]	12(422°K) 13(294°K)	[25] [26]
Начальная магнитная проницаемость μ_0	70 (поликр.)	[8]	36 (поликр.)	[54]	200	[5]
Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$	—	—	$\varepsilon' = 9,68$** $\varepsilon'' = 0,17$	[42] [42]		
Удельное сопротивление ρ_0, 10^8 ом·см	$5 \cdot 10^{-9}$	[10, 43]	~ 12*	[44]	$2 \cdot 10^{-8}$***	[27]

* Значения физических констант приведены, если не оговорено в условии, для комнатурных температур 20°C.
** Измерено на частоте 4,36 Ггц в поликристаллических образцах.
*** При температуре $T = 100$°C.
**** Для состава $Mn_{1,96}Fe_{1,04}O_4$.
***** Структуры медного феррита $CuFe_2O_4$ зависят от термообработки. При медленном охлаждении до ниже определенной температуры происходит переход кубической структуры в тетрагональную. Температура $T_{тр}$ — 360°C, согласно [36], 410°C [38] и 360°C [37]. Однако в реальном закаленном $T > T_{тр}$ кубическая структура сохраняется и при комнатной температуре.

Таблица 29.1

со структурой шпинели

$CuFe_2O_4$	Литература	$CoFe_2O_4$	Литература	$NiFe_2O_4$	Литература	$Li_{0,5}Fe_{2,5}O_4$	Литература
8,37 (куб)** c — 8,70 a — 8,[illegible] (тетр.)	[34] [35]	8,38	[17]	8,337	[11, 13]	8,31	[28]
Fe[CuFe]	[36]	Fe[CoFe]	[45]	Fe[NiFe]	[12]	Fe[$Li_{0,5}Fe_{1,5}$]	[28]
0,380	[12]	0,381	[45]		—	0,382	[28]
5,35	[12]	5,29	[15]	5,37	[13]	4,75	[28]
455	[5]	(20)	[5]	585	[13]	670	[5]
2,34* (куб)(0°K) 1,5 (тетр.)(0°K)	[37] [37]	3,04(0°K)	[46]	2,3 (0°K)	[5]	2,6(0°K)	[5]
30(0°K) 25(300°K)	[5] [5]	30(0°K) 90(300°K)	[5] [5]	50(0°K) 50(300°K)	[5] [5]	80(0°K) 65(300°K)	[5] [5]
2000(0°K) 1700(300°K)	[5] [5]	6300(0°K) 5300(300°K)	[5] [5]	3800(0°K) 3400(300°K)	[5] [5]	4200(0°K) 3400(300°K)	[5] [5]
—20,6(77°K) 6,7(300°K)	[38] [38]	4,4·10⁻⁷(77°K) 2,9·10⁻⁶(300°K)	[15] [15]	—8,7(77°K) —6,2(300°K)	[14] [14]	—14,7(77°K) —8,4(300°K)	[29] [29]
—		—	—	—3	[16]	9,7(77°K) —0,2(300°K)	[30] [30]
4,5(μ_B)	[39]	120 [111]** —590 [100] 110 (μ_B)	[15] [15] [47]	—4[111] —36[100] 26(μ_B)	[14] [14] [17]	—8(μ_B)	[31]
2,20(77°K) 2,04(300°K)	[39] [39]	2,7(367°K) (монокр.) 2,22(173°K) (поликр.)	[48] [19]	2,199(85°K) 2,196(298°K)	[18] [18]	2,072(77°K) 2,003(300°K)	[30] [30]
350 (поликр.)	[41]	—	—	9,5 15	[19] [20]	0,8(131°K) 1,7(300°K)	[32] [32]
70	[40]	25 (поликр.)	[5]	80 (монокр.) 30 (поликр.)	[21] [21]	33 (поликр.)	[6]
c' — 9,94** κ' — 0,52	[42] [42]	c' — 10**	[42]	19 (монокр.) 21 (поликр.)	[14] [14]	—	—
~1**	[44]	0,5**	[44]	2	[22]	~1·10⁻⁴	[33]

* Измерено на частоте 4,86 Ггц в поликристаллических образцах.

** При температуре T = 100°C.

*** Состав образца $Co_{0,8}Fe_{2,1}O_4$.

**** Получено на частоте 4,86 Ггц в поликристаллических образцах.

***** При температуре T = 100°C.

Таблица 29.2

Результаты экспериментов по дифракции нейтронов в ряде образцов феррита $Mg_xMn_{1-x}Fe_2O_4$ [11]

Обозначения: $T_{зак}$ — температура закаливания; σ — постоянная решетки; u — жесткорелятивный параметр.

x	$T_{зак}$, °C	σ, Å	u	Доля ионов в октаэдрических узлах	
				Mg^{2+}	Mn^{2+}
0,25	1400	8,485	0,3850	0,12	0,83
0,26	1000	8,479	0,3848	0,09	0,78
0,5	1400	8,456	0,3839	0,18	0,92
0,6	1000	8,450	0,3836	0,14	0,82
0,75	1400	8,424	0,3834	0,24	0,90
0,75	1000	8,421	0,3831	0,21	0,98
0,9	1400	8,406	0,3831	0,25	1,00
0,9	1000	8,403	0,3821	0,21	0,90

Таблица 29.4

Зависимость намагниченности насыщения M_s и фактора спектроскопического расщепления g для поликристаллического феррита $Cu_{0,7}Zn_{0,3}Fe_2O_4$ от температуры

Приведены также значения g фактора и первой константы анизотропии K_1 для монокристалла того же состава. Точка Кюри Tc — 340°C. Измерения в интервале температур от — 50°C до — 10°C проводились на частоте 23,6 Ггц, а в интервале от 20 до 280°C — на частоте 9,25 Ггц [60, 61]

T, °C	Поликристалл		Монокристалл	
	M_s, гс	g	g	K_1, 10^6 эрг/см³
—50	500	—	1,90	12,03
—20	545	—	1,90	8,41
10	500	—	1,91	4,51
20	506	2,07	1,91	2,06
40	450	2,10	1,92	1,34
60	381	2,11	1,96	0,16
80	338	2,12	2,06	—0,21
120	269	2,15	2,12	—0,41
160	200	2,16	2,12	—0,34
200	134	2,17	2,17	0,21
240	61	2,18	2,16	—0,07
280	8	2,19	2,15	0,01

Таблица 29.3

Зависимость некоторых параметров кобальт-цинковоо феррита $Co_xZn_{1-x}Fe_2O_4$ от содержания кобальта x [58, 59]

Обозначения: Tc — точка Кюри; p_m^0 — магнитный момент на молекулу; σ_s — удельная намагниченность насыщения

x	T_c, °C	p_m^0, μB	σ_s, гс·см³/г			
			T = 350°K	T = 275°K	T = 220°K	T = 0°K
0,2	25	4,46	18,5	62,0	72,6	95,0
0,3	92	4,90	39,3	91,0	95,6	114,0
0,4	137	5,78	61,0	119,2	126,0	132,0
0,6	275	6,03	87,5	128,5	133,2	143,0
0,8	380	4,87	93,7	110,0	110,0	115,5
0,9	460	4,29	90,0	90,9	94,1	102,0
1,0	516	3,67	83,6	83,0	82,6	87,5

Таблица 29.5

Зависимость некоторых параметров никелевого феррита — алюмината $NiFe_{2-x}Al_xO_4$ от содержания алюминия x [62, 63]

Обозначения: a — постоянная решетки; Tc — точка Кюри; p_m^0 — магнитный момент на молекулу; g — фактор спектроскопического расщепления

x	a, Å	T_C, °C	p_m^0, μB		g
			недавленное состояние	закалка при 1500°C	
0,00	8,3370	580	2,29	2,29	2,3
0,20	8,3002	506	1,30	1,59	2,7
0,46	8,2769	465	0,61	1,19	—
0,50	8,2705	430	0,41	0,99	6,0
0,625	8,2521	360	0—0,040	—	3,8
0,75	8,2320	294	0,38	0,58	1,5
1,00	8,1951	198	0,04	0,42	—

Таблица 29.6

Некоторые свойства смешанных ферритов $NiMn_{0,02}Fe_{2-x}Al_xO_4$ и феррита $Ni_{0,925}Co_{0,05}Mn_{0,02}Fe_{1,7}Al_{0,3}O_4$ [64]

Свойство	Содержание алюминия x в $NiMn_{0,02}Fe_{2-x}Al_xO_4$								$Ni_{0,925}Co_{0,05}Mn_{0,02}Fe_{1,7}Al_{0,3}O_4$
	0	0,2	0,4	0,6	0,65	0,75	1,00	1,25	
Фактор спектроскопического расщепления g	2,34	2,38	2,45	2,37	4,40	—	1,38	2,47	2,35
Ширина линии ферромагнитного резонанса ΔH, э	400	480	550	660	1180	—	150	530	900
Точка Кюри T_C, °C	585	500	420	375	310	275	80	400	160
Намагниченность насыщения M_s, гс	267	171	119	83	37	20	27	157	158
Поле анизотропии $H_a^{\text{эф}}$, э	260	450	530	800	1500	—	125	480	<170
Резонансная частота для сферического образца* $f_{res} = 1,4\gamma H_a$, Мгц	850	1500	2100	3320	9200	—	240	1660	<360
Максимальная резонансная частота для сферы** $f_{max} = 1,4\gamma(H_a + 4\pi M_s)$, Мгц	12000	9000	7600	6800	10000	>10000	1300	7000	7000
Начальная проницаемость μ_0	28	20	10	6	2	—	3	—	—
Положение 1-го пика в спектре*** $\mu''f_1$, Мгц	100	160	230	350	900	—	250	—	—
Положение 2-го пика в спектре*** $\mu''f_2$, Мгц	1700	1600	2300	3000	8000	—	—	2100	—
Плотность ρ, г/см³	5,13	5,08	5,02	4,98	4,90	4,74	4,27	4,98	5,15

* При $T = 300$°K.

** Для $K_1 < 0$, $H_a = \frac{4}{3}\frac{|K_1|}{M_s}$; для $K_1 > 0$, $H_a = 2\frac{K_1}{M_s}$.

*** При внешнем поле $H = 0$.

**** См. рис. 29,19.

Таблица 29.7

Связь между плотностью и некоторыми СВЧ-параметрами феррита $NiMn_{0,02}Fe_{1,8}O_3$ [64]

Рентгеновская плотность $\rho_x = 5,38$ г/см³, $A_1 = 5 \cdot 10^6$ эрг/см³, $T_c = 560$ °С, $4\pi M_s = 3210$ гс (обозначения см. в табл. 29.6)

Параметры									
ρ, г/см³	η, %	$\varkappa$	ΔH, А/м	$\tan\delta_\varepsilon$	μ_0	$H_{\max}$, А/м	$H_{\max}$, А/м	Δf, МГц	Δf, МГц
5,13	95,4	2,34	440	260	28	850	12000	100	1700
4,90	92,3	2,36	315	200	20,5	850	12000	170	1600
4,85	90,2	2,33	550	560	17	850	—	330	—
4,59	85,3	2,39	770	200	15	850	12000	350	
3,81	70,8	2,43	1300	260	6,5	850	12000	650	—

* $H_a = \frac{3}{2} \cdot \frac{|K_1|}{M_s}$.

** $f_{рез} = 1,4\,H_a$ для шпинелей после $H = 0$

*** $f_{рез} = 1,4\,\gamma(H_a + 4\pi M_s)$ при наличии поля $H = 0$

Таблица 29.8

Значения фактора спектроскопического расщепления g и магнитного момента на молекулу p_m^C для феррита $LiFe_5O_8$ и его твердых растворов с $CdFe_2O_4$ и $LiAl_5O_8$ [65]

Состав	g ($T = 300$ °К)	p_m^C, МБ
$LiFe_5O_8$	1,96	2,38
$(LiFe_5O_8)_{0,75}(CdFe_2O_4)_{0,25}$	1,97	3,46
$(LiFe_5O_8)_{0,55}(CdFe_2O_4)_{0,35}$	1,98	4,10
$(LiFe_5O_8)_{0,50}(CdFe_2O_4)_{0,50}$	1,97	4,76
$(LiFe_5O_8)_{0,25}(CdFe_2O_4)_{0,75}$	1,99	4,57
$Li(Fe_{0,9}Al_{0,1})_5O_8$	1,97	1,99
$Li(Fe_{0,8}Al_{0,2})_5O_8$	1,96	0,92
$Li(Fe_{0,7}Al_{0,3})_5O_8$	2,01	0,18
$Li(Fe_{0,6}Al_{0,4})_5O_8$	—	0,13

Таблица 29.9

Зависимость параметров литий-хромовых ферритов от содержания хрома [66]

Содержание хрома x	Распределение катионов по подрешеткам	a, Å	T_C, °С	$T_{плавл}$, °С	p_m^C, МБ
0	$Fe_{1,00}[Li_{0,50}Fe_{1,50}]O_4$	8,331	680	—	2,47 ÷ 2,60
0,50	$Fe_{1,00}[Li_{0,25}Fe_{1,00}Cr_{0,50}]O_4$	8,306	500	—	1,50 ÷ 1,62
0,75	$Fe_{0,98}Li_{0,02}[Li_{0,48}Fe_{0,27}Cr_{0,75}]O_4$	8,290	410	—	1,35
1,00	$Fe_{0,96}Li_{0,06}[Li_{0,42}Fe_{0,20}Cr_{1,00}]O_4$	8,292	315	200	0,84
1,25	$Fe_{0,94}Li_{0,06}[Li_{0,41}Fe_{0,25}Cr_{1,25}]O_4$	8,290	214	38	0,61
1,50	$Fe_{0,90}Li_{0,10}[Li_{0,40}Fe_{0,20}Cr_{1,50}]O_4$	8,287	119	—10	0,55
1,60	$Fe_{0,94}Li_{0,06}[Li_{0,40}Fe_{0,20}Cr_{1,60}]O_4$	8,285	107	11	0,42
1,70	$Fe_{0,94}Li_{0,06}[Li_{0,40}Fe_{0,20}Cr_{1,70}]O_4$	8,290	155	20	0,22
2,00	$Fe_{0,90}Li_{0,10}[Cr_{2,00}]O_4$	8,288	80 ± 16	37 ± 15	0,10

Таблица 29.10

Напряженность порогового поля H_1 и коэффициента переключения S_H некоторых ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса [67]

Обозначения: H_0 — напряженность размагничивающего магнитного поля, необходимая для переключения, время переключения $\tau = S_H/(H_{пр} - H_1)$, где S_H — коэффициент переключения; H_1 — коэффициент переключающего импульсного магнитного поля

Феррит	H_0, А	S_H, мкс·А
$Ni_{0,10}Mn^{2+}_{0,20}Mn^{2+}_{0,20}Fe^{3+}_{1,27}O_4$	0,9	0,9
$Cu_{0,35}Mn_{0,35}Fe_2O_4$	0,85	0,8
$Mg_{0,6}Ni_{0,4}Fe_2O_4$	3,6	2,3
$Li_{0,5}Ni_{0,06}Fe_{2,47}O_4$	2,2	1,0
$Co_{0,1}Fe^{3+}_{0,9}Fe_2O_4$	8,6	165,0
$MnFe_2O_4$	0,5	3,2

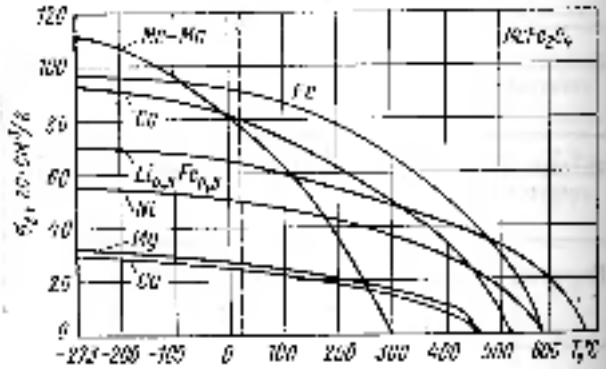


Рис. 29.2. Зависимость удельной намагниченности насыщения σ_s для некоторых простых ферритов-шпинелей от температуры [6]

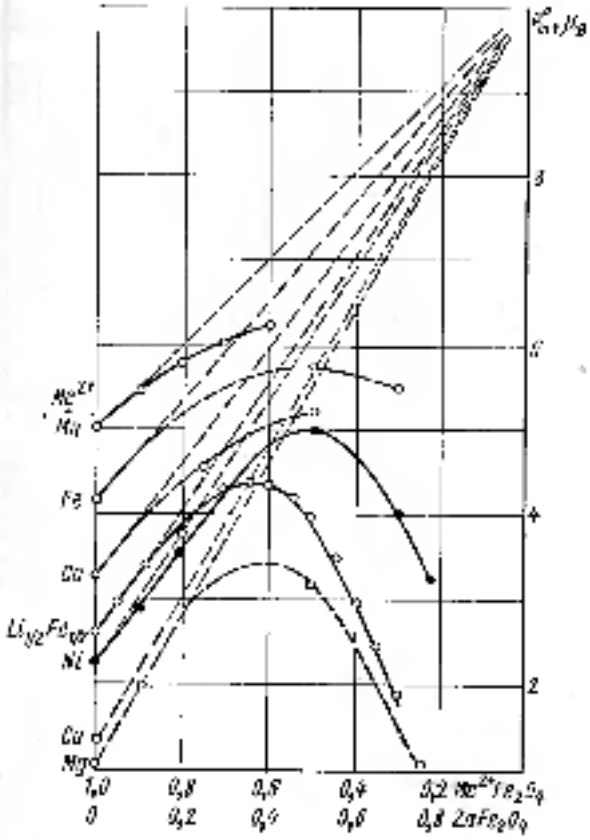


Рис. 20.3. Магнитные моменты насыщения p_a^0 при 0°К некоторых смешанных ферритов, полученных замещением магнитных ионов двухвалентного металла Me^{2+} немагнитными ионами цинка (Me^{2+} — один из ионов Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Mg или $Li_{0,5}Fe_{0,5}$) [37]

20.2. ФЕРРИТЫ СО СТРУКТУРОЙ ГРАНАТА

Кристаллографическая структура. Ферримагнитные оксиды типа граната кристаллизуются в структуре, изоморфной классическому минералу гранату $Ca_3[Fe_2](Si_3)O_{12}$. Структура граната относится к кубической пространственной группе $Ia3d$ — O_h^{10}. Описание структуры граната можно найти, например, в работах [81—84]. В табл. 20.1 показано окружение ионов в гранате, имеющем формулу $Ca_3M_2(SiO_4)_3$. Кубическая элементарная ячейка граната содержит восемь формульных единиц. Шестнадцать ионов M^{3+} занимают октаэдрические узлы, обозначенные 16a, двадцать четыре иона Si^{4+} занимают узлы в центрах тетраэдров, обозначенные 24d и двадцать четыре иона Ca^{2+} находятся в окружении из восьми ионов кислорода и их позиции обозначаются 24c.

Интерес к структуре граната значительно возрос после синтеза ферримагнитных гранатов типа $M_3Fe_5O_{12}$, где M — ион редкоземельного металла или иттрия.

Магнитные свойства и намагниченность насыщения. Магнитные свойства ферритов-гранатов $M_3Fe_5O_{12}$, в которых додекаэдрическая подрешетка занята трехвалентными ионами иттрия или редкоземельных элементов,

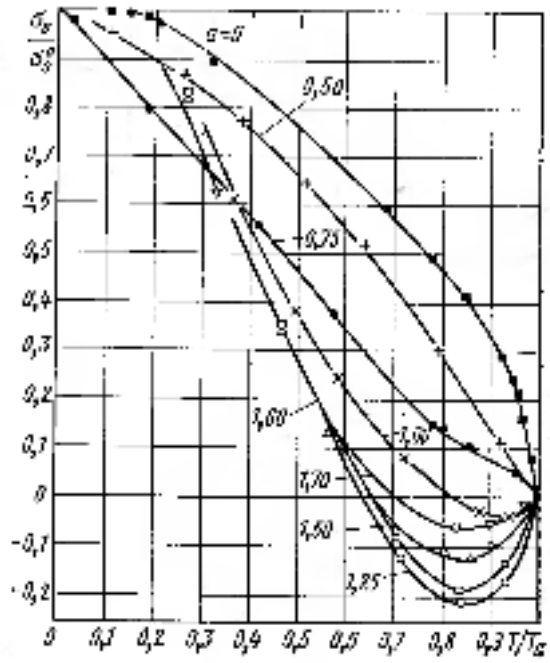


Рис. 20.4. Зависимость относительной намагниченности насыщения σ_s/σ_s^0 от приведенной температуры T/T_C для литиевых ферритов-хромитов $Li_{0,5}Fe_{0,5}$ $_x$ Cr_xO_4 [68]

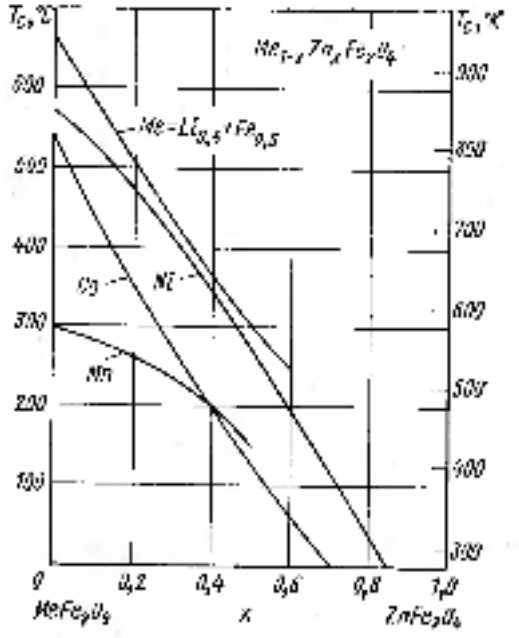


Рис. 20.5. Зависимость точки Кюри T_C некоторых смешанных ферритов типа $Me_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ от концентрации цинка [5]

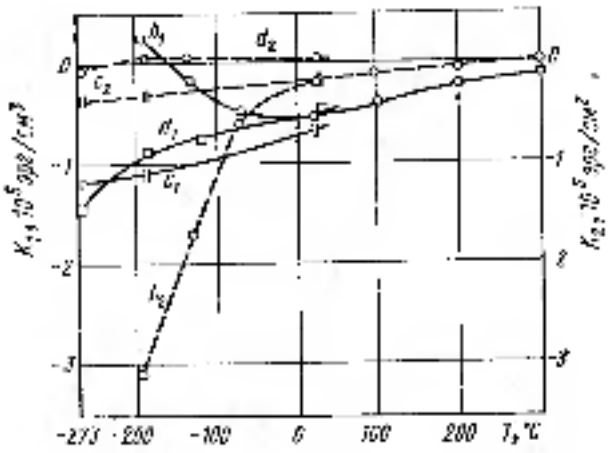


Рис. 29.6. Зависимости первой K_1 (сплошная линия) и второй K_2 (пунктир) констант анизотропии от температуры для следующих ферритов [16]:

$NiFe_2O_4$ — кривые K_1 и K_2; $Ni_{0,36}Fe^{2+}_{0,36}Fe_2O_4$ — кривые c_1 и c_2; $Ni_{0,72}Fe^{2+}_{0,28}Fe_2O_4$ — кривые d_1 и d_2

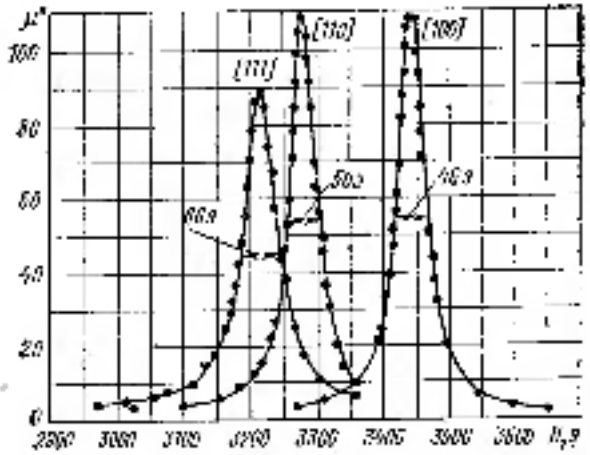


Рис. 29.8. Кривые ферромагнитного резонанса для монокристалла $Mn_{0,98}Fe_{1,98}O_3$ [94]. Образец имел форму сферы диаметром ~ 0,25 мм. Кривые сняты при комнатной температуре на частоте 9300 Мгц в соответствии трем главным кристаллографическим направлениям, по которым направлено постоянное магнитное поле

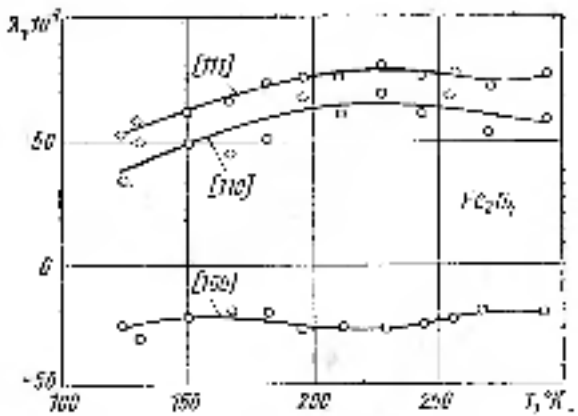


Рис. 29.7. Зависимость констант магнитострикции λ_{100}, λ_{111} и λ_{110} искусственного монокристалла магнетита от температуры [8]

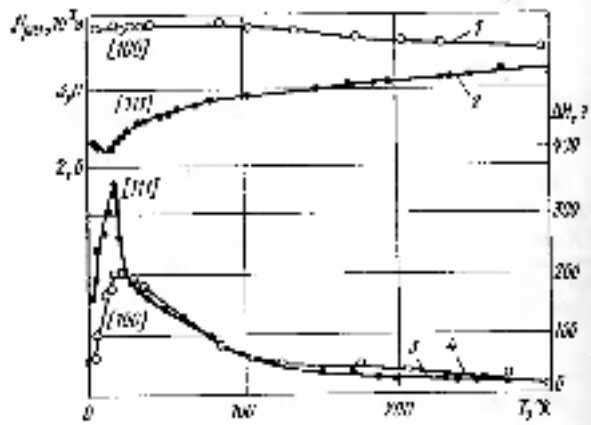


Рис. 29.9. Зависимости резонансного поля H_{res} (кривые 1, 2) и ширины кривой ферромагнитного резонанса ΔH (3, 4) для сферы из монокристалла феррита $Mn_{1,0}Fe_{1,9}O_4$ ($\lambda = 3,2$ см) от температуры [89]. Наличие максимумов при $T = 20°$ К на кривых ΔH (T), по-видимому, обусловлено ионами Mn^{2+} или ионами Ni, еще более тяжелой примеси

были поняты на основе коллинеарной модели Нееля о подрешеточном строении ферримагнитных соединений [8,1]. В гранатах, в отличие от ферритов со структурой шпинели, были введены в рассмотрение три магнитные подрешетки. Наиболее сильное ферримагнитное взаимодействие, определяющее точку Кюри T_C, осуществляется между ионами трехвалентного железа в октаэдрической 16a- и тетраэдрической 24d-подрешетках. Подрешетка редкоземельных ионов 24c наиболее сильно связана отрицательным обменным взаимодействием с тетраэдрической подрешеткой (в гранатах с легкими редкоземельными ионами от Pr до Sm с октаэдрической подрешеткой), причем эта связь примерно в 10 раз слабее, чем (a–d)-взаимодействие. Намагниченность насыщения M_s в случае тяжелых редкоземельных гранатов может быть записана следующим образом через намагниченности отдельных подрешеток:

$$M_s = M_{24d} - M_{16a} - M_{24c}.$$

Ферромагнитный резонанс и анизотропия. Ферриты-гранаты имеют меньшую удельную намагниченность, чем ферриты-шпинели и большой интерес к ним был вызван в основном их уникальными свойствами в СВЧ-диапазоне. Минимальные значения ширины линий ферромагнитного резонанса $\Delta H \simeq 0,2$ э было получено в итриевом феррите-гранате, свободном от примесей редкоземельных ионов.

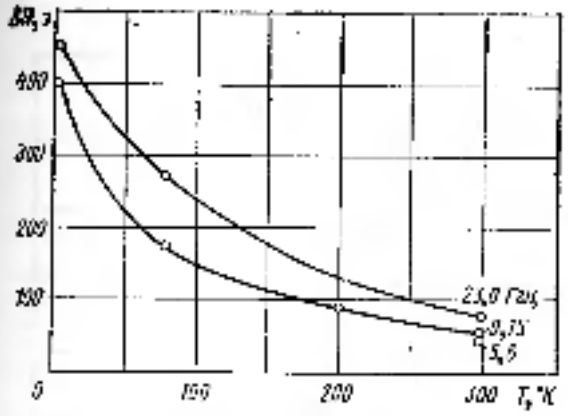


Рис. 29.10. Зависимость ширины резонансной кривой ΔH для марганец-цинкового феррита, содержащего небольшое (неизвестное) количество железа от температуры [79]

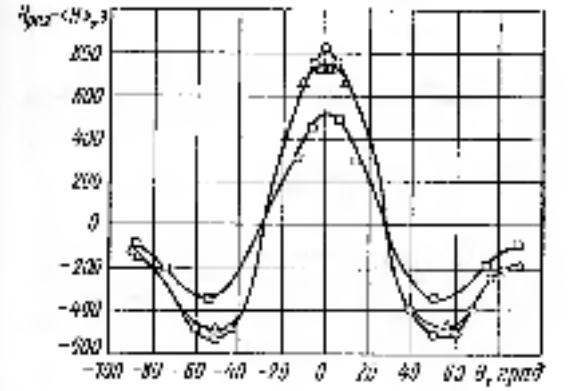


Рис. 29.11. Зависимость резонансного поля $H_{рез}$ — $\langle H \rangle$ от угла θ между направлением M и осью [100] в плоскости (110) для монокристалла феррита $(NiO)_{0,26}(FeO)_{0,03}Fe_2O_3$ [18]:

$\langle H \rangle$ — равновесное значение $H_{рез}$ в материале: △ — 80 °К; ○ — 4,2 °К; △ — 85 °К; □ — 300 °К

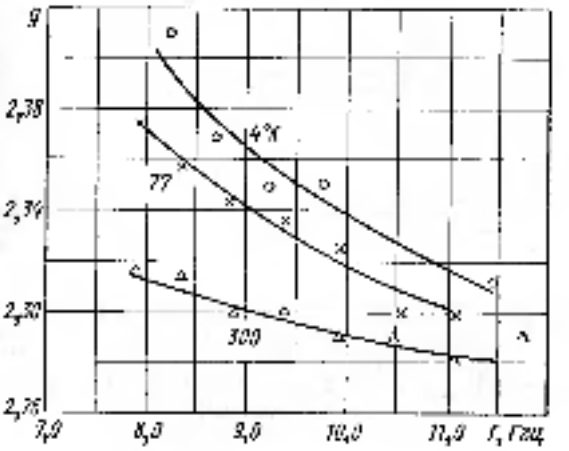


Рис. 29.12. Зависимость фактора спектроскопического расщепления g от частоты для монокристалла $(NiO)_{0,26}(FeO)_{0,06}Fe_2O_3$ [71]

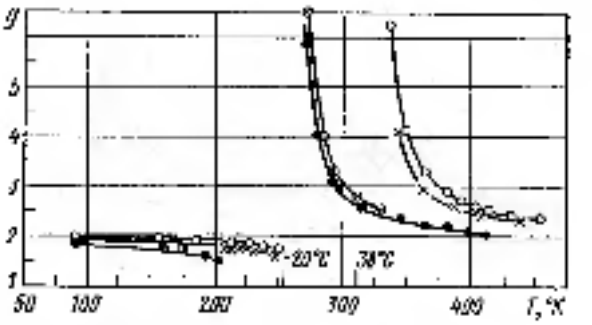


Рис. 29.13. Зависимость g-фактора литиевых ферритов-хромитов от температуры [72]:

$Li_{0,5}Fe_{1,0}Cr_{1,5}O_4$: ○ — 9000 Мгц; ● — 24000 Мгц; $Li_{0,5}Fe_{1,25}Cr_{1,25}O_4$: ○ — 9000 Мгц; × — 24000 Мгц. Точки показывают $T_{комн}$ лежат около −20°C и +20°C

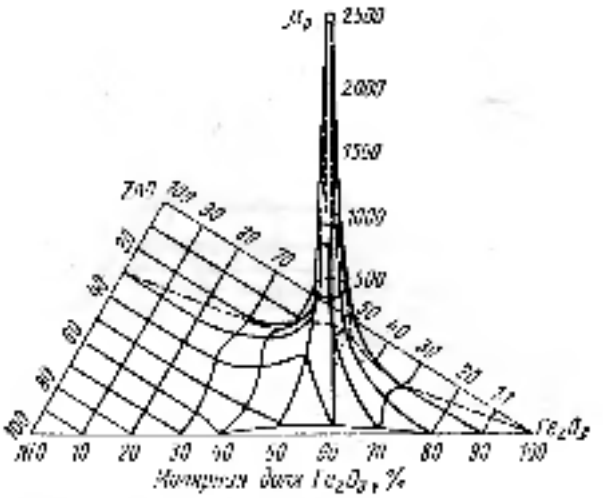


Рис. 29.14. Зависимость начальной магнитной проницаемости μ_0 ферритов в системе NiO — ZnO — Fe_2O_3 от их состава [73]

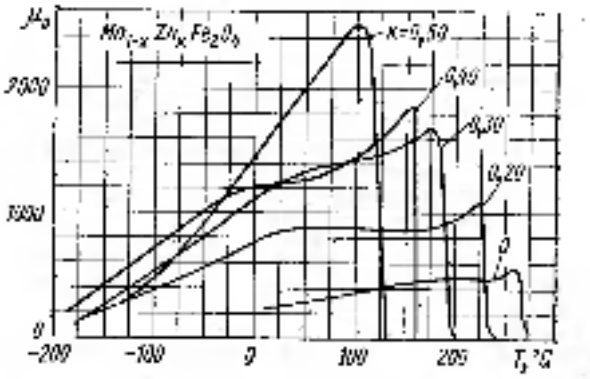


Рис. 29.15. Зависимость начальной магнитной проницаемости μ_0 смешанных марганец-цинковых ферритов от температуры [5]

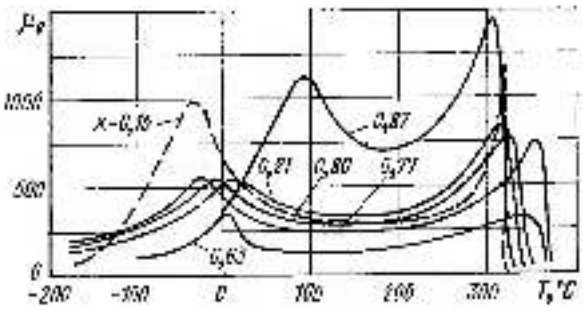


Рис. 29.16. Зависимость начальной магнитной проницаемости μ_0 от температуры для ферритов $Mn_{1-x}Fe^{2+}_{x}Fe_2O_4$ [74]

Сплошные кривые относятся к монокристаллическим образцам — цифры у кривых — x. У некоторых образцов плотность спекания составляла лишь 0,5 μ_0 [illegible] при комнатной температуре (точки 70°С). Наличие последнего обусловлено, вероятно, эффектом доспекания

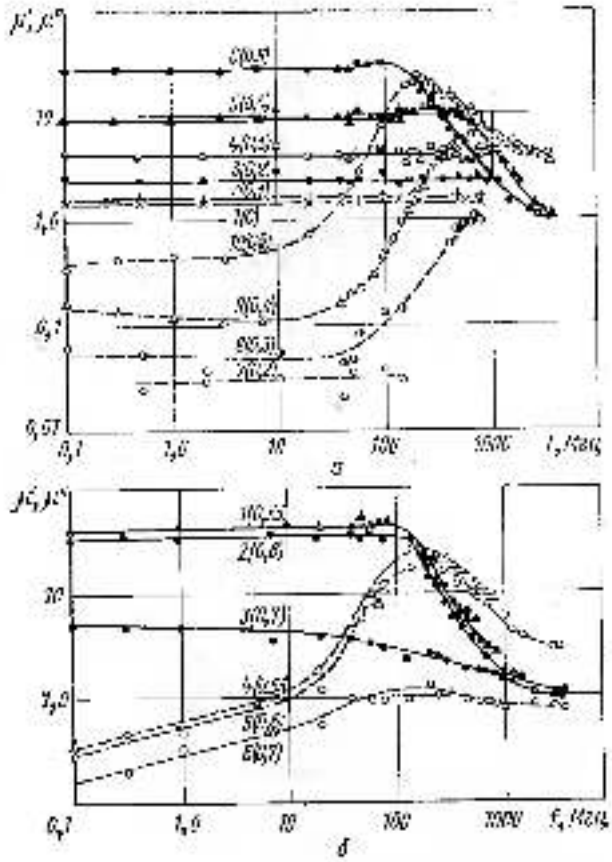


Рис. 29.17. Магнитные спектры кобальт-цинкового феррита $Co_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ [76]:

а — при $0 \le x \le 0,5$. Кривые 1 — 6 — $\mu'(f)$; 7 — 10 — $\mu''(f)$. б — при $x \ge 0,5$. Кривые 1 — 7 — $\mu'(f)$; (8 — 6) — $\mu''(f)$. В скобках приведены значения x для каждой кривой

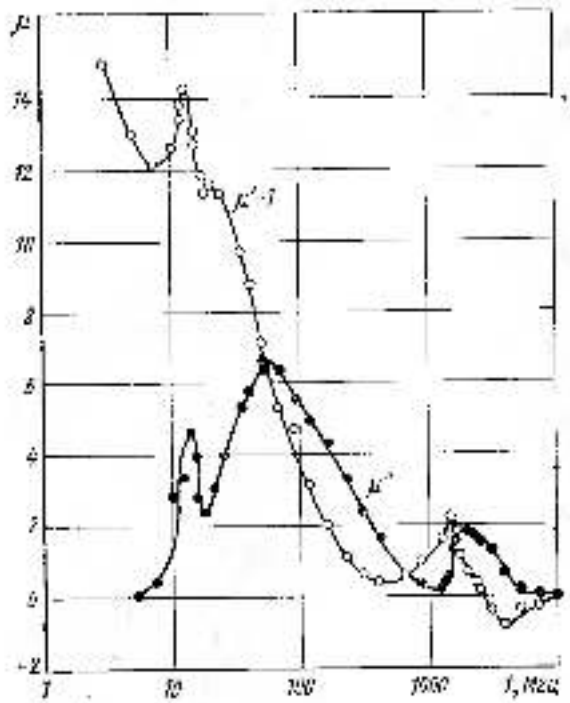


Рис. 29.18. Зависимость вещественной μ' и мнимой μ'' частей начальной магнитной проницаемости от частоты для поликристаллического феррита $(NiO)_{0,88}(FeO)_{0,12}Fe_2O_3$ при комнатной температуре [84] (μ_0 — 3,09 $\pm$ [illegible]; σ_s (26° С) — 26,4 [illegible])

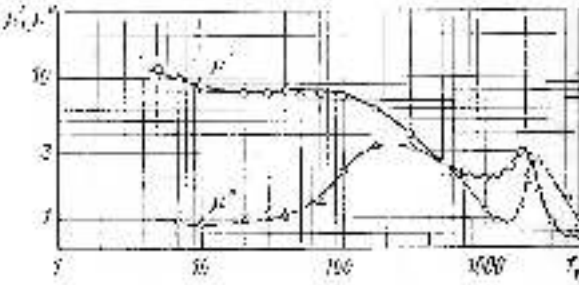


Рис. 29.19. Зависимость вещественной μ' и мнимой μ'' частей начальной магнитной проницаемости для поликристаллического феррита-алюмината $NiMn_{0,02}Al_{0,2}Fe_{1,8}O_4$ при комнатной температуре от частоты [64]

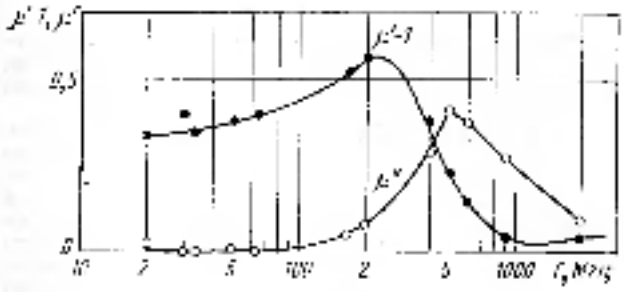


Рис. 20.20. Магнитный спектр поликристаллического литиевого феррита-хромита $Li_{0,5}Fe_{1,0}Cr_{1,5}O_4$ [6] (σ_s = 2,2 гс·см³/г; ρ = 4,3 г/см³)

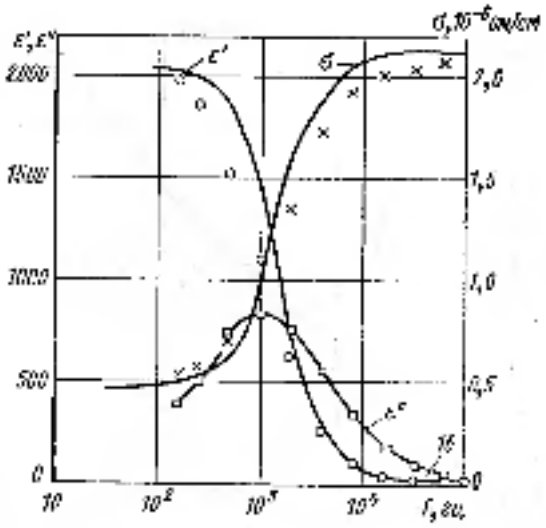


Рис. 20.22. Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ и удельной проводимости σ феррита $Ni_{1-x}Zn_{0,6}Fe_2O_4$ от частоты [77]

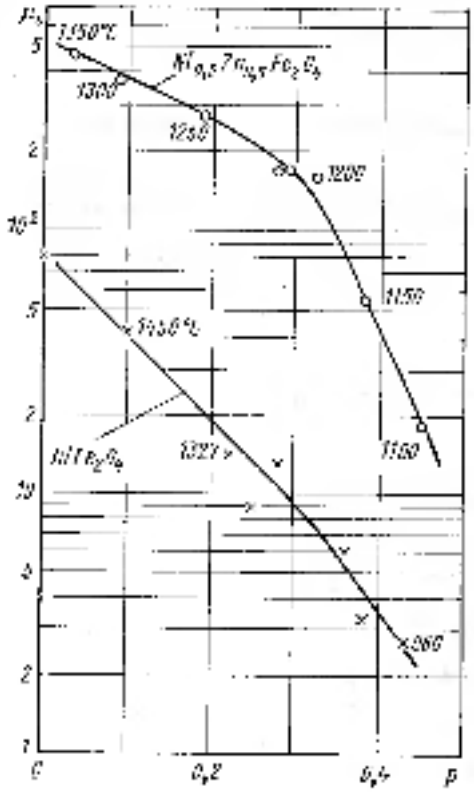


Рис. 20.21. Зависимость начальной проницаемости μ_0 от пористости p для поликристаллических образцов никелевого [79] и никель-цинкового [5] ферритов. Для p = 0 приведены результаты измерений на монокристалле никелевого феррита [76]. Пористость изменялась в результате изменения температуры спекания; последняя указана для каждого образца

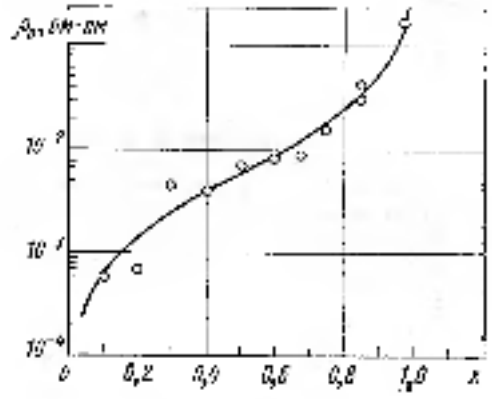


Рис. 20.23. Зависимость удельного сопротивления ρ от состава ферритов типа $Mn_{1-x}Fe_{1-x}O_4$ [78]:

○ — экспериментальные значения; сплошная линия — $\rho = 0 \cdot 10^{-9}$ [x/(1—x)]

Для теоретической интерпретации результатов по ферромагнитному резонансу и электронным резонансным ферритов-гранатов необходимо одновременно учесть расщепление уровней ионов за счет кристаллического поля, спин-орбитального и обменного взаимодействий, которые тоже являются величинами одного порядка. В настоящее время информация об электронных уровнях ионов редкоземельных элементов еще недостаточна для полной теоретической интерпретации результатов.

Магнитострикция. Магнитострикционная деформация кристалла зависит от направления вектора намагниченности по отношению к кристаллографическим осям [90]. Обозначая направляющие косинусы вектора намагниченности α_i, можно представить относительное изменение длины $\delta l/l$ в кубическом кристалле в направлении, заданном косинусами β_i, в виде (20.5).

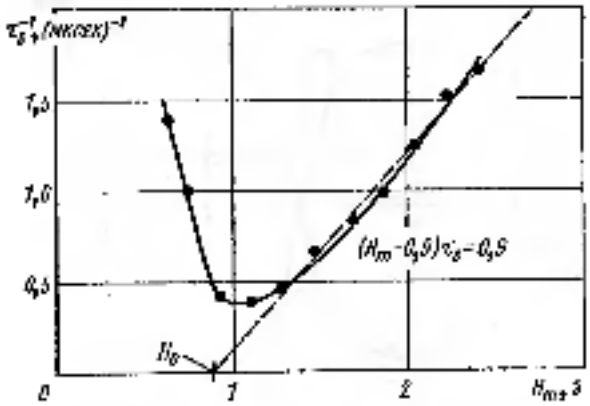


Рис. 29.24. Зависимость обратного времени переключения τ_s^{-1} от амплитуды переменнозначного импульса H_m для феррита $Mg_{0,67}Mn^{2+}_{0,56}Mn^{3+}_{0,23}Fe_{1,77}O_4$ [67]. Напряженность порогового поля $H_0 = 0,9$ э. Константа переключения $\tau_{sp} = 0,9$ э·мксек

Магнитострикция редкоземельных ферритов-гранатов линейно связана с концентрацией редкоземельных ионов и сильно возрастает при понижении температуры. Рекордные значения $\lambda_{111} = 2420 \cdot 10^{-6}$ и $\lambda_{100} = -1200 \cdot 10^{-6}$ в поле $H = 25$ кэ при 4,2° К были получены в тербиевом феррите-гранате [91], что сравнимо по порядку величины с магнитострикцией редкоземельных металлов.

Упругие свойства и магнитоупругое взаимодействие. Магнитоакустические эффекты в гранатах возникают в результате взаимодействия между спинами магнитных ионов и упругими колебаниями кристаллической решетки, т. е. в результате тех же взаимодействий, которые определяют магнитострикционные эффекты. Выражение для упругой и магнитоупругой энергии кубика железа в виде [93]:

$$E_y + E_{my} = \frac{1}{2} C_{11}\left(e_{xx}^2 + e_{yy}^2 + e_{zz}^2\right) + \frac{1}{4} C_{44}\left(e_{xy}^2 + e_{yz}^2 + e_{zx}^2\right) + C_{12}\left(e_{xx}e_{yy} + e_{yy}e_{zz} + e_{zz}e_{xx}\right) + B_1\left(\alpha_x^2 e_{xx} + \alpha_y^2 e_{yy} + \alpha_z^2 e_{zz}\right) + B_2\left(\alpha_x\alpha_y e_{xy} + \alpha_y\alpha_z e_{yz} + \alpha_z\alpha_x e_{zx}\right),$$

где $C_{11} = c_{1111}$, $C_{12} = c_{1122}$, $C_{44} = c_{2323}$ — упругие константы, $B_1 = b_{1111}$, $B_2 = b_{2323}$ — магнитоупругие константы.

Условия для упругой и магнитоупругой изотропии следующие:

$$C_{11} - C_{12} = 2C_{44}; \quad B_1 = B_2.$$

Первое условие выполняется в иттриевом феррите-гранате с погрешностью до 5%. Значения констант, определяющих упругие и магнитоупругие свойства, приведены на с. 561.

Оптические и магнитооптические свойства. Ферриты-гранаты обладают сравнительно высокой прозрачностью в ряде участков ближнего и дальнего инфракрасного спектра [94]. Так, в иттриевом феррите-гранате имеются окна прозрачности при длинах волн $1 \leq \lambda \leq 6,1$ мк и $1 \leq \lambda \leq 10$ мкм, между двумя этими областями наблюдается сильное решеточное поглощение. В редкоземельных ферритах-гранатах в первой области прозрачности могут наблюдаться поглощение при ферромагнитном резонансе (при больших полях анизотропии), обменное резонансное редкоземельной подрешетки в поле железных подрешеток, а также электронные переходы между уровнями основного мультиплета редкоземельных ионов [96]. Во второй области наблюдаются электронные переходы в редкоземельных ионах и (при более коротких длинах волн) электронные переходы в ионах железа в октаэдрических и тетраэдрических позициях [97, 98]. Ферриты-гранаты в видимой и ближней инфракрасных областях спектра обнаруживают значительный эффект Фарадея [98, 99] при распространении света вдоль вектора намагниченности и примерно такой же по величине эффект Коттона — Мутона (магнитное линейное двулучепреломление) при распространении света перпендикулярно вектору намагниченности [100, 101].

Кристаллографические и другие характеристики

Таблица 29.11

Кристаллографические позиции в структуре граната [102]

Кристаллографические характеристики	Типовая кристаллическая формула			
	$\{Ca_3\}$	$[Al_2]$	(Si_3)	O_{12}
Точечная симметрия	222	$\bar{3}$	$\bar{4}$	$\bar{1}$
Позиция пространственной группы	24 c	16 a	24 d	96 h
Кислородная координация	8	6	4	—
Вид кислородного окружения	Додекаэдр (искаженный куб)	Октаэдр	Тетраэдр	—

Таблица 29.12

Распределение катионов по подрешеткам в структуре граната [102]

(в скобках указан ионный радиус, Å [103])

Позиция	Октаэдрическая подрешетка (16 a)	Тетраэдрическая подрешетка (24 d)	Додекаэдрическая подрешетка (24 c)
1A	—	Li^{1+} (0,68)	Na^{1+} (0,98)
1B	—	—	Cu^{2+} (0,80)

Группа	Октаэдрические пустоты (16 a)	Тетраэдрические пустоты (24 d)	Додекаэдрические пустоты (24 c)
IIA	Mg^{2+} (0,74)	—	Mg^{2+}, Ca^{2+} (1,04), Sr^{2+} (1,20), Ba^{2+} (1,38)
IIB	Zn^{2+} (0,83)		Zn^{2+}?, Cd^{2+} (0,99)
IIIA	Al^{3+} (0,57), Ga^{3+} (0,62), In^{3+} (0,92)	Al^{3+}, Ga^{3+}	—
IIIB	Sc^{3+} (0,81)	—	Y^{3+} (0,97) и большинство редкоземельных элементов, кроме Ce^{3+}
IVA	Si^{4+} (0,39), Ge^{4+} (0,44), Sn^{4+} (0,67)	Si^{4+}, Ge^{4+}, Sn^{4+}?	—
IVB	Ti^{4+} (0,64), Zr^{4+} (0,82), Hf^{4+} (0,82)	Ti^{4+}	—
VA	Sb^{5+} (0,62)	P^{5+} (0,35), As^{5+} (0,47)	Bi^{3+} (1,20)
VB	Nb^{5+} (0,66), Ta^{5+} (0,64)	V^{5+} (0,40)	
VIB	Cr^{3+} (0,64)	—	Cr^{2+} (0,83)
VIIB	Mn^{3+} (0,91)	—	Mn^{2+}
VIII	Fe^{3+} (0,67), Co^{3+} (0,78), Ni^{2+} (0,74), Rh^{3+} (0,68)	Fe^{3+}, Rh^{3+}	Fe^{2+} (0,80)

Таблица 29.13

Расстояния между ионами в иттрий-железистом гранате (ИЖГ) $Y_3Fe_5O_{12}$ [104]

Числа в скобках указывают количество связей

Ион	Расстояние между ионами, Å
Y^{3+}(24 c)	(4) Fe^{3+} (16 a) 3,46 (6) Fe^{3+} (24 d) 3,09 (2); 3,79 (4) (8) O^{2-} 2,37 (4); 2,43 (4)
Fe^{3+} (16 a)	(2) Y^{3+} (24 c) 3,46 (6) Fe^{3+} (24 a) 3,46 (6) O^{2-} 2,0
Fe^{3+} (24 d)	(6) Y^{3+} (24 c) 3,09 (2); 3,79 (4) (4) Fe^{3+} (16 a) 3,46 (4) Fe^{3+} (24 d) 3,79 (4) O^{2-} 1,89
O^{2-}	(2) Y^{3+} (24 c) 2,37; 2,43 (1) Fe^{3+} (16 a) 2,00 (1) Fe^{3+} (24 d) 1,89 (9) O^{2-} 2,68 (2); 2,81; 2,87; 2,96; 2,99 (2); 3,16 (2).

Таблица 29.14

Углы связи катион—анион—катион в ИЖГ [104]

Связь	Угол связи, град	Связь	Угол связи, град
Fe(a)—O—Fe(d)	120,6	Fe(a)—O—Fe(a)	147,2
Fe(a)—O—Y(c)	102,8	Fe(d)—O—Fe(d)	86,6
Fe(a)—O—Y(c)	104,7	Fe(d)—O—Fe(d)	78,8
Fe(d)—O—Y(c)	122,2	Fe(d)—O—Fe(d)	74,7
Fe(d)—O—Y(c)	99,2	Fe(d)—O—Fe(d)	74,6
Y(c)—O—Y(c)	101,7		

Таблица 29.15

Диэлектрические свойства ИЖГ

Параметр	Диапазон	f, ГГц	Примечание	Литературный источник
ε'	12	0,02	Обжиг при 1350—1450°С в атмосфере O_2	[105]
	10	3,00—9,24	Обжиг при 1380°С	[106]
ε''	0,0015	9,24	Обжиг при 1385°С. Концентрация Mn 1—2%	[106]
	0,009	9,24	Обжиг при 1200°С. Концентрация Cu 2%	[106]
tg δ	0,002	3,00—9,24	Обжиг при 1380°С	[106]
	0,002	10	Обжиг при 1400°С	[107]
	0,003	0,02	Обжиг при 1300—1500°С в O_2	[108]

Электронные конфигурации, основные термы, валентности и ионные радиусы редкоземельных элементов, скандия и иттрия

Элемент	Электронная конфигурация атома	Наиболее вероятная валентность	Электронная конфигурация трехзарядного иона	Основной терм трехзарядного иона	Радиус трехзарядного иона*	
					[106]	[108]
La	$5d^1 6s^2$	3	$5p^6$	$^1S_0$	—	1,04
Ce	$4f^1 5d^1 6s^2$	3 (4)	$4f^1$ (Ce^{3+})	$^2F_{5/2}$	—	1,02
Pr	$4f^3 6s^2$	3 (4)	$4f^2$ (Pr^{3+})	$^3H_4$	—	1,00
Nd	$4f^4 6s^2$	3	$4f^3$	$^4I_{9/2}$	1,18	0,99
Pm	$4f^5 6s^2$	—	$4f^4$	$^5I_4$	—	0,98
Sm	$4f^6 6s^2$	2 (3)	$4f^5$ (Sm^{3+})	$^6H_{5/2}$	1,136	0,97
Eu	$4f^7 6s^2$	2 (3)	$4f^6$ (Eu^{3+})	$^7F_0$	1,131	0,97
Gd	$4f^7 5d^1 6s^2$	3	$4f^7$	$^8S_{7/2}$	1,11	0,94
Tb	$4f^9 5d^0 6s^2$	3 (4)	$4f^8$ (Tb^{3+})	$^7F_6$	1,09	0,89
Dy	$4f^{10} 6s^2$	3	$4f^9$	$^6H_{15/2}$	1,07	0,88
Ho	$4f^{11} 6s^2$	3	$4f^{10}$	$^5I_8$	1,05	0,86
Er	$4f^{12} 6s^2$	3	$4f^{11}$	$^4I_{15/2}$	1,003	0,85
Tm	$4f^{13} 6s^2$	3	$4f^{12}$	$^3H_6$	1,09	0,85
Yb	$4f^{14} 6s^2$	2 (3)	$4f^{13}$ (Yb^{3+})	$^2F_{7/2}$	1,00	0,81
Lu	$4f^{14} 5d^1 6s^2$	3	$4f^{14}$	$^1S_0$	0,99	0,86
Sc	$3d^1 4s^2$	3	$3p^6$	$^1S_0$	—	0,88
Y	$4d^1 5s^2$	3	$4p^6$	$^1S_0$	1,05	0,97

* Рассчитан по отношению к кислороду, радиус которого принят равным 1,36 Å.

Таблица 29.17

Магнитные свойства ИЖГ и редкоземельных ферритов-гранатов

Соединение	T_C, °K	$T_{компенс}$, °K	Намагниченность насыщения $4\pi M_s$, гс				Литература
			$4\pi M_s$, гс		$4\pi M_s$, гс		
			0 K	300 K	77 K	300 K	
$Y_3Fe_5O_{12}$	541–560	—	5,0	3,7	2470	1800	[113—115]
$Lu_{0,4}Y_{2,6}Fe_5O_{12}$	—		5,0	—	2200		[115]
$PbY_2Fe_5O_{12}$	—	—	6,0	—	2900	1900	[115]
$Nd_{1,5}Y_{1,5}Fe_5O_{12}$	—	—	7,0		3960	—	[112]
$Sm_3Fe_5O_{12}$	578		5,43	3,7	2600	1770	[114, 115]
$Eu_3Fe_5O_{12}$	566	—	2,76	2,45	1320	1160	[114, 115]
$Gd_3Fe_5O_{12}$	564	286	16,0	—	7250	—	[114, 116]
$Tb_3Fe_5O_{12}$	568	216	18,2	0,7	8800	340	[111, 114]
$Dy_3Fe_5O_{12}$	563	233	16,9	0,9	8200	440	[111, 114]
$Ho_3Fe_5O_{12}$	567	137	16,2	1,5	7400	740	[111, 114]
$Er_3Fe_5O_{12}$	556	83	10,9	2,0		1300	[111, 114]
$Tm_3Fe_5O_{12}$	549	—	1,2	2,8		—	[111, 114]
$Yb_3Fe_5O_{12}$	548	0	0	3,2	—	1640	[111, 114]
$Lu_3Fe_5O_{12}$	549	—	5,02	3,6	2500	1800	[111, 114]

Таблица 29.18

Константы анизотропии ИЖГ и редкоземельных ферритов-гранатов

Соединение	Константы анизотропии, 10^4 эрг/см^3		Литература
	$-K_1$	K_2	
$Y_3Fe_5O_{12}$	6,2 (300°K); 24,5 (0°K)	—	[116, 117]
$Sm_3Fe_5O_{12}$	10,8 (300°K)		[117, 118]
$Eu_3Fe_5O_{12}$	3 (300°K)	—	[119,
$Gd_3Fe_5O_{12}$	250 (0°K)		[117]
$Tb_{0,037}Y_{2,963}Fe_5O_{12}$	—88 (20°K)	460 (20°K)	[120]
$Tb_3Fe_5O_{12}$	700 (80°K)	7600 (80°K)	[118]
$Dy_3Fe_5O_{12}$	970 (80°K)	—214	[118]
$Ho_3Fe_5O_{12}$	800 (80°K)	270	[118]
$Er_3Fe_5O_{12}$	7 (300°K); 52 (160°K)	—	[117, 118]
$Tm_3Fe_5O_{12}$	11 (300°K); 210 (77°K)	100 (77°K)	[121]
$Yb_3Fe_5O_{12}$	4 (300°K); 170 (77°K)	—	[117]
	6 (300°K); 40 (77°K)		[118]

Таблица 20.19

Параметры элементарной ячейки и плотность ИЖГ и редкоземельных ферритов-гранатов

Гранат	Параметр ячейки, Å	ρ, г/см³	Литература
$Y_3Fe_5O_{12}$	12,376	5,17	[110]
$Lu_{0,4}Y_{2,6}Fe_5O_{12}$	12,338	5,24	[111]
$DyY_2Fe_5O_{12}$	12,406	5,42	[111]
$Nd_{1,6}Y_{1,6}Fe_5O_{12}$	12,288	5,60	[112]
$Sm_3Fe_5O_{12}$	12,529	6,23	[110]
$Eu_3Fe_5O_{12}$	12,498	6,31	[110]
$Gd_3Fe_5O_{12}$	12,471	6,46	[110]
$Tb_3Fe_5O_{12}$	12,436	6,55	[110]
$Dy_3Fe_5O_{12}$	12,406	6,61	[110]
$Ho_3Fe_5O_{12}$	12,375	6,77	[110]
$Er_3Fe_5O_{12}$	12,347	6,87	[110]
$Tm_3Fe_5O_{12}$	12,323	6,94	[110]
$Yb_3Fe_5O_{12}$	12,302	7,06	[110]
$Lu_3Fe_5O_{12}$	12,283	7,14	[110]

Таблица 20.22

Постоянная элементарной ячейки и плотность редкоземельных галлатов [125] и алюминатов [109] со структурой граната

Соединение	a, Å	ρ, г/см³
$Y_3Ga_5O_{12}$	12,30	5,73
$Pr_3Ga_5O_{12}$	12,57	6,40
$Nd_3Ga_5O_{12}$	12,50	6,57
$Sm_3Ga_5O_{12}$	12,42	6,58
$Gd_3Ga_5O_{12}$	12,39	7,02
$Dy_3Ga_5O_{12}$	12,32	7,25
$Er_3Ga_5O_{12}$	12,25	7,49
$Y_3Al_5O_{12}$	12,02	4,10
$Gd_3Al_5O_{12}$	12,11	5,35
$Dy_3Al_5O_{12}$	12,06	6,15
$Er_3Al_5O_{12}$	11,98	6,37

Таблица 20.23

Расчетные значения момента насыщения (M_0) ионов редкоземельных элементов в структуре граната и соответствующие расчетные $M_{расч}$ и измеренные $M_{изм}$ в поле 200 кэ значения момента на молекулу $3Fe_2O_3 \cdot 3M_2O_3$ [122]

Момент насыщения	Редкоземельный элемент					
	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb
M_{0}, μ_B	6,8±0,2	7,92±0,25	6,6±0,2	4,6±0,2	5,1±0,1	1,7±0,04
$M_{расч}$, μ_B	30,6±1,2	37,52±1,5	30,6±1,2	30,6±1,2	20,6±0,6	0,2±0,04
$M_{изм}$, μ_B	30,3±0,3	31,4±0,3	32,5±0,3	27,5±0,3	23,1±0,3	0±0,3

Таблица 20.24

Ширина линии ферромагнитного резонанса ΔH, Э, в некоторых редкоземельных ферритах со структурой граната [123]

T, K	$Sm_3Fe_5O_{12}$		$Gd_3Fe_5O_{12}$		$Er_3Fe_5O_{12}$		$YL_3Fe_5O_{12}$	
	[100]	[111]	[100]	[111]	[100]	[111]	[100]	[111]
301	—	—	—	—	—	—	196	242
296	2100	2400	—	—	474	1180	203	304
195	3500	5000	96,5	206	1980	4400	961	1400
77	Не наблюдается	—	125	170	Не наблюдается	Не наблюдается	1000	5000

Таблица 29.23

Магнитные свойства гранатов $(5-x)\ Fe_2O_3 \cdot xMe_2O_3 \times \times 3Y_2O_3$ [126, 127]
$Me: Ga^{3+}$, Al^{3+}, Sc^{3+}, In^{3+} и Cr^{3+}

x Me_2O_3	$n_{\text{эксп}}$, μ_B	$n_{\text{расч}}$, μ_B	$T_{\text{расч}}$, °K	$T_{\text{эксп}}/T_{\text{расч}}$
0	9,62	545	545	0
1/3 Ga_2O_3	7,95	519	524	0,91
2/3 Ga_2O_3	4,38	460	477	0,88
1/3 Al_2O_3	7,00	497	518	0,85
1 Al_2O_3	3,25	415	451	0,64
1/3 Sc_2O_3	11,97	508	504	0,11
2/3 Sc_2O_3	14,4	503	457	0,21
1/3 In_2O_3	13,8	441	462	0,11
2/3 Cr_2O_3	10,95	515	—	0,00

Таблица 29.24

Положение низкотемпературного максимума ширины линии ферромагнитного резонанса в $Y_3Fe_5O_{12}$ с примесью ионов редкоземельных элементов [124]

Ион	$T_{\Delta H_{\text{макс}}}$, °K			Частота, Гц
	[100]	[110]	[111]	
Pr	37	40	42	9,2
Nd	28	50	43	9,2
Pm	—	—	—	
Sm	42	—	—	23
Eu	—	—		
Gd	—	—	—	—
Tb	90	90	90	20,8
Dy	50	55	52	20,8
Ho			65	9,2
Er	60	—	—	23,8
Tm	61			9,2
Yb	90	145	145	20,8

Таблица 29.25

Зависимость намагниченности насыщения и точки Кюри феррита-граната $Gd_3Fe_{5-x}Al_xO_{12}$ от содержания Al [128]

x	n_B (0°K), μ_B	T_C, °K	x	n_B (0°K), μ_B	T_C, °K
0,50	17,7	500	2,50	16,2	175
1,00	19,2	470	3,00	16,4	88
1,50	20,1	345	3,50	14,9	30
2,00	19,3	250			

Таблица 29.26

Зависимость намагниченности насыщения, температуры компенсации и точки Кюри феррита-граната $Gd_3[Fe_{5-x}Sc_x]Fe_3O_{12}$ от содержания Sc [129]

x	n_B (0°K), μ_B	$T_{\text{комп}}$, °K	T_C, °K	x	n_B (0°K), μ_B	$T_{\text{комп}}$, °K	T_C, °K
0,00	16,0	286	546	1,00	14,2	137	340
0,25	14,9	223	223	1,25	8,6	127	216
0,50	13,7	182	182	1,50	6,0	Нет	30
0,75	12,6	157					

Таблица 29.27

Зависимость точки Кюри и низкочастотной относительной начальной проницаемости при различных температурах от содержания Sc в гранате $Y_3Sc_xFe_{5-x}Fe_3O_{12}$ [129]

x	T_C, °K	μ_r		
		300°K	195°K	77°K
0,0	560	112	73	46,5
0,4	485	346	184	142
0,6	425	601	290	197
0,7	400	814	372	230
0,8	375	1030	494	272
0,9	340	1504	700	360
1,0	320	1	1114	491
1,3	280	1	1	1

Таблица 29.28

Постоянная решетки a и намагниченность насыщения n_B некоторых гранатов, содержащих ионы Si^{4+}, Ge^{4+} и Sn^{4+} [130]

Состав граната	a, Å	n_B (0°K), μ_B
$(1/3)Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$ — $(2/3)Y_3Fe_5Fe_3O_{12}$	12,290	0,5
$(1/3)Ca_3Fe_2Ge_3O_{12}$ — $(2/3)Y_3Fe_5Fe_3O_{12}$	12,350	1,5
$(1/3)Ca_3Fe_2Sn_3O_{12}$ — $(2/3)Y_3Fe_5Fe_3O_{12}$	12,502	5,2
$(1/3)Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$ — $(2/3)Gd_3Fe_5Fe_3O_{12}$	12,70	13,5
$(1/3)Ca_3Al_2Si_3O_{12}$ — $(2/3)Y_3Fe_5Fe_3O_{12}$	12,35	1,4
$(1/3)Ca_3Al_2Si_3O_{12}$ — $(2/3)Gd_3Fe_5Fe_3O_{12}$	12,409	14,2
$Ca_3Fe_2Ge_3O_{12}$	12,312	
$Mn_3Fe_2Ge_3O_{12}$	12,097	—
$Mn_3Fe_2Si_3O_{12}$	11,87	—
$Gd_3Cu_2GaGe_3O_{12}$	12,446	—
$Gd_3Ni_2GaGe_3O_{12}$	12,401	

Таблица 29.29

Магнитные свойства гранатов типа $xCa_3Fe_2Sn_3O_{12} - (1-x)Y_3Fe_5O_{12}$ [181]

x	a, Å	μ_B при 0°K	T_C, °K	x	a, Å	μ_B при 0°K	T_C, °K
0	12,370	5,0	545	5/12	12,530	2,0	290
1/12	12,407	6,25	496	1/2	12,564	1,2	—
1/6	12,440	7,1	400	2/3	12,620	0,25	—
1/3	12,502	5,2	260	1,0	12,729		—

Таблица 29.30

Магнитные свойства феррита граната $[Y_{3-x}Ca_x]\,[Zr_xFe_{2-x}]\,(Fe_3)O_{12}$ [182]

x	a, Å	μ_B при 0°K	μ_B при 300°K	T_C, °K	T_C по Сю-Ко, °K
0	12,376	5,0	5,0	545	545
0,2	12,404	5,0	5,94	—	510
0,4	12,434	6,7	6,79		469
0,6	12,463	7,2	6,75	400	421
0,8	12,501	6,6	6,31		366
0,9	12,516	—	—	—	—
1,0	12,535	5,3	5,31		306
1,2	12,572	3,4	3,87	190	241
1,3	12,588	—		—	—
1,4	12,594	2,0	2,22	—	173
1,6	12,630	1,2	0,71	—	116
2,0	12,684	1,7	0,00		

* μ_B ниже $x=0,8$ при экстраполяции $T \to 0$°K, $H \to \infty$.

Таблица 29.31

Свойства гранатов с титаном и рутением [133, 134]

Соединение	x	a	μ_B, μ_B	
			T=300°K	T=400°K
$Y_{3-x}Ca_xTi_xFe_{5-x}O_{12}$	0,20	12,382	—	—
	0,40	12,390	5,64	—
	0,65	12,398	5,89	3,1
$Y_{3-x}Ca_xRu_xFe_{5-x}O_{12}$	0,34	12,393	5,24	

Таблица 29.32

Магнитные свойства гранатов $(Bi_xY_{3-x})Fe_5O_{12}$ [136]

x	T_C, °K	μ_B (0°K), μ_B	μ_B (300°K), μ_B
0,25		4,97	3,67
0,75	—	5,04	3,75
1,00	591	5,09	3,79

Таблица 29.33

Параметр элементарной ячейки и магнитные свойства ферритов-гранатов, содержащих V^{3+}, Sb^{3+}

Феррит-гранат	x	a, Å	T_C, °K	μ_B (0°K), μ_B
$[Y_{3-x}Ca_x]\,[Fe_3]\,(Fe_{5-x}V_xO_{12}$ [136]	0,00	12,376	557	5,00
	0,40	12,400	560	
	0,80	12,422	548	1,00
	1,25	12,449	523	1,23
	1,60	12,465	403	—2,30
$[Y_{3-x}Ca_x]\,[Fe_{2-y}Sb_y]\,(Fe_3)\,O_{12}$ [137]	0,50	12,446	—	7,25
	0,60	12,460	—	7,52
	0,70	12,473	—	7,10
	1,00	12,514	—	4,25
	1,50	12,580		0,4
$[Ca_3]\,[Sb_yFe_{2-y}]\,(Fe_{1,5-x}V_{1,5+x})\,O_{12}$ [129]	0,00	12,465		2,50
	0,30	12,487	—	0,51
	0,50	12,502		1,65
	0,75	12,523	—	2,5
	1,50	12,580	—	0,4

Таблица 29.24

Константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} ферритов-гранатов [138]

Феррит-гранат	$\lambda_{100}\cdot10^6$			$\lambda_{111}\cdot10^6$		
	70°К	150°К	290°К	70°К	150°К	290°К
$Y_3Fe_5O_{12}$	—1,0	—1,1	—1,4	3,6	3,9	2,4
$Sm_3Fe_5O_{12}$	159	49	91	—183	—28,1	8,5
$Eu_3Fe_5O_{12}$	86	52	21	9,7	5,3	1,8
$Gd_3Fe_5O_{12}$	4,0	1,7	0	5,1	4,5	—1,1
$Tb_3Fe_5O_{12}$	67	—10,0	—3,3	90,0	66	12
$Dy_3Fe_5O_{12}$	—165	46,6	12,7	—14,1	—21,6	—5,9
$Ho_3Fe_5O_{12}$	—82,2	—10,6	—3,4	56,3	—7,4	—4,0
$Er_3Fe_5O_{12}$	10,7	4,1	2,0	—19,4	9,6	4,9
$Tm_3Fe_5O_{12}$	23	4,0	1,4	—31,2	11,3	5,2
$Yb_3Fe_5O_{12}$	18,3	5,0	1,4	—14,4	—7,1	—4,5

Упругие [139] и магнитоупругие [140] константы ИЖГ при комнатной температуре: $C_{11} = 26,9\cdot10^{11}$ *дин/см²*; $C_{12} = 10,77\cdot10^{11}$ *дин/см²*; $C_{44} = 7,64\cdot10^{11}$ *дин/см²*; $b_1 = 3,42\cdot10^6$ *эрг/см³*; $b_2 = -6,56\cdot10^6$ *эрг/см³*.

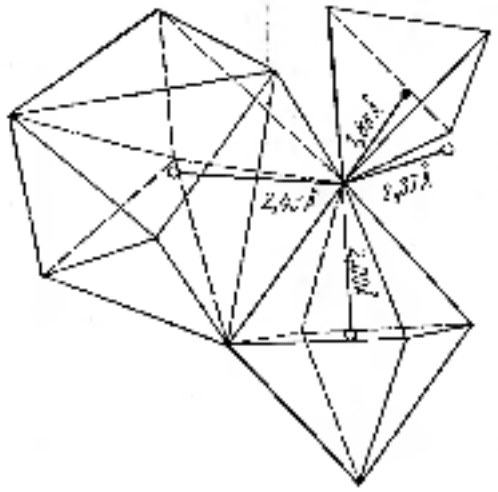


Рис. 29.25. Схема структуры иттриевого феррита-граната [127]. Показаны расстояния металлических ионов каждого типа от общего для всех ближайшего иона кислорода

Рис. 29.26. Зависимость самопроизвольной намагниченности на 1 грамм-молекулу редкоземельных ферритов-гранатов и феррита-граната иттрия от температуры [114]

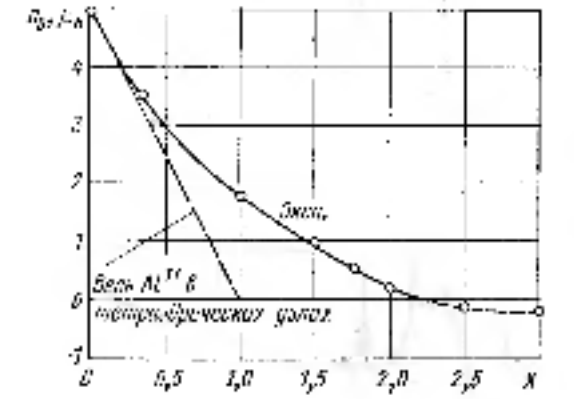


Рис. 29.27. Зависимость спонтанного момента от состава для граната $Y_3Fe_{5-x}Al_xO_{12}$. Намагниченность для граната $Y_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ почти совпадает с кривой для $Y_3Fe_{5-x}Al_xO_{12}$ вплоть до значения $x = 1,6$, до которого было проведено измерение [153] (см. также рис. 29.28)

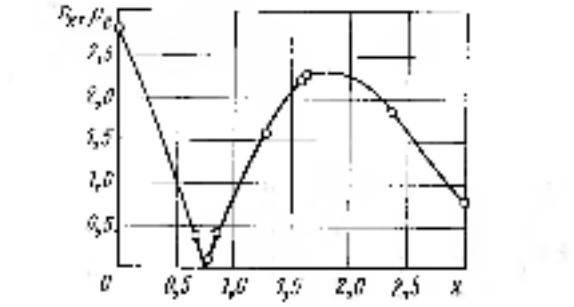


Рис. 29.28. Намагниченность насыщения на формульную единицу граната $Eu_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$. Намагниченность измерялась на свободной сфере из монокристалла и экстраполирована к $H = 0$ [141]

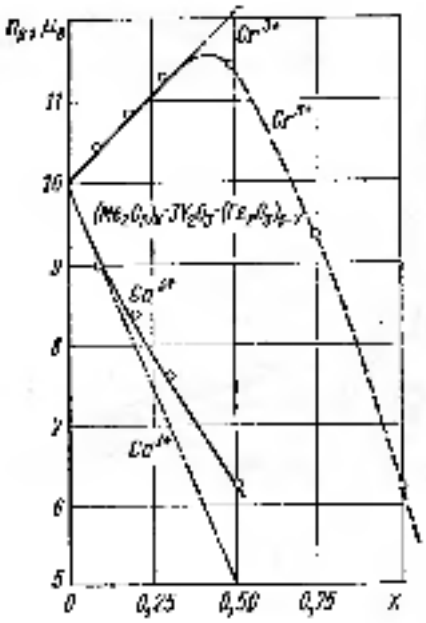


Рис. 29.29. Зависимость намагниченности насыщения n_B (0° К) на молекулу в феррите-гранате иттрия от содержания x ионов Ga^{3+} и Cr^{3+} [127] (— · — · — теория)

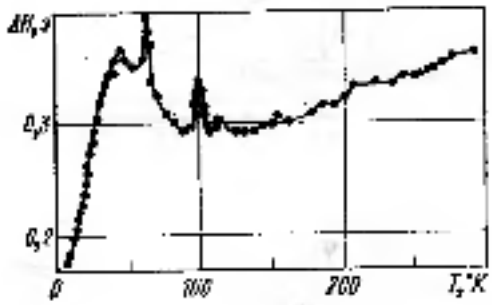
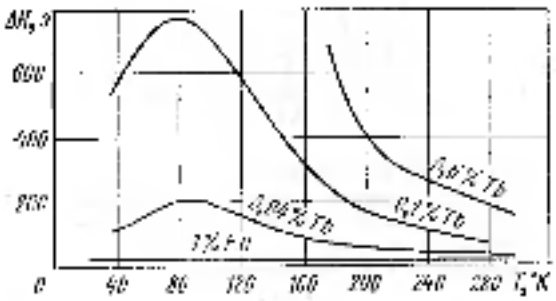


Рис. 29.30. Зависимость ширины резонансной кривой от температуры монокристалла иттриевого граната, выращенного из специальной окиси иттрия, содержащей менее 10^{-4}% остаточных примесей редкоземельных элементов [142]



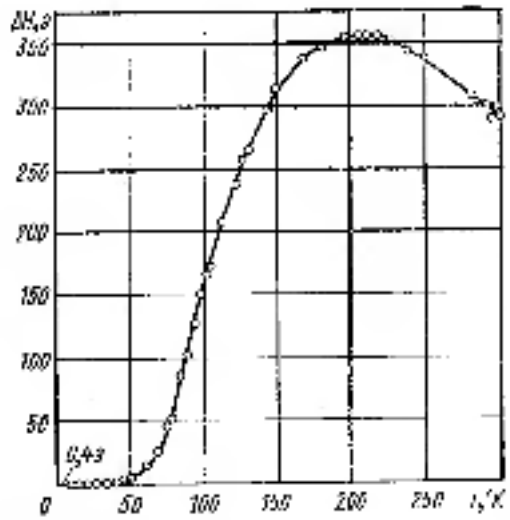


Рис. 29.31. Зависимость ширины резонансной кривой от температуры монокристалла серошевого феррита-граната $Tb_3Fe_5O_{12}$ [143]

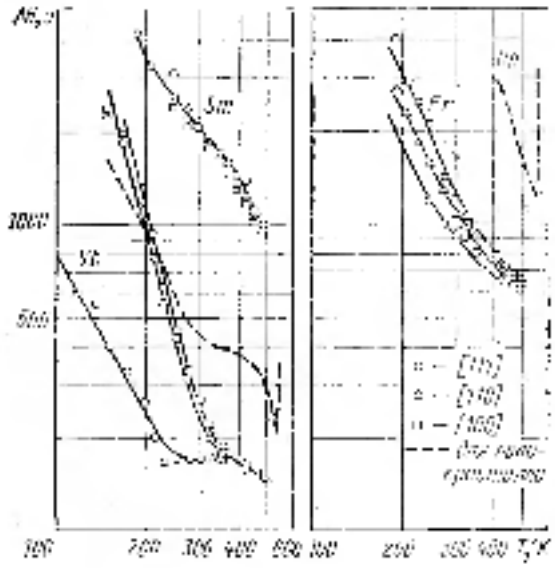


Рис. 29.32. Зависимость ширины резонансной кривой для ферритов-гранатов самария, иттербия, эрбия и гольмия от температуры [123]

Рис. 29.33. Зависимость ширины резонансной кривой от температуры для монокристалла иттриевого граната с примесью тербия и европия [144]

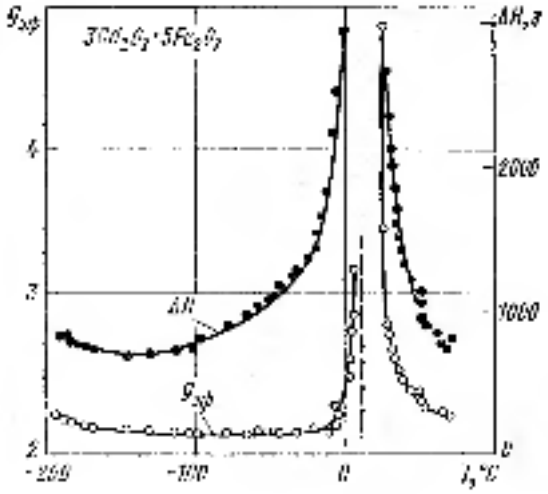


Рис. 29.34. Зависимость эффективного значения g фактора и ширины резонансной кривой для случая ферромагнитного резонанса в гадолиниевом гранате вблизи $T_{комп}$ от температуры [145]. Данные получены на монокристаллическом сферическом образце при частоте 9479 Мгц

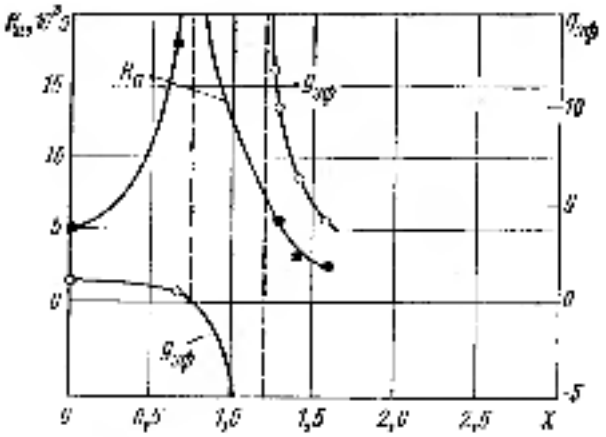


Рис. 29.36. Значения эффективного g-фактора и поля анизотропии H_{res} при 4,2° К вдоль направления [111] ($H_{res} \simeq 4K_1/3M_s$) в зависимости от содержания галлия в гранате $Pb_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ [141]

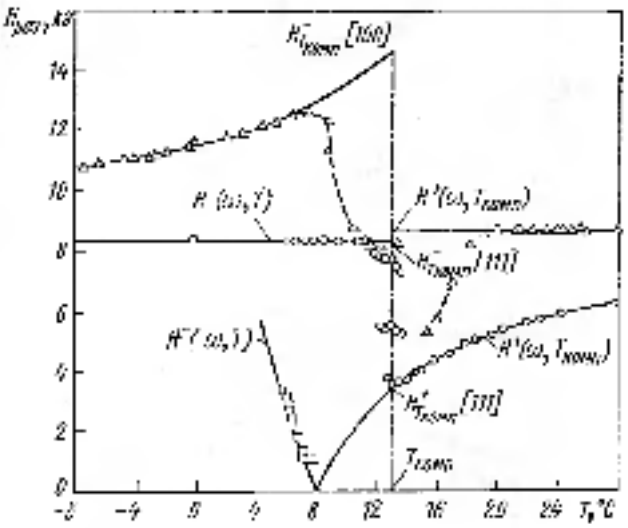


Рис. 29.35. Экспериментальные зависимости резонансного поля для случая обменного резонанса в гадолиниевом гранате вблизи точки магнитной компенсации $T_{комп}$ от температуры [146].

Около нижних кривых магнитный случай, когда значение поля непрерывно вплоть до нулевой оси. Данные получены на монокристаллических сферических образцах при частоте 24-89 Мгц. Ориентация: ○ — вдоль [111]; △ — вдоль [100]; □ — промежуточная [111]; — — — — область неустойчивости для спинов, не направленных по [100]

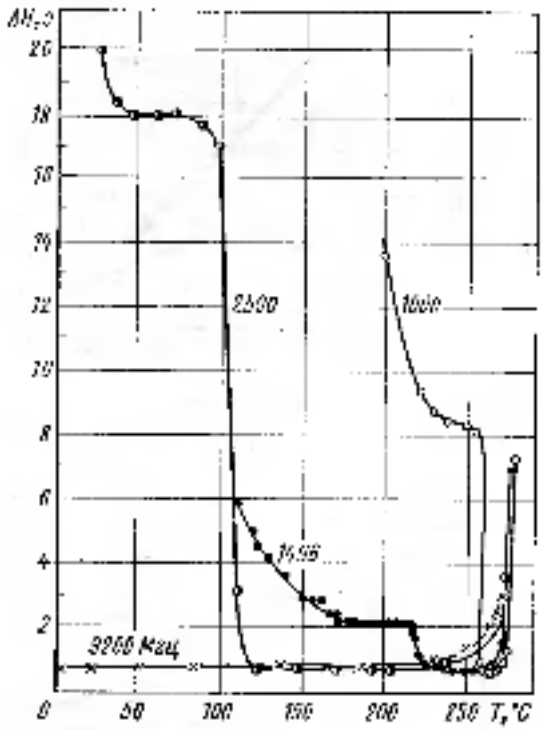


Рис. 29.37. Зависимость ширины линии ферромагнитного резонанса монокристалла иттриевого граната при различных частотах от температуры [164]

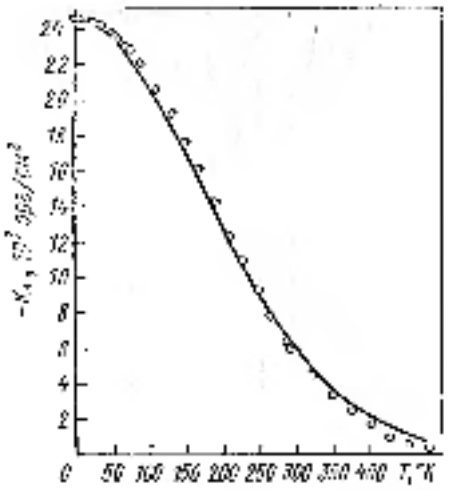


Рис. 29.38. Зависимость первой константы анизотропии K_1 иттриевого феррита-граната от температуры [123]:

○ — экспериментальные данные, ——— — расчет по модели кристаллического поля

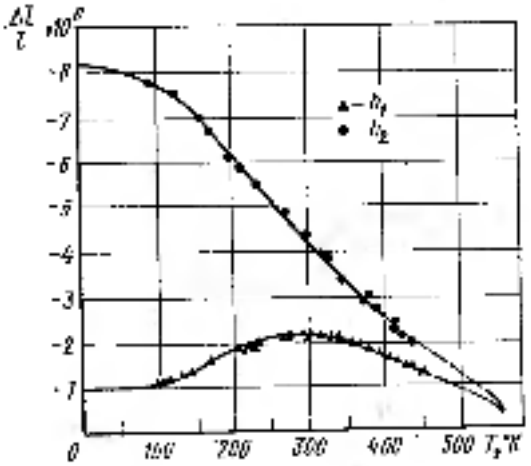
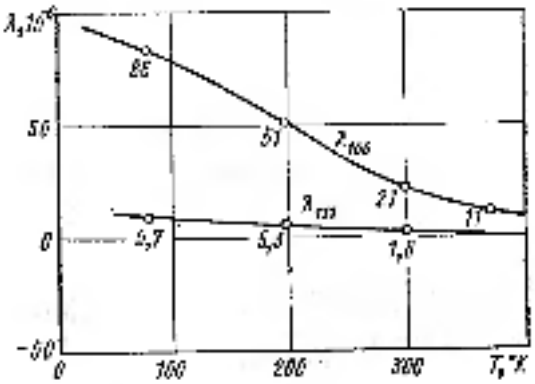


Рис. 29.39. Зависимость константы магнитострикции для иттриевого феррита-граната от температуры [148]



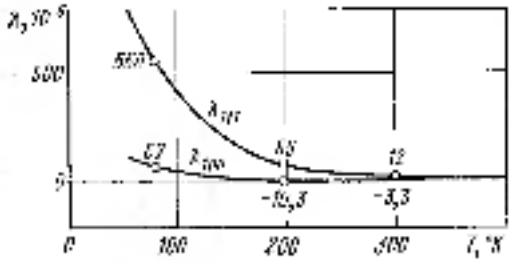


Рис. 29.41. Зависимость констант магнитострикции феррита-граната тербия $Tb_3Fe_5O_{12}$ от температуры [108]

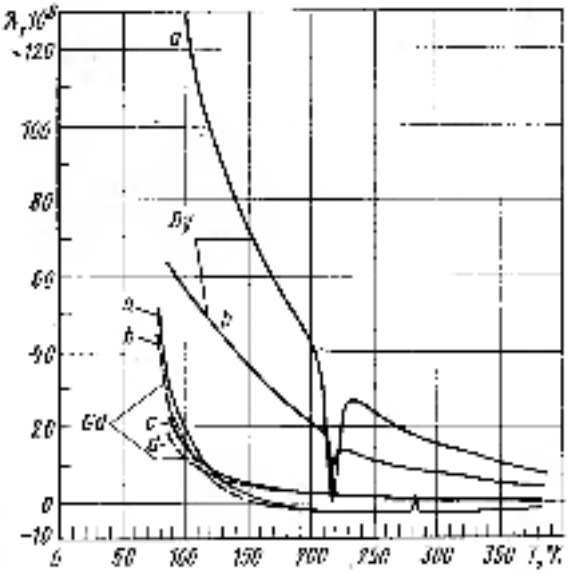


Рис. 29.42. Температурная зависимость магнитострикции ферритов-гранатов $GdyFe_5O_{12}$ и $DyyFe_5O_{12}$ [149]:

Dy: a — λ_{111}, $H = 7,6$ кЭ; b — λ_{100}, $H = 5,1$ кЭ; Gd: a — λ_{100}, $H = 0,2$ кЭ; b — λ_{100}, $H = 5,2$ кЭ; c — λ_{111}, $H = 8,2$ кЭ; d — λ_{111}, $H = 7,6$ кЭ

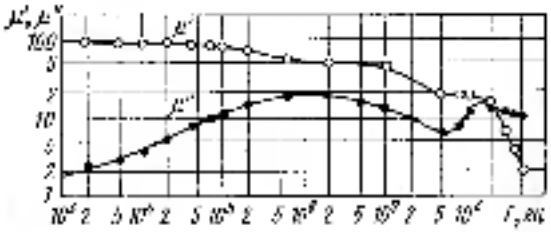


Рис. 29.43. Действительная μ' и мнимая μ'' части начальной магнитной проницаемости при 20° С образца $YbFe_5O_{12}$ как функция частоты f (ρ = 4,9 г/см³) [150]

Рис. 29.40. Зависимость констант магнитострикции для феррита-граната европия $EuyFe_5O_{12}$ от температуры [138]

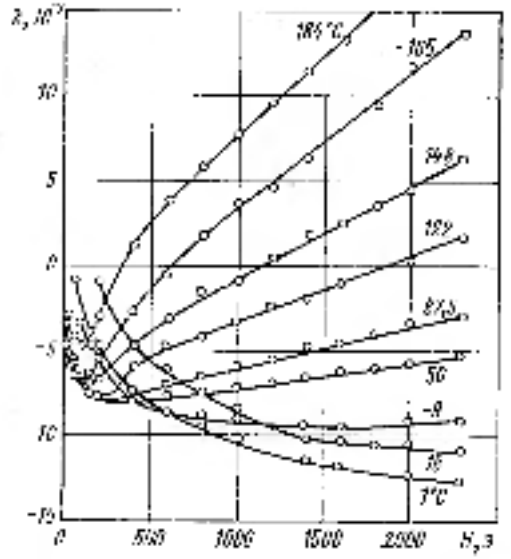


Рис. 29.44. Изотермы намагничивания для феррита-граната $5CdO_3 \cdot 3Fe_2O_3$ [116]

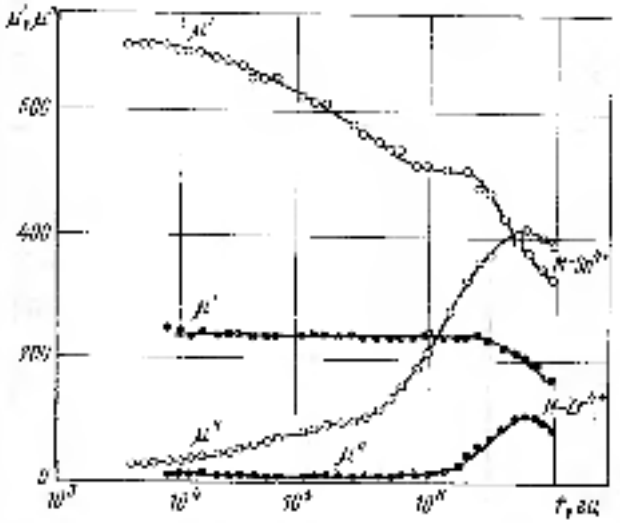


Рис. 29.45. Зависимости μ' и μ'' твердых растворов $Y_{2,5}Ca_{0,5}[Fe_{1,2}M_{0,8}](Fe_3)O_{12}$ от частоты при 20°C [151]

29.3. ГЕКСАГОНАЛЬНЫЕ ФЕРРИТЫ

Большая группа ферромагнитных оксидов обладает гексагональной кристаллической структурой [153—156, 159]. На рис. 29.48 приведена диаграмма, на которой указаны химические составы таких веществ. В углах расположены соединения BaO, MeO и Fe_2O_3. Символ Me означает двухвалентные ионы первой переходной группы или ионы Zn^{2+} и Mg^{2+}, а также комбинацию этих ионов (например, Li^{+} и Fe^{3+}). На линии диаграммы, соединяющей BaO и Fe_2O_3, отмечена точка, соответствующая антиферромагнитному бариевому ферриту $BaFe_2O_4$. Точка S на линии MeO — Fe_2O_3 соответствует соединению $Me_2Fe_4O_9$ с кубической кристаллической структурой типа шпинели. Точка M отмечает оксиду, имеющему гексагональную структуру в химическом составе $BaFe_{12}O_{19}$ — BaO·6Fe_2O_3. Точка Y от диаграмме соответствует соединению $Ba_2Me_2Fe_{12}O_{22}$ — 2(BaO·MeO·3Fe_2O_3).

Известно также большое число соединений с составом, лежащим на линиях M — S и M — Y, а элементарная ячейка этих соединений может быть легко построена из всех структур S, M и Y. В большинстве случаев ион Ba^{2+} (r = 1,43 Å) может быть частично или полностью заменен ионами Ca^{2+} (r = 1,06 Å), Sr^{2+} (r = 1,27 Å) или Pb^{2+} (r = 1,32 Å) или трехвалентными ионами, например La^{3+} (r = 1,22 Å).

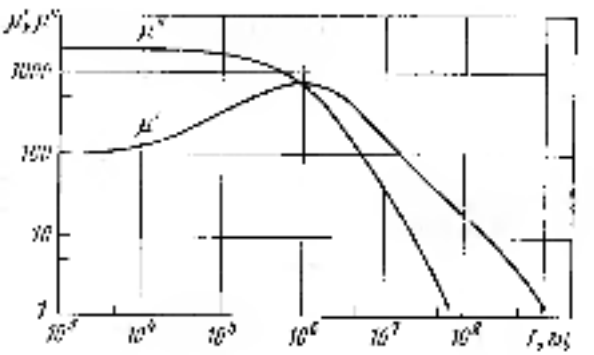


Рис. 29.46. Зависимость μ' и μ'' от частоты для граната $Y_3Sc_{0,9}Fe_{3,1}(Fe_3)O_{12}$ при 24° C [152]

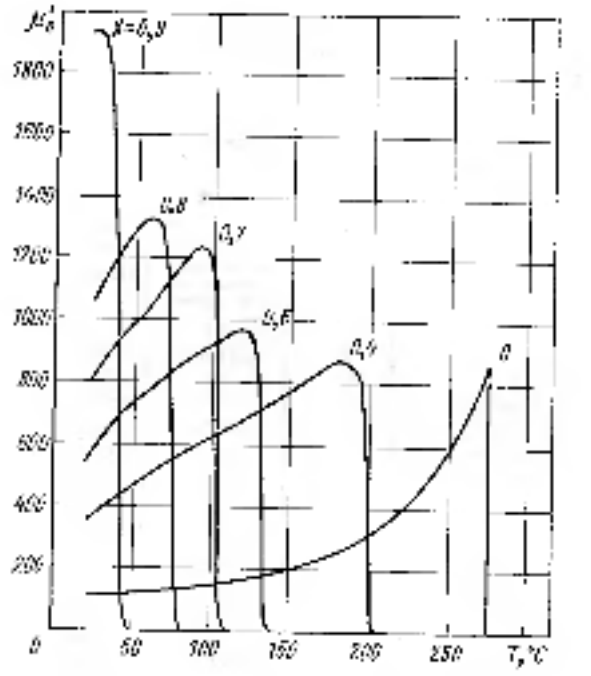


Рис. 29.47. Зависимость μ' от температуры для $Y_3[Sc_xFe_{1-x}][Fe_3]O_{12}$ от 20° C до T_C [152]

Энергия кристаллографической магнитной анизотропии гексагональных кристаллов описывается формулой

$$E_a = K_1 \sin^2\theta + K_2 \sin^4\theta + K_3' \sin^6\theta + K_3 \sin^6\theta \cos^6(\varphi - \varphi),$$

где E_a — энергия анизотропии; K_1, K_2, K_3' и K_3 — константы анизотропии; θ и φ — полярные координаты. Для полей анизотропии:

$$\theta_0 = 0^\circ; \quad H_\theta^A = \frac{2K_1}{M_s};$$

$$\theta = 90^\circ; \quad H_\theta^A = -\frac{2(K_1 + 2K_2)}{M_s};$$

$$\sin\theta_0 = \sqrt{\frac{K_1}{2K_2}}; \quad H_\varphi^A = 2\left(\frac{K_1}{K_2}\right)\frac{K_1 + 2K_2}{M_s}.$$

Здесь H_θ^A — напряженность эффективного поля, необходимого для поворота вектора намагниченности в те направления, где меняется только θ, а H_φ^A — поле, вращающее вектор намагниченности на поверхности конуса. Значение H_φ^A определяется формулой:

$$H_\varphi^A = 30\,|K_3|\,\frac{\sin^4\theta_0}{M_s}.$$

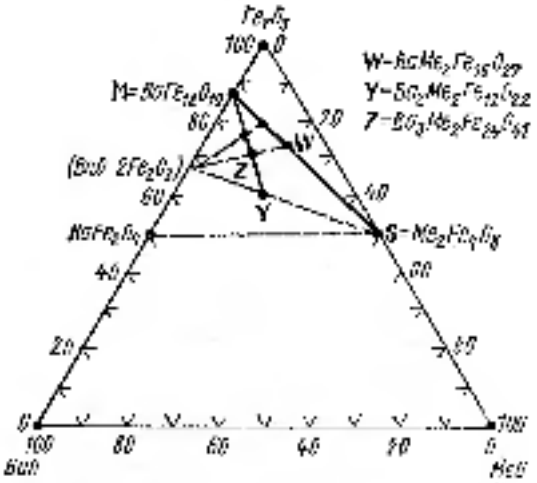


Рис. 29.46. Диаграмма состояния ферримагнитных окислов. Символ Me обозначает двухвалентный ион (или комбинацию двухвалентных ионов) [150]

Таблица 29.35

Некоторые характеристики ферромагнитных окислов с гексагональной структурой

Химический состав	Символ	Число слоев в элементарной ячейке	Пространственная группа	Параметр c, Å	Рентгеновская плотность в $г/см^3$	Молекулярная масса M, г/моль	Литература
$BaFe_{12}O_{19}$	M	(10)	$P6_3/mmc$	23,2	5,28	1112	[155]
$Ba_2Fe_4O_8$	S	—	—	—	5,24	922	[159]
$BaFe_2Fe_{16}O_{27}$	W	$(14)_1$	$P6_3/mmc$	32,845	5,31	1575	[156]
$Ba_3Fe_2Fe_{24}O_{41}$	X	$(12)_3$	$R\bar{3}m$	84,11	5,29	2684	[156]
$Ba_2Fe_2Fe_{12}O_{22}$	Y	$(6)_3$	$R\bar{3}m$	43,568	5,39	1416	[156]
$Ba_3Fe_2Fe_{24}O_{41}$	Z	$(27)_1$	$P6_3/mmc$	52,3	5,33	2520	[156]
$Ba_2Zn_2Fe_{40}O_{66}$	—	$(17)_2$	$P6_3/mmc$	79,36	—	—	[157, 158]
$Ba_6Zn_6Fe_{36}O_{66}$	M_2Y	$(16)_3$	$R\bar{3}m$	36,1	5,31	3622	[157]
$Ba_8Zn_4Fe_{60}O_{96}$	—	$(22)_3$	$R\bar{3}m$	153,85	—	—	[157, 158]
$Ba_8Zn_8Fe_{64}O_{104}$	—	$(27)_2$	$P6_3/mmc$	125,76	—	—	[157, 158]
$Ba_8Zn_{16}Fe_{72}O_{104}$	—	$(28)_3$	$R\bar{3}m$	200,40	—	—	[157]
$Ba_{10}Zn_8Fe_{92}O_{136}$	—	$(34)_3$	$R\bar{3}m$	243,98	—	—	[157]
$Ba_{12}Zn_{10}Fe_{94}O_{148}$	—	$(40)_3$	$R\bar{3}m$	95,84	—	—	[157]
$Ba_{14}Zn_{12}Fe_{98}O_{170}$	—	$(46)_3$	$R\bar{3}m$	331,09	—	—	[157]

Таблица 29.36

Состав и структура гексагональных ферритов типов Me_2Y_m, где Me—Mn, Zn [166]

Состав	Последовательность блоков	Количество плотных слоев	Пространственная группа	Параметр c, Å: Экспериментальный	Расчет
$Ba_{20}(Mn, Zn)_{18}Fe_{132}O_{268}$	$M(Y)_3M(Y)_6$	$(64)_2$	$R\bar{3}m$	462,0	462,0
$Ba_{22}(Mn, Zn)_{20}Fe_{144}O_{292}$	$M(Y)_3M(Y)_5$	$(70)_1$	$P6_3/mmc$	168,6	168,5
$Ba_{24}(Mn, Zn)_{22}Fe_{156}O_{316}$	$M \ldots M(Y)_{11}$	$(70)_3$	$R\bar{3}m$	549,3	549,2
$Ba_{26}(Mn, Zn)_{22}Fe_{164}O_{334}$	$M(Y)_3M(Y)_{10}$	$(76)_1$	$P\bar{3}m1$	183,1	183,1
$Ba_{26}(Mn, Zn)_{22}Fe_{164}O_{334}$	$M(Y)_3M(Y)_7$	$(76)_1$	$P\bar{3}m1$	183,1	183,1
$Ba_{24}(Mn, Zn)_{22}Fe_{156}O_{320}$	$M(Y)_3M(Y)_8$	$(76)_3$	$R\bar{3}m$	549,3	549,2
$Ba_{28}(Mn, Zn)_{28}Fe_{168}O_{354}$	$M(Y)_6M(Y)_7$	$(88)_3$	$R\bar{3}m$	636,7	636,4

Таблица 29.37

Рентгеновская плотность ρ_X и молекулярная масса M некоторых окислов с гексагональной кристаллической структурой [5]

Металл	W — $Ba_2Me_2Fe_{12}O_{22}$		Y — $Ba_2Me_2Fe_{12}O_{22}$		Z — $Ba_3Me_2Fe_{24}O_{41}$	
	ρ_X, г/см³	M, а.е.м.	ρ_X, г/см³	M, а.е.м.	ρ_X, г/см³	M, а.е.м.
Mg	5,10	1512	5,14	1346	5,20	2457
Mn	5,31	1573	5,38	1406	5,39	2518
Fe	5,31	1575	5,39	1408	5,33	2520
Co	5,31	1577	5,40	1410	5,33	2522
Ni	5,32	1580	5,40	1414	5,35	2526
Cu	5,36	1590	5,45	1424	5,37	2536
Zr	5,37	1594	5,40	1428	5,37	2539

Таблица 29.38

Точка Кюри и намагниченность насыщения гексаферритов типа Me_2W [6]

Металл	T_C, °К	σ_X, ед.СГС/г		σM_S, ед.СГС	σ_B при $T=0$°К	
		0°К	293°К	0°К	Эксперимент	Расчет
Mn_2	690	97	59	3600	27,4	29,2
Fe_2^{2+}	730	98	78	5230	27,4	28
$NiFe^{2+}$	730	79	52	3490	22,3	20,4
$ZnFe^{2+}$	700	108	73	4800	30,7	31,6
$Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe^{2+}$	720	104	68	4550	29,5	29,2

Таблица 29.39

Точка Кюри и намагниченность насыщения гексаферритов типа Me_2Y [6]

Металл	T_C, °К	σ_X, ед.СГС/г		σM_S, ед.СГС	σ_B при $T=0$°К	
		0°К	293°К	0°К	Эксперимент	Расчет
Mg	590	20	23	1500	6,9	2,2
Mn	560	42	31	2100	10,6	9,2
Co	610	39	34	2300	9,8	7,4
Ni	660	25	24	1600	6,3	4,6
Cu	—	28	—	—	7,1	2,6
Zn	400	72	42	2650	16,4	20

Таблица 29.40

Точка Кюри и намагниченность насыщения гексаферритов типа Me_2Z [5]

Металл	T_C, °К	σ_X, ед.СГС/г		σM_S, ед.	σ_B при $T=0$°К	
		0°К	293°К	0°К	Эксперимент	Расчет
Mg	—	55	—	—	24	25,9
Co	680	69	50	3350	31,2	29,8
Ni	—	54	—	—	24,6	26,1
Cu	710	60	46	3100	27,2	27,1
Zn	650	—	56	3900	—	—

Таблица 29.41

Магнитные свойства ферритов типа $SrO \cdot nFe_2O_3$ и $PbO \cdot nFe_2O_3$ [180—182]

Соединение	$\frac{2}{3}M_S$, гс	$\frac{2}{3}M_r$, гс	H_c, э
$SrFe_8O_{13}(SrO \cdot 4Fe_2O_3)$	3250	2250	3000
$SrFe_{12}O_{19}(SrO \cdot 6Fe_2O_3)$	3150	2300	2900
$SrFe_{18}O_{28}(SrO \cdot 9Fe_2O_3)$	1900	1500	3350
$PbFe_8O_{13}(PbO \cdot 4Fe_2O_3)$	3500	2000	4700
$PbFe_{12}O_{19}(PbO \cdot 6Fe_2O_3)$	2500	1800	2900
$PbFe_{18}O_{28}(PbO \cdot 9Fe_2O_3)$	1700	1000	2400

Таблица 29.42

Константа анизотропии K_1 и поле анизотропии H_φ^A для некоторых гексагональных ферримагнетиков [5]

Соединение	t, °С	M_S, гс	K_1, кг/см²	H_φ^A, э
$Ba_2Co_2Fe_{12}O_{22}$	−196	210	2000	340
	20	187	800	155
	170	147	160	37
$Ba_2Co_{1,0}Ti^{2+}_{0,5}Fe_{23}O_{41}$	20	280	55	7
	158	220	−9	−2
$Ba_2Co_{1,0}Fe^{2+}_{0,5}Fe_{23}O_{41}$	20	260	120	16
$Ba_2CoZn_{0,5}Fe^{2+}_{0,5}Fe_{23}O_{41}$	20	290	25	3
$Ba_2Zn_{1,5}Fe^{2+}_{0,5}Fe_{23}O_{41}$	20	190	< 6	< 1

Таблица 29.43

Константа анизотропии K_1 или K_1+2K_2, намагниченность насыщения M_s и поле анизотропии H_1^A некоторых гексагональных оксидов при температуре 20° С [5]

Оксидное	Состав	K_1, $10^6 \frac{эрг}{см^3}$	K_1+2K_2, $10^6 \frac{эрг}{см^3}$	M_s, гс	H_1^A, э
$BaFe_{18}O_{19}$*	M	+3,3	—	380	17 000
$BaFe_2O_{27}$*	Fe_2W	+3,0	—	310	19 000
$BaZnFe_{16}O_{27}$	FeZnW	+2,4	—	340	12 500
$BaZn_{1,0}Fe_{16,0}O_{27}$	$Fe_{1,0}Zn_{1,0}W$	+2,1	—	380	11 100
$BaMnZnFe_{14}O_{27}$	MnZnW	+1,9	—	370	10 200
$BaNi_2Fe_{16}O_{27}$	Ni_2W	+2,1	—	330	12 700
$BaNi_{0,5}Zn_{0,5}Fe_{16,0}O_{27}$	$ZnFe_{0,5}Ni_{0,5}W$	+1,6	—	350	9 100
$BaCo_{0,75}Zn_{0,75}Fe_{16,0}O_{27}$	$Fe_{0,5}Co_{0,25}Zn_{0,75}W$	—	0,4	300	2 200
$Ba_2Mg_2Fe_{12}O_{22}$	Mg_2Y	—	—0,6	119	10 000
$Ba_2Ni_2Fe_{12}O_{22}$	Ni_2Y	—	—0,9	127	14 000
$Ba_2Zn_2Fe_{12}O_{22}$	Zn_2Y	—	—1,0	227	9 000
$Ba_2Zn_{1,0}Fe_{10,0}O_{22}$*	$Fe_{0,6}Zn_{1,0}Y$	—	0,9	191	5 500
$Ba_2Co_2Fe_{12}O_{22}$*	Co_2Y		2,6	185	26 000
$Ba_2Co_2Fe_{24}O_{41}$*	Co_2Z	—	—1,8	270	13 000

* Изучение относится к монокристаллам.

Таблица 29.44

Магнитные свойства монокристаллов ферроксплюмбита $BaFe_{12-2x}Ir_x^{3+}Zn_x^{2+}O_{19}$ с большой анизотропией в базисной плоскости [163]

Состав x	$H_{ик}$, э (T = 300°К) по электронн. намагниченности	$H_{ик}$, э (T = 300°К) по ферромагнитн. резонансу	ΔH, э (T = 300°К)	T_c, °К	$\frac{\Delta H}{H_{ик}}$ (T = 300°К)
0	17 000	17 000	53 при 65 Гзц	730	75
0,16	9 600	—	—	635	—
0,02	16 000	16 000	1050 при 17 Гзц	700	65
0,06	16 000	—		500	60
0,60	20 000	22 000	1175 при 14 Гзц	520	47

Таблица 29.45

Ширина линии ферромагнитного резонанса для монокристаллов Me_2Y [164]

Монокристалл	Параметр c, Å	ΔH, э (T=300°К)
$BaZn_2Fe_{12}O_{22}$	43,577	8 (9000 Мгц)
$Ba(Zn_{1-x}Mn_xFe_{12}O_{22}$ (3,5 % Mn по весу)	43,564	3,9 (9000 Мгц) 4,0 (17 300 Мгц)

Таблица 29.46

Свойства некоторых гексагональных ферритов, используемых в волноводах в миллиметровом диапазоне длин волн [165]

Состав	$T_{обж}$, °С	ρ, г/см³	Степень фазовой чистоты	$\frac{tg\delta}{(f=9,5\ Ггц)}$	$\frac{\Delta H_{ик}}{(f=9,5\ Ггц)}$	$\frac{\Delta H_{ик}}{\rho}$	$H_{ик}$, э	T_c, °К	$T_{точ}$, °С
Система $BaCO_3 \cdot 2NiO \cdot xAl_2O_3 \cdot (8-x)Fe_2O_3$, обозначения NiW($x$Al)									
Ni_2W(0,40 Al)	1300	4,09	0,69	—	—	—	16 200	760	48,0
Ni_2W(0,60 Al)	1350	4,58	0,88	0,001	15,4	3680	17 100	730	52,0
Ni_2W(0,73 Al)	1350	4,60	0,83	0,003	14,9	2440	17 900	720	55,0
Ni_2W(0,86 Al)	1350	4,63	0,84	0,004	15,1	2270	19 000	710	58,0
Ni_2W(1,00 Al)	1350	4,55	0,86	0,002	14,5	2080	19 700	690	62,0
Система $SrCO_3 \cdot xAl_2O_3(6-x)Fe_2O_3$, обозначения SrM($x$Al)									
SrM (0,00 Al)	1350	4,91	0,19	—	—	4180	19 000	700	60,0
SrM (0,20 Al)	1300	4,48	0,87	0,002	18,6	3300	20 000	730	64,0
SrM (0,43 Al)	1300	4,41	0,89	0,003	16,2	2110	25 900	690	74,0
SrM (0,80 Al)	1300	4,00	0,91	—	—	—	31 000	650	86,0
SrM (0,96 Al)	1300	3,95	0,88	—	—	—	34 800	630	98,0

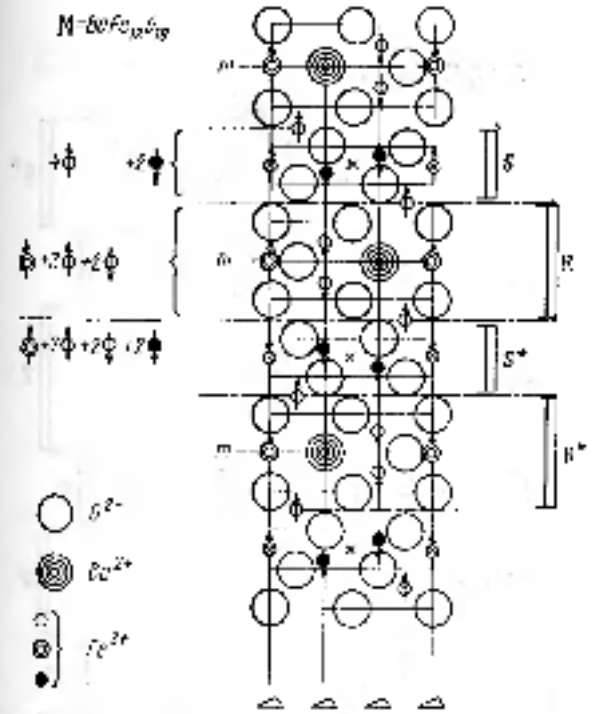


Рис. 29.49. Сечение структуры магнеплюмбита M с осью c, направленной вертикально [5]. Стрелки — направление спинов; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; крестики — положения центров симметрии; через слои, содержащие ионы бария, проходят зеркальные плоскости, обозначенные буквой m; изображенная структура состоит из шпинельных блоков S, разделенных блоками, содержащими ионы бария; звездочки — поворот данного блока вокруг оси c на 180°

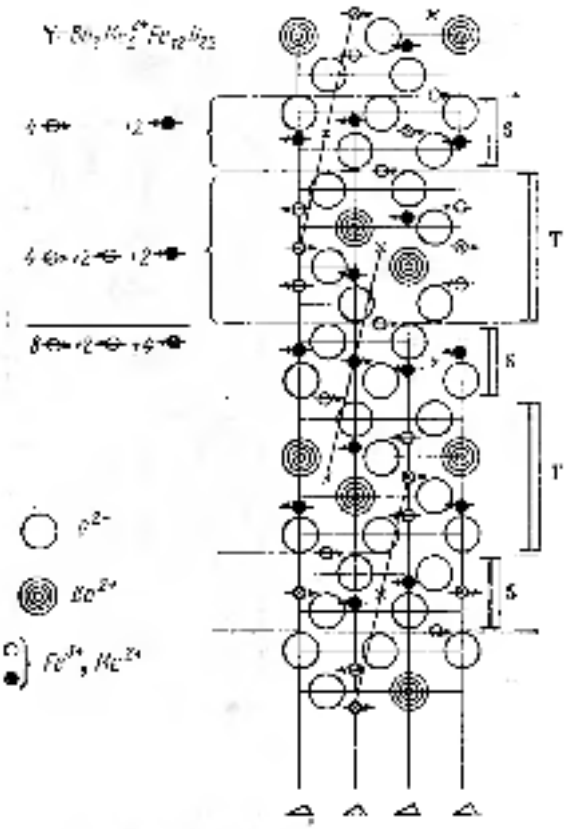


Рис. 29.50. Сечение структуры типа Y с осью c, направленной вертикально [5]. Стрелки — направления спинов, которые в данном случае ориентированы перпендикулярно оси c; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; крестики — положения центров симметрии; изображенная структура состоит из последовательно расположенных блоков S и T

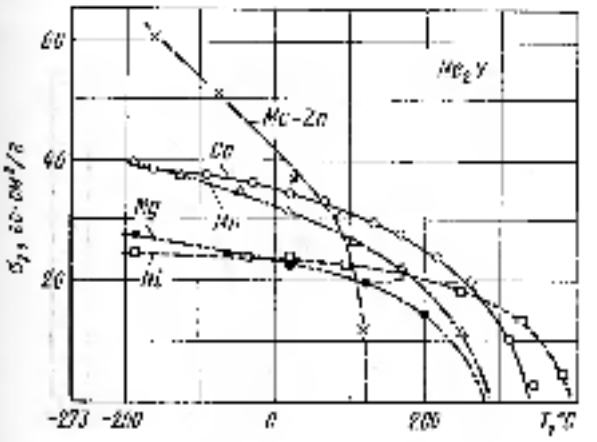


Рис. 29.51. Зависимость намагниченности насыщения σ_s соединений со структурой типа Y от температуры [5]. Измерение проводилось на поликристаллических образцах в поле напряженностью 11 000 э

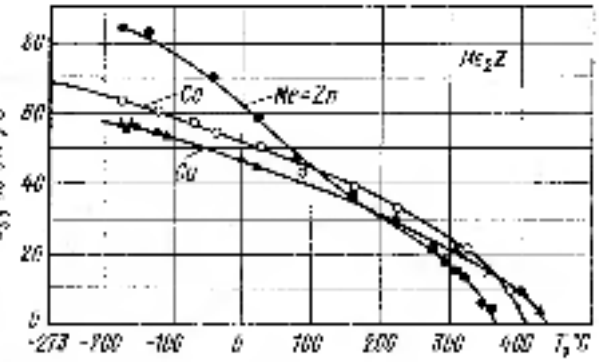


Рис. 29.52. Зависимости намагниченности насыщения σ_s соединений со структурой типа Z от температуры. Измерения проводились на поликристаллических образцах в поле напряженностью 11 000 э для Co_2Z и Zn_2Z и в поле напряженностью 18 000 э для Cu_2Z [5]

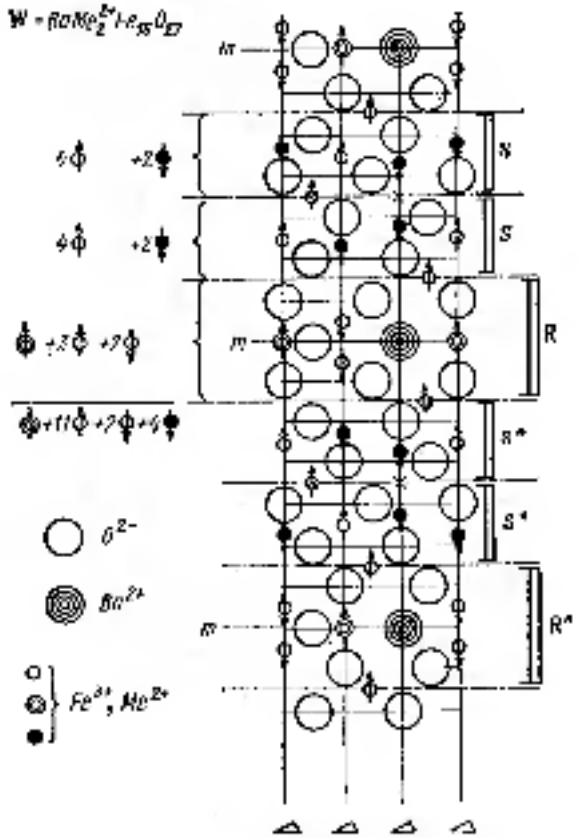


Рис. 29.53. Сечение структуры типа W с осью c, направленной вертикально [5]. Стрелки — направления спинов; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; звездочки — поворот данного блока вокруг оси c на 180°; структуру можно рассматривать как сумму структур типа M и S

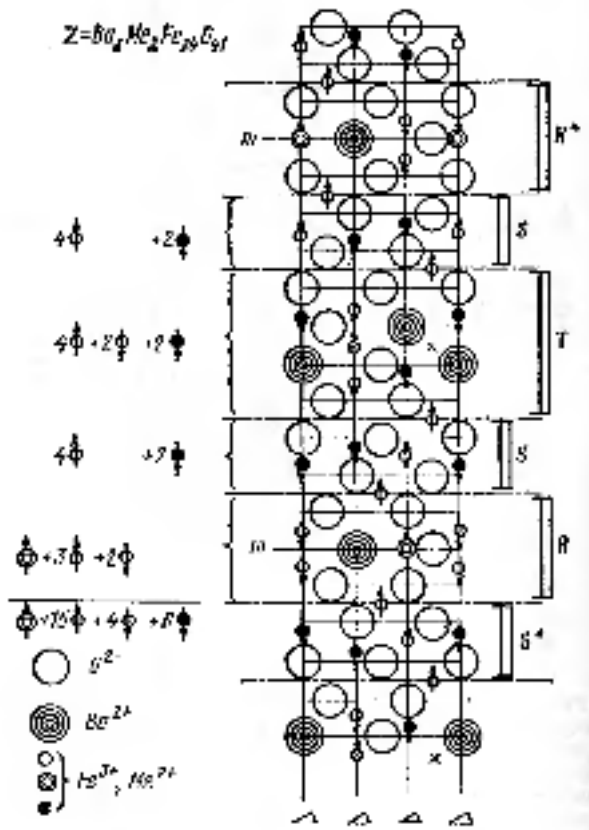


Рис. 29.54. Сечение структуры типа Z с осью c, направленной вертикально [5]. Стрелки — направления спинов; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; крестики — положения центра симметрии; звездочки — поворот данного блока вокруг оси c на 180°; структуру можно представить как сумму структур типа M и Y

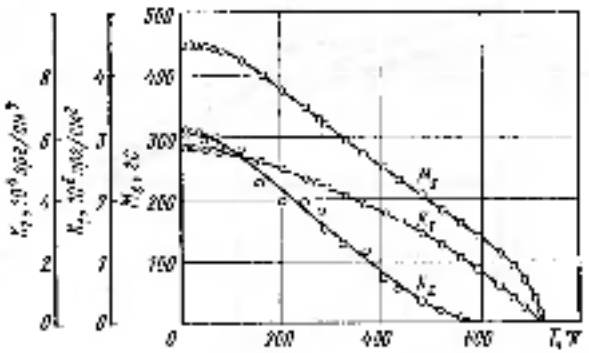


Рис. 29.55. Зависимость намагниченности насыщения M_s и констант анизотропии K_1 и K_2 для PbO·6Fe$_2$O$_3$ от температуры [5]

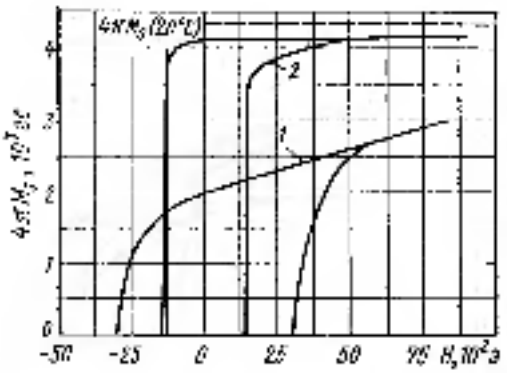


Рис. 29.56. Гистерезисные петли для образца BaFe$_{12}$O$_{19}$ [5]:

1 — исходный образец; 2 — кристаллизованный, текстурированный образец

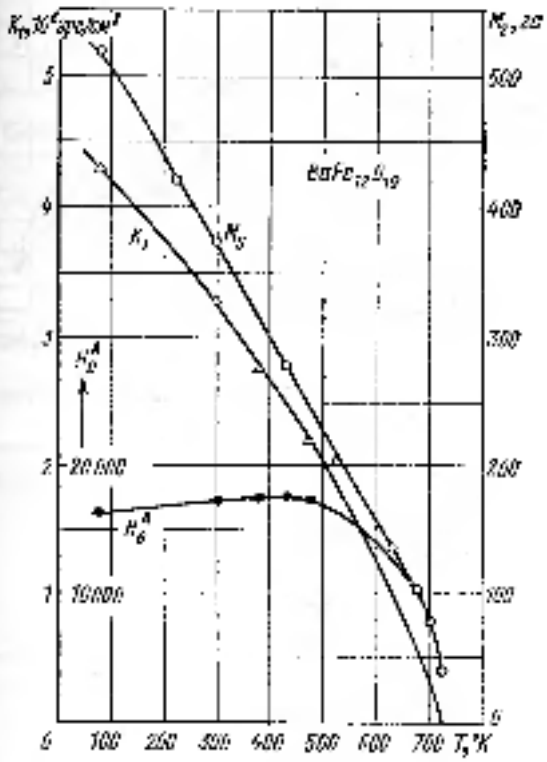


Рис. 29.59. Зависимость намагниченности насыщения M_s, константы анизотропии K_1 и поля анизотропии H_a^A для $BaFe_{12}O_{19}$ от температуры

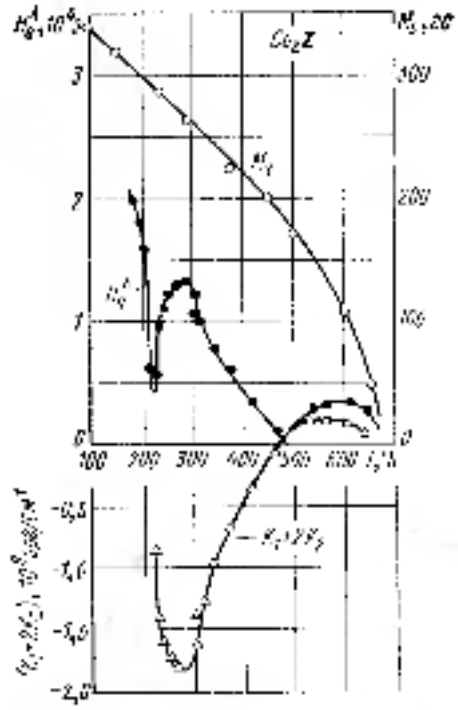


Рис. 29.60. Зависимость намагниченности насыщения M_s, константы анизотропии $K_1 + 2K_2$ и поля анизотропии для Co_2Z от температуры [6]

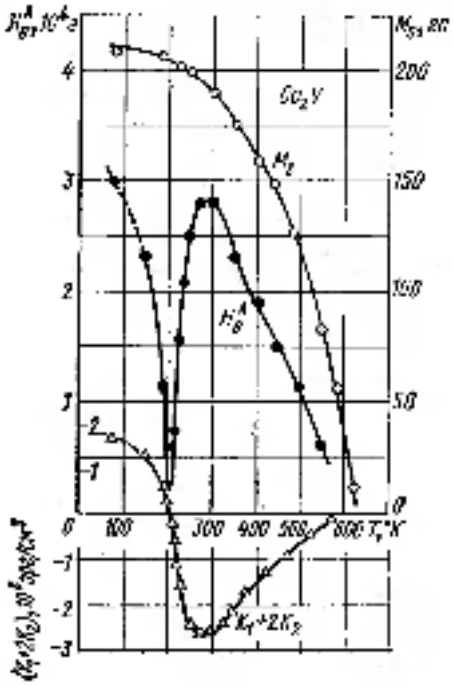


Рис. 29.58. Зависимость намагниченности насыщения M_s константы анизотропии $K_1 + 2K_2$ и поля анизотропии H_a^A для Co_2Y от температуры [6]

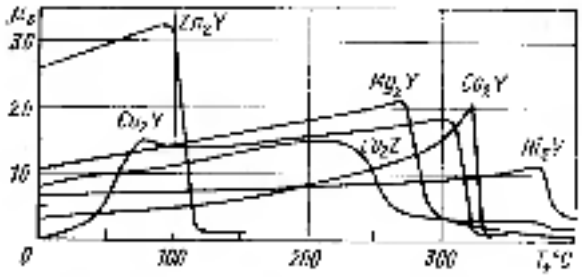


Рис. 29.60. Зависимость начальной магнитной проницаемости некоторых поликристаллических образцов гексагональных окислов от температуры [5]

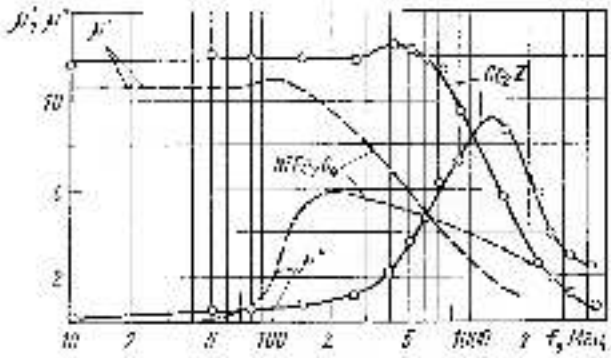


Рис. 29.61. Магнитные спектры поликристаллического образца Co_2Z и шпинели $Ni[Fe_2]O_4$, которая имеет приблизительно то же значение намагниченности насыщения, но иных частота [5]

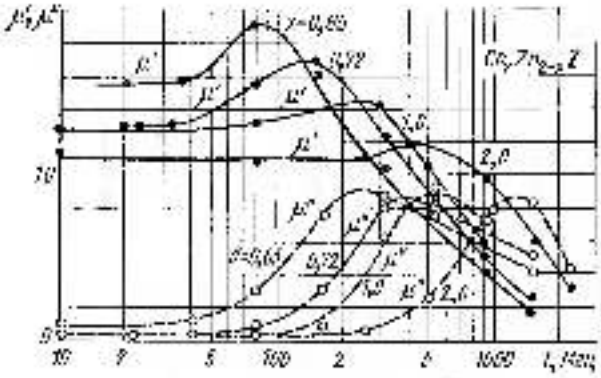


Рис. 29.62. Магнитные спектры некоторых ферритов группы $Co_xZn_{2-x}Z$ [5]

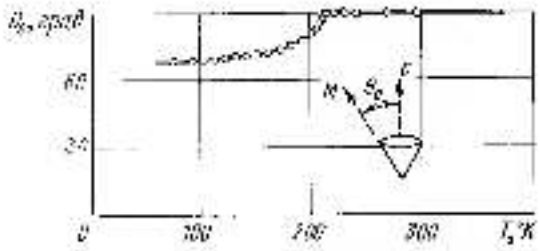


Рис. 29.63. Зависимость равновесного положения вектора намагниченности относительно оси c для Co_2Y от температуры [5]

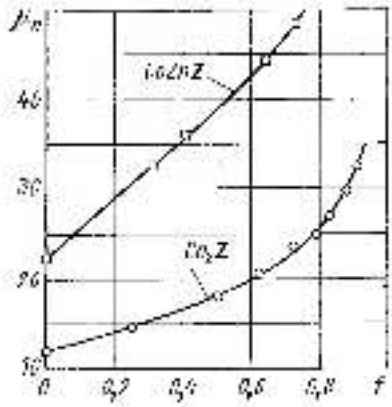


Рис. 29.64. Зависимость μ_0 образцов Co_2Z и Co_2uZ от f различной степени ориентации кристаллитов [5]

29.4. НЕКОТОРЫЕ ФЕРРО- И ФЕРРИМАГНИТНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Таблица 29.47

Магнитные свойства соединений трехвалентного хрома с галогенами [167]

Обозначения: T_p — парамагнитная точка Курси; θ_N — постоянная закона Кюри — Вейса; $\mu_{эф}$ — эффективный магнитный момент

Соединение	Структура	T_C, °K	θ_p, °K	μ_B, μB	ΔE, эв	$\frac{\Delta E}{kT}$ $T=300$ °K	$\frac{\Delta E}{kT}$ $T=1,7$ °K	$\frac{\Delta E}{kT}$ T_C	$\mu_{эф}$, μB
CrF_3	D_{3d}^6 — $R\bar{3}c$; a—5,2043 Å; α—54,3°'	69,8	−124	—	—	—	—	1,86	3,85
$CrCl_3$	D_3^5—$P3_112$; D_{3d}^5—$P\bar{3}_112$; a—6,00 Å; c—17,3 Å	16,8	+31	—	—		—	1,7	3,60
$CrBr_3$	C_{3i}^2—$R\bar{3}$; a—6,20 Å; c—18,2 Å	35,7	−47	3,0	3230	6850	$9,4 \cdot 10^3$	1,84	3,86
CrI_3	D_3^5—$P3_112$	68	+70	3,1	2690	28 600	$3,1 \cdot 10^4$	2,07	4,10

Таблица 29.48

Магнитные свойства $CoMnO_3$, $NiMnO_3$, $BiMnO_3$ и $BiCrO_3$

Обозначение: $p_{эф}$ — эффективный магнитный момент.

Соединение	Структура	Параметры ячейки $T = 300°K$	T_C, °K	p_B, μ_B	$p_{эф}$, μ_B	Литература
$CoMnO_3$	$C_{3i}^2 - R\bar{3}$	$a = 5{,}385$ Å $\alpha = 54°31'$	120	0,79 (0°K)	—	[170—172]
$NiMnO_3$	$C_{3i}^2 - R\bar{3}$	$a = 5{,}243$ Å $\alpha = 54°39'$	120—160	0,76 (0°K)	—	[170—172]
$BiMnO_3$	Перовскит	$a = c = 3{,}935$ Å $b = 3{,}989$ Å $\alpha = \gamma = 91°28'$ $\beta = 90°56'$	103 $T_p = 130$	2 (77°K) 4 (экстраполяция)	5	[168, 169]
$BiCrO_3$	Перовскит	$a = c = 3{,}900$ Å $b = 3{,}870$ Å $\alpha = \gamma = 90°33'$ $\beta = 89°9'$	123	—	—	[168, 169]

Таблица 29.49

Кристаллографические и магнитные свойства ферримагнитных фторидов с ионами Fe^{3+}, Cr^{3+} и Co^{3+} [173]

Соединение	Структура		T_C, °K	p_B, μ_B (0°K)	A, 10^{-6} эрг/см (0°K)
	Высокотемпературная фаза	Низкотемпературная фаза			
$Na_3Fe_2F_{14}$	$a = 7{,}84$ Å; $c = 10{,}38$ Å $\rho = 3{,}26$ г/см³	$a = 73{,}23$ Å; $b = 7{,}46$ Å $c = 12{,}72$ Å; $\beta = 90 \pm 0{,}5'$ $\rho = 3{,}15$ г/см³	80	5	2500
$Na_3Cr_2F_{14}$	—	—	< 20	—	
$Na_3Co_2F_{14}$	—	—	$77 < T_C < 200$	—	—

Таблица 29.50

Магнитные свойства соединений двухвалентного европия

Соединение	Структура	Параметры решетки, Å	T_C, °K	θ_p, °K	C_M	$\mu_{эф}$, μB (T=298 K)	Литература
EuF_2	Кубическая	5,85	2	−5	7,75	—	[174]
$EuCl_2$	Орторомбическая	a — 4,48 b — 7,48 c — 8,96	—	0	6,90	—	[174]
$EuBr_2$	»	a — 4,30 b — 9,20 c — 11,42		0	—	—	[174]
EuI_2	Моноклинная	a — 7,62 b — 8,23 c — 7,88 β — 98°	5	+5	7,85	7	[174]
EuO EuS EuSe EuTe	NaCl	5,143 5,96 6,19 6,60	75 16,5 7 7,6	+16 +19 + 9 — 6	7,60 7,80 7,53 7,14	6,80 6,87 6,70 —	[174]
$Eu_2P_2O_7$	Тетрагональная	—	—	3	—	—	[86]
$Eu_3(PO_4)_2$	Ромбоэдрическая	—		+5	—	6,7	[86]
$EuSiO_3$	—	—	—	0	7,00	—	[174]
Eu_3SiO_4	Орторомбическая (порошок)	a — 9,71 b — 49,56 c — 5,96	7	+7	6,63	6,0	[174]
Eu_2SiO_4	Орторомбическая (монокрист.)	a — 9,71 b — 49,56 c — 5,65	—	+10	—	6,5	[174]
Eu_2SiO_5	Тетрагональная	—	4	+19	7,01	6,71	[174]
$EuAl_2O_4$ $Eu_3Al_5O_6$ $Eu_6Al_2O_9$	Псевдокубическая	— — —	— — —	0 10 6	— — —	— 6,2 5,8	[86]

Таблица 29.51

Параметры элементарной ячейки гексагональной и кубической фаз некоторых фторидов типа ABF_3

Соединение	Синтез при высоких давлениях	Синтез при низком давлении
$RbNiF_3$ [87]	$a=5,847\pm0,001$ Å $c=14,310\pm0,003$ Å $c/a=2,449\pm0,001$ $v=424,0\pm0,9$ Å³	$a=b=c=4,0769\pm0,0004$ Å $v=67,76\pm0,09$ Å³
$TlNiF_3$ [87]	$a=5,678\pm0,001$ Å $c=14,364\pm0,005$ Å $c/a=2,444\pm0,001$ $v=499,8\pm0,4$ Å³	$a=b=c=4,0095\pm0,0002$ Å $v=68,91\pm0,01$ Å³
$CsMnF_3$ [87]	$a=5,230\pm0,002$ Å $c=13,130\pm0,008$ Å $c/a=2,499\pm0,002$ $v=508,6\pm0,6$ Å³	$a=b=c=4,2906\pm0,0002$ Å $v=81,23\pm0,01$ Å³
$CsNiF_3$ [88]	Фаза 2L $a=6,298$ Å $c=8,6$ Å³	1) Фаза 9L $a=6,12$ Å; $c=22,15$ Å $v=79,6$ Å³ 2) Фаза 6L $a=6,05$ Å; $c=14,54$ Å $v=76,6$ Å³

Таблица 29.52

Магнитные свойства ферримагнитных фторидов

Соединение	T_c, °K	θ_p, $\frac{\text{гр-сим}}{\text{г}}$	$\frac{dT_c}{d_p}$, $\frac{\text{град}}{\text{г/см}^3}$	Литература
$RbNiF_3$	139	91	+0,60	[89, 92, 93]
$CsNiF_3$	110	12	+0,53	[88]
$TlNiF_3$	150	11,9 (отдельно)	—	[147]

Таблица 29.53

Магнитные свойства ферримагнетиков $Ga_{x-y}Fe_yO_3$ [146]

Химический состав		$\frac{M_s(T=0)}{M_s(T=293)}$	T_c, °K
исходного раствора	по анализу		
$Ga_{1,3}Fe_{0,7}O_3$	$Ga_{1,3}Fe_{0,66}O_3$	0,395	129
$Ga_{1,2}Fe_{0,8}O_3$	$Ga_{1,14}Fe_{0,86}O_3$	0,510	170
$Ga_{1,1}Fe_{0,9}O_3$	$Ga_{1,07}Fe_{0,93}O_3$	0,630	196
$Ga_{1,0}Fe_{1,0}O_3$	$Ga_{0,95}Fe_{1,05}O_3$	0,780	243
$Ga_{0,92}Fe_{1,08}O_3$	$Ga_{0,89}Fe_{1,11}O_3$	0,785	295
$Ga_{0,8}Al_{0,2}Fe_{1,0}O_3$	$Ga_{0,81}Al_{0,11}Fe_{1,08}O_3$	0,793	265

29.5. МАРКИ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ ФЕРРИТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СССР

Таблица 29.54

Магнитомягкие ферриты [80]

Обозначения: $\mu_н$ — начальная магнитная проницаемость; $\mu_{макс}$ — максимальная магнитная проницаемость; $H_{макс}$ — напряженность магнитного поля, соответствующая $\mu_{макс}$; α_τ — относительный температурный коэффициент $\mu_н$; $f_{гр}$ — граничная частота; $\Delta h/\mu_н^2$ — относительный коэффициент потерь на гистерезис

Марка феррита	Состав и структура	T_c, °C	$\mu_н$	$\mu_{макс}$	$H_{макс}$, $\frac{\text{А}}{\text{м}}$	$\alpha_\tau \cdot 10^6$, $\frac{1}{°C}$	$f_{гр}$, Мгц при индукции $B=0,1$	$B=0,02$	$\frac{\Delta h}{\mu_н^2} \cdot 10^6$	$\frac{\Delta\mu}{\mu_н^2}$, $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$\frac{\delta}{\mu_н}$
6000 НМ	Mn-Zn-шпинель	110	6000	10000	0,15	0,2 – 1,5	0,005		0,04	5,0	10
4000 НМ	Mn-Zn-шпинель	140	4000	7000	0,20	0,5—1,5	0,08	—	0,07	4,9	50

Продолжение табл. 29.54

Марка сердечника	Состав и структура	T_C, °C	μ_r	μ_{max}	$K_{пр}$	$\alpha_\mu \cdot 10^6$, $\frac{1}{°C}$	$\tan\delta/\mu$, при μ_0 и f: $\mu_0 = 0,1$	$\mu_0 = 0,05$	$\frac{\tan\delta}{\mu} \cdot 10^6$	γ, $\frac{г}{см^3}$	λ, вт/м·°C
2000 НМ	Mn-Zn-шпинель	200	2000	3500	0,25	−2 ÷ +4,5	0,35	0,06	0,17	4,6	50
2000НМ1	Mn-Zn-шпинель	200	2000	3500	0,40	0,1 ÷ +1,0	0,4	0,05	0,17	4,6	$5 \cdot 10^4$
1500 НМ3	Mn-Zn-шпинель	200	1500	3000	0,60	0,5÷0,7	1,0	0,35	0,09	4,5	$2 \cdot 10^4$
1000 НМ3	Mn-Zn-шпинель	200	1000	2000	1,0	0 ÷ 1,0	2,0	0,7	0,13	4,4	$1 \cdot 10^4$
700 НМ	Mn-Zn-шпинель	240	700	2000	1,30	−0,2 ÷ +1,2	4,0	2,1	0,04	4,4	$2 \cdot 10^4$
2000 НН	Ni-Zn-шпинель	2000	70	7000	0,15	3 ÷ 9	0,2	0,005	1,10	5,0	$8 \cdot 10^3$
1000 НН	Ni-Zn-шпинель	1000	110	3000	0,40	5÷15	0,4	0,02	1,30	5,0	$2 \cdot 10^4$
200 ГН	Ni-Zn-шпинель	200	120	300	2,00	4 ÷ 20	3,0	1,0	2,00	4,8	$1 \cdot 10^4$
150 ВЧ	Ni-Zn-шпинель	150	400	350	8,00	±4	25	15	0,30	4,9	$1 \cdot 10^4$
100 ВЧ	Ni-Zn-шпинель	100	400	280	9,00	9	35	25	0,18	4,9	$1 \cdot 10^4$
50 ВЧ2	Ni-Zn-шпинель	50	450	170	10,00	−1,0 ÷ +9,0	70	35	1,30	4,7	$1 \cdot 10^4$
30 ВЧ2	Ni-Zn-шпинель	30	450	120	15,00	+35	200	100	0,30	4,6	$1 \cdot 10^4$

* В интервале температур от +20 до +70 °C.

Таблица 29.55

Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса [60]

Обозначения: T_C — точка Курие; H_c — коэрцитивная сила; B_r — остаточная индукция; $K_{пр}$ — коэффициент прямоугольности; TKH_c — температурный коэффициент коэрцитивной силы; H_k — напряженность порогового поля; S_W — константа переключения; ρ_v — удельное электросопротивление

Марка сердечника	Состав и структура	T_C, °C	H_c, а	B_r, мт	$K_{пр}$	TKH_c, %, в интервале температур: от −50 до +20 °C	от +20 до +70 °C	H_k, а	S_W, а·мксек	ρ_v, ом·см
0,12 ВТ	Mg-Mn-шпинель	115	0,12	2000	0,91	2,0	1,3	0,70	0,35	$0 \cdot 10^9$
0,16 ВТ	Mg-Mn-шпинель	135	0,16	2000	0,93	1,8	1,2	0,70	0,50	$5 \cdot 10^4$
0,27 ВТ	Mg-Mn-шпинель	110	0,27	2000	0,90	1,7	1,3	0,50	0,45	$2 \cdot 10^3$
0,3 ВТ	Mg-Mn-шпинель	150	0,30	2100	0,93	1,3	0,8	1,20	0,60	—
0,37 ПТ	Mg-Mn-шпинель	145	0,37	1400	0,93	1,3	1,0	1,20	0,60	$1 \cdot 10^9$
0,44 ВТ	Mg-Mn-шпинель	180	0,44	1600	0,93	1,1	0,8	1,60	0,55	$2 \cdot 10^4$
0,7 ВТ	Mg-Mn-шпинель	240	0,70	2300	0,93	0,8	0,7	2,00	0,35	$5 \cdot 10^4$
0,9 ПТ	Mg-Mn-шпинель	235	0,90	2500	0,92	0,8	0,6	1,70	0,60	$2 \cdot 10^4$
1,3 ВТ	Mg-Mn-шпинель	250	1,30	2300	0,91	0,8	0,6	2,00	0,65	$25 \cdot 10^4$
1,5 ВТ	Mg-Mn-шпинель	250	1,50	2200	0,91	0,7	0,6	2,20	0,60	$5 \cdot 10^4$
2 ВТ	Mg-Mn-шпинель	260	2,00	1800	0,90	0,7	0,6	2,60	0,55	$5 \cdot 10^4$

Таблица 29.56

Ферриты СВЧ-шпинели [80]

Обозначения: T_C — точка Кюри; M_s — намагниченность насыщения; B_s — индукция насыщения; B_r — остаточная индукция; ε' — действительная часть диэлектрической проницаемости; μ' — действительная часть магнитной проницаемости; ΔH — ширина линии ферромагнитного резонанса; $\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла потерь; ρ — плотность; ρ_v — удельное сопротивление

Марка феррита	Состав и структура	T_C, °C	$4\pi M_s$, гс	B_s, гс	B_r, гс	ε'	μ'	ΔH, э на частоте 9250 Мгц	ΔH, э на частоте 3000 Мгц	$\operatorname{tg}\delta$	ρ, г/см³	ρ_v, ом·см
2СЧ 1	Mg-Mn-шпинель	370	1860	1520	1040	10,6	94	800	780	$0{,}4\cdot10^{-4}$	3,8	$5{,}0\cdot10^{8}$
2СЧ 4	Ni-Zn-шпинель	450	4150	3900	1400	12,5	47	120	—	$1{,}7\cdot10^{-4}$	4,9	$5{,}3\cdot10^{8}$
5СЧ	Ni-Zn-шпинель	340	2820	2600	640	11,9	54	180	—	$5{,}4\cdot10^{-4}$	4,8	$3{,}0\cdot10^{8}$
8СЧ 1	Mg-Al-шпинель	250	710	690	490	9,8	12	600	400	$1{,}6\cdot10^{-3}$	3,6	$1{,}5\cdot10^{7}$
10СЧ 6	Y-Fe-гранат	280	1700	1700	950	13,8	9,7	70	40	$1{,}6\cdot10^{-3}$	4,9	$1{,}2\cdot10^{9}$
10СЧ 8	Mg-Cr-шпинель	140	620	560	350	9,3	15	250	220	$2{,}8\cdot10^{-3}$	3,5	$3{,}8\cdot10^{5}$
10СЧ 12	Ni-Cr-шпинель	350	1100	890	590	9,0	8	540	400	$8{,}5\cdot10^{-3}$	4,8	$3{,}2\cdot10^{6}$
30СЧ 3	Y-Al-гранат	230	1180	1200	650	13,0	86	60	65	$3{,}4\cdot10^{-4}$	5,0	$3{,}8\cdot10^{11}$
40СЧ 2	Y-Al-гранат	160	750	770	340	14,1	44	80	55	$8{,}1\cdot10^{-4}$	4,8	$3{,}1\cdot10^{10}$
60СЧ	Y-Al-гранат	130	480	500	320	13,2	28	90	40	$4{,}2\cdot10^{-4}$	4,7	$9{,}0\cdot10^{11}$
80СЧ	Y-Al-гранат	190	510	360	90	12,5	23	70	55	$1{,}4\cdot10^{-3}$	4,9	$1{,}6\cdot10^{11}$

Таблица 29.57

Магнитотвердые ферриты [60]

Обозначения: T_C — точка Кюри; B_r — остаточная индукция; ${}_{I}H_c$ — коэрцитивная сила по индукции; ${}_{M}H_c$ — коэрцитивная сила по намагниченности; $(BH)_{max}$ — удельная энергия магнитная энергия; μ_r — обратимая магнитная проницаемость; α_B — температурный коэффициент остаточной индукции; ρ_v — удельное электросопротивление

Марка	T_C, °C	B_r, гс	${}_{I}H_c$, э	${}_{M}H_c$, э	$(BH)_{max}$, 10^6 гс·э	μ_r	α_B, % на 1°C	ρ_v, ом·см	ρ, г/см³
Гексаферрит Ba серии									
0,7 БИ	400	1400—2100	1400—1600	1500—3500	0,7—0,8	1,05—1,25	—0,2	10^5	4,5—5,0
1 БИ	450	1900—2200	1000—1800	2200—4000	0,8—1,1	1,05—1,25	—0,2	10^6	4,5—5,0
2БА	450	2800—3300	2450—3000	>3800	1,8—2,5	1,05—1,25	—0,2	10^6	4,5—5,0
2БА	450	3000—3500	2700—2900	2500—3800	2,0—2,9	1,05—1,25	—0,2	10^6	4,5—5,0
3БА	450	3000—4000	1600—2300	1600—2300	2,9—3,5	1,05—1,25	—0,2	10^5	4,5—5,0
Феррит Co марки 1ФК	550	2400—2700	1600—1900	>1800	1,4—1,7	—	0,05* —0,08**	10^1	3,3—3,5

* В интервале температур от —70 до +230°C.
** В интервале температур от —70 до +90°C.
*** В интервале температур от +20 до +90°C.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Néel L. "Ann. phys.", 1948, v. 3, p. 137. (См. пер. в сб.: Антиферромагнетизм. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1956, с. 56).
2. Вонсовский С. В., Шур М. С. Ферромагнетизм. М., Гостехиздат, 1948.
3. Гуревич А. Г. Ферриты на сверхвысоких частотах. М., Физматгиз, 1960.
4. Wangsness R. K. "Phys. Rev.", 1954, v. 95, p. 68.
5. Смит Я., Вейн Х. Ферриты. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
6. Shull C. G., Wollan E. O., Koehler W. C. "Phys. Rev.", 1951, v. 84, p. 912.
7. Bickford L. R., Brownlow J. M., Penoyer R. F. Proc. Instn Electr. Engrs, 1957, v. 104B, Suppl. 5, p. 238.
8. Bickford L. R., Pappis J., Stull J. L. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1210.
9. Bickford L. R. "Phys. Rev.", 1950, v. 78, p. 449.
10. Calhoun B. A. "Phys. Rev.", 1954, v. 94, p. 1582.

11. Nathans R. e. a. "Proc. Inst. Electr. Engrs", 1957, v. 104B, Suppl. 5, p. 277.
12. Verwey J. W., Heilmann E. L. "J. Chem. Phys.", 1947, v. 15, p. 174.
13. Gorter E. W. "Philips Res. Repts.", 1954, v. 9, p. 295.
14. Galt J. K., Matthias B. T., Remeika J. P. "Phys. Rev.", 1950, v. 79, p. 391.
15. Bozorth R. M., Tilden E. F., Williams A. J. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1788.
16. Dwight K., Menyuk N. "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1958, v. 3, Ser. 2, p. 41.
17. Smit J., Wijn H. P. J. "Adv. in Electr. and Electr. Phys.", 1954, v. 6, p. 69.
18. Yager W. A., Galt J. K., Merritt F. R. "Phys. Rev.", 1935, v. 99, p. 1203.
19. Гендлин С. Ш., Лапонос Б. Л., Рубинштейн Б. Е. «Физика твердого тела», 1963, т. 5, с. 3077.
20. Sekizawa H., Sekizawa K. "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, Suppl. B—1, p. 380.
21. Epstein D. J. Conf. on Magn. and Magn. Mater., Boston, Amer. Inst. Electr. Eng., 1957, p. 466.
22. Van Uitert L. G. "J. Chem. Phys.", 1956, v. 24, p. 306.
23. Hastings J. M., Corliss L. M. "Phys. Rev.", 1956, v. 104, p. 328.
24. Dillon J. F., Geschwind S., Jaccarino V. "Phys. Rev.", 1955, v. 100, p. 750.
25. Гуревич А. Г., Губкер Н. Е., Титова А. Г. «Физика твердого тела», 1961, т. 3, с. 19.
26. Teale R. W. "J. Appl. Phys.", 1962, v. 33, Suppl. 3, p. 1296.
27. Данеча К., Сахрина Е., Малинова О. «Физика твердого тела», 1962, т. 4, с. 3595.
28. Braun P. B. "Nature", 1962, v. 170, p. 1123.
29. Folen V. J. "J. Appl. Phys.", 1960, Suppl., v. 31, p. 160.
30. Schnitzler A. D., Folen V. J., Rado G. T. "J. Appl. Phys.", 1962, Suppl., v. 31, p. 348.
31. Enz U. Erzeugung von Vetterschaft mit Ferrites, Thesis, Zürich, 1959.
32. Comstock R. L., Remeika J. P. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 1018.
33. Nielsen J. W. e. a. "J. Appl. Phys.", 1962, v. 33, Suppl., No. 3, p. 1379.
34. Bertaut F. "Compt. rend.", 1950, v. 230, p. 213.
35. Prince E., Trueting R. G. "Acta crystallogr.", 1956, v. 9, p. 1025.
36. Weil L., Bertaut F., Bochirol L. "J. phys. rad.", 1950, v. 11, p. 208.
37. Gorter E. W. "Nature", 1950, v. 165, p. 798.
38. Okamura T., Kojima Y. "Phys. Rev.", 1952, v. 86, p. 1040.
39. Weisz R. S. "Phys. Rev.", 1956, v. 96, p. 800.
40. Snoek J. L. "Philips. Techn. Rev.", 1946, v. 8, p. 353.
41. Okamura T., Torizuka Y. "Nature", 1951, v. 168, p. 872.
42. Okamura T., Fujimura T., Date M. "Phys. Rev.", 1952, v. 85, p. 1041.
43. Рабкин Л. И. Высокочастотные ферромагнетики. М.—Л., Физматгиз, 1960.
44. Bochirol L. "Compt. rend.", 1951, v. 233, p. 736.
45. Prince E. "Phys. Rev.", 1956, v. 102, p. 674.
46. Pauthenet R. "Compt. rend." 1956, v. 230, p. 1842.
47. Guillaud C. "Rev. Mod. Phys.", 1953, v. 25, p. 64.
48. Tannenwald P. E. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 463.
49. Torizuka Y. "Sci. Repts. Res. Inst. Tôhoku Univ.", 1951, v. A 3, p. 383.
50. Corliss L. M., Hastings J. M., Brockman F. G. "Phys. Rev.", 1953, v. 90, p. 1013.
51. Bonn G. N., Roberts F. P. "Acta crystallogr.", 1953, v. 6, p. 57.
52. Jones G. O., Roberts F. P. "Proc. Phys. Soc. (London)", 1952, v. 65 B, p. 390.
53. Belson H. S., Kriessman C. J. "J. Appl. Phys.", 1959, v. 30, p. 1783.
54. Rado G. T., Folen V. J., Emerson W. H. "Proc. Instn Electr. Engrs", 1957, v. 104B, Suppl. 5, p. 198.
55. Yager W. A., Merritt F. R., Guillaud "Phys. Rev.", 1951, v. 81, p. 477.
56. Торопов Н. А., Борисенко А. И. «Журн. прикл. химии», 1954, т. 88, с. 1243.
57. Inoue T., Iida S. "J. Phys. Japan", 1958, v. 13, p. 696.
58. Guillaud C., Crevenux H. "Compt. rend.", 1950, v. 230, p. 1458.
59. Guillaud C. "J. phys. et radium", 1951, v. 12, p. 239.
60. Okamura T., Kojima Y., Torizuka Y. "Sci. Repts. Inst. Tôhoku Univ.", 1952, v. A4, p. 72.
61. Okamura T. "Phys. Rev.", 1952, v. 85, p. 690.
62. Gorter E. W. "Philips. Res. Repts.", 1954, v. 9, p. 295.
63. McGuire T. R. "Phys. Rev.", 1950, v. 91, p. 200.
64. Pippin J. E., Hogan C. L. Sci. Rep. N1 Gordon McKay Lab. of Appl. Science, Harvard Univ., N. Y., 1959.
65. Carter A. E., Miles D. A., Welch A. J. A. "Proc. Instn Electr. Engrs", 1957, v. 104 B, Suppl. 5, p. 141.
66. Gorter E. W. "Philips. Res. Repts.", 1954, v. 9, p. 403.
67. van der Heide H., Bruijning H. G., Wijn H. P. J. "Phil. Tech. Rev.", 1957, v. 18, p. 336.
68. Gorter E. W. "Philips. Res. Rept.", 1954, v. 9, p. 403.
69. Соловьев В. И. «Физика твердого тела», 1964, т. 6, с. 2324.
70. Tannenwald P. E. "Phys. Rev.", 1955, v. 100, p. 1713.
71. Healy D. M., Johnson R. A. "Phys. Rev.", 1958, v. 104, p. 660.
72. van Wieringen J. S. "Cahiers phys.", 1956, v. 62, p. 45.
73. Смоленский Г. А. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1952, т. 16, с. 726.
74. Enz U. "Physica", 1958, v. 24, p. 665.
75. Поливанов С. А., Давыдов Л. Д. «Физика твердого тела», 1964, т. 6, с. 2190.
76. Galt J. K. "Bell. Syst. Techn. J.", 1954, v. 33, p. 1023.
77. Kaupa C. G. "Phys. Rev.", 1951, v. 83, p. 121.
78. Funatogawa Z., Miyata H., Usami S. "J. Phys. Soc. Japan", 1959, v. 14, p. 854.
79. Brown F., Gravel Ch. L. "Phys. Rev.", 1955, v. 97, p. 55.
80. Горбунов Н. Д., Матвеев Г. А. Ферриты и магнитодиэлектрики. М., «Советское радио», 1969.
81. Menzer G. "Z. Kristallogr.", 1928, Bd. 69, S. 300.
82. Gibbs G. V., Smith J. V. "Amer. Mineral.", 1966, v. 50, p. 2023.
83. Prandl W. "Z. Kristallogr.", 1966, Bd. 123, S. 81.
84. Abrahams S. C., Geller S. "Acta crystallogr.", 1958, v. 11, p. 437.
85. Néel L. "Ann. Phys.", 1949, v. 3, p. 137.
86. Shafer M. W. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 1145.
87. Syono Y., Akimoto S., Kohn K. "J. Phys. Soc. Japan", 1969, v. 26, p. 993.
88. Longo J. M., Kafalas J. A. "J. Appl. Phys.", 1969, v. 40, p. 1601.
89. Смоленский Г. А. и др. «Физика твердого тела», 1964, т. 6, с. 2965.
90. Callen E. "J. Appl. Phys.", 1968, v. 39, p. 519.
91. Кирюхин В. П., Соколов В. И. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1966, т. 51, с. 428.
92. Shafer M. W. e. a. "Appl. Phys. Lett.", 1967, v. 10, p. 262.
93. Le Craw R. C., Comstock R. L. Physical Acoustics. V. III, p B. Lattice Dynamics. Ed. by W. P. Mason. New York — London, Academic Press, 1965.

94. Wickersheim K. A. Magnetism. Ed. G. Rado and H. Schl. Academic Press, 1963.
95. Kolelas I. A., Longo J. M. "Mater. Res. Bull.", 1968, v. 3, p. 501.
96. Tinkham H. "J. Appl. Phys.", 1962, v. 33, Suppl., p. 1246.
97. Wood D. L., Remeika J. P. "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1038.
98. Dillon J. F., Jr. "J. phys. et radium.", 1959, v. 20, p. 374; "J. Appl. Phys.", 1958, v. 29, p. 539.
99. Крупичка Г. С., Четкин М. В. «Курс. эксперим. и теор. физ.», 1961, т. 40, с. 729; 1961, т. 41, с. 673.
100. Шендерев Р. В., Синий И. Г., Смоленский Г. А. «Письма ЖЭТФ», 1969, с. 9, с. 119, 984; 1969, т. 57, с. 737.
101. Dillon J. F. "J. Appl. Phys.", 1969, v. 40, p. 1231.
102. Geller S. "Z. Kristallogr.", 1967, Bd 125, S. 1.
103. Боков Г. В. Кристаллохимия. М., Изд. МГУ, 1960.
104. Geller S., Gilleo M. A. "Acta crystallogr.", 1957, v. 10, p. 787.
105. Anderson E. E. "J. Appl. Phys.", 1959, v. 30, p. 299.
106. Гуревич А. Г., Губаев И. Е., Сафронтьевский А. И. «Физика твердого тела», 1959, т. 1, с. 1860.
107. Sirotta M. I., Zeldner J. E. "J. Appl. Phys.", 1958, v. 29, p. 491.
108. Wolf W. P., Rodrigue G. P. "J. Appl. Phys.", 1958, v. 29, p. 105.
109. Bertaut F., Forrat F. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1957, v. 98, p. 244.
110. Espinosa G. P. "J. Chem. Phys.", 1962, v. 37, p. 2344.
111. Geller S. e. a. "Phys. Rev.", 1965, v. 137 A, p. 1034.
112. Geller S., Williams H. J., Sherwood R. C. "Phys. Rev.", 1961, v. 123, p. 1602.
113. Geller S., Gilleo M. A. "J. Phys. Chem. Solid.", 1957, v. 3, p. 30.
114. Paulthenet R. Thesis, University of Grenoble, 1968.
115. Geller S. "Phys. Rev.", 1963, v. 131, p. 1080.
116. Белов К. П., Белов В. Ф., Тимофеева В. А. «Кристаллография», 1961, т. 6, с. 609.
117. Rodrigue G. P., Meyer H., Jones R. V. "J. Appl. Phys.", 1960, v. 31S, p. 376S.
118. Pearson R. F. "J. Appl. Phys.", 1962, v. 33S, p. 1236.
119. Miyadai T. "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 2205.
120. Pearson R. F., Cooper R. W. "J. Appl. Phys.", 1961, v. 32S, p. 2056.
121. Miyadai T. "J. Phys. Soc. Japan.", 1962, v. 17, p. 1899.
122. Guillot M., Paulthenet R. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 36, p. 1073.
123. Jones R. V., Rodrigue G. P., Wolf W. P. "J. Appl. Phys.", 1958, v. 29, p. 474.
124. Dillon J. F. "Phys. Rev.", 1962, v. 127, p. 1495.
125. Bertaut F., Forrat F. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1956, v. 243, p. 1219.
126. Gilleo M. A., Geller S. "J. Appl. Phys.", 1958, v. 29, p. 380.
127. Gilleo M. A., Geller S. "Phys. Rev.", 1958, v. 110, p. 73.
128. Geller S. e. a. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 89.
129. Cunningham J. R., Jr. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 2491.
130. Bozorth R. M., Geller S. "J. Phys. Chem. Solid.", 1959, v. 11, p. 263.
131. Geller S. e. a. "J. Phys. Chem. Solid.", 1959, v. 12, p. 111.
132. Geller S. e. a. "J. Phys. Chem. Solid.", 1960, v. 13, p. 29.
133. Geller S. e. a. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 321.
134. Espinosa G. P. "Inorg. Chem.", 1964, v. 3, p. 881.
135. Geller S. e. a. "Appl. Phys. Lett.", 1963, v. 3, p. 21.
136. Geller S. e. a. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 570.
137. Geller S. e. a. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 542.
138. Iida S. "J. Phys. Soc. Japan", 1967, v. 22, p. 1201.
139. Clark A. E., Strakna R. E. "J. Appl. Phys.", 1961, v. 32, p. 1172.
140. Comstock R. L. "Proc. IEEE", 1965, v. 53, p. 1508.
141. Le Craw R., Remeika J. P., Matthews H. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 901.
142. Spencer E. G., Le Craw R. C., Clogston A. "Phys. Rev. Lett.", 1959, v. 3, p. 32.
143. Le Craw R. C. e. a. "Phys. Rev. Lett.", 1963, v. 11, p. 430.
144. Dillon J. F., Jr., Nielsen J. "Phys. Rev. Lett.", 1959, v. 3, p. 30.
145. Calhoun B. A., Overmeyer J., Smith W. V. "Phys. Rev.", 1957, v. 107, p. 993.
146. Geschwind S., Walker L. R. "J. Appl. Phys.", 1959, v. 30, p. 1035.
147. Kohn K., Fukuda R., Iida S. "J. Phys. Soc. Japan", 1967, v. 22, p. 333.
148. Callen E. R. e. a. "Phys. Rev.", 1963, v. 130, p. 1779.
149. Clark A. E., De Savage B. F., Callen E. R. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 35, p. 1028.
150. Mc Duffie G. E., Cunningham J. R., Jr. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 31, p. 475.
151. Смоленский Г. А., Чжан-Пуэн, Шер Е. С. «Физика твердого тела», 1961, т. 3, с. 1806.
152. Cunningham J. R., Jr. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 2491.
153. Geller S. e. a. «Bell Syst. Techn. J.», 1964, v. 43, p. 565.
154. Яковлев Ю. М., Лебедев Б. М. «Физика твердого тела», 1962, т. 4, с. 3654.
155. Jonker G. H., Wijn H. P. J., Braun P. B. «Philips Techn. Rev.», 1956/1957, v. 18, p. 145.
156. Braun P. B. "Philips Res. Repts.", 1957, v. 12, p. 491.
157. Kohn J. A., Eckart D. W. "Z. Kristallogr.", 1964, Bd 119, S. 454.
158. Kohn J. A., Eckart D. W. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 968.
159. Сигуэнс Ю., Сакэ Х. Ферриты. Пер. с англ. М., «Мир», 1964.
160. Villers G. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1969, v. 248, p. 1974.
161. Paulthenet R., Rivet G. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1969, v. 249, p. 506.
162. Kojima H. "Sci. Repts. Res. Inst. Tôhoku Univ.", 1955, v. A7, p. 502.
163. Tauber A. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1265.
164. Savage R. O., Jr., Dixon S., Jr., Tauber A. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 873.
165. Loff D. R. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 770.
166. Levine B. F., Nowlin C. H., Jones R. V. "Phys. Rev.", 1968, v. 174, p. 57.
167. Dillon J. F., Jr., Kamimura H., Remeika J. P. "J. Phys. Chem. Solid", 1966, v. 27, p. 1531.
168. Sugawara F. e. a. "J. Phys. Soc. Japan", 1968, v. 26, p. 1553.
169. Бобов В. А. и др. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 3095.
170. Bertaut E. F., Forrat F. "J. Appl. Phys.", 1958, v. 29, p. 247.
171. Cloud W. H. "Phys. Rev.", 1959, v. 111, p. 1046.
172. Bozorth R. M., Walsh D. E. "J. Phys. Chem. Solid", 1958, v. 5, p. 200.
173. Knox K., Geller S. "Phys. Rev.", 1958, v. 110, p. 771.
174. Shafer M. W., Mc Guire T. R. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 984.

ГЛАВА 30

АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ

30.1. ВВЕДЕНИЕ

Обменное взаимодействие, обусловливающее упорядоченную магнитную структуру вещества, может приводить как к параллельной, так и к антипараллельной ориентации магнитных моментов соседних ионов в кристаллах. Вещества, в которых происходит полная (или почти полная) компенсация антипараллельных моментов отдельных ионов, называют *антиферромагнетиками*. Сведения о магнитной структуре и свойствах антиферромагнетиков можно найти в монографиях [1—7]. Экспериментальные данные по магнитным свойствам антиферромагнетиков, как правило, хорошо объясняются, если представить их магнитную структуру как суперпозицию двух или более вставленных одна в другую подрешеток, в каждой из которых магнитные моменты атомов параллельны друг другу.

30.2. МАГНИТНЫЕ И МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕГКООСНЫХ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ (НА ПРИМЕРЕ MnF_2)

Простейшим двухподрешеточным антиферромагнетиком, свойства которого в настоящее время изучены наиболее детально, является MnF_2 (рис. 30.1). Нейтро-

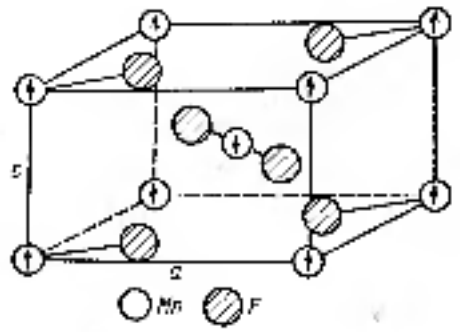


Рис. 30.1. Магнитная структура MnF_2 при $T < T_N$ [6].

нограммы, подтверждающие данную структуру, представлены на рис. 30.2. Температурная зависимость интенсивности разрешенного для магнитного рассеяния пика (100) позволяет определить температуру магнитного упорядочения — температуру Нееля (T_N) (рис. 30.3). Магнитная восприимчивость выше точки Нееля подчиняется закону Кюри — Вейса $\chi = \frac{C}{(T-\theta)}$ ($\theta < 0$); ниже точки Нееля поведение магнитной восприимчивости зависит от направления внешнего магнитного поля относительно осей кристалла. Одноосные кристаллы, т. е. кристаллы, имеющие одно выделенное направление (для MnF_2 это легкая ось, т. е. ось, вдоль которой в положении равновесия ориентируются магнитные моменты подрешеток), обычно характеризуются магнитной восприимчивостью при поле, параллельном оси ($\chi_\parallel$) и при поле, перпендикулярном к оси ($\chi_\perp$). При $T = T_N$ магнитная восприимчивость $\chi_\parallel$ имеет максимум (рис. 30.4). В точке Нееля имеет также место чет-

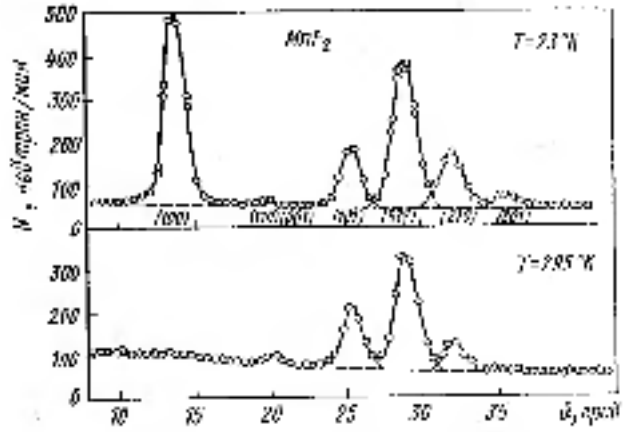


Рис. 30.2. Зависимость числа нейтронов N_s рассеянных на угол θ (нейтронограммы) для MnF_2 в парамагнитном ($T = 295$ K) и антиферромагнитном ($T = 23$ K) состояниях [14]. Пики (100) и (201), запрещенные при ядерном рассеянии, разрешены при магнитном рассеянии и появляются при переходе в антиферромагнитное состояние.

Рис. 30.3. Зависимость интенсивности I пика (100) рассеяния нейтронов для MnF_2 от температуры [14]. (Кружки — экспериментальные данные; сплошная кривая — функция Бриллюэна для $s = 5/2$.)

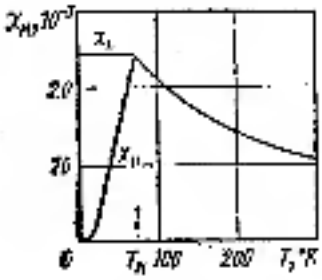


Рис. 30.4. Зависимость восприимчивостей $\chi_\parallel$ и $\chi_\perp$ монокристаллов MnF_2 от температуры [16].

вой аномалии на кривой удельной теплоемкости (рис. 30.5). Хотя безусловным критерием существования антиферромагнитного порядка могут служить лишь результаты экспериментов по дифракции нейтронов, данные наличие аномалий в температурных зависимостях магнитной восприимчивости и теплоемкости позволяют предполагать (с достаточно большой вероятностью) существование в кристалле антиферромагнитного упорядочения.

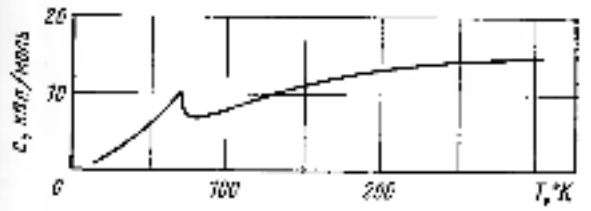


Рис. 30.5. Зависимость удельной теплоемкости MnF_2 от температуры [53].

Не рис. 30.6 изображена зависимость намагниченности от напряженности внешнего магнитного поля, параллельного легкой оси. В критическом поле H_c — 93,3 кэ на кривой наблюдается резкий скачок, соответствующий фазовому переходу первого рода между двумя состояниями магнитной структуры. В этом поле происходит опрокидывание магнитных подрешеток («спин-флип»*) (рис. 30.7).

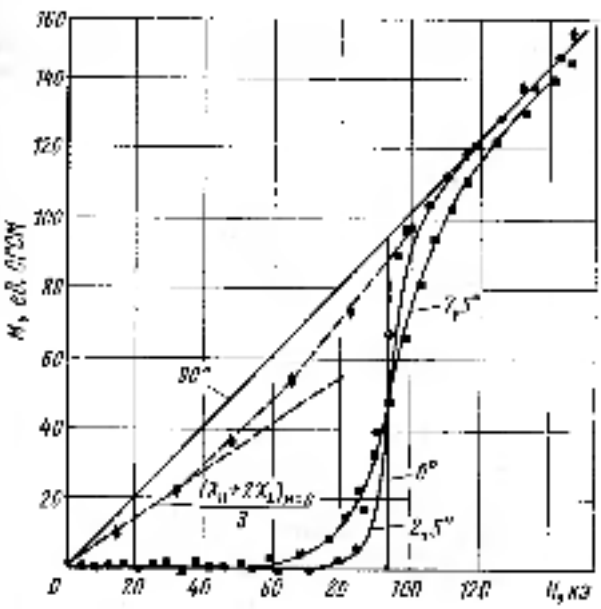


Рис. 30.6. Зависимость намагниченности монокристалла MnF_2 от напряженности магнитного поля, ориентированного вдоль легкой оси (б — 0) и отклоненного от оси на небольшие углы (б равно 2,5° и 7,5°). T — 4,2° К [20].
Данные для монокристалла: ● — б = 2,5°; ■ — б = 7,5°; ◆ — данные для порошка; сплошные линии — результаты расчета в приближении теории молекулярного поля.

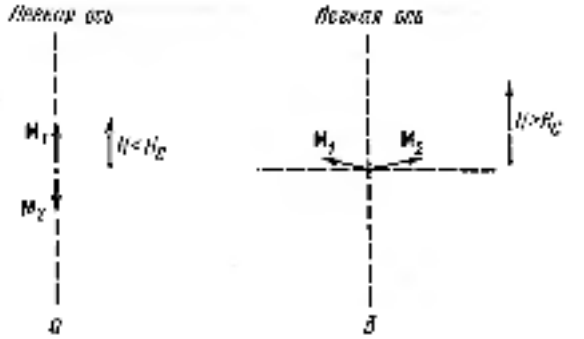


Рис. 30.7. Опрокидывание подрешеток в одноосном антиферромагнитном в магнитном поле, параллельном легкой оси.

На рис. 30.8 представлена магнитная фазовая диаграмма MnF_2 при поле, параллельном легкой оси. Спектр магнонов (или, что то же самое, спиновых волн) для двух направлений волнового вектора q изображен на рис. 30.9. Щель в спектре спиновых волн ω_0 (в приближении теории молекулярного поля $\omega_0 = \gamma\sqrt{H_A H_E \pm H}$), где H_E и H_A — эффективные поля обмена и анизотропии, H — напряженность внешнего поля, параллельного легкой оси) определяет частоту антиферромагнитного резонанса (АФМР). Зависимость частоты АФМР в нулевом поле от температуры представлена на

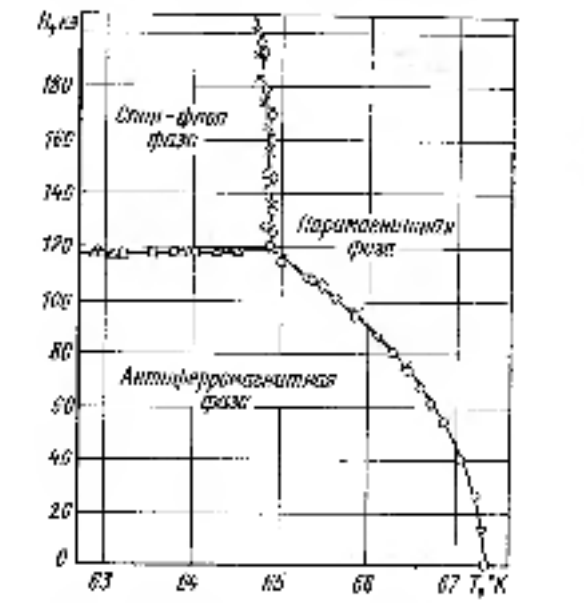


Рис. 30.8. Магнитная фазовая диаграмма MnF_2 в магнитном поле, параллельном легкой оси [25]. Экспериментальные точки получены с помощью измерения поглощения ультразвука в образце; «спин-флип фаза» — состояние с опрокинутой конфигурацией моментов подрешеток (см. рис. 30.7).

---

* По-английски spin-flip.

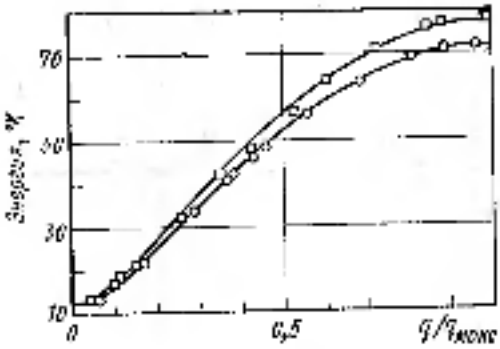


Рис. 30.9. Спектр спиновых волн в MnF_2 при $T = 4{,}2°K$ [31]. Дисперсионные кривые определены из неупругого рассеяния нейтронов для двух направлений волнового вектора q: □ — [001] и ○ — [100].

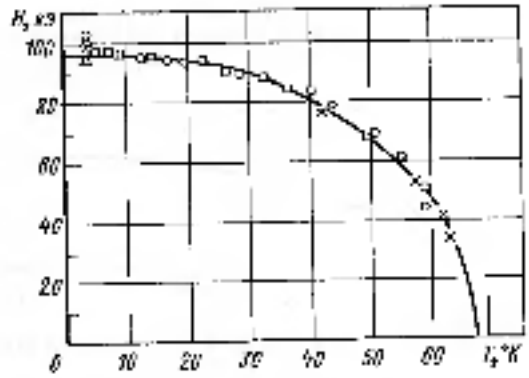


Рис. 30.11. Зависимость напряженности магнитного поля, в котором наблюдается АФМР в MnF_2 на нулевой частоте, от температуры [33]. (Сплошная кривая — нормализованная функция Бриллюэна для $s = 5/2$. Вертикальные черточки в малых полях — данные работы [32].)

рис. 30.10. Температурная зависимость напряженности поля, в котором наблюдается АФМР при экстраполяции к нулевой частоте, изображена на рис. 30.11.

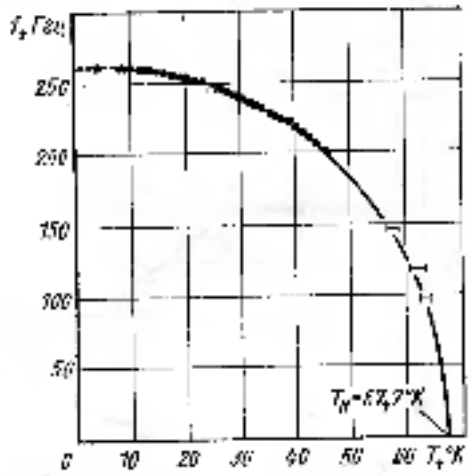


Рис. 30.10. Зависимость частоты АФМР в MnF_2 от температуры [32]. Результаты получены на высоких частотах в малых магнитных полях; горизонтальные черточки указывают погрешность при $H = 0$; сплошная кривая — нормализованная функция Бриллюэна для $s = 5/2$.

В оптических и инфракрасных спектрах антиферромагнетиков имеются особенности, обусловленные магнитным упорядочением и участием магнонов в поглощении (или рассеянии) электромагнитных волн*. Электрическо-дипольное поглощение в длинноволновой инфракрасной области, связанное с одновременным рождением двух спиновых волн (двухмагнонное поглощение), иллюстрирует рис. 30.12. На рис. 30.13 изображено спектральное распределение коэффициента поглощения света в области дополнительной полосы поглощения, обусловленной экситон-магнонным переходом. Такие полосы в оптических спектрах антиферромагнетиков называют магнонными спутниками; они отделены от чисто электронных переходов интервалом $\approx kT_N$.

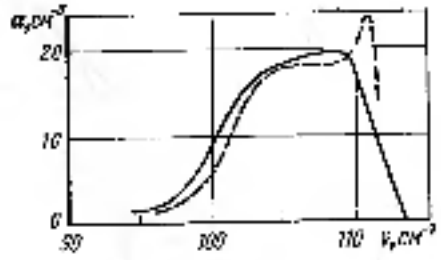


Рис. 30.12. Зависимость коэффициента поглощения α от частоты, характеризующая форму двухмагнонного поглощения, в MnF_2 при $T = 4{,}2°$ K [34]. Электрический вектор электромагнитной волны параллелен легкой оси. Сплошная кривая — эксперимент; пунктир — расчет.

На рис. 30.14 представлены характерные изменения величины эффекта Фарадея в красной и фиолетовой областях спектра при антиферромагнитном упорядочении. На рис. 30.15 показана зависимость угла вращения плоскости поляризации от напряженности магнитного поля, параллельного легкой оси. Объяснение поведения кривых рис. 30.14 и 30.15 можно найти в обзоре [36].

* Вопросы спектроскопии антиферромагнетиков освещены в работах [4, 26].

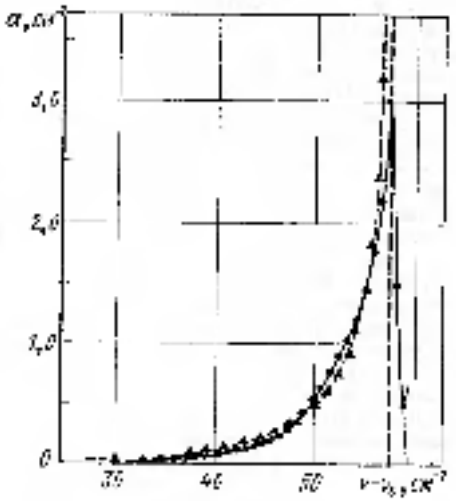


Рис. 30.13. Спектральное распределение коэффициента поглощения света в MnF_2 в области экситон-магнонной полосы поглощения при $T = 2{,}9°$ К [35].

$\nu_0 = 18\,480{,}6$ см$^{-1}$ — частота магнитной дипольной линии, соответствующей экситонному возбуждению; магнитная спин-волновая частота (электрически дипольная линия) наблюдается при $\nu = 18\,477{,}1$ см$^{-1}$. ● — расчет; ▲ — эксперимент.

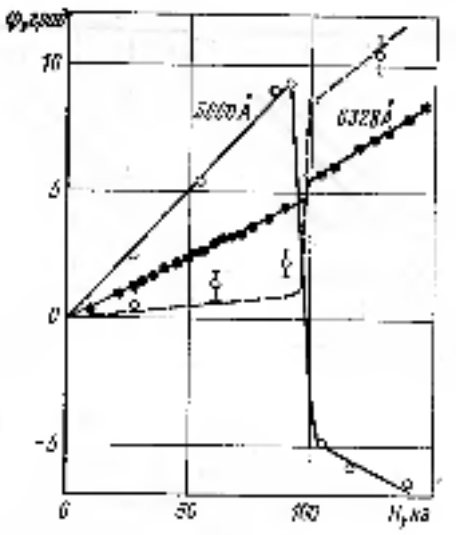


Рис. 30.15. Зависимость величины эффекта Фарадея (угла поворота плоскости поляризации φ) от магнитного поля, параллельного легкой оси [36]. (Пунктир — магниторезонансное приближение; толщина образца — 2,3 см, $T = 20°$ К.)

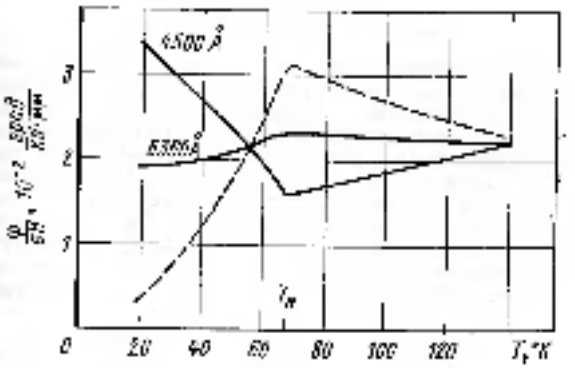


Рис. 30.14. Зависимость величины эффекта Фарадея (φ — угол поворота плоскости поляризации, l — толщина образца) в MnF_2 при $H \ll H_c$ [36, 37] от температуры. Пунктир — магниторезонансное приближение.

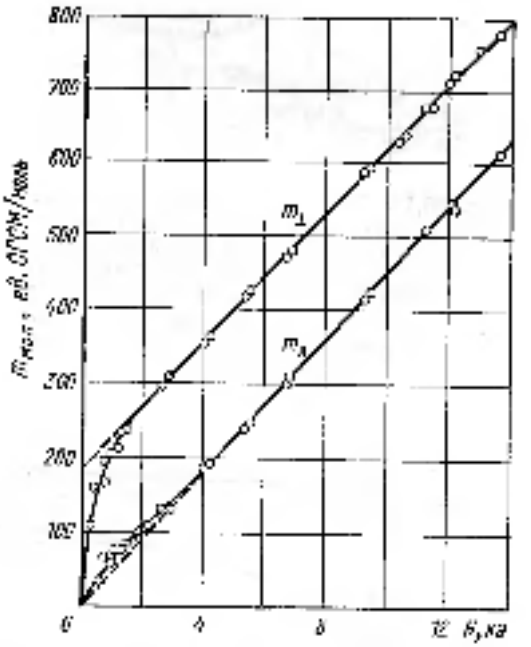


Рис. 30.16. Зависимость полярного магнитного момента m от напряженности поля H в типичном АФДМ $MnCO_3$ при $T = 4{,}2°$ К [8]. $m_\parallel$ — поле направлено вдоль трудной оси; $m_\perp$ — в базисной плоскости. (Наличие в образце спонтанного момента обусловлено взаимодействием Дзялошинского, а не типом анизотропии.)

30.3. ОСНОВНЫЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЛЕГКОПЛОСКОСТНЫХ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ (НА ПРИМЕРЕ $MnCO_3$)

Большой интерес с точки зрения физических свойств, а также возможного технического применения представляют одноосные антиферромагнетики с анизотропией типа легкая плоскость (АФДМ). Выделенное направление в этих кристаллах является трудной осью. Для магнитных моментов подрешеток. Магнитная анизотропия в перпендикулярной к этому направлению плоскости (базисной плоскости) обычно много меньше осевой анизотропии, и ее часто пренебрегают. Кратко не-

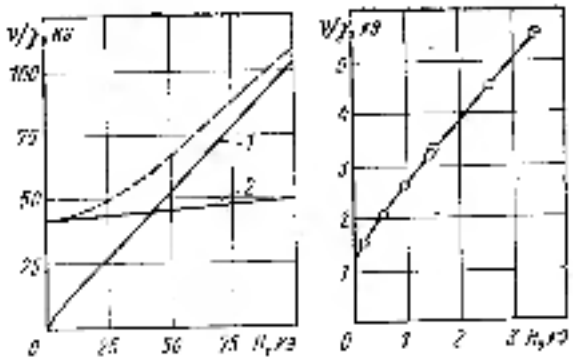


Рис. 30.17. Спектр АФМР в $MnCO_3$ при $T = 4{,}2°$ К [17].

Сплошные кривые — поле приложено в базисной плоскости; пунктир — перпендикулярно к ней. 1 — квазиферромагнитная ветвь колебаний; 2 — антиферромагнитная ветвь. На рисунке справа экспериментальные результаты работы [61] для малых значений поля.

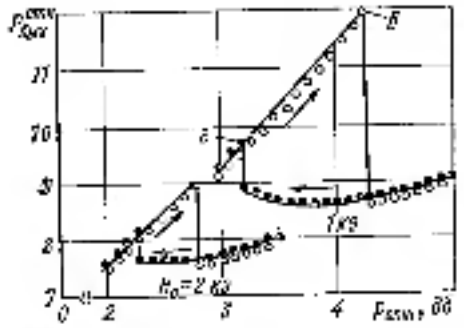


Рис. 30.18. Зависимость проходящей мощности от мощности на входе резонатора при фиксированных значениях магнитного поля H_0 (поле приложено в базисной плоскости) для $MnCO_3$ при $T = 1{,}7°$ К, $\lambda_{сред} = 6$ мм [13]. В точке *а* — скачкообразное возбуждение спин-волновых пар, в точке *в* — их гашение (срыв).

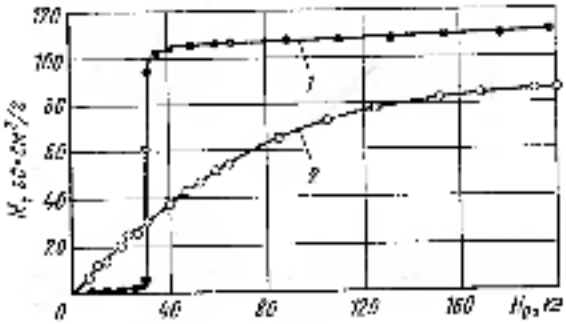


Рис. 30.19. Кривые намагничивания $FeBr_2$ [38]:

1 — антиферромагнитное состояние, $T = 4{,}2°$К; 2 — парамагнитное состояние, $T = 20{,}4°$К.

магнитования и спектр АФМР в кристаллах, обладающих такого типа анизотропией, существенно отличаются от соответствующих характеристик легкоосных антиферромагнетиков (рис. 30.16 и 30.17).

Две ветви АФМР в АФДП различаются прежде всего симметрией участвующих в колебаниях компонент намагниченностей подрешеток [39]. Квазиферромагнитная ветвь (рис. 30.17) имеет щель $\omega_{АФМР}$ $(H = 0)$, определяемую средним геометрическим большого обменного поля и очень малого поля эффективной анизотропии в базисной плоскости. В последнем, благодаря малости магнитокристаллографической анизотропии в базисной плоскости, могут давать заметный вклад магнитоупругое [40] и (при низких температурах) сверхтонкое [41] взаимодействия. Аналогичным образом большое обменное поле усиливает влияние магнитоупругого взаимодействия на спектр фононов, приводя к спадной зависимости скорости звука в АФДП от напряженности магнитного поля (точнее, от его компоненты, параллельной легкой плоскости, — см. [140]). Особенности спектра спиновых волн в АФДП приводят к возможности параметрического (порогового) возбуждения спиновых волн в этих кристаллах [12]. В $MnCO_3$ при параллельной ориентации высокочастотного и статического магнитных полей параметрическое возбуждение спиновых волн квазиферромагнитной ветви происходит с участием вынужденных колебаний квазиантиферромагнитной ветви и может иметь скачкообразный характер — рис. 30.18 [13]. Кроме свойств $MnCO_3$ в настоящее время изучены свойства и других АФДП: $CoCO_3$, $NiCO_3$, FeF_3, $FeBO_3$, α-Fe_2O_3, $(T_M^{*} < T < T_N)$, $CsMnF_3$ и др. (табл. 30.1).

30.4. МЕТАМАГНЕТИКИ

Под *метамагнетиками* в настоящее время понимаются антиферромагнетики, у которых эффективное поле магнитной анизотропии больше эффективного поля обменного взаимодействия: $H_A \gg H_E$. Типичное поведение кривых намагничивания метамагнетиков на примере $FeBr_2$ демонстрирует рис. 30.19. При $T < T_N$ и поле $H \to H_A$ вещество переходит из антиферромагнитной фазы в ферромагнитную, минуя фазу с опрокинутыми подрешетками (спин-флоп фазу). Ниже приводится температура упорядочения и значение поля перехода (при $T \ll T_N$) некоторых типичных метамагнетиков [5]:

	T, °К	H, кэ
$FeCl_2$	23,5	10,5
$FeBr_2$	11	31
$FeCO_3$	38	150

Более подробные сведения о свойствах метамагнетиков можно найти в монографиях [1, 5].

30.5. АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ С ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ДЗЯЛОШИНСКОГО

Существует целый ряд антиферромагнитных кристаллов, при описании магнитных свойств которых, кроме изотропного обменного взаимодействия, определяю-

---

* T_M (точка *Морина*) — температура, при которой α-Fe_2O_3 переходит из легкоосного состояния в легкоплоскостное.

** Кристалл $FeBr_2$ обладает антиферромагнитной слоистой структурой, характерной для многих метамагнетиков (для соседних слоев металлических ионов имеют антипараллельное направление магнитных моментов).

дного собственно магнитное упорядочение, необходимо учитывать специфическое анизотропное взаимодействие обменно-релятивистского происхождения — взаимодействие Дзялошинского (ВД)*. ВД, как правило, приводит к небольшому наклону магнитных моментов подрешеток друг относительно друга и образованию слабого ферромагнитного момента. Антиферромагнетики, обладающие слабым спонтанным моментом ($MnCO_3$, $CoCO_3$, α-Fe_2O_3 ($T > T_M$), CoF_2, NiF_2, $RFeO_3$, где R редкоземельные элементы, $NaNiF_3$, $YCrO_3$ и др.) часто называют слабыми ферромагнетиками**. В случае, когда подрешеток больше двух, их скос может не приводить к появлению спонтанного момента***. В четырехподрешеточных антиферромагнетиках (например, Cr_2O_3 [9], $CuSO_4$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ [5]) две подрешетки дают слабый суммарный момент $+m$, а две другие — $-m$, так что полный момент образца равен нулю. Существует класс кристаллов (наиболее характерные примеры: α-Fe_2O_3 при $T < T_M$; CoF_2), в которых при $H = 0$ ВД не приводит к скосу магнитных моментов подрешеток, однако его необходимо учитывать для адекватного описания магнитных свойств таких кристаллов в сильных магнитных полях [16, 18].

30.6. ПЬЕЗОМАГНЕТИКИ И МАГНИТОЭЛЕКТРИКИ***

Пьезомагнетики — вещества, у которых при наложении упругих напряжений возникает спонтанный магнитный момент, пропорциональный первой степени величины напряжений. Пьезомагнитный эффект сравнительно мал и практически легче всего может быть обнаружен в антиферромагнетиках, которые не обладают в нормальных условиях спонтанным моментом. Появление спонтанного момента в таких кристаллах объясняется изменением их магнитной структуры вследствие деформации при наложении упругих напряжений [2]. Пьезомагнитный момент (m_i) связан с тензором упругих напряжений (σ_{jk}) соотношением $m_i = \Lambda_{ijk}\sigma_{jk}$. Для MnF_2 и CoF_2 в соответствии с требованиями симметрии отличны от нуля только три компоненты пьезомагнитного тензора: $\Lambda_{xyz} = \Lambda_{yxz}$ и Λ_{zxy}. При $T = 20{,}4$ К эти компоненты для CoF_2 имеют значения: $\Lambda_{xyz} = 2 \cdot 10^{-8}$ эв·см³/кГ и $\Lambda_{zxy} = -0{,}8 \cdot 10^{-8}$ эв·см³/кГ [18]. В случае MnF_2 эффект примерно в 100 раз меньше. Пьезомагнитный эффект обнаружен также в $FeCl_2$ [19], α-Fe_2O_3 [20] и др.

Магнитоэлектрики — вещества, у которых при помещении их в электрическое поле возникает магнитный момент, пропорциональный значению поля. Впервые магнитоэлектрический эффект был обнаружен в антиферромагнитном кристалле Cr_2O_3 [21]. Значение эффекта характеризуется тензорным коэффициентом пропорциональности (α_{ij}) между возникающим магнитным моментом и приложенным электрическим полем. Для Cr_2O_3 α_{zz} (256°К) $= 5{,}8 \cdot 10^{-4}$ [22]. Магнитоэлектрический эффект обнаружен также в антиферромагнетиках Fe_2TeO_6, $Nb_2Co_2O_9$, $Nb_2Mn_2O_9$, $Ta_2Mn_2O_9$ [23] и др.***

* Термин ВД впервые в литературе по магнетизму после феноменологического объяснения Дзялошинским [9] природы слабого ферромагнетизма в некоторых антиферромагнитных кристаллах. Влияние ВД на основные свойства АФ исследовано в работе [10].

** В зарубежной литературе их называют скошенными (canting) антиферромагнетиками.

*** В зарубежной литературе — скрытые скошенные (hidden canting).

**** Подробная классификация материалов по их магнитным, электрическим и упругим свойствам, основанная на общем кристаллографическом симметрии, дана в обзоре H. Shirai. «Int. J. Magnetism», 1974, v. 4, p. 387.

30.7. ОРГАНИЧЕСКИЕ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ

Как правило, в органических парамагнетиках, обладающих значительной величиной обменного взаимодействия, магнитного упорядочения, характерного для неорганических веществ, не наблюдается. Объяснение этого явления можно найти, например, в работе [42]. Однако имеются косвенные свидетельства о существовании антиферромагнитного упорядочения в двух органических кристаллах: йодиде дибензохрома и α-дифенил-β-пикрилгидразиле (ДФПГ). Антиферромагнитное упорядочение в йодиде дибензохрома обнаружено при $T < 0{,}75$ К из температурной зависимости сигнала ЯМР на протонах [28]. Переход в антиферромагнитное состояние при $T = 0{,}2 \div 0{,}3$ К обнаружен в ДФПГ по уменьшению интегральной интенсивности электронного парамагнитного резонансного поглощения [27].

30.8. НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Справочный материал относится в основном к магнитным свойствам диэлектриков, обладающих антиферромагнитным упорядочением. Кроме того, приведены данные о магнитных и электрических свойствах некоторых антиферромагнитных полупроводников и металлических сплавов*.

Условные обозначения к табл. 30.1

T_N, $T_K(R)$ — температура антиферромагнитного упорядочения, температура упорядочения ионов R

χ_M — молярная магнитная восприимчивость, ед. СГСМ/моль — см³/моль

$\left.\begin{matrix}\theta \\ c_M\end{matrix}\right\}$ — постоянные в законе Кюри—Вейса $\chi_M = c_M/(T - \theta)$; $\theta \lesssim 0$

p — эффективное число магнетонов Бора в парамагнетике, определяющее c_M ($c_M = Np^2\mu_B^2/3k$)

n_s — число магнетонов Бора на атом в состоянии насыщения

АФ, П, Ф, СФ — антиферро-, пара-, ферро- и слабоферромагнитное состояния вещества. П > АФ — переход между состояниями

* Сведения о магнитной структуре многих антиферромагнетиков, исследованных методом нейтронной дифракции, содержатся в работе [3].

В статье Г. А. Смоленского и Г. М. Недлина (В сб.: Физика магнитных диэлектриков. М., «Наука», 1974, с. 8) представлены основные классы антиферромагнитных диэлектриков.

Значения T_N многих антиферромагнетиков можно найти в книге Solids State Physics Literature Guides, 1972, v. 5. Bibliography of magnetic materials and tabulation of magnetic transition temperatures. Comp. by T. F. Connolly, E. D. Copenhaver.

T_n — температура перемагничивания магнитных моментов относительно кристаллических осей

σ — спонтанный магнитный момент, гс·см³ (СГСМ)

$\sigma(T)$* — значение спонтанного момента при температуре T °К

μ — магнитный момент иона (атома)

$\mu_A(T)$* — магнитный момент иона (атома) A при температуре T °К (в магнетонах Бора μ_B)

$H_E^{эф}$ — эффективное обменное поле

$H_A^{эф}$ — эффективное поле магнитной анизотропии

$H_Л^{эф}$ — эффективное поле, связанное с взаимодействием Дзялошинского [2, 9] (см. разд. 30.3)

$H_c^{э}$ — значение внешнего магнитного поля, при котором наблюдается та или иная особенность в зависимости магнитного момента вещества от магнитного поля

$H_{FMR}^{э}$ — значение магнитного поля, при котором наблюдается АФМР

ΔH_{FMR} — ширина линии АФМР по полю при $\nu_{АФМР} = const$

$\lambda(0)$ — длина волны, соответствующая частоте АФМР в нулевом магнитном поле (при $T \ll T_N$)

c — ось наивысшей симметрии в тригональной, гексагональной и тетрагональной сингониях

$[a]$, $[b]$, $[c]$ — кристаллографические оси в моноклинной и орторомбической сингониях

ρ — удельное сопротивление

E_g — значение энергетической щели в спектре электронных возбуждений для вещества, обладающего полупроводниковыми свойствами

Индексы в обозначениях отдельных физических величин[3*]

$\parallel$, $\perp$ — данная величина относится к направлению, параллельному выделенной в кристалле оси, или направлению, перпендикулярному к ней

$[hkl]$, $[a]$, $[b]$, $[c]$ — данное значение относится к соответствующему кристаллографическому направлению

При числовых значениях магнитной восприимчивости χ:

з — значение восприимчивости в точке Нееля

0 — значение восприимчивости при $T \to 0$ К

к — значение восприимчивости при $T = 293$°К

г — значение восприимчивости при $T = 4{,}2$°К

л — значение восприимчивости при $T = 77$°К

Классификация соединений в таблице дана по магнитному атому. Расположение соединений в таблице соответствует порядковому номеру магнитного атома в таблице Менделеева. Соединения с одним и тем же магнитным атомом расположены в порядке возрастающей сложности (например, соединения, состоящие из трех элементов вида $B_1A_xB_2$ с магнитным атомом B, расположены в порядке возрастания числа $x = |100l + 10p + j|$; при равных числах в соединения расположены в порядке номеров таблицы Менделеева элементов A и B).

---

* $\sigma(0^\circ)$, $\chi(0^\circ)$ — экстраполяция при $T \to 0$.

** Если не указана конкретная температура измерения, значение поля дается для $T \ll T_N$.

*** Те же индексы, стоящие при числовых значениях, означают, что данное измерение проводилось в соответствующем направлении.

Таблица 30.1

Свойства антиферромагнетиков

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	χ_N, $\frac{10^{-6}\ \text{см}^3\cdot\text{Гс}/\text{см}}{\text{моль}}$	θ, °K	Дополнительные сведения	Литература
KO_2	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	7	—	—	—	[207]
TlI_2	Кубическая	—	300	0,22[a]	—	—	[186]
$TlCl_2$	—	—	100	—	—	—	[188]
Ti_2O_3	Тригональная D_{3d}^{5}	—	94[b]	0,21[a]	2000	—	[187]
α-VS	Гексагональная D_{6h}^{4}	—	1040, 900[c]	0,066[a]	3000	—	[271]
α-VSe	Гексагональная D_{6h}^{4}	—	163	0,02[a]	2570		[274]
VO_2	Тетрагональная D_{4h}^{14}	—	343	0,07[a]	1300	$\chi(T_N+0)-\chi(T_N-0)=0,08\frac{\text{см}^3\cdot\text{Гс}/\text{см}}{\text{моль}}$	[280]
VT_2	Тетрагональная D_{4h}^{14}	—	7	—	80		[285]
VCl_2	Тригональная D_{3d}^{3}	—	30	—	—		[29]
V_2O_3	Тригональная D_{3d}^{5}	$\mu \parallel c$[d]	150—170		—	$\chi(T_N+0)/\chi(T_N-0)$[e] $\simeq 10$[f]	[3, 39, 283]
α-Cr	Кубическая O_h^9	$\mu \parallel [100]$ Спиральная	311	0,16[a]		μ (78°) — 0,39μ_B	[2, 3]
CrN	Орторомбическая[g]	$\mu \parallel [110]$ Удвоение периода по двум направлениям	282[a], 273	—		μ_{Cr} (77°) — 2,4μ_B	[3, 286]
CrS	Моноклинная	—	—	—	816	$p = 4,22$	[51]
CrSe	Гексагональная D_{6h}^{4}	Удвоение периода	270—300	—			[3, 287]
CrSb	Гексагональная D_{6h}^{4}	$\mu \parallel c$ Слоистая	703—723	1,02[a]	—	μ_{Cr} — 2,84μ_B	[3, 288]

* Магнитные свойства KO_2 обусловлены наличием неспаренного электрона у $2p$ молекулярной орбитали π-типа иона O_2^-.

[a] По данным измерений.

[b] Предполагается магнитная структура с чередованием магнитных моментов +—+— вдоль оси c [284].

[c] Кубическая (O_h^9 при $T > T_N$).

[d] При $T = T_N$ — фазовый переход первого рода [280].

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °К	χ_M, 10^{-6} ед. СГСМ/моль	$-\theta$, °К	Дополнительные сведения	Литература
CrF_2	Моноклинная C_{2h}^5	Магнитные моменты параллельны длинной оси Cr – F	53	—	—	—	[289]
$CrCl_2$	Орторомбическая D_{2h}^{12}	Удвоение периода цепи [010] и [001]*	20	—	—	—	[289]
CrF_3	Тригональная D_{3d}^6	p ∥ (111)	80	—	160	$c_M = 2{,}07$ $\sigma(0) = 108$ ед.СГСМ/моль·°К $\mu(4{,}2°) = 3\mu_B$	[3, 290]
$CrCl_3$	Тригональная D_3^4 или D_3^5	p ⊥ c Слоистая	17	$\Theta 0{,}02_{\parallel}^{\perp}$		$c_M = 1{,}83$ $H_{c,\parallel} = 3$ кэ, $H_{c,\perp} = 2{,}6$ кэ**	[291]
$CrBr_3$	Тригональная C_{3i}^2 или D_{3d}^2	p ⊥ c Слоистая	38	—	—	$H_{c,\parallel} = 2$ кэ, $H_{c,\perp} = 8$ кэ**	[291]
Cr_2As	Тетрагональная D_{4h}^7	—	393	—	2067	$p = 1{,}8$	[48]
Cr_2O_3	Тригональная D_{3d}^6	p ∥ c	306–308	3,4*		$\mu_{Cr}(4{,}2°) = 2{,}8\mu_B$ $H_{c,\parallel} = 59$ кэ** $\lambda(0) = 189$ дин·°К	[3, 290]
Cr_2O_3	—	—	100	—	140	—	[50]
Cr_2S_3	Моноклинная C_{2h}^3	—	560	—	547	—	[47]
Cr_2Se_3	Моноклинная C_{2h}^3	—	80	—	60	—	[47]
Cr_2S_3	Гексагональная	—	305 (П→Ф), 158 (Ф→ЛФ)	—	—	$\Delta\sigma(158°) = 1{,}85$ ед. СГСМ/г $\rho(77°) = 5 \cdot 10^9$ ом·см	[44]
$KCrF_3$	Тетрагональная	Слоистая	77	—	—	—	[52]
$YCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	c ∥ [c]	141		—	$H_{c,[c]} = 33$ кэ**, $\mu_{Cr}(4{,}2°) = 2{,}95\mu_B$	[24, 227]
$LaCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	295; 282**	1,9*	600	$\mu_{Cr}(4{,}2°) = 2{,}45\mu_B$	[45, 227]

* Магнитные моменты слоев перпендикулярны длинной оси Cr – Cr.
** При $T = 1{,}7$ °К.
*** Значения даны в парамагнитном подрешетке при $T = 77$ °К.
**** Описание этих антиферромагнитных подрешеток см. работу [290].
***** См. в строгую систему на с. 610.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	χ_M, 10^{-6} см³/г (СГСМ) / моль	θ, °K	Дополнительные сведения	Литература*
$GdCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	277*	—	—	—	[227]
$PrCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	239*	—	-	μ_{Cr} (4,2°) = 2,40μ_B	[227]
$NdCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	224* 10(Nd)	—	—	μ_{Cr} (4,2°) = 2,55μ_B μ_{Nd} (4,2°) = 1,3μ_B	[227]
$SmCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	192*	—	—	—	[227]
$EuCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	181*	—	—	—	[227]
$GdCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	170*	—	—	—	[227]
$TbCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	1,5—4,2(Tb); 158*	—	—	μ_{Cr} (4,2°) = 2,85μ_B	[227]
$DyCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	2(Dy) 146*	—	—	μ_{Dy} (1,5°) = 9,6μ_B μ_{Cr} (1,5°) = 2,76μ_B	[227]
$HoCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}		12(Ho)** 140—141*	—	-	μ_{Cr} (4,2°) = 2,94μ_B	[227]
$ErCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	16,8(Er) 133*	—	—	μ_{Cr} (4,2°) = 2,98μ_B μ_{Er} (4,2°) = 5,2μ_B	[227]
$TmCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	4 (Tm) 134*	—	—	μ_{Cr} (4,2°) = 2,58μ_B μ_{Tm} (4,2°) = 6,8μ_B	[3]
$YbCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}		3(Yb) 148*	—	—	μ_{Cr} (4,2°) = 2,80μ_B	[227]
$LuCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	112*	—	—	μ_{Cr} (4,2°) = 2,51μ_B	[227]
$PbCrO_3$	Кубическая T_d^6	—	210—250	—	—	μ_{Cr} (0°) = 2,2μ_B	[3, 56]
$CrVO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{17}	—	50	—	—	μ_{Cr} (4,2°) = 2,1 ± 0,2μ_B	[292]

* Температура упорядочения ионов хрома. Сведения о магнитной структуре приводятся (или нет, см. примеч. к таблице XI.1) в разделе [3].

** При $T < 12$°K магнитная структура гетеромагнитная. Но имеет место ферро- [μ (4,2°) = 3,6μ_B] и антиферромагнитную [μ (4,2°) = 7,0μ_B] компоненты [8].

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	χ_N, 10^{-3} ед. СГСМ/моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
$UCrO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{24}	$\mu \perp [c]$	45	—	—	—	[236]
$MgCr_2O_4$	Кубическая O_h^7	Геликоидальная $\mu \parallel [100]$ и $\mu \parallel [010]$	14	—	350	μ_{Cr} (4,2°) — 2,6μ_B	[3]
$ZnCr_2O_4$	Кубическая O_h^7	Геликоидальная	15—16				[3, 46]
$ZnCr_2Se_4$	Кубическая O_h^7	$\mu \parallel [001]$	13[1] (П→Ф); 22 (Ф→АФ)	340[2]	115	μ_{Cr} (4,2°) — 3μ_B	[3, 64]
Cr_2TeO_7	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \perp c$	>4,2	—	—	μ (4,2°) — 2,15μ_B	[257]
Cr_2WO_6	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \perp c$	>4,2			μ (4,2°) — 2,14μ_B	[257]
$CrK(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	Кубическая T_h^6	—	0,004	$9 \cdot 10^{-4}$	—	—	[29]
$Cr(CH_3NH_2) \cdot (SO_4)_2 \times$ $\times 12H_2O$	—	—	0,02	—		—	[49]
α-Mn	Кубическая T_d^3	—	100	—	—	—	[2]
MnO	Кубическая с ромбоэдрическими искажениями ниже T_N	$\mu \parallel (111)$	120	6[3]	610	c_p — 4,4 λ (0) — 362 ккал μ — 5μ_B	[3, 58, 69]
MnP	Орторомбическая D_{2h}^{16}	При $T < 47$ К геликоидальная	291 (П→Ф) 50[4] (Ф→АФ)	—	—312	H_{c_1} [c] — 2,4 кэ[5] H_{c_2} [b] — 6,2 кэ c_p — 10,4	[57, 225]
β-MnS	Гексагональная C_{6v}^4	$\mu \parallel [001]$, $\mu \perp [001]$	165; 110	19	528	μ (4,2°) — 5μ_B	[3, 29]
MnSe	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [001]$	247	19[3]	740	Полупроводник E_g — = 0,68 эв	[29, 212]
MnTe	Гексагональная D_{6h}^4	—	307	4,6[4]	—	Полупроводник E_g — 1 эв μ_{Mn} (165°) — 4,6μ_B	[3, 29, 213]
MnNi	Тетрагональная	$\mu \perp c$	1140	0,067[6]	—	μ_{Mn} (0°) — 4μ_B μ_{Ni} (0°) < 0,6μ_B	[62]
MnCu	Тетрагональная	$\mu \parallel c$	300	—	—	Сплав (69—85% Mn)	[59]

[1] T (Ф → АФ) = 47° по данным работы [240].
[2] T = 4,9°К.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	γ_N, гр·см³/см³	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
MnRh	Тетрагональная*	—	170	0,8[a]	260	$c_N = 1,35$	[60]
MnIr	Кубическая O_h^1	—	3(0)—520	4,8[a]	337	$c_N = 3,79$; $\mu_{Mn} = 4,2\ \mu_B$	[3, 61]
MnPt	Кубическая O_h^1	$\mu \parallel [100]$ при $T < 195$°K	460; 198	9,4[b]	—	$\rho(T_N) = 5 \cdot 10^{-9}$ ом·см	[3, 58]
MnO_2	Тетрагональная	$\mu \perp c$	92	2,6[b]	—	—	[63]
MnS_2	Кубическая T_h^6	$\mu \parallel c$	48; 50	7,1[b]	592	$c_N = 4,91$; $\mu(4,2°) = 5\mu_B$	[3, 64]
$MnSe_2$	Кубическая T_h^6	$\mu \parallel c$	75	6,6[b]	463	$c_N = 4,36$; $\mu(4,2°) = 5\mu_B$	[64]
$MnTe_2$	Кубическая T_h^6	$\mu \parallel c$	75—87	6,8[b]	628	$c_N = 4,78$; $\mu(42°) = 5\mu_B$	[3, 62]
MnF_2	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \parallel c$	72	25^{5}_{1}	113	$c_N = 4,67$; $H_{c,1} = 93,3$ кэ[c]; $\chi(0) = 1,11$ мкг; $\Delta H_{res} = 3$э при $\nu = 23$ Ггц	[56, 185]
$MnCl_2$	Тригональная D_{3d}^5	Слоистая	1,61	—	3,3	—	[14]
$MnBr_2$	Тригональная D_{3d}^1	$\mu \perp (001)$ Слоистая	2,10	—	4,03	—	[67]
MnI_2	Тригональная D_{3d}^3	Геликоидальная $\mu \parallel (001)$	3,4	—	—	$\mu(1,3°) = 4,6\mu_B$	[214]
$MnSn_2$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \parallel c$[a]	330	—	—	$\mu(77°) = 2,36\mu_B$	[66]
$MnAu_2$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	Спиральная	363	—	—	—	[69]
MnF_3	Моноклинная	Слоистая	47	7,0[b]	—5	$c_N = 3,1$; $\mu(0°) = 2\mu_B$	[70]
$MnAu_2$	—	—	145	77,3[b]	200	$c_N = 2,5$	[61]
Mn_4Sn	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	573	—	1957	$\rho = 2,58$	[97]
$TlMn_2$	Кубическая	Спиральная	46				[73]
Mn_3Cu	Кубическая T_h^7	—	80	—	—	—	[71]

* При $T \geq T_N$ — кубическая (O_h^1).

[a] Значение поля опрокидывания подрешеток при $T = 4,2$°K.

[b] При $T < T_N$ 7,3°K сложная модулированная спиновая структура.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °К	$\chi_N \cdot 10^{-5}$ ед. СГСМ/моль	θ, °К	Дополнительные сведения	Литература
Fe_3Mn_2	—	—	590	0,02*	430	—	[72]
Mn_3Cr_2	—	—	283(П → Ф); 164 (Ф → АФ)		-300	$\sigma_{ш} = 0,775$ $\Delta\sigma(104°) = 3,5$ ед. СГСМ/г	[74]
$MnCO_3$	Тригональная D_{3d}^{6}	$\sigma \parallel c$	32	43*	14,5	$\sigma(0°) = 188$ ед. СГСМ/моль $\lambda(0) = 2,3$ мм $H_{ДЛ} = 4,4$ кэ	[75]
$MnSiO_3$	Триклинная	—		12,4*	45	$\mu = 5,91$	[77]
$CaMnO_3$	Кубическая (приближенно) O_h^1	Удвоение по числам по трем направлениям	130; 95	4,7*	425	$\sigma(0°) \neq 0$	[3, 84]
$SrMnO_3$	Гексагональная C_{6v}^{2}	—	150	—	—	$\mu_{Mn}(4,2°) = 4\mu_B$	[3, 90]
$MnTiO_3$	Тригональная C_{3i}^{2}	$\mu \parallel [111]$	60—65, 41	—	210	$\sigma_M = 4,15$ $H_{ДЛ} = 62$ кэ $\mu(4,2°) = 4,55\ \mu_B$	[3, 70]
$MnGeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{15}	$\mu \parallel [b]$	18	-	510; 46	$\mu = 6,02$	[89, 234]
$MnYO_3$	Гексагональная	—	48		—	$\sigma(0°) \neq 0$	[47]
$LaMnO_3$	Кубическая (приближенно)	Спиральная	170; 100	48,4*	—40	$\sigma(0°) = 1210$ ед. СГСМ/моль	[3, 85]
$HoMnO_3$	Гексагональная C_{6v}^{2}	—	70	—	-	$\mu_{Mn}(4,2°) = 3,5\ \mu_B$	[3, 99]
$ErMnO_3$	Гексагональная C_{6v}^{2}	—	79	—	—	$\mu_{Mn}(4,2°) = 3,5\mu_B$	[3, 99]
$TmMnO_3$	Гексагональная C_{6v}^{2}		86*	—	—	$\mu_{Mn}(4,2°) = 3,8\ \mu_B$	[3, 99]
$LuMnO_3$	Гексагональная C_{6v}^{2}	—	91	—	—	$\mu_{Mn}(4,2°) = 3,7\ \mu_B$	[3, 99]
$NaMnF_3$	Орторомбическая	$\sigma \parallel [c]$	67	—	—	$H_{ДЛ} = 390$ кэ $H_{ДЛ} = 4,3$ кэ $H_A = 200$ э	[103]

* Нет уверенности, что наблюдается переход П → АФ.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	$\chi_M \cdot 10^{-6}$ ед. СГСМ/моль	Θ, °K	Дополнительные сведения	Литература
$KMnF_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	88,3	17,7*	238	$c_M = 4,73$ $S(4,2°K)$ — —19,3 ед.СГСМ/моль°	[80]
$RbMnF_3$	Кубическая	$\mu \parallel [111]$	54	$17,7^{\perp}$	190	$c_M = 4,22$ $H_{c,\parallel} = 2,2$ кэ $H_A = 4,5$ э $H_E = 950$ кэ	[81]
$CsMnF_3$	Тетрагональная D_{5h}^{4}	$\mu \perp c$	66; 53	40*	—	$H_{A,\parallel} = 7,6$ кэ $H_{A,\perp} = 1,1$ э $H_E = 3,5 \cdot 10^4$ э	[83]
$TlMnF_3$	Кубическая	—	83; 76	—	195	$H_E = 680$ кэ $H_A = 6,7$ кэ $\mu(4,2°) = 4,9\ \mu_B$	[224, 225]
$KMnCl_3$	Тетрагональная $[c]/[a] = 1,016$	—	100	—	—	—	[82]
$RbMnCl_3$	Кубическая (приближенно)	—	92	—	—	—	[82]
$CsMnCl_3$	Кубическая (приближенно)	—	70	—	—	ΔH (6°) — 36 кэв	[82]
$MnWO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}		11	—	—	—	[78]
$MnLiO_2$	Орторомбическая D_{2h}^{26}	слоистая	12	200*	8	$c_M = 4,39$	[79]
$Mn(CH_3)_2$	Тригональная D_{3d}^{3}	$\mu \parallel c$	12	—	28	$c_M = 4,26$	[225]
$MnKnF_3$	Кубическая O_h^7	$\mu \parallel [111]$	33	—		$\mu_{Mn}(4,2°) = 3,6\ \mu_B$	[100]
K_2MnF_4	—	—	45	—	—	—	[222]
α-Cs_2MnCl_4	Орторомбическая	—	0,93*	—	4		[240]
$MnNb_2O_6$	Орторомбическая D_{2h}^{14}	$\mu \parallel [100]$**	4,48*	—	—	—	[276]
$Mn_{1-x}Cr_xSb$ $0,16 \leq x \leq 0,2$	Тетрагональная D_{4h}^{7}	—	550* (ПТ → Ф при $x = 0$)	—	—	$c_M \to -5220$ ед. СГСМ/моль	[89]

* Специальный вопросы поведения ниже $T = 61,5$°K. Изменение магнитной структуры при $T = 81,5$°K является фазовым переходом первого рода.

** В пределах линии АФМР на частоте 9,5 Гц.

*** В плоскости, перпендикулярной к c, наблюдается структура.

**** По данным измерений.

***** Моменты почти параллельны оси [100].

****** По измерений магнитострикции нижнего предела.

******* $T_{\Phi \to \Pi\Phi}(K) = 120 \div 225$ К [95].

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	χ_M, 10^{-6} ед. СГСМ/моль	θ, °K	Дополнительные сведения	Литература
$Mn(C_5H_5)_2$	—	—	134	—	492	$p = 7,18$	[98]
Mn_2SiO_4	Орторомбическая D_{2h}^{15}	$\mu \parallel [a]$*	50	18,8**	163	$c_M = 4,27$	[3, 87]
Mn_3GaC	Кубическая	—	226(П→АФ), 160 (Ф→АФ)	—	—	—	[109]
Mn_3ZnN	Кубическая O_h^1	—	183 (П→Ф); 140 ($АФ_1$→$АФ_2$)	—	—	—	[222]
$CsMnCl_3$	Тетрагональная	—	0,39**	—	0,9	—	[240]
$Nb_3Mn_4O_9$	Тригональная D_{3d}^6	—	125; 110**	32*	250	$c_M = 17,2$ Магнитоэлектрик $\mu_M(4,2°) = 5\mu_B$	[3, 88, 293]
$Ta_3Mn_4O_9$	Тригональная D_{3d}^1	—	103*	—	—	Магнитоэлектрик	[264; 293]
$Dy_3Mn_4O_9$	Орторомбическая L_{2h}^9		8	—	—	В поле $H = 100$ кэ при $T = 4,2$ °K максимальный момент вдоль оси [a]	[101]
$LiMnPO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [100]$	34—42	32*	80	$c_M = 4,35$	[3, 90]
NH_4MnCl_3	Кубическая O_h^1 при $T > T_N$. Орторомбическая L_{2h}^{18} при $T < T_N$	—	103	—		—	[263]
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	Моноклинная C_{2h}^5		1,62		1,79	$H_{c_1} = 2,5 \div 5,0$ кэ**	[91, 215]
$MnBr_2 \cdot 4H_2O$	Моноклинная C_{2h}^5	$\mu \parallel [c]$	2,136		—	$H_{c_1} = 7,5 \div 10$ кэ**	[92, 215]
$MnSiF_6 \cdot 6H_2O$	Тригональная C_{3v}^6	—	0,1		—		[104]
$Cs_2MnCl_4 \cdot 2H_2O$	Триклинная	—	1,83**	—	—	—	[240]

* При $T > T_1 = 15$ °K; при $T < T_1$ — геликоидальная спиновая структура [3].
** Из магнитных измерений.
*** По измерениям магнитоэлектрического эффекта.
**** При $T = 1,2$ °K.

Вещество	Структура кристаллическая	Структура магнитная	T_N, °K	$\chi_N \cdot 10^6$ ед. СГСМ/моль	θ, °K	Дополнительные сведения	Литература
$Mn(C_2H_3O_2)\cdot 4H_2O$	Моноклинная		3,2	—	5,2	$c_M = 3,19$ $\varkappa(0°) = 2790$ ед. СГСМ/моль	[94]
$Mn(HCOO)_2\cdot 2H_2O$	Моноклинная: C_{2h}^5	$\mu \parallel [110]$*	3,7**	—	—	$c_M = 4,37$	[99]
$Mn(NH_4)_2(SO_4)_2\cdot 6H_2O$	Моноклинная		0,14			$\varkappa(0°) =$ $= 7,82\cdot 10^4$ ед. СГСМ/моль	[95]
FeSi	Кубическая T_4	—	443	—	107	$p = 2,55$	[135]
FeP	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	—	—	56	$c_M = 1,46$	[133]
FeO	Кубическая с ромбоэдрическими искажениями при $T < T_N$	—	198; 196	8*	190	$\mu(1,2) = 3,3\ \mu_B$ $c_M = 4,6$	[3, 68]
FeS	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \parallel c$ при $T < T_N$ $\mu \perp c$ при $T > T_N$ $T_N = 600$°K	593—600	2,2*	917	—	[3, 106]
FeSe	Гексагональная D_{6h}^4	—	847**	—	—	—	[106]
FeTe	—	—	70	—			[40]
FeRh	Кубическая	—	675 (П → Ф) 350 (Ф → АФ)	15,9*	680	$\Delta\varkappa(350°) =$ $= 117$ ед. СГСМ/моль $\rho(0°) = 5\cdot 10^{-5}$ ом·см	[107]
FeF_2	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \parallel c$	78	15,9	117	$c_M = 3,88$ $\lambda(0) = 190$ моль	[108]
$FeCl_2$	Тригональная D_{3d}^3	$\mu \parallel c$ Слоистая	23	320[6]	—49	$\mu(4,2°) = 4,2\ \mu_B$ $H_{c,\parallel} = 10,5$ кэ	[3, 67]
$FeBr_2$	Тригональная D_{3d}^3	$\mu \parallel c$ Слоистая	11	100[6]	—6	$c_M = 3,92$ $H_{c,\parallel} = 31,5$ кэ	[38]
FeI_2	Тригональная D_{3d}^3	—	10	85[6]	23	$c_M = 4,29$	[110]
FeP_2	Орторомбическая D_{2h}^{12}	—	250**	1,16*	17	—	[113]
$FeGe_2$	Тетрагональная D_{4h}^{16}	—	77	—	—	—	[137]

* Проявляет свойства, характерные для двумерной модели Изинга [216].

** При этой температуре упорядочивается только часть магнитных моментов. Остальные моменты обусловливают парамагнитные свойства. При $T = 0,23$°K наблюдается аномалия Шоттки в поведении теплоемкости [216].

*** При $T = 420$°K наблюдается переход АФ → Ф.

**** Нет уверенности, что переход есть П → АФ.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	$T_{кр}$, °K	$\chi_{ат} \cdot 10^{-6}$ см³/г·ат	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
$FeSiO_3$	Тетрагональная D_{4h}^{16}	–	380	1,05[1]	236	$c_м = 1,4$	[114]
$FeSi_2$	Орторомбическая D_{2h}^{12}	—	773	–	—	—	[112]
$FeTe_2$	—	—	85	–	320	$\mu = 0,194$	[436]
FeF_2	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \parallel (111)$	364; 364		—	$\mu(4,2°) = 5_{\mu_B}$	[3, 85]
$FeCl_2$	Гексагональная C_{3i}^2	Спиральная	16; 10	—	115	$\mu = 0,73$ $\mu(4,2°) = 4,3\ \mu_B$	[3, 134]
$FeBr_2$	Кубическая T_d^5	—	120 170	—	—	—	[3, 141]
α-Fe_2O_3	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \perp c$ $0 < T < T_M$[2] $\mu \perp c$ $T_M < T < T_N$	950	—	—	$H_E = 9000$ кэ $H_K = 22$ кэ,[2] $H_{c,\perp} = 68$ кэ,[3] $H_{c,\parallel} = 160$ кэ, $\sigma(300°) = 70$ ед. СГСМ/моль	[114]
FeOCl	Орторомбическая D_{2h}^{13}		92	—			[252]
$LiFeO_2$	Тетрагональная	Слоистая $\mu \parallel [001]$	315	—	—	—	[115]
β-$FeNaO_2$	Орторомбическая	$\sigma \parallel [b]$ $\mu \parallel [c]$	–		–	—	[47]
$CuFeS_2$	Тетрагональная D_{2d}^{12}	$\mu \parallel c$	821	1,1	–	$\mu_{эф} = 3,85\ \mu_B$ $\Gamma_2 = 2,5$ эв	[118]
$FeBO_3$	Тригональная D_{3d}^6	$\sigma \parallel c$	348	–	—	$H_Д = 62$ кэ[4] $\mu_{Fe}(77) = 4,7\ \mu_B$	[3, 254, 255]
$FeCO_3$	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \parallel c$	35; 20	17[5]	14	$H_{c,\parallel} = 150$ кэ	[9, 3]
$FeTiO_3$	Тригональная C_{3v}^2	Слоистая $\mu \perp c$	68; 50	61[6]	−17	$c_м = 3,92$	[3, 116]
$FeVO_3$	Тригональная D_{3d}^6	—	—	—	—	—	[117]
$YFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [c]$	643	2,2[7]		$\sigma(4,2°) =$ $= 30,1$ ед. СГСМ/моль $H_c = 72,5$ кэ[8] $(T = 4,2°K)$	[121]

[1] При $T = T_м = 202°K$ переход СФ → ПФ.
[2] При $T = 77°K$ [115].
[3] При $T = 98°K$.
[4] В поле $H = H_c$ [3] [16]) происходит фазовый переход второго рода, сопровождающийся изменением магнитной симметрии кристалла [122].

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	$\chi_\perp \cdot 10^{-3}$ ед. СГСМ/моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
$LaFeO_3$*	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$ Удвоение периода по трем направлениям	738	12**	480	$\sigma = 243$ ед. СГСМ/моль**	[124]
$CeFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$ $T > T_n$ $T_n = 290$ K	719	—	—	—	[278]
$PrFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$	—	—	—	—	[123]
$NdFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	Удвоение периода по трем направлениям	760	—			[126]
$SmFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [100]$ при $T < T_n$; $\sigma \parallel [001]$ при $T > T_n$ $T_n = 910°C$	675	—	—	$\sigma = 202 \div 210$ ед. СГСМ/моль	[135]
$EuFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$	668		—	$\sigma = 198 \div 204$ ед. СГСМ/моль	[125]
$GdFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	648(Fe) 2,5(Gd)	—	-	$\sigma = 257$ ед. СГСМ/моль	[125]
$TbFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$ при $T > T_n$; $T_n = 6,4°K$	651(Fe) 3(Tb)		—	$\sigma = 340 \div 356$ ед. СГСМ/моль	[126]
$DyFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$ при $T > T_n$; $\sigma = 0$; $T < T_n$ $T_n = 30 \div 35°K$	668(Fe) 3,7(Dy)	—	-	$\sigma = 330$ ед. СГСМ/моль	[126]
$HoFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [100]$ при $T < T_n$; $\sigma \parallel [001]$ при $T > T_n$ $T_n = 80°K$	643(Fe) 6,5(Ho)	—	—	$\sigma = 236 \div 250$ ед. СГСМ/моль	[126]
$ErFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [100]$ при $T < T_n$; $\sigma = [001]$ при $T > T_n$ $T_n = 102°K$	643(Fe) 4,3(Er)	—	—	$\sigma = 228 \div 237$ ед. СГСМ/моль	[125]
$TmFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [100]$ при $T < T_n$; $\sigma \parallel [001]$ при $T > T_n$ $T_n = 90°K$	630	—	—	$\sigma = 320 \div 324$ ед. СГСМ/моль $\Delta H_{рез} = 1,68$ при $\nu_{мощн} = 57,7$ Гц	[125, 127]

* Обзор магнитных свойств орторомбических ($RFeO_3$, где R — все редкоземельные металлы) дан в работе [123].
** Значения σ и приведенных для $T < T_N$(Fe), но $T > T_N$(R).

Вещество	Структура: пространственная	Структура: магнитная	T_N, °K	$\chi_M \cdot 10^{-3}$ эл. ед. СГСМ/моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
$YbFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [001]$ при $T > T_{II} - 9$ °K	636	—	—	$a = 340$ эл. ед. СГСМ/моль; $c = 358$ эл. ед. СГСМ/моль	[193]
$LuFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	647	—	—	$a = 329$ эл. ед. СГСМ/моль	[126]
$LiTeO_3$	Тригональная D_{3d}^{6}, C_{3v}^{6} *	—	643	—	—	—	[142]
$KTeF_3$	Тригональная	—	113	—	—		[120]
$RbTeF_3$	Тетрагональная **	—	102; 75		88	При $T_1 = 42$ °K и $T_2 = 87$ °K — изменение структуры (фазовые переходы первого рода); $\chi \neq 0$ при $T < T_2$	[140, 228]
$TeFO_4$	Тригональная D_3^5	$\mu \perp c$	27	—	60	—	[258]
$FeSO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$	21 23	78,5 ***	30,5	$a_M = 3,99$ μ (4,2°) = 4,1 μ_B	[3, 49, 78]
$UFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{14}	$\mu \parallel [b]$ ****	59 (П → АФ) 42 (АФ → Ф) *****	—	—	$\rho = 3,2 \cdot 10^6$ ом·см	[237]
$BaFeF_3$	Орторомбическая D_{2h}^{12}	Скошенная ****** $\mu \parallel [010]$	54	1 *****	—	$\mu(0°) = 4,2$ μ_B	[229]
$FeSb_2O_4$	Тетрагональная D_{4h}^{10}	$\mu \perp c$	—	—	—	—	[261]
Fe_2SiO_4	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$ *****	65	20,4 *****	150	$a_M = 4,25$	[67]
$ZnFe_2O_4$	Кубическая O_h^7	—	9 16	—	—	$\mu_{Fe}(4,2°) = 4\mu_B$	[3, 46]
Fe_2TeO_6	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \parallel c$	210	—	—	Магнитоэлектрик $\mu(4,2°) = 4,19$ μ_B	[257]
$Ca_2Fe_2O_5$	Орторомбическая D_{2h}^{17}	$\mu \parallel [c]$ $(a < c < b)$	720	—	—	$\mu(78°) = 4,5$ μ_B	[144]

* Предполагаемая структура.
** При $T > T_N$ — кубическая структура; при $T = 40 \div 47$ °K — орторомбическая, при $T < 40$ °K — моноклинная [228].
*** Для АФ-структуры.
**** В состоянии Ф обнаружен слабый ферромагнетизм.
***** Проявляет свойства двумерного антиферромагнетика.
****** При $T > T_N = 85 \div 95$ °K, при $T < T_N$ — скошенная спиральная структура [3].

Вещество	Структура: кристаллическая	Магнитная	T_N, °K	$\chi_{\max}$, 10^{-6} ед. СГСМ/моль	χ_K, °K	Дополнительные сведения	Литература
$Sr_2Fe_2O_5$	Орторомбическая D_{2h}^{16}		600—700	—	—	$\mu(77°) = 4.5\ \mu_B$	[3, 218]
$Na_3Fe_3O_5$	Моноклинная C_{2h}^{6}	$\mu \parallel [001]$	381	—	—	$H_{\text{эф}} = 510$ кэ*	[163]
α-FeOOH	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$	370	—	—	—	[3, 138]
LiFePO$_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}		53	—	—	$H_c = 430$ кэ	[268]
Ca_2FeAlO_5	Орторомбическая D_{2h}^{12}	$\mu \parallel [a]$	60	—	—		[270]
$FeCl_3 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^{5}	μ составляет с осью $[a]$ угол 76°	23	—	—	Метамагнетик $H_{c,1} = 39{,}2$ кэ $H_{c,2} = 45{,}6$ кэ	[130]
$FeCl_3 \cdot 4H_2O$	Моноклинная	$\mu \parallel [b]$	1	1050**		—	[130]
$K_3Fe(CN)_6$	Моноклинная C_{2h}^{5}	—	0,129		—	—	[128]
$FeCl_3(CH_3)_2 \cdot 2H_2O$	—	—	20	—	—	—	[129]
$Fe_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$	Моноклинная C_{2h}^{5}	$\sigma \parallel [b]$	30	307**	—	$\sigma = 6460$ ед. СГСМ/моль	[131]
$Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$	Моноклинная	$\mu \parallel [001]$	4—11	—	—	—	[132]
$Fe(HCOO)_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^{5}	—	3,75; 3,68	—		$\sigma = 0$	[93, 216]
$Fe(NH_4)(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	—		0,043	1000**	—	—	[29]
CoO	Кубическая с тетрагональными искажениями ниже T_N	$\mu \parallel [111]$	328; 291	0,7*	282	$c_{44} = 305$	[3, 68, 146]
CoS	Гексагональная D_{6h}^{4}	—	358	—	632	$p = 1{,}7$	[130]
CoF_2	Тетрагональная D_{4h}^{13}	$\mu \parallel [001]$	37,7	50*	62,7	$c_{44} = 3{,}29$ $H_{c,\perp} = 120$ кэ** $H_{c,\parallel} = 190$ кэ $\lambda_1(0) = 351$ ангстрем** $\lambda_2(0) = 278$ ангстрем	[146]

* Эффективное поле спин-спинового взаимодействия (усреднение по трем неэквивалентным позициям ионов Fe).

** Значения $H_{c,\parallel}$ и $H_{c,\perp}$ по данным по АФМР [147]. В силу $H_{c,\perp} > H_{c,\parallel}$ по-видимому, осуществляется фазовый переход первого рода, согласованный с изменением магнитной структуры [203].

*** При $H \parallel [001]$ g-факторы для $\lambda_1(H)$ и $\lambda_2(H)$ соответственно равны $g_1 = 1{,}18$ и $g_2 = 2{,}80$.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	$\chi_m \cdot 10^{-7}$, ед. СГСМ/моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
$CrCl_3$	Тригональная D_{3d}^5	Слоистая $\mu \perp c$	24,9	69^6	90	$c_M = 3,33$ $\mu(4,2°) = 3,1\ \mu_B$	[3, 148]
$CrBr_3$	Тригональная D_{3d}^2	Слоистая $\mu \perp c$	19	147^6, $43^6_{\parallel}$		$c_M = 3,34$	[148]
α-CrI_3	Тригональная D_{3d}^2	Слоистая $\mu \parallel c$	3	—	—	—	[148]
$CrSn_2$	Кубическая T_h^6		93	—	160	Полупроводник $p = 2,2$	[269]
CrF_3	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \perp$ (111)	460			$\mu_{Cr}(4,2°) = 4,2\ \mu_B$	[3, 85]
Cr_2O_3	Кубическая O_h^7 шпинель	—	40	—	53	$\mu_{Cr^{3+}} = 0$ $\mu_{Cr^{3+}} = 3,26\ \mu_B$	[3, 149]
$CrCl_3$	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \perp c$	18	62	—	$\chi(0°) = 1403$ ед. СГСМ/моль	[2]
$CrTiO_3$	Тригональная C_{3v}^2	$\mu \perp$ [111]	37—42	—	15	$c_M = 3,3$	[3, 150]
$CrGeO_3$	Моноклинная C_{2h}^6	—		8,5	14	$\mu = 5,33$	[77]
$KCrF_3$	Тетрагональная*	—	114; 119	8,5	125	$c_M = 3,07$ $\mu_{Cr}(4,2°) = 3,3\ \mu_B$	[3, 120, 167]
$RbCrF_3$	Тетрагональная $[c]/[a] = 0,967$ при $T = 4,2$°K	—	98	—	180	$\mu(4,2°) = 3\ \mu_B$ $\mu = 5,13$	[151]
$RbCrBr_3$	Тетрагональная D_{6h}^4	$\mu \parallel c$	36	—	—	$\mu_{Cr}(4,4°) = 3,4\ \mu_B$	[3, 239]
β-$CrSO_4$	Орторомбическая D_{16}^{2h}	—	12	62^9	52	$c_M = 3,37$ $H_{c,[c]} = 12$ кэ $\mu(0°) = 3,4\ \mu_B$	[42, 78]
$CrTiO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{14}	Слоистая	12	85^9	23	$c_M = 3,11$ $\mu_{Cr}(4,2°) = 4\mu_B$	[3, 79]
K_2CrF_4	Тетрагональная	—	130	—	—	—	[90]
$CrRb_2O_4$	То же	—	27	—	30	$c_M = 2,58$	[102]
$CrCs_2Cl_3$	?	—	0,52	—	—		[158]

* Тетрагональные искажения кубической решетки при $T = 78$°K 0,8% переходит на решетки [167].

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	$\chi_{ат}$, 10⁻⁶ ед. СГСМ/моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
$CoCs_3Br_5$	Тригональная	—	—	—	—	—	[159]
Co_2SiO_4	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	—	17*	15	$c_H = 2,12$	[67]
$Nb_2Co_2O_6$	Тригональная D_{3d}^4	Магнитные цепи образуют цепи вдоль оси c	30; 27*	133	40	$\mu_{Co}(4,2°) = 3\mu_B$ Магнитоэластик $c_H = 12,0$	[3, 88, 293]
$Ta_2Co_2O_6$	Тригональная D_{3d}^4	—	900*	—	—	—	[964]
$LiCoPO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$	22		—	$H_{c_1} = 320$ кэ	[3, 268]
$BaCoWO_6$	Кубическая O_h^5	μ составляет с осью [111] угол 20°	17	—	—	—	[166]
$CoCl_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^5	$\mu \parallel [b]$	8	210*	—	Метамагнетик $H_{c_1}, [b] = 32$ кэ $H_{c_2}, [b] = 46$ кэ	[153]
$CoBr_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная	$\mu \parallel [b]$	9,5		0	Метамагнетик $H_{c_1}, [b] = 13,7$ кэ $H_{c_2}, [b] = 29,8$ кэ	[154]
$CoCl_2 \cdot 6H_2O$	То же	—	2,29**	178*	20		[155]
$CoBr_2 \cdot 6H_2O$	»	—	3,9	220*		$c_H = 2,63$	[156]
$Co(NC_5H_5)_2Cl_2$	»	—	3,7	2800*	—4	—	[152]
$Co(H_2O)_2SiF_6$	Тригональная	$\mu \perp c$	0,15	—	—	$\sigma = 0,005 \cdot 2M_B$*	[157]
$CoCl_2[(NH_2)_2CS]_4$	Тригональная C_{4h}^4	—	0,92**	—	—	—	[900]
$CoK_2(SO_4)_2$	—	—	0,193		—	—	[158]
$Co(HCOO)_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^5	$\mu \parallel (100)$**	5,125*	—	—	—	[216, 217]
$Co(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$	Моноклинная	—	0,004	—	—	$\sigma = 70/0$ эл. СГСМ/моль	[95]

* Из измерений магнитоэлектрического эффекта.
** Из теплоемкости.
*** $NM_0 = Nng_{eff}\mu_B$, где N — число Авогадро, n — число магнитных ионов в молекуле; g — фактор Ланде; g_{eff} — эффективный фактор; μ_B — магнетон Бора; M_0 — спин магнитного иона.
**** Приведены свойства, характерные для двухзонной магнитной системы.
***** При этой температуре упорядоченность только изменяется в плоскости (100). Система магнитных моментов плоскости (100) обусловливает термодинамически стабильный вплоть до T=5,12°K.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	χ_N, 10^{-6} ед. СГСМ/моль	$-\Delta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
NiO	Кубическая с ромбоэдрическим искажением ниже T_N	p ∥ (111)	647; 523	—	9470	$\lambda(0) = 274$ *нм*	[16, 66, 162]
NiS	Гексагональная D_{6h}^4	p ∥ c	263*	—	—	$p_{Ni} = 2,1\ p_B$	[3, 109]
NiAs	Гексагональная D_{6h}^4	p ∥ c	150	—	300	—	[103]
NiF_2	Тетрагональная D_{4h}^{14}	p ∥ [010]	73,2	20	100	$\chi_\perp = 350$ ед. СГСМ/*моль* $c_p = 1,2$ $\lambda_\parallel = 3000$ *нм* $\lambda_\perp = 320$ *нм*	[2]
$NiCl_2$	Тригональная D_{3d}^3	Слоистая p ⊥ c	52	110	−67	$c_p = 1,33$	[164]
$NiBr_2$	Тригональная D_{3d}^3	—	10	—	20	$p = 3,0$	[174]
$NiCO_3$	Тригональная C_{3i}^2	σ ⊥ c	25,2	23,8*	—	$c(4,2°)$ — −2080 ед. СГСМ/*моль*** $H_D = 90$ *кэ* $H_E = 243$ *кэ*	[220]
$NaNiO_2$	Тригональная C_{3i}^2	Слоистая p ⊥ [111]	23	29,4*	55; 11	$c_p = 1,3$ $M(0) = 1,6$ *кэ* $p_{Ni}(4,2) = 2,25\ p_B$	[3, 150, 165, 182]
$NaNiF_3$	Орторомбическая D_{2h}^{10}	σ ∥ c	158	—	—	$\chi_\parallel = 3,6$ ед. СГСМ/*моль* $H_D = 162$ *кэ* $H_A = 12$ *кэ* $H_E = 2 \cdot 10^4$ *кэ****	[43]
$KNiF_3$	Моноклинная C_{2h}^2		275	2,05*	840	$c_p = 2,41$	[120]
$RbNiCl_3$	Гексагональная D_{6h}^4	p ∥ c	11,5	—	—	$p(0°) = 1,3\ p_B$	[219]
$CsNiCl_3$	Гексагональная D_{6h}^4	p ⊥ c****	4,5	$3,3_\parallel^*$ $7,3_\perp^*$	65	$p_{Ni}(2°) = 1,4\ p_B$ $\mu = 3,41$	[3, 229]
$NiSO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	p ∥ [b]	37	15*	82	$c_p = 1,83$ $p_{Ni}(4,2°) = 2,1\ p_B$	[78, 299]

* Переход $\Gamma_1 \to \Delta_5$ обладает свойствами характерными для второго рода; в точке перехода изменяется параметр кристаллической решетки: $\Delta[a]/[a] = 3 \cdot 10^{-3}$; $\Delta[c]/[c] = 10^{-3}$.

** Результаты измерения восприимчивости монокристалла $NiCO_3$ в трех взаимоперпендикулярных направлениях представлены в [10].

*** Значения эффективных полей получены из экспериментов по ЯМР [168] в предположении изотропного эффективного g-фактора электронов: $g_{eff}^{\parallel} = g_{eff}^{\perp} = 2,14$, $g_{eff} = 1,64$ — 2,5 · 10 (т. е. g_{eff} направлен соответственно вдоль [a], [b], [c]).

**** Магнитная подрешетка состоит из двойных антиферромагнитных слоев.

Вещество	Структура: цилиндрическая	Структура: кубическая	T_N, °K	$\chi_M \cdot 10^{-6}$ ед. СГСМ/моль	$-\theta_p$, °K	Дополнительные сведения	Литература
$BaNiF_3$	Орторомбическая D_{2h}^{13}	—	110	—		$\mu_{Ni}(4,2°) = 2\mu_B$	[230]
K_2NiF_4	Тетрагональная D_{4h}^{17}	Слоистая $\mu \parallel c$*	190, 97	—	0,09	$H_{c,\parallel}(4,2°) = 180$ кэ	[170, 222, 33b]
Rb_2NiF_4	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \parallel c$	190	—	—	$H_{c,\parallel}(4,2°) = 350$ кэ	[160, 222]
$NiRh_2O_4$	Тетрагональная	—	18		20	$c_M = 1,42$ эрг $T = 20 - 880$°K $c_M = 2,06$ эрг $T = 880 - 900$ K	[152]
Tl_2NiF_4	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	190	—		—	[168]
Ni_2SiO_4	Орторомбическая	—		8,9	−44	$c_M = 1,14$	[87]
$GaNi_2O_4$	Кубическая O_h^7	$\mu \parallel (111)$	15	—	—	$\mu_{Ni}(4,2°) = 2,9\mu_B$	[3, 47]
Sr_2NiMoO_6	—	—	71,5		-	-	[166]
Ba_2NiWO_6	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [111]$ У давление перехода от трех осей	17			$\mu_{Ni}(4,2°) = 1,9\mu_B$	[100]
$(NH_4)_2NiF_4$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	—	—		—	[170]
$NiCl_2 \cdot 6H_2O$	—		5,3[1]	67,8[2]	7	$c_M = 1,18$	[105]
$NiBr_2 \cdot 6H_2O$	—	—	6,5[1]	—	—	—	[172]
$Ni_3P_2O_8J$	—	—	190	—	—	—	[175]
$Ni(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная	$\mu \parallel [u]$	4,2	1500[2]	−2,5	—	[173]
$Ni(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$	—	—	3,08	100[2]	5	$c(0°) = 1,45$ эрг/СГМС/моль	[171]
$Ni(NO_3)_2 \cdot 6NH_3$	Кубическая	—	1,35**	—	3,3	—	[272]
$Ni(HCOO)_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^5	$\mu \parallel (100)$**	10,7[1]	—	-	—	[93, 216]

* Обзорные свойства, описываемые двумерной моделью Изинга.
[1] По тепловым измерениям.
[2] Проявляет свойства, характерные для двумерной спиновой системы.
** При этой температуре упорядочиваются магнитные моменты только в плоскостях (100). Система моментов плоскостей (200) обнаруживает парамагнитные свойства вплоть до T_N. При $T = 8,15$°K наблюдается аномалия Шоттки в поведении теплоемкости.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	$\Delta\varepsilon$, 10^{-3} см. СГСЭ/моль	$-\theta_p$, °K	Дополнительные сведения	Литература
$Ni(NH_3)_4 \cdot Ni(CN)_3 \times X_2H_4$	Тетрагональная C_{4h}^1	$\mu \parallel [c]$	2,37	—		$H_{c,\parallel} = 35$ кэ H_A (1,46°) — 22 кэ	[233]
CrO	Моноклинная C_{2h}^5	Состояния	290	—		—	[85]
CrF_2	Кубическая O_h^5	$c \parallel [010]$	70	—	190	$c \ll 1$ см. СГСЭ/моль	[176]
$CrCl_2$	Моноклинная C_{2h}^3		70		—		[46]
$CrBr_2$	Моноклинная C_{2h}^1	—	197	—	—	—	[46]
Cr_2S_3	Тетрагональная	—	373	—	1694	— p—43	[48]
$KCrF_3$	Тетрагональная D_{4h}^{18}, D_{2h}^{16}*	$\mu \parallel [ab]$	38 — D_{2h}^{16} 22 — D_{4h}^{18}	—	356	$\mu_0 = 0,58$ $\mu(1,4°) = 0,49$ μ_B	[120, 235]
$CrSO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$	34,5	12	77,5	$\mu_M = 0,517$	[78]
$CuSeO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [c]$	34		—	$\mu(7,2°) = 0,9$ μ_B	[231]
$CuF_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^2	$\mu \parallel [c]$	26; 11	0*	37	$c_0 = 0,46$	[3, 39]
$CuCl_2 \cdot 2H_2O$	Орторомбическая	$\mu \parallel [a]$	4,3	25,0*	—5	$H_{c,\parallel} = 6,5$ кэ	[2]
$CuCl_2 \cdot 2H_2O$**	То же	$\mu \parallel [a]$	—	—	—	—	[184]
$Cu(C_2H_3O_2)_2$	—	—	270	—	—		[182]
$Cu(C_{12}H_{23}O)_2$		—	230	—	—	—	[183]
$CuSiO_3 \cdot H_2O$	—		21**			—	[177]
$LiCuCl_3 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^5	$\mu \parallel [ac]$	5,9; 4,4	30*	10	$H_{c,\parallel} = 9 \div 10,5$ кэ**	[178, 251]
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	Триклинная C_i^1	—	0,029**	—	—	—	[128]
$CuSeO_4 \cdot 5H_2O$	—	—	0,040**	—	—	—	[128]

* Обе структуры наблюдались одновременно [235].
** Магнитные свойства экспонентны свойствам $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ [184].
*** См. учебных монографий.
**** Значение поля спин-спиновых подрешеток ($H \parallel [ac]$) [251].

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	$\chi_M \cdot 10^{-6}$ ед. СГСМ/моль	ΔS, кэ	Дополнительные сведения	Литература
$Cu(NO_3)_2 \cdot 2,5H_2O$	—	—	3,2*; 0,45	69	—	—	[179, 242]
$Cu_3(CO_3)_2 \cdot (OH)_2$	Моноклинная C_{2h}^5	—	1,86	41,5*	10	—	[191]
$Cu(HCO_2)_2 \cdot 4H_2O$**	Моноклинная		17	24,8*	175	$\sigma(0)$ — 150 ед. СГСМ/моль c_M — 0,197	[160]
$CuK_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$	—	—	0,05	—	—	—	[29]
$Cu(C_2H_3O_2)_2 \cdot H_2O$	—	—	270—290	—	—	—	[182]
$(C_2H_5NH_3)_2CuCl_4$	—	Ферромагнитные слои, связанные слабыми антиферромагнитными взаимодействиями	10,2	—	—	$H_{E,1}$ — 800 э (между слоями) $H_{E,2}$ — 500 кэ (внутри слоя)	[267]
$Cu(NH_3)_4SO_4 \cdot H_2O$	—		0,37**	40*	1,2		[128]
$Cu(C_6H_5OHO)_2 \cdot 3H_2O$	Моноклинная	Ферромагнитная вдоль [c]**	<1,4	—	—	—	[270]
MoF_5	Кубическая O_h^1	—	185	—	—	—	[190]
CuSb	Кубическая (тетрагональные искажения при $T < T_N$)	—	16		—	—	[243]
CeBi	Кубическая O_h^5	↑↑ [001]	26	—	—12	—	[252]
$CeCl_3$	Гексагональная	—	0,345	—		—	[262]
$Ce_2Zn_3(NO_3)_{12} \cdot 24H_2O$	Тригональная	—	0,0063	—	—	—	[191]
$PrCl_3$	Гексагональная	—	0,7	—	—	—	[262]
PrB_6	Кубическая	—	0,9**	—	—	Металл ρ (300°) — 15 × 10^{-6} ом·см	[279]

* Нет уверенности, что выбирается переход $(1 \to 1)$.
** Проявляет свойства, характерные для двумерной модели Гейзенберга.
*** Из тепловых измерений.
**** Проявляет свойства, характерные для одномерной модели антиферромагнетика.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	$\chi_M \cdot 10^{-6}$ ед. СГСМ/моль	$-\theta$, °K	Дополнительные свойства	Литература
$PrAlO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	—	10^6	100	—	[206]
NdS	Кубическая O_h^5	—	6		24	$\mu=3,62$	[276]
NdSe	Кубическая O_h^5	—	14	—	9	$\mu=3,40$	[276]
NdTe	Кубическая O_h^5	—	13		14	$\mu=3,64$	[276]
NdSb	—		16	—	3	$\mu=3,75$; $n_y=2,7$ $H_c=105$ кэ	[208]
NdBi	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [001]$	25	—	1	—	[252]
$NdCl_3$	Гексагональная	—	1,035	—	—	—	[269]
$Nd(OH)_3$	Гексагональная C_{6h}^2	$\mu \parallel c$	1,7			—	[271]
$SmCl_3$	Гексагональная		0,4	—	—		[262]
EuSe	Кубическая O_h^5	—	4,7	—	—	Полупроводник ферромагнетик при $T<2,8$°K	[3,96, 241]
EuTe*	Кубическая O_h^5		11; 9,7	440	7	$H_c=75$ кэ $n_y=7$	[192, 253]
EuF_2	Кубическая O_h^5		[9,5**]; 2	—	—		[193, 194]
Eu_2O_3	Орторомбическая	$\mu \parallel [c]$ $(a>b>c)$	5,8	—	—	$H_c=2$ кэ	[205]
$EuTiO_3$	Кубическая	—	5,2		—3,7	$n_y=6,93$ $H_c=14$ кэ	[295]
$EuCr_2O_4$	Орторомбическая	—	4,5		—	—	[265]
GdP	Кубическая	—	15	480**	2	$H_c=75$ кэ	[197]
GdS		$\mu \parallel (111)$	50	—	—	—	[242]
GdCu		—	41	—	—	—	[189]

* Магнитные свойства образцов EuTe коррелируют с электронными спектрами, которые может изменяться в широких пределах (10^{-4} — 10^{-2} эв/см при $T=800$°K) [253].

** Не измерялся МФМР на образцах, содержащих примеси [194].

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, К	χ_M, 10^{-6} кг/см³ Гс/Ое / моль	$-\theta_p$, К	Дополнительные сведения	Литература
GdAs	Кубическая с тригональными искажениями при $T<T_N$	—	25; 19	—	12	$H_c=180$ кэ $p=6,2$; $n_s=7,2$	[198, 242]
GdSe	Кубическая	p ∥ (111)	60	—	—	—	[242]
GdAg	Кубическая O_h^1	—	145	40*	82	$p=8,6$	[204]
GdIn	Кубическая O_h^1	—	28	73,5*	66	$p=8,1$	[204]
GdSb	Кубическая	p ∥ (111)	25	—	42	$p=8,1$	[203]
GdTe	То же	—	80	—		—	[242]
GdBi	»	p ∥ (111)	32	—	—		[242]
$GdCl_3$	Гексагональная	—	41	—	—	$1/\rho\neq 0$; $p=8,4$	[196]
$GdAlO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	p ∥ [b]	3,87	—	4,81*	$H_{c,\parallel}$ (0,5°) — 11 кэ**	[221]
$GdVO_3$	Орторомбическая	—	7,5	—	—	$p=80$	[204]
$Gd(OH)_3$	Гексагональная C_{6h}^3	p ∥ c	2,0	—	—	—	[271]
$SrGd_2O_4$	Орторомбическая	—	2,6	—	0	—	[205]
$GdCl_3 \cdot 6H_2O$	—	—	0,182**	—		—	[128]
TbP	Кубическая O_h^7	p ∥ [111]	8—9		1	$p=9,2$; $n_s=8$ $H_c=4,3$ кэ $\mu(0°)=6,2$ μ_B	[196, 197]
TbAs	То же	p ∥ [111]	10—12		4	$p=9,7$; $n_s=7,9$ $H_c=26$ кэ $\mu=7,7$ μ_B	[3, 196, 198]
TbSb	»	p ∥ [111]	14—16	—	14	$p=9,7$; $n_s=7,5$ $H_c=60$ кэ $\mu(0°)=8,2$ μ_B	[196, 203]
TbBi	»	p ∥ [111]	18		33	—	[202]
$TbCl_3$	Гексагональная	—	64	—		$1/\rho\neq 0$; $p=9,8$	[195]

* Усредненное значение измерений кроме точек [a], [b], [c].
** Значение поля проникновения осредняется.
— Из тепловых измерений.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	χ_0, 10^{-6} ед. СГСМ/моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
Tb_2O_3	—	—	2,4	—			[247]
TbOCl	Тетрагональная D_{4h}^{7}	—	4	—		$c_N = 12,05$	[226]
$Tb_3Al_5O_{12}$	Кубическая	—	1,8	—	—	—	[210]
DyP	Кубическая O_h^5	—	—	—	4	$\mu = 9,9$; $n_s = 7,8$ $H_c = 17$ кэ	[197]
DyAs	—	—	8,5	—	2	$\mu = 10,4$; $n_s = 8,1$ $H_c = 32$ кэ	[196]
DySb	—	—	9,5	—	4	$\mu = 10,7$; $n_s = 7,7$ $H_c = 19,5$ кэ	[206]
DyBi	Кубическая O_h^5		13		30	—	[252]
$DyCu_5$	Гексагональная	—	24	—		$1/\rho \neq 0$, $\mu = 10,75$	[196]
$DyAg_5$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	9	—	25	$H_{c,1} = 36$ кэ*	[249]
$DyAu_2$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	31	—	13	Метамагнетик	[249]
DyOCl	Тетрагональная D_{4h}^{7}		9		—	$c_N = 13,95$ $H_c(4,2°) = 14$ кэ	[226]
$DyAlO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	8,4		—	—	[211]
$DyVO_4$**	Тетрагональная D_{4h}^{19}	$\mu \perp c$	3,05				[223]
$Dy_3Al_5O_{12}$	Кубическая O_h^{10}	$\mu \parallel [111]$	2,5	—		$\mu_{Dy}(1,35°) = 9\mu_B$	[3,206]
HoP	Кубическая O_h^5	—	5,5**	—		$\mu = 10,2$; $n_s = 9,2$ $H_c = 1,8$ кэ	[197]
HoAs		—	4,8	—	—1	$\mu = 10,5$; $n_s = 9,0$ $H_{c,1} = 1,8$ кэ $H_{c,2} = 6$ кэ	[196]
HoSb	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [100]$	9; 5,5	—	2,4	$\mu = 10,6$; $n_s = 8,7$ $H_c = 15$ кэ $\mu(0°) = 0,3\ \mu_B$	[196, 206]
$HoCu_2$	Гексагональная	—	9	—	—	$1/\rho \neq 0$, $\mu = 10,5$	[196]

* При $T = 1,8$°K имеет сложную несоизмеримую магнитную структуру [18].
** Данные для образцов низкого порядка.
*** В работе [99] сообщается, что ниобат-ортованадатные рекристаллизованы обладают также $GdVO_4$, $TbVO_4$, $ErVO_4$.
**** Ниже этой температуры имеет сложную несоизмеримую магнитную структуру.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	T_N, 10^{-3} ед. СГСМ/моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
ErP	Кубическая O_h^5	$\mu \perp [111]$	3—4	—	0	$p = 9{,}3$; $n_s = 8{,}5$ $H_c = 5{,}2$ кэ $\mu(0°) = 5{,}7$ μ_B	[196, 197]
ErAs	—	—	3,5	—	1,5	$p = 9{,}0$; $n_s = 8{,}4$ $H_c = 10{,}5$ кэ	[198]
ErSb	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [111]$	3,5—3,7		3	$p = 9{,}8$; $n_s = 7{,}3$ $H_c = 12$ кэ $\mu(0°) = 7\mu_B$	[196, 203]
$ErCu_2$	Гексагональная	—	11		—	$1/\chi \neq 0$; $p = 9{,}35$	[190]
Er_2O_3	Кубическая O_h^7	—	4			—	[200]
Yb_2O_2S	Тригональная D_{3d}^2	$\mu \parallel c$	2,65		—	$\mu(1{,}5°) = 1{,}6$ μ_B	[248]
K_2ReCl_6	Кубическая O_h^5	Сложная (не редуцируется ферроном)	12		—	$n_s = 2{,}6$ $\mu_{эф}(4{,}2°) = 2{,}7$ μ_B	[3, 202]
K_2IrCl_6	Кубическая O_h^5	—	3,08	—	32	—	[199]
$(NH_4)_2IrCl_6$	Кубическая		2,16	—	20	—	[199]
UN	Кубическая O_h^5	—	90	—	—	$\mu(4{,}2°) = 0{,}75$ μ_B	[3, 250]
UP	Кубическая O_h^5		125	—	—49	$\mu = 1{,}3$ $\mu(4{,}2°) = 1{,}9$ μ_B	[3, 253, 278]
UAs	Кубическая O_h^5	—	128	—	—	$\mu = 1{,}9$ μ_B	[3, 250]
UO_2	Кубическая O_h^5	$\mu \perp [111]$	28—31			$\mu = 1{,}7$ μ_B	[3, 250]
UP_2	Тетрагональная	$\mu \parallel c$	190	—	—80	$p = 2{,}3$	[273]
UTe_2	—	—	78	—	—	—	[277]
UTi_2	Тетрагональная	$\mu \perp c$	183	—	53	—	[275]
UTe_3	—	—	56	—	—	—	[277]
NpC	Кубическая O_h^5	—	310 (Т→АФ) 200 (АФ→Ф)	—	—	$p = 3{,}37$ $\mu = 1{,}4$ μ_B *	[204]
NpO_2	Кубическая O_h^5	—	25,3		—		[204]

* В ферромагнитном состоянии.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Вонсовский С. В. Магнетизм. М., «Наука», 1971.
2. Боровик-Романов А. С. «Итоги науки. Физ.-мат. науки», вып. 4. «Антиферромагнетизм», Изд-во АН СССР, 1962.
3. Oles A. e. a. Tables of Magnetic Structures determined by Neutron Diffraction, Institute of Nuclear Techniques, Cracow. Part I — cubic systems, report N 1/PS, 1970; Part II — tetragonal systems, report N 4/PS, 1970; Part III — rhombohedral and hexagonal systems, report N 7/PS, 1971; Part IV — orthorhombic systems, report N 11/PS, 1971.
4. Боровик Е. С., Мильнер А. С., Еременко В. В. Лекции по магнетизму. Харьков, Изд-во Харьк. ун-та, 1972.
5. Keller F. Handbuch der Physik. Bd. 18/2, S. 1. Springer, Berlin, 1966.
6. Morrish A. H. The Physical Principles of Magnetism. John Wiley and Sons, Inc., N. Y., 1965.
7. Изюмов Ю. А., Озеров Р. П. Магнитная нейтронография. М., «Наука», 1966.
8. Боровик-Романов А. С. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1959, т. 36, с. 75.
9. Дзялошинский И. Е. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1957, т. 32, с. 1547.
10. Туров Е. А. Физические свойства магнитоупорядоченных кристаллов. М., Изд-во АН СССР, 1963.
11. Ozhegin V. I., Maximichkow P. P. Digests of Intermag. conf. Kyoto, 1972, p. 49-4;
Semey M. H. "Solid. State Comm.", 1972, v. 10, p. 219.
12. Borovik-Romanov A. S., Prozorova L. A. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-837.
13. Ожогин В. И., Якубовский А. Ю. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1979, т. 63, с. 2155.
14. Erickson R. A. "Phys. Rev.", 1953, v. 90, p. 779.
15. Ожогин В. И., Шапиро В. Г. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1968, т. 54, с. 96.
16. Bizette H., Tsai B. "Compt. rend.", 1954, v. 238, p. 1575.
17. Боровик-Романов А. С., Прозорова Л. А. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1958, т. 55, с. 1727.
18. Боровик-Романов А. С. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1961, т. 39, с. 1088.
19. Боровик-Романов А. С. Физический энциклопедический словарь. М., 1965, т. 4, с. 250.
20. Андрацкий В. П., Боровик-Романов А. С. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1966, т. 51, с. 1030.
21. Астров Д. Н. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1960, т. 38, с. 984.
22. Астров Д. Н. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1961, т. 40, с. 1035.
23. Hoenreich R. M. Digests of the Intermag. Conference, Kyoto, 1972, p. 40, 4.
24. Jodin V. M., Sherman A. B. "Solid. State Comm.", 1966, v. 4, p. 661.
25. Shapira Y., Foner S. "Phys. Rev. B", 1970, v. 1, p. 3083.
26. Еременко В. К., Белаева А. И. «Успехи физ. наук», 1969, т. 98, с. 27.
27. Прохоров А. М., Федоров В. Б. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1962, т. 43, с. 2104.
28. Карпов Ю. С., Щеголев И. Ф. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1964, т. 47, с. 1721.
29. Lubbart H. "Z. angew. Math. und Phys.", 1953, Bd 4, S. 1.
30. Jacobs I. S. "J. Appl. Phys.", 1961, v. 32, p. 61-S.
31. Low G. G. e. a. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 998.
32. Johnson F. M., Nethercot A. H., Jr. "Phys. Rev.", 1959, v. 114, p. 705.
33. Foner S. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 336.
34. Allen S. J., Jr., London R., Richards P. L. "Phys. Rev. Lett.", 1966, v. 16, p. 463.
35. Green R. L. e. a. "Phys. Rev. Lett.", 1965, v. 15, p. 956.
36. Харченко Н. Ф., Еременко В. В. Физика конденсированного состояния. Вып. XIII, ФТИ низких температур АН УССР, Харьков, 1971, с. 3.
37. Харченко Н. Ф., Еременко В. В. «Физика твердого тела», 1968, т. 10, с. 1402.
38. Jacobs I. S., Lawrence P. E. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 996.
39. Ожогин В. И. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1970, т. 58, с. 2079.
40. Боровик-Романов А. С., Рудашевский Е. Г. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1964, т. 47, с. 2096.
41. Боровик-Романов А. С., Крейнес Н. М., Прозорова Л. А. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1963, т. 45, с. 64.
42. McConnell H. M., Lynden-Bell R. "J. Chem. Phys.", 1962, v. 36, p. 2393.
43. Jodin V. M., Sherman A. B. "Phys. St. Sol.", 1967, v. 20, p. 709.
44. Dwight K. e. a. "J. Appl. Phys.", 1962, v. 33, p. 1341.
45. Koehler W. C., Wollan E. O. "J. Phys. Chem. Sol.", 1957, v. 2, p. 100.
46. American Institute of Physics Handbook (1957), section 5, p. 226.
47. Bertaut E. F. e. a. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 952.
48. Yamaji M. "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 2107.
49. Matsuki K. "J. Phys. Soc. Japan", 1969, v. 31, p. 759.
50. Hirata E., Kubota B. "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 1715.
51. Benoit R. "J. Chem. Phys.", 1955, v. 52, p. 119.
52. Scaffardi V. e. a. "Acta crystallogr.", 1961, v. 14, p. 19.
53. Stout J. W., Adams H. E. "J. Amer. Chem. Soc.", 1942, v. 64, p. 1536.
54. Plumier R. J. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 964.
55. Roth W. L., De Vries R. C. "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 951.
56. Richards P. L. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1237.
57. Huber E. E., Ridgley D. H. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1099.
58. Nakagawa Y., Hori T. "J. Phys. Soc. Japan", 1961, v. 16, p. 1470.
59. Street R., Smith J. "J. Phys. Rad.", 1962, v. 23, p. 69.
60. Kotvel J. S. e. a. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1095.
61. Meyer A. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 439.
62. Kasper J. S. e. a. "J. Phys. Chem. Sol.", 1959, v. 11, p. 231.
63. Bizette H. "J. Physiq.", 1951, v. 12, p. 161.
64. Hastings J. e. a. "Phys. Rev.", 1959, v. 115, p. 13.
65. Corliss L., Hastings J. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1192.
66. Douglass D., Strandberg M. "Physika", 1961, v. 27, p. 1.
67. Koehler W. e. a. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 180.
68. Бейнон Дж. "Успехи физ. наук», 1963, т. 81, с. 335.
69. Asch P. G. "J. Phys. Rad.", 1969, v. 20, p. 349.
70. Bouvet R., Nielsen J. "Phys. Rev.", 1958, v. 110, p. 879.
71. Meisenheimer R. C., Cook D. L. "J. Chem. Phys.", 1959, v. 30, p. 605.
72. Burger J. e. a. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 427.
73. Corliss L. M., Hastings J. M. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 1051.

74. **Flippen R., Darnell F.** "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1024.
75. **Tink H., Shultiel D.** "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1963, v. 8, p. 214.
76. **Jonk R. J.** "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1097.
77. **Sawaoka A., Miyahara S.** "J. Phys. Soc. Japan", v. 19, p. 1254.
78. **Крейнес Н. М.** Диссертация. ИФП АН СССР, М., 1963; «Журн. эксперим. и теор. физ.» 1961, т. 40, с. 792.
79. **Bertaut E. e. a.** "J. Phys. Rad.", 1960, v. 23, p. 477.
80. **Heeger A. J., Beckman O., Portis A. M.** "Phys. Rev.", 1961, v. 123, p. 1052.
81. **McGuire T. R.** "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1963, v. 8, p. 55.
82. **Kedzie R. W. e. a.** "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 1196.
83. **Lee K., Portis A. M., Will G. L.** "Phys. Rev.", 1963, v. 132, p. 144.
84. **Jonker G. H.** "Physika", 1956, v. 22, p. 707.
85. **Hirakawa K. e. a.** "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 2063.
86. **Sawaoka A., Miyahara S.** "J. Phys. Soc. Japan", 1964, v. 19, p. 1750.
87. **Kondo H., MiyaharaS.** "J. Phys. Soc. Japan", 1963, v. 18, p. 305.
88. **Bertaut E. e. a.** "J. Chem. Phys. Sol.", 1961, v. 21, p. 234.
89. **Swoboda T. e. a.** "Phys. Rev. Lett.", 1960, v. 4, p. 509.
90. **Mays J. M.** "Phys. Rev.", 1963, v. 131, p. 38.
91. **Lashen M. A., e. a.** "Physika", 1959, v. 21, p. 1001.
92. **Schelleng J., Friedberg S.** "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1067.
93. **Pierce R. D., Friedberg S. A.** "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1462.
94. **Friedberg S., Flippen R.** Proc. VIII Intern. Conf. LTP, Toronto, 1960 (Amsterdam, 1961).
95. **Uryu N.** "J. Phys. Soc. Japan", 1961, v. 16, p. 2140.
96. **Busch G.** "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1386.
97. **Yuzuri M., Yamada M.** "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 1845.
98. **Willkinson G. e. a.** "Inorg. Nucl. Chem.", 1956, v. 2, p. 96.
99. **Koebler W. C. e. a.** "Phys. Lett.", 1964, v. 9, p. 98.
100. **Boucher R. e. a.** "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 960.
101. **Nowik I. e. a.** "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 970.
102. **Bouchaud J. P. e. a.** "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 971.
103. **Shane J. R. e. a.** "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1280.
104. **Oldsubo A. e. a.** "Physika", 1958, v. 24, p. 161.
105. **Nagamiya T.** "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 70.
106. **Maxim I.** Studii si cercetari fiz Acad. R. P. R, 1959, v. 9, p. 323.
107. **Kouvel J. S. Hartelius C. C.** "J. Appl. Phys.", 1962, v. 33, p. 1343.
108. **Ohlman R., Tinkham M.** "Phys. Rev.", 1961, v. 123, p. 425.
109. **Бакин А. Н.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1974, т. 66, с. 1086.
110. **Blazite H. e. a.** "Compt. rend. Acad. Sci.", 1967, v. 246, p. 567.
111. **Kaneyuki e. a.** "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 2358.
112. **Rosenquist T.** "Acta Met.", 1953, v. 1, p. 761.
113. **Meyer A., Cadeville M.** "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, S. B—1, p. 223.
114. **Восканян Р. А., Лешкин Р. З., Шурпа В. А.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1967, т. 53, с. 459.
115. **Jacobs I. S. e. a.** "Intern. J. Magnetism," 1971, v. 1, p. 193.
116. **Ishikawa Y., Akimoto S.** "J. Phys. Soc. Japan", 1967, v. 12, p. 1083.
117. **Berry C., Combs C.** "J. Appl. Phys.", 1960, v. 31, p. 1130.
118. **Taranishi T.** "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, S. B—1, p. 263.
119. **Cox D. e. a.** "Phys. Rev.", 1963, v. 132, p. 1547.
120. **Okazaki A., Suemune Y.** "J. Phys. Soc. Japan", 1961, v. 16, p. 671.
121. **Jacobs I. S., Burke H. F., Levinson L. M.** "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1631.
122. **Окоши В. Н. и др.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1972, т. 62, с. 2221.
123. **Уайт Р.** «Успехи физ. наук», 1971, т. 103, с. 693.
124. **Treves D.** "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 1033.
125. **Koehler W. e. a.** "Phys. Rev.", 1960, v. 118, p. 58.
126. **Gorodetsky G., Treves D.** "Phys. Rev.", 1964, v. 135A, p. 97.
127. **Hagedorn F. B. e. a.** "Phys. Rev. Lett.", 1968, v. 21, p. 364.
128. **Duffy W. T. e. a.** Proc. VIII Intern. Conf. LTP, London, Butterworths, 1963, p. 243.
129. **Ono K., Ito A.** "J. Phys. Soc. Japan," 1964, v. 19, p. 899.
130. **Friedberg S. A., Schriempf J. T.** "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 1000.
131. **Van Agt T. W. e. a.** Proc. VIII Intern. Conf. LTP, London, Butterworths, 1963, p. 222.
132. **Poulis N., W. v. d. Lugt** "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, S. B—1, p. 505.
133. **Chiba S.** "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 581.
134. **Cable J. e. a.** "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1960, v. 5, p. 456.
135. **Bevill R.** "J. Chem. Phys.", 1955, v. 52, p. 110.
136. **Finlayson D. e. a.** "Proc. Phys. Soc. (London)", 1959, v. 74, p. 76.
137. **Kren E., Szabo P.** "Phys. Lett.", 1964, v. 11, p. 215.
138. **Hrynkiewicz A. Z. e. a.** "Phys. Lett.", 1965, v. 17, p. 93.
139. **Narath A., Schirber J. E.** "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 1124.
140. **Wang F. Y., Kesligian M.** "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 975.
141. **Коротин В. В. и др.** «Физика металлов и металловедение», 1966, т. 21, с. 153.
142. **Юдин В. М.** «Физика твердого тела», 1966, т. 8, с. 267.
143. **Schurer P. J.** "J. Physiq"., 1971, v. 32, C1—275.
144. **Grant R. W. e. a.** "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1455.
145. **Tachiki M.** "J. Phys. Soc. Japan", 1964, v. 19, p. 454.
146. **Lines M. E.** "Phys. Rev.", 1965, v. 137, p. A 982.
147. **Шапиро В. Г., Окоши В. Н., Гурговой К. Г.** «Изв. АН СССР. Сер. физич.», 1972, т. 36, с. 1559.
148. **Blazite H. e. a.** "J. Phys. Rad.", 1969, v. 20, p. 421.
149. **Roth W. L.** "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1963, v. 8, p. 213.
150. **Ishikawa Y., Akimoto S.** "J. Phys. Soc. Japan", 1958, v. 13, p. 1298.
151. **Swoboda T. e. a.** "J. Phys. Chem. Sol.", 1958, v. 5, p. 293.
152. **Blasse G., Schipper D.** "Phys. Lett.", 1963, v. 5, p. 300.
153. **Haseda T. e. a.** Proc. VIII Intern. Conf. LTP, London, Butterworths, 1963, p. 302.
154. **Narath A.** "J. Phys. Soc. Japan", 1964, v. 19, p. 2244.
155. **Robinson W. K., Friedberg S. A.** "Phys. Rev.", 1960, v. 117, p. 402.

156. Forstat H. e. a. "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1960, S. II, v. 5, p. 59.
157. Ohtsubo A., Kanda E. "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, S. II—I, p. 493.
158. Miedema A. R. e. a. "Phys. Lett.", 1963, v. 17, p. 87.
159. Beijers H. G. e. a. "Phys. Lett.", 1964, v. 12, p. 81.
160. Cox D. E., Shirane G., Frazer B. C. "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1459.
161. Trombe M. "J. Physiq.", 1951, v. 12, p. 170.
162. Sparks T. J., Komoto T. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1033.
163. Adachi K. "J. Phys. Soc. Japan", 1961, v. 16, p. 2187.
164. Blazic H. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1956, v. 243, p. 1196.
165. Shirane G. e. a. "J. Phys. Soc. Japan", 1959, v. 14, p. 1352.
166. Heller G. e. a. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1033.
167. Holden T. M. e. a. "J. Phys. C", 1971, v. 4, p. 2127.
168. Сапожкова В. А. Диссертация. Институт полупроводников АН СССР. Л., 1970.
169. Rudorff W. e. a. "Z. anorgan. und allgem. Chem.", 1962. Bd 317, S. 261.
170. Plumier R., Legrand B. "J. Phys. Rad.", 1962, v. 23, p. 474.
171. Burgiel J. S. e. a. "Phys. Rev.", 1961, v. 122, p. 429.
172. Spence R. D. e. a. "J. Chem. Phys.", 1959, v. 31, p. 555.
173. Berger L., Friedberg S. "Phys. Rev.", 1964, v. 136A, p. 166.
174. Tsubokawa I. "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 2109.
175. Ascher E. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 1404.
176. Jaerik R. J., Bozorth R. M. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 1167.
177. Eisenberg W. R., Forstat H. "J. Phys. Soc. Japan", 1964, v. 19, p. 405.
178. Vosser P. H. "J. Chem. Phys.", 1960, v. 32, p. 1600.
179. Berger L. e. a. "Phys. Rev.", 1963, v. 132, p. 1057.
180. Kobayashi H., Haseda T. "J. Phys. Soc. Japan", 1963, v. 18, p. 541.
181. Prince E., Van den Handel J. "Physika", 1962, v. 28, p. 269.
182. Figgis B., Martin R. "J. Chem. Soc. (London)", 1956, v. 10, p. 3837.
183. Gilmour A., Pink R. "J. Chem. Soc. (London)", 1963, v. 8, p. 2198.
184. Date M. "J. Phys. Soc. Japan", 1957, v. 12, p. 1168.
185. Kollhaus J. P., Jacarino V. В кн.: Труды международной конференции по магнетизму. М., «Наука», 1974, т. III, с. 255.
186. Wohlfarth E. P. "Acta Metl.", 1956, v. 4, p. 225.
187. Альшиц Б. И., Астров Д. Н. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1963, т. 44, с. 1190.
188. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. Пер. с англ. М., Гостехиздат, 1963, с. 490.
189. Affieri G. T. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 1264.
190. Wilkinson M. K. e. a. "Phys. Rev.", 1961, v. 121, p. 74.
191. Levi M. W., Sapp R. C., Calvahouse J. W. Proc. VII Intern. Conf. LTP. Toronto, 1960 (Amsterdam, 1961), p. 168.
192. Busch G. e. a. "Phys. Lett.", 1964, v. 9, p. 7.
193. Mc Guire T. R., Shaffer M. W. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 984.
194. Lee K., Muir H. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 36, p. 1042.
195. Child H. R. e. a. "Phys. Rev.", 1968, v. 131, p. 922.
196. Sherwood R. C., Williams H. J., Wernick J. H. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 1049.
197. Busch G. e. a. "Phys. Lett.", 1964, v. 11, p. 100.
198. Busch G. e. a. "Phys. Lett.", 1965, v. 15, p. 301.
199. Owen J. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 138.
200. Henshaw D. G., Brockhouse B. N. "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1957, v. 2, p. 9.
201. Ross J. S., Lam D. J. "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1451.
202. Smith H. G., Bacon G. E. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 979.
203. Busch G. e. a. "Phys. Lett.", 1965, v. 14, p. 262.
204. Sekizawa K. "Phys. Lett.", 1964, v. 11, p. 216.
205. Holmes L., Schieber M. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 969.
206. Mc Guire T. R. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 981.
207. Smith H. G. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 1047.
208. Keen B. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 1120.
209. Юрин В. М., Гаврилишина А. Н. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 3435.
210. Wolf W. P. e. a. "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, S. B-I, p. 443.
211. Herpin A. e. a. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1964, v. 259, p. 2416.
212. Маковецкий Г. И., Сирота Н. Н. «Докл. АН БССР», 1965, т. 9, с. 15.
213. Wasser J. D. Intern. Confer. Semicond. Physics, Paris, 1964, p. 1260.
214. Cable J. W. e. a. "Phys. Rev.", 1962, v. 125, p. 1860.
215. Tsujikawa I., Kanda E. "J. Phys. Rad.", 1956, v. 20, p. 22.
216. Takeda K., Kawasaki K. "J. Phys. Soc. Japan", 1971, v. 31, p. 1026.
217. Matsuura M. e. a. "J. Physiq.", 1971, C1-157.
218. Callagher P. K., McChesney J. B., Buchanan D. N. "J. Chem. Phys.", 1964, v. 41, p. 2429.
219. «Yelon W. B., Cox D. E. "Phys. Rev.", 1972, v. B6, p. 20M.
220. Крейнес Н. М., Шапошникова Т. А. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1970, т. 58, с. 622.
221. Cashion J. D. "Proc. Roy. Soc. (London)", 1970, v. A 318, p. 473.
222. Miedema A. R., "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1 306.
223. Cooke A. H., Martin D. M., Wells M. R. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-480.
224. Madhav Rao L., Satya Murthy N. S. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-617.
225. Петров М. П., Смоленский Г. А. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 2156.
226. Gondenough J. B., e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1 622.
227. Bertaut E. F. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 1038.
228. Elmalen D., Fruchart D., Joubert J. C. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-741.
229. Eibschütz M. e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-760.
230. Cox D. E. e. a. "J. Appl. Phys.", 1970, v. 41, p. 943.
231. Schartenberg W., Will G. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-855.
232. Fruchart D. e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-876.
233. Takayanagi S., Wahnabe T. "J. Phys. Soc. Japan", 1970, v. 28, p. 296.
234. Boucher B., Sougi M., Mlle Whuler. A. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-853.
235. Hutchings M. T. e. a. "Phys. Rev.", 1969, v. 188, p. 919.

236. Wolfers P., Bacmann M., Bertaut E. F. "J. Physiq." 1971, v. 32, p. C1-859.
237. Bacmann M. e. a. "J. Appl. Phys.", 1969, v. 40, p. 1131.
238. Skalyo J., Shirane Jr. G., Birgeneau R. J. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-882.
239. Minglewicz V. J., Cox D. E., Shirane G." J. Physiq." 1971, v. 32, p. C1-899.
240. Blöte H. W. J., Huiskamp W. J. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-1005.
241. Pearney T., Kasuya T. "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1408.
242. Mc Guire T. e. a. "J. Appl. Phys.", 1969, v. 40, p. 1009.
243. Busch G., Stutius W., Vogt O. "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1493.
244. Van Toll M. W., Matsuura M., Poulis N. J. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-943.
245. Nagamiya T., Nagamiya S. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-972.
246. Brown J. D. e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-974.
247. Ayant Y., Belorizky E., Tchéou F. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-1029.
248. Rossat-Mignod J. e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-1081.
249. Miura S. e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-1124.
250. Santra V. A. e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-1149.
251. Forstat H., Bailey P. T., Ricks J. R. "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1579.
252. Nereson N., Arnold G. "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1625.
253. Olivera N. F. e. a. "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1783.
254. Perrel M., Elmaleh D., Joubert J. "Solid. State Comm.", 1970, v. 8, p. 1563.
255. Бецкова Л. В., Рудашевский Е. Г., Семенцов В. Н. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1972, т. 36, с. 1531.
256. Kuznietz M. "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1470.
257. Kummant W. e. a. "J. Phys. Chem. Sol.", 1968, v. 29, p. 1359.
258. Beckmann V. e. a. "Phys. St. Sol.", 1968, v. 29, p. 761.
259. Lee K. N. e. a. "Phys. Rev. B", 1970, v. 2, p. 4590.
260. Forstat H. e. a. "Phys. Rev.", 1966, v. 145, p. 405.
261. Gonzalo J. A., Cox D. E., Shirane G. "Phys. Rev.", 1966, v. 147, p. 415.
262. Eisenstein J. C., Hudson R. P., Mangum B. W. "Phys. Rev.", 1965, v. 137, p. A—1886.
263. Shachar G., Makovsky J., Shaked H. "Solid State Comm.", 1971, v. 9, p. 493.
264. Fischer F., Gorodetsky G., Hornstein R. M. "Solid State Comm.", 1972, v. 10, p. 1127.
265. Holmes L. M., Guggenheim A. A., Hecker R. R. "Solid State Comm.", 1972, v. 11, p. 409.
266. Nørlund Christensen A., Oliver G. "Solid State Comm." 1972, v. 10, p. 609.
267. Bloembergen P., Franse J. J. M. "Solid State Comm." 1972, v. 10, p. 323.
268. Yee J. H., Chao H. H. M. "Phys. Lett.", 1970, v. 32A, p. 441.
269. Adachi K., Sato K., Takeda M. "J. Appl. Phys.", 1968, v. 39, p. 900.
270. Grant R. W. e. a. "J. Appl. Phys.", 1968, v. 39, p. 1122.
271. Wolf W. P., Meissner H., Cutanese C. A. "J. Appl. Phys.", 1968, v. 39, p. 1134.
272. Becerra C. C. e. a. "Phys. Lett.", 1972 v. 40 A, p. 203.
273. Окотов В. И. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1963, т. 45, с. 1687.
274. Tsubokawa I. "J. Phys. Soc. Japan", 1969, v. 14, p. 196.
275. Чечерников В. И. и др. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1966, т. 55, с. 151.
276. Адаева В. Е., Лугинов Г. М. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1966, т. 51, с. 1041.
277. Чечерников В. И. и др. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1967, т. 52, с. 854.
278. Robbins M. e. a. "J. Phys. Chem. Solids", 1969, v. 30, p. 1823.
279. Date M. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-887.
280. Арин С. М., Гроссман Г. «Физика твердого тела» 1960, т. 2, с. 1363.
281. Kendrick, Arrot A., Wenzer S. A. "J. Appl. Phys.", 1968, v. 39, p. 686.
282. Goodman G. "Phys. Rev. Lett.", 1962, v. 9, p. 335.
283. Paoletti A., Pickart S. J., "J. Chem. Phys.", 1960, v. 32, p. 706.
284. Bozorth R. M. e. a. "Phys. Rev.", 1958, v. 103, p. 572.
285. Strut J. W., Lau H. Y. "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1472.
286. Corliss L. M. e. a. "Phys. Rev.", 1960, v. 117, p. 929.
287. Matsumoto K., Hibara T., Kamigaichi T. "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, p. 1209.
288. Shaw A. I. "Phys. Rev.", 1952 v. 85, p. 365.
289. Calabrese J. W. e. a. "Phys. Rev.", 1960, v. 116, p. 950.
290. Bozorth R., Kramer V. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 303.
291. Bizette H., Terrier C. "J. Phys. Rad.", 1962, v. 23, p. 486.
292. Frazer B. C., Brown P. J. "Phys. Rev.", 1962, v. 125, p. 1283.
293. Foner S. "Phys. Rev.", 1963, v. 130, p. 183.

V. ОПТИКА И РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

ГЛАВА 31

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ

31.1. ПОКАЗАТЕЛИ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Показатель преломления абсолютный $n_{абс}$ — отношение скорости света в вакууме к фазовой скорости света в данной среде; относительный $n_{отн}$ — отношение скорости света в среде II к скорости света в среде I. Показатель преломления зависит от длины волны света. Принято измерять показатель преломления для определенных спектральных линий. Показатель преломления в этом случае приписывается соответствующий индекс.

Таблица 31.1

Индексы показателей преломления

Показатель преломления	Длина волны, нм	Обозначение линии по Фраунгоферу	Элемент, излучающий линию
n_A	760,1	*A*	K
n_b	706,5	*b*	He
n_C	656,3	*C*	H
n_D	589,3	*D*	Na
n_d	587,6	*d*	He
n_e	546,1	*e*	Hg
n_F	486,1	*F*	H
n_g	435,8	*g*	Hg
n_G	434,0	*G*	H
n_h	404,7	*h*	Hg

В табл. 31.2—31.20 приведены значения показателя преломления вещества по отношению к воздуху. Показатель преломления среды относительно воздуха n_1, показатель преломления воздуха $n_{возд}$ и абсолютный показатель преломления $n_{абс}$ связаны формулой

$$n_{абс} = n_{возд} n_1.$$

Оптические свойства анизотропных сред характеризуются двумя (для одноосных кристаллов) или тремя (для двуосных) показателями преломления.

В одноосных кристаллах n_o и n_e — показатели преломления обыкновенного (n_o) и необыкновенного (n_e) лучей. В таблицах приведены главные значения n_e, соответствующие направлению в кристалле, перпендикулярному к оптической оси.

В двуосных кристаллах оба луча, возникающих вследствие двойного лучепреломления, необыкновенные. Оптическая индикатриса двуосных кристаллов (векторная диаграмма, изображающая угловые зависимости оптических свойств тела) представляет собой трехосный эллипсоид, полуоси которого равны главным показателям преломления кристалла.

В табл. 31.2—31.20 использованы обозначения: $(n_F - n_C)$ — средняя дисперсия; $(n_C - 1)/(n_F - n_C)$ — коэффициент дисперсии; $\frac{n_F - n_D}{n_F - n_C}$; $\frac{n_F - n_e}{n_F - n_C}$; $\frac{n_D - n_F}{n_F - n_C}$ — относительные (частные) дисперсии; V_C — термооптическая постоянная (средняя для области $t = -60°$ ÷ $20°C$), $V_C = \delta_C/(n_C - 1) - \alpha$, где $\delta = dn/dT$ — приращение показателя преломления при повышении температуры на 1°C; α — коэффициент линейного расширения; $\Delta\lambda$ — границы поглощения, ограничивающие спектральную область, для которой пропускание образца толщиной 10 мм составляет не менее 50%.

Газы

Показатель преломления сухого воздуха $n_{возд}$ зависит от длины волны света и при давлении $P = 760$ *мм рт. ст.* и температуре $t = 15°C$ [1]

$$n_{возд} = 1 + \frac{1}{10^6}\left[64{,}328 + \frac{29498{,}1}{146 - 10^6/\lambda_0^2} + \frac{255{,}40}{41 - 10^6/\lambda_0^2}\right],$$

где λ_0 — длина волны в вакууме, *нм*.

Для других температур и давлений [1]

$$(n_{\lambda;\ P} - 1) = (n_{\lambda;\ 760} - 1)\,\frac{P\,[1 + (1{,}049 - 0{,}01671)\cdot 10^{-6}P]}{720{,}883\,(1 + 0{,}0036610)}.$$

Таблица 31.2

Показатель преломления газов (0°С и 760 *мм рт. ст.*)

Газ (пар)	Формула	n_D
Азот	N_2	1,000297
Азота закись	N_2O	1,000515
» окись	NO	1,000297
Аммиак	NH_3	1,000375
Аргон	Ar	1,000281
Ацетилен	C_2H_2	1,000606
Бензол	C_6H_6	1,001786
Бром	Br_2	1,001125
Вода	H_2O	1,000252
Водород	H_2	1,000139
» бромистый	HBr	1,000570
» иодистый	HI	1,000906
» хлористый	HCl	1,000444
Воздух	—	1,000292
Гелий	He	1,000035
Дейтерий	D_2	1,000137
Кислород	O_2	1,000272
Криптон	Kr	1,000427
Ксенон	Xe	1,000702
Метан	CH_4	1,000441
Метанол (метиловый спирт)	CH_3OH	1,000598
Метил фтористый	CH_3F	1,000449
» хлористый	CH_3Cl	1,000865
Мышьяк	As	1,001552
Неон	Ne	1,000067
н-Пентан	$n\text{-}C_5H_{12}$	1,001701
Ртуть	Hg	1,000939
Селен	Se	1,000895
Сера	S	1,001111
» гексафтористая	SF_6	1,000783
Сернистый газ	SO_2	1,000660
Серный ангидрид	SO_3	1,000737
Сероводород	H_2S	1,000619
Сероуглерод	CS_2	1,001476
Теллур	Te	1,000991
» четыреххлористый	$TeCl_4$	1,002000
Углекислота	CO_2	1,000450
Углерод четыреххлористый	CCl_4	1,001769
Углерода окись	CO	1,000334
Фосфор	P	1,001212
» треххлористый	PCl_3	1,001730
Фтор	F_2	1,000195
Хлор	Cl_2	1,000769
Хлороформ	$CHCl_3$	1,001455
Цинк	Zn	1,002000
Этилен	$CH_2{=}CH_2$	1,000696

Таблица 31.3

Показатель преломления воды при 20°С [6]

Для *D*-линии β — $8\cdot10^{-5}$ *град*$^{-1}$

Длина волны, *нм*	*n*	Длина волны, *нм*	*n*
1256,0	1,3210	656,8	1,3300
678,0	1,3308	486,1	1,3371
656,3	1,3311	480,0	1,3374
643,8	1,3314	404,7	1,3428
589,3	1,3330	303,4	1,3561
546,1	1,3345	214,4	1,4032

Жидкости

Таблица 31.4

Показатель преломления жидкостей при 20°С [5]

Жидкость	n_D	Жидкость	n_D
Анилин	1,586	α-Монобромнафталин	1,660
Бензилбензоат	1,568	Параальдегид	1,405
Бензол	1,501	Парафин жидкий	1,480
Вода	1,333	Сероводород	1,885
Глицерин	1,470	Скипидар	1,470
Масла		Толуол	1,497
подсолнечное	1,532	Углерод четыреххлористый	1,460
кедровое	1,516	Фосфор (раствор в сероуглероде)	1,950
касторное	1,501	Хинолин	1,627
парафиновое	1,440	Хлорбензол	1,526
прованское	1,460	Этил коричный	1,559
Металлгидрат	1,450	Этилсалицилат	1,523
Метилен иодистый	1,737		
Метиленсалицилат	1,539		

Оптические стекла

Таблица 31.5

Показатель преломления оптических стекол [2]

Для обозначения марок стекол приняты сокращения: К — крон; Ф — флинт; БК — баритовый крон; ЛК — легкий крон; ТК — тяжелый крон; БФ — баритовый флинт; ЛФ — легкий флинт; ТФ — тяжелый флинт; СФ — особый флинт; КФ — крон-флинт

Марка стекла	n_D	ν_D	$\frac{n_F-n_C}{n_F-n_D}$	$\theta_{F'C'}$	$\frac{n_F-n_D}{n_F-n_C}$	$\frac{n_C-n_D}{n_F-n_C}$	$\frac{n_F-n_D}{n_D-1}$	$\frac{n_C-n_D}{n_D-1}$
БК4	1,5302	877	60,6	—3,6	0,704	0,467	0,564	
БК6	1,5399	906	59,7	—4,1	0,704	0,457	0,567	
БК8	1,5467	871	62,8	0,6	0,702	0,454	0,560	
БК9	1,5646	1012	56,8	—1,3	0,705	0,459	0,572	
БК10	1,5689	1015	56,0	0,0	0,700	0,459	0,571	
БК11	1,5524	872	63,3	—1,1	0,702	0,454	0,559	
БК12	1,5606	961	59,3	—3,0	0,706	0,457	0,568	
БК13	1,5504	915	61,1	—1,7	0,703	0,456	0,563	
БФ1	1,5947	955	54,9	—0,1	0,706	0,459	0,573	
БФ4	1,5480	1016	53,9	—2,1	0,707	0,460	0,576	
БФ6	1,5606	1152	49,4	—3,2	0,700	0,463	0,584	
БФ7	1,5795	1076	53,9	0,0	0,708	0,461	0,576	
БФ8	1,5826	1264	46,5	—3,3	0,710	0,464	0,591	
БФ11	1,6222	1171	53,1	0,5	0,708	0,461	0,577	
БФ12	1,6259	1601	39,1	—4,0	0,714	0,468	0,603	
БФ13	1,6395	1325	48,3	0,7	0,710	0,463	0,586	
БФ16	1,6709	1419	47,3	—4,5	0,710	0,464	0,587	
БФ18	1,5904	1100	50,9	—1,3	0,708	0,462	0,589	
БФ19	1,5895	1153	51,1	—1,1	0,708	0,462	0,580	
БФ21	1,6140	1534	40,0	0,3	0,713	0,467	0,601	
БФ23	1,5493	1046	52,4	—2,4	0,707	0,461	0,579	
БФ24	1,6344	1726	36,8	0,6	0,715	0,469	0,607	
БФ25	1,6076	1316	46,1	0,7	0,711	0,464	0,589	
БФ26	1,6504	1691	38,5	3,6	0,714	0,468	0,604	
БФ27	1,6067	1380	44,0	—1,2	0,712	0,466	0,594	
БФ28	1,6641	1874	35,4	6,3	0,716	0,470	0,611	

Марка стекла	n_D	ν_D	$\frac{n_F-n_C}{n_D-1}$	$10^7\lambda_0$	$\frac{n_g-n_D}{n_F-n_C}$	$\frac{n_e-n_C}{n_F-n_C}$	$\frac{n_s-n_C}{n_F-n_C}$
К1	1,4982	700	65,1	—2,0	0,700	0,453	0,543
К2	1,5004	758	66,0	0,0	0,700	0,452	0,545
К3	1,5100	806	63,4	—3,3	0,702	0,454	0,550
К5	1,5110	795	64,3	—1,4	0,701	0,454	0,557
К8	1,5163	806	64,1	—2,2	0,701	0,454	0,557
К14	1,5147	849	60,0	1,5	0,703	0,456	0,562
К15	1,5235	862	55,5	—2,8	0,706	0,459	0,572
К18	1,5191	860	60,4	0,4	0,703	0,455	0,564
К19	1,5187	841	61,7	—2,8	0,703	0,456	0,563
К20	1,5263	875	60,1	0,2	0,704	0,456	0,565
КО1	1,5163	946	54,5	0,1	0,705	0,459	0,574
КО2	1,5202	1032	51,0	—2,2	0,708	0,461	0,580
КО4	1,5181	879	58,9	0,6	0,703	0,456	0,565
КО5	1,4996	806	62,1	0,5	0,702	0,455	0,562
КО6	1,5005	875	57,2	1,9	0,704	0,458	0,568
КО8	1,5332	1006	52,0	—1,7	0,707	0,460	0,579
ЛК3	1,4871	696	70,0	—10,7	0,699	0,452	0,553
ЛК4	1,4907	753	65,1	2,8	0,707	0,462	0,553
ЛК5	1,4781	729	60,6	9,7	0,698	0,451	0,553
ЛК6	1,4704	704	66,8	—8,6	0,700	0,452	0,553
ЛФ1	1,5406	1145	47,2	—5,4	0,709	0,462	0,588
ЛФ5	1,5749	1392	41,3	0,6	0,712	0,460	0,598
ЛФ7	1,5763	1407	41,1	—0,4	0,712	0,466	0,599
ЛФ10	1,5490	1195	45,9	3,0	0,710	0,464	0,592
ЛФ11	1,5608	1190	46,5	—1,2	0,710	0,463	0,588
ОФ1	1,5254	1029	51,5	0,4	0,706	0,459	0,574
ОФ2	1,5538	1140	48,6	—3,0	0,708	0,461	0,582
ОФ3	1,6123	1399	44,1	0,3	0,708	0,461	0,583
ТК1	1,5638	926	60,8	—0,7	0,703	0,456	0,563
ТК2	1,5721	956	57,5	—1,0	0,706	0,458	0,569
ТК3	1,5801	962	61,2	0,2	0,702	0,455	0,562
ТК4	1,6111	1095	56,8	1,7	0,707	0,459	0,572
ТК7	1,6137	1090	56,3	—2,3	0,705	0,458	0,570
ТК8	1,6140	1114	55,1	0,2	0,707	0,460	0,572
ТК9	1,6171	1142	51,0	—1,4	0,707	0,460	0,576
ТК12	1,5688	904	62,9	—0,9	0,702	0,454	0,559
ТК13	1,6058	996	60,9	—2,3	0,703	0,456	0,565
ТК14	1,6130	1012	60,6	—3,0	0,704	0,456	0,564
ТК16	1,6126	1050	56,3	—3,5	0,704	0,457	0,569
ТК20	1,6220	1097	56,7	—3,4	0,705	0,459	0,571
ТК21	1,6568	1285	51,1	2,7	0,708	0,462	0,580
ТФ1	1,6470	1912	33,9	—3,8	0,716	0,471	0,613
ТФ2	1,6725	2087	32,2	0,3	0,717	0,472	0,617
ТФ4	1,7398	2628	28,2	1,6	0,719	0,475	0,628
ТФ5	1,7550	2743	27,5	1,8	0,720	0,475	0,630
ТФ7	1,7260	2570	28,3	—3,5	0,719	0,474	0,627
ТФ8	1,6893	1985	31,1	0,6	0,717	0,472	0,619
ТФ10	1,8000	3170	25,4	2,6	0,721	0,477	0,636
Ф1	1,6126	1659	38,9	0,9	0,714	0,468	0,607
Ф2	1,6164	1684	36,6	0,0	0,714	0,468	0,606
Ф4	1,6242	1738	35,9	0,7	0,715	0,469	0,608
Ф6	1,6031	1590	37,9	1,1	0,714	0,468	0,604
Ф7	1,6232	1689	36,9	0,3	0,714	0,468	0,607
Ф8	1,6246	1757	35,6	—8,4	0,713	0,470	0,610
Ф13	1,6199	1706	36,3	1,0	0,714	0,469	0,608

Кварц

Таблица 31.6

Показатели преломления кристаллического и плавленого кварца при 18°С [5]

Длина волны, нм	Вызывающий линию	Кварц		
		Кристаллический		Плавленый
		о-луч	е-луч	
186,487	Al	1,67678	1,68997	1,57436
188,583	Al	1,63939	1,67313	1,56999
200,06	Au	1,64927	1,66927	—
202,55	Zn	1,64557	1,65842	1,54727
204,446	Au	1,64268	1,65502	—
211,07	Au	1,63132	1,64071	
214,439	Cd	1,63009	1,64262	1,53286
219,462	Cd	1,62497	1,63698	1,52907
228,803	Cd	1,61618	1,62702	1,52106
231,226	Cd	1,61401	1,62559	1,51941
242,796	Au	1,60565	1,61650	—
250,329	Au	1,60032	1,61139	1,50745
257,304	Cd	1,59622	1,60714	1,50379
263,155	Al	1,59309	1,60389	—
274,867	Cd	1,58752	1,59813	1,49617
291,358	Au	1,58098	1,59136	—
303,412	Sn	1,576955	1,58720	1,48591
312,279	Au	1,57433	1,584465	—
326,253	Cd	1,570915	1,58095	
340,365	Cd	1,56747	1,577366	1,47807
358,69	Al	1,563915	1,573705	
396,848	Ca	1,56013	1,56772	1,47004
404,656	Hg	1,557156	1,56671	1,46966
410,174	H	1,556502	1,56603	—
434,047	H	1,553067	1,563405	1,46691
435,834	Hg	1,553790	1,563225	1,46675
467,815	Cd	1,551027	1,560366	1,46435
479,991	Cs	1,550118	1,559428	1,46355
486,133	H	1,549687	1,558979	1,46318
508,582	Cs	1,548229	1,557475	1,46191
518,362	Mg	1,547651	1,556887	—
533,85	Cd	1,546799	1,556006	1,46067
546,072	Hg	1,546174	1,555370	1,46013
579,066	Hg	1,544067	1,553201	—
587,563	He	1,544316	1,553428	
589,29	Na	1,544246	1,553357	1,45855
625,62	Au	1,542819	1,551880	—
643,847	Cd	1,542286	1,551312	1,45674
656,278	H	1,541899	1,550929	1,45640
667,815	He	1,541563	1,550575	—
670,785	Li	1,541466	1,550483	—
706,520	He	1,540186	1,549172	1,45517
728,135	He	1,539048	1,548013	—
766,494	K	1,537071	1,545005	—
794,763	Rb	1,538478	1,547192	1,45340
844,67	O	1,537525	1,54640	—
900,00	—	1,53503	1,54361	—
1014,06	Hg	1,53483	1,54301	—
1083,03	He	1,53387	1,54200	—
1200,00	—	1,53212	1,54008	—
1300,00		1,53102	1,53902	—
1400,00	—	1,52972	1,53696	—
1529,61	Hg	1,52800	1,53440	—
1600,0	—	1,52703	1,53345	
1800,0	—	1,52413	1,53242	—
2058,20	He	1,51998	1,52514	—
2500,0	—	1,51156	1,51900	—
3000,0	—	1,49902	1,50700	—

Таблица 31.7

Показатель преломления одноосных кристаллов для D-линии [2]

Вещество	$n_{обыкн}$	$n_{необ}$
Берилл (изумруд)	1,581	1,575
Корунд (сапфир, рубин)	1,709	1,700
Турмалин	1,669	1,638

Таблица 31.8

Три главных значения показателя преломления двуосных кристаллов для D-линии [2]

Вещество	n_1	n_2	n_3
Арагонит	1,530	1,681	1,686
Барит	1,637	1,631	1,649
Гипс	1,5205	1,5226	1,5296
Калий азотнокислый	1,335	1,506	1,506
Сода	1,461	1,600	1,594

Таблица 31.9

Показатель преломления LiF при 20°C [2, 4]

$n_D = 1,3920$ (20°C); $\beta_D = -12,7\cdot10^{-6}$ град$^{-1}$;
$(n_D - 1)/(n_F - n_C) = 90,3$; $\Delta\lambda = 160 \div 6500$ нм;
$\alpha = 4,1\cdot10^{-5}$ град$^{-1}$; $\rho = 2,6$ г/см^3; влагоустойчив

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
240,0	1,4220	656,3	1,3909
248,3	1,4194	728,1	1,3898
253,6	1,4179	768,2	1,3893
266,4	1,4150	1083,0	1,3866
280,4	1,4119	1200,0	1,3856
302,2	1,4082	1600,0	1,3832
313,2	1,4067	2000,0	1,3788
366,3	1,4012	2600,0	1,3733
404,7	1,3985	3000,0	1,3690
480,1	1,3948	4000,0	1,3456
546,1	1,3930	5000,0	1,3267
587,6	1,3921	6000,0	1,2975
589,3	1,3920		

Таблица 31.10

Показатель преломления NaF (виллиоолит) при 20°C [2]

$n_D = 1,3255$; $\dfrac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 85,2$

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
240,0	1,3679	486,1	1,3282
248,3	1,3650	546,1	1,3264
253,6	1,3633	587,6	1,3255
265,4	1,3600	589,3	1,3255
280,4	1,3565	656,3	1,3244
302,2	1,3527	728,1	1,3235
313,2	1,3508	768,2	1,3232
366,3	1,3445	1083,0	1,3213
404,7	1,3419		

Таблица 31.11

Показатель преломления CaF_2 (флюорит) при 18°C [4, 5]

$n_D = 1,4368$; $\beta_D = -1,04\cdot10^{-5}$ град$^{-1}$; $\dfrac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 96,3$; $\Delta\lambda = 170 \div 9000$ нм; $\alpha = 2\cdot10^{-5}$ град$^{-1}$;
$\rho = 3,2$ г/см^3, влагоустойчив

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
185,2	1,5099	670,8	1,4323
214,4	1,4840	1256,0	1,4276
303,4	1,4534	1500,0	1,4263
404,7	1,4415	2000,0	1,4230
480,0	1,4369	2500,0	1,4211
488,1	1,4371	3000,0	1,4179
508,6	1,4362	4000,0	1,4097
546,1	1,4350	5000,0	1,3990
589,3	1,4339	6000,0	1,3856
643,8	1,4327	8000,0	1,3499
656,3	1,4325		

Таблица 31.12

Показатель преломления BaF_2 при 20°C [4]

$n_D = 1,4775$; $\beta_D = -1,52\cdot10^{-5}$ град$^{-1}$;
$\dfrac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 81,4$; $\Delta\lambda = 270 - 12\,000$ нм;
$\alpha = 1,8\cdot10^{-5}$ град$^{-1}$; $\rho = 4,8$ г/см^3, влагоустойчив

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
1000	1,4686	4 000	1,4570
1200	1,4676	5 000	1,4511
1500	1,4663	6 000	1,4441
2300	1,4647	8 000	1,4259
2500	1,4630	10 000	1,4014
3000	1,4612		

Таблица 31.13

Показатель преломления NaCl при 18°C [4, 5]

$n_D = 1,5442$; $\beta_D = -3,6 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$;

$$\frac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 42,7; \quad \Delta\lambda = 200 - 17\,000 \text{ нм};$$

$\alpha = 4,2 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$; $\rho = 2,2$ *г/см*^{3}, влагонеустойчив

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
185,2	1,6933	1 000	1,5302
214,4	1,7322	1 500	1,5284
303,4	1,6066	2 000	1,5268
404,7	1,5685	2 500	1,5255
480,0	1,5541	3 000	1,5244
486,1	1,5534	4 000	1,5220
508,6	1,5509	5 000	1,5190
546,1	1,5475	6 000	1,5155
589,3	1,5443	8 000	1,5066
643,8	1,5412	10 000	1,4949
656,3	1,5407	12 000	1,4801
670,8	1,5400	15 000	1,4515
1000	1,5322		

Таблица 31.14

Показатель преломления KCl (сильвин) при 18°C [4, 5]

$n_D = 1,4902$; $\beta_D = -3,3 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$;

$$\frac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 43,9; \quad \Delta\lambda = 300 - 21\,000 \text{ нм};$$

$\alpha = 3,7 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$; $\rho = 2,0$ *г/см*^{3}, влагонеустойчив

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
185,2	1,5270	1 200	1,4779
214,4	1,5018	1 500	1,4769
303,4	1,5440	2 000	1,4754
404,7	1,5097	2 500	1,4746
480,0	1,4990	3 000	1,4730
486,1	1,4987	4 000	1,4721
508,6	1,4961	5 000	1,4704
546,1	1,4931	6 000	1,4684
589,3	1,4904	8 000	1,4633
643,8	1,4877	10 000	1,4570
656,3	1,4872	12 000	1,4490
670,8	1,4866	15 000	1,4390
1000	1,4799	20 000	1,3938

Таблица 31.15

Показатель преломления KBr при 20°C [4]

$n_D = 1,5600$; $\beta_D = -4,0 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$;

$$\frac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 39,5; \quad \Delta\lambda = 210 - 28\,000 \text{ нм};$$

$\alpha = 3,6 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$; $\rho = 2,8$ *г/см*^{3}, влагонеустойчив

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
240,0	1,7570	1 000	1,5445
248,3	1,7330	1 200	1,5421
253,6	1,7198	1 500	1,5399
265,4	1,6950	2 000	1,5383
280,4	1,6713	2 500	1,5374
302,2	1,6460	3 000	1,5368
313,2	1,6351	4 000	1,5357
365,3	1,6030	5 000	1,5345
404,7	1,5899	6 000	1,5332
486,1	1,5719	8 000	1,5302
546,1	1,5641	10 000	1,5264
587,6	1,5601	12 000	1,5217
589,3	1,5600	15 000	1,5129
656,3	1,5572	20 000	1,4966
728,1	1,5510	25 000	1,4642
768,2	1,5501		

Таблица 31.16

Показатель преломления KRS-5 (состав: 42% TlBr, 58% TlI) при 20°C [4]

$n_D = 2,6150$; $\beta_D = -2,5 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$;

$\Delta\lambda = 500 - 35\,000$ *нм*; $\alpha = 7,0 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$;

$\rho = 7,4$ *г/см*^{3}; влагоустойчив

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
1000	2,4474	8 000	2,3757
1200	2,4258	10 000	2,3719
1500	2,4069	12 000	2,3679
2000	2,3962	15 000	2,3592
2500	2,3903	20 000	2,3417
3000	2,3869	25 000	2,3186
4000	2,3841	30 000	2,2890
5000	2,3810	40 000	2,2113
6000	2,3791		

Таблица 31.17

Показатель преломления CsI при 20°C [4]

$n_D = 1,7874$; $\beta_D = -9,9 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$;

$$\frac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 24,0; \quad \Delta\lambda = 250 \div 62\,000 \text{ нм};$$

$\alpha = 4,9 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$; $\rho = 4,5$ *г/см*^{3}; влагонеустойчив

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
1000	1,7576	8 000	1,7409
1200	1,7530	10 000	1,7395
1500	1,7494	12 000	1,7376
2000	1,7465	15 000	1,7347
2500	1,7451	20 000	1,7280
3000	1,7444	25 000	1,7192
4000	1,7434	30 000	1,7077
5000	1,7427	40 000	1,6785
6000	1,7421	50 000	1,6399

Таблица 31.18

Показатель преломления полевого (исландского) шпата [5]

Длина волны, мк	o-Луч	e-Луч	Длина волны, мк	o-Луч	e-Луч
214,4	1,8459	1,6000	589,3	1,6584	1,4864
303,4	1,7196	1,5136	643,8	1,6560	1,4847
404,7	1,6813	1,4969	656,3	1,6544	1,4846
460,0	1,6696	1,4911	670,8	1,6537	1,4843
480,1	1,6678	1,4907	1258	1,6388	1,4782
508,6	1,6653	1,4895	2172	1,6210	1,4745
546,1	1,6616	1,4879			

Таблица 31.19

Показатель преломления KI при 20°C [2]

$$n_D = 1,67;\ \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 23,2$$

Длина волны, мк	n	Длина волны, мк	n
248,3	2,0548	466,1	1,6866
253,6	2,0116	540,1	1,6731
214,4	1,9494	587,6	1,6665
280,4	1,8837	589,3	1,6661
302,2	1,8277	656,3	1,6581
313,2	1,8071	726,1	1,6520
366,3	1,7442	768,2	1,6494
404,7	1,7184	1093	1,6381

Таблица 31.20

Оптические постоянные металлов и полупроводников [6]

n — показатель преломления; k — показатель поглощения; $n^* = n(1 + ik)$. Прохождение света через преломляющие вещества определяется соотношением $I = I_0 \exp(-4\pi nik/\lambda)$, где d — толщина поглощающего слоя; n и k — оптические постоянные для длины волны λ.

Вещество	λ=500 нм		λ=5000 нм	
	n	k	n	k
Ag	0,11	35,73	2,4	14,17
Al	0,60	9,18	6,7	5,61
Au	0,50	4,06	3,3	10,67
Co	1,68	2,20	4,3	3,40
Cu	1,06	2,56	3,1	10,58
Fe	1,46	2,17	4,20	2,98
In	—	—	9,8	3,29
Mo	3,15	1,18	4,25	5,62
Na*	0,05	32,2	—	—
Nb	2,13	1,44	8,0	3,46
Ni	1,54	2,01	4,95	3,72
Pb	1,76	1,94	9,0	2,75
Pt	1,76	2,04	7,6	2,66
Si*	4,24	0,114	—	—
Sn	0,76	4,90	8,6	3,35
Ti	2,10	1,34	3,4	2,70
V	2,66	2,56	6,6	2,65
W	3,31	0,89	3,48	6,09
Zn	—	—	3,8	6,89

* Отсутствие характеристики означает $k = 590,3$ нм.

31.2. КОЭФФИЦИЕНТЫ ОТРАЖЕНИЯ. ПРОСВЕТЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Коэффициентом отражения называют отношение потока излучения, отраженного двумя телами, к падающему потоку.

Таблица 31.21

Коэффициент отражения света (при нормальном падении) от полированных металлических поверхностей [5], %

Длина волны, мк	Магний (Al—89%, Mg—3%)	Медь	Олово	Платина	Родий	Сталь (Fe—99%, C—1%)	Хром	Цинк
186	53	—	—	36	—	22,0	33	—
200	56	—	—	36	—	27,0	35	—
251	67	25,9	—	33,8	—	36,0	32	—
286	—	21,3	—	36,8	—			—
305	69	25,9	—	39,8	—	44,0	37	—
316	—	—	—	—	—	—	—	—
320	77	24,9	—	41,4	—	—	—	
357	81	27,3		43,4	—	50,0	41	—
385	—	28,6	—	45,4	—	—	—	—
420	83	32,7		51,8	—	—	—	—
450	—	37,0	—	54,7		55,0	—	54
500	—	43,7	—	58,4	76,0	56,0	55	56
550	83	47,7	—	61,1	—	56,0	—	56
600	—	71,8	—	64,2	—	57,3	—	57,5
650	83	80,0	—	66,5	—	58,0	—	—
700	—	82,4	—	69,0	—	58,0	55	61
800	—	88,6	—	70,3	81,0	—	—	61,0
1 000	84	90,1	54,0	72,9	84,0	63	57	69,0
2 000	—	95,5	60,0	80,6	91,0	77	63	94,0
3 000	—	97,1	68,6	88,8	92,0	83	70	95,5
4 000	89	97,5	71,7	91,5	92,5	89	76	—
5 000	—	97,9	76,7	—	93,0	—	81	97,2
7 000	—	98,3	80,3	—	93,5	—	—	97,2
9 000	—	98,4	87,0	95,4	94,5	93	92	98,1
11 000	—	98,4	—	95,6	—	—	93	—
12 000	—	—	86,9	—	—	—	—	98,5
14 000	92	97,9		96,4	—	95	—	—

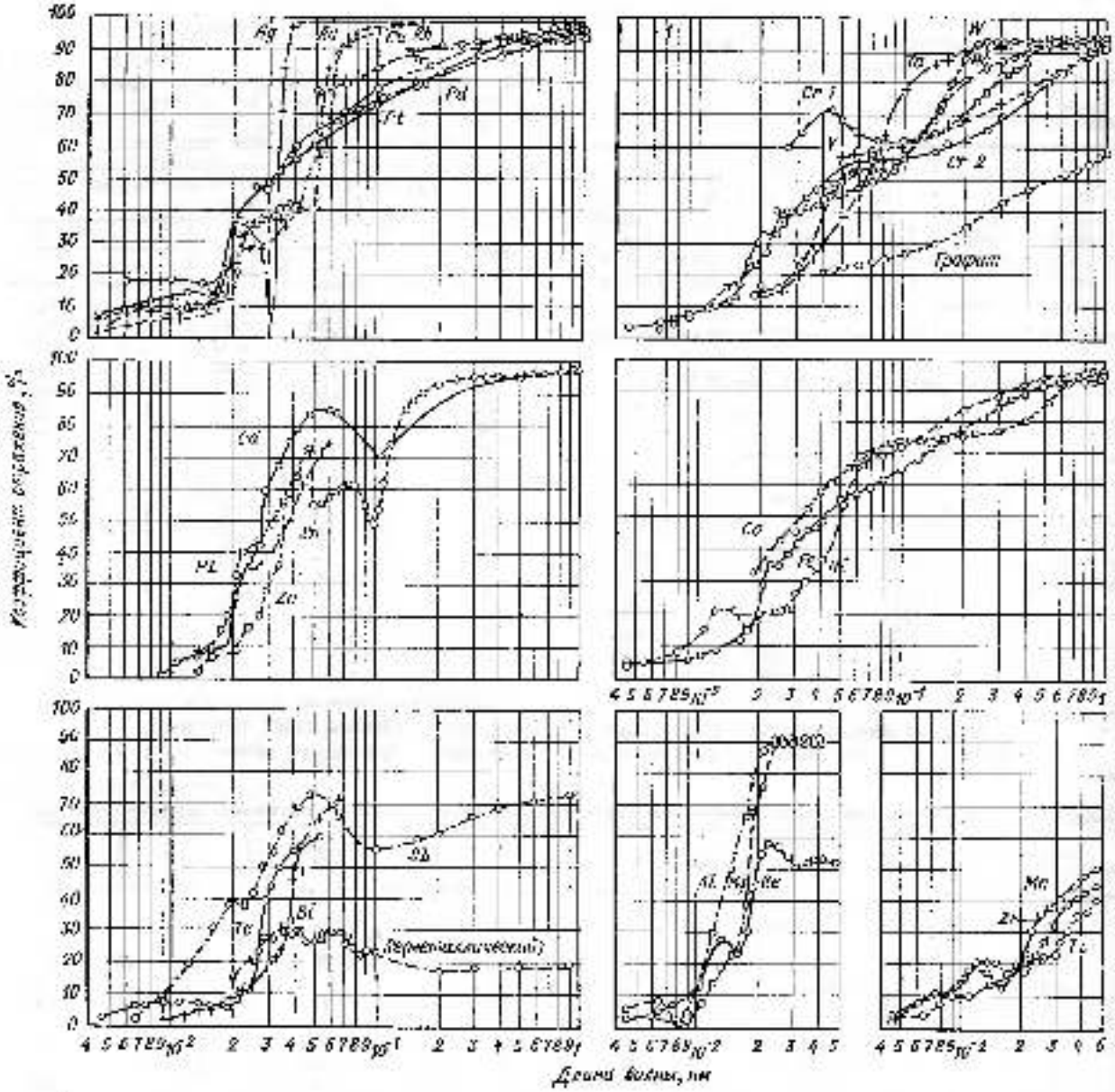


Рис. 31.1. Коэффициент отражения света для металлов и графита [7].

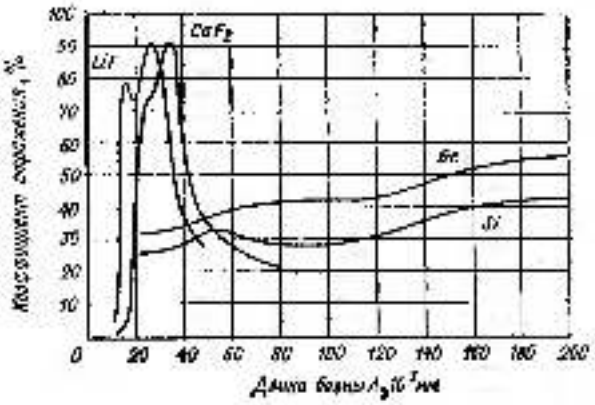


Рис. 31.2. Коэффициент отражения для LiF; CaF_2; Ge и Si [8].

Таблица 31.22

Коэффициент отражения света от тонких стеклянных полированных пластинок [5], %

Учтены обе поверхности и внутренние отражения. Рассчитано для желтых лучей с показателем преломления n_D

Угол падения, град	n_D				
	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70
0	7,8	8,8	10,2	11,3	12,6
10	7,6	8,8	10,2	11,3	12,6
20	8,0	8,9	10,3	11,4	12,7
30	8,0	9,1	10,4	11,4	12,8
40	8,6	9,8	11,1	12,2	13,4
50	10,4	11,6	12,7	13,9	16,1
60	15,2	16,3	17,4	18,4	19,4
70	27,3	28,1	28,9	29,6	30,2

Отражение света значительно уменьшается, если отражающую поверхность покрыть «просветляющей» пленкой; в этом случае поверхность становится «просветленной». При нормальном падении света оптическая толщина пленки должна равняться четверти его длины волны, а показатель преломления пленки — корню квадратному из показателя преломления стекла, на которое она наносится. Эффективность пленки зависит от того, насколько выполняются данные условия; на практике для одной пленки отражение света обычно уменьшается приблизительно на 1%. Наиболее часто для просветления употребляют фтористый магний ($n_D = 1,390$). Можно также увеличить отражение, нанеся на поверхность стекла пленку жидкости, равной одной четверти длины волны, из материала с большим коэффициентом отражения, например из сернистого цинка или двуокиси титана. Такой прием обычно используют для расщепления луча, так как поглощение света в пленке очень мало по сравнению с поглощением полупрозрачными слоями металла.

Таблица 31.23

Показатель преломления материалов, используемых для отражающих покрытий

Материал	Показатель преломления	Области длин волн, в пределах которых используется материал, мк
Al_2O_3	1,69	200—7000
Ge	4,0	1300—35 000
GeO_2	2,30	400—8000
MgF_2	1,38	200—9000
$NaAlF_4$	1,30	200—10 000
Si	3,40	900—9000
SiO	1,85	800—7000
SiO_2	1,45	200—8000
Si_2O_3	1,55	300—8000
TiO_2	2,30	400—12 000
ZnS	2,30	140—15 000
ZrO_2	2,1	250—7000

31.3. ОБЛАСТИ ПРОЗРАЧНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОГЛОЩЕНИЯ

Коэффициент пропускания есть отношение потока излучения, прошедшего через данное тело, к падающему потоку излучения.

Коэффициент поглощения есть отношение потока излучения, поглощенного телом, к падающему на него потоку.

В области прозрачности проходит не менее 50% готового потока, в области непрозрачности характеризуется поглощением светового потока до 90% и более.

Таблица 31.24

Пропускание газовых фильтров в вакуумном ультрафиолете [9]

Области относительной прозрачности и относительной непрозрачности даны для температуры газа 0°С и давления 760 *мм рт. ст.*

Газ	Толщина фильтра, см	Область относительной прозрачности, нм	Область относительной непрозрачности, нм
CCl_4	0,0025	116—120; >>166	122—133; <<115
CCl_3F	0,0025	120,0—123,0; >>137,5	123,5—132,5; <<119,5
CH_4	0,025	140	<<137,5
C_2H_4	0,025	185	<<175
C_2H_6	0,1	160	<<157,5
$CH_3—CH$	0,1	160	<<164
CH_3Br	0,05	152,5—157,5; >>180	161—177,5; <<152
CH_3Cl	0,1	142,5—146; >>185	147,5—161; <<142
CO_2	0,5	117,5—125; >>165	130—156; <<115
Cl_2	0,1	Около 12 полос прозрачности между 117 и 131. Одна полоса прозрачна для лаймановской линии водорода; >>145	
CS_2	0,5	Около 10 полос прозрачности между 150 и 178; >> 220.	160—210; <<152
H_2S	0,1	160—170; >> 230	180—220; <<157,5
NH_3	0,1	Около 10 полос прозрачности между 145 и 170; >> 215	170—205; <<142,5
N_2O	0,025	120—124; >> 153	128—135; <<119
SO_2	0,1	162,5—175; >> 225	180—215; <<160

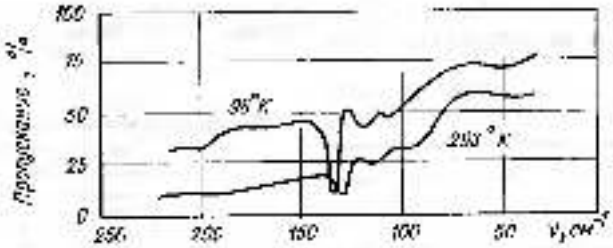


Рис. 31.3. Пропускание кристаллического кварца толщиной 5 мк в инфракрасной области [10]

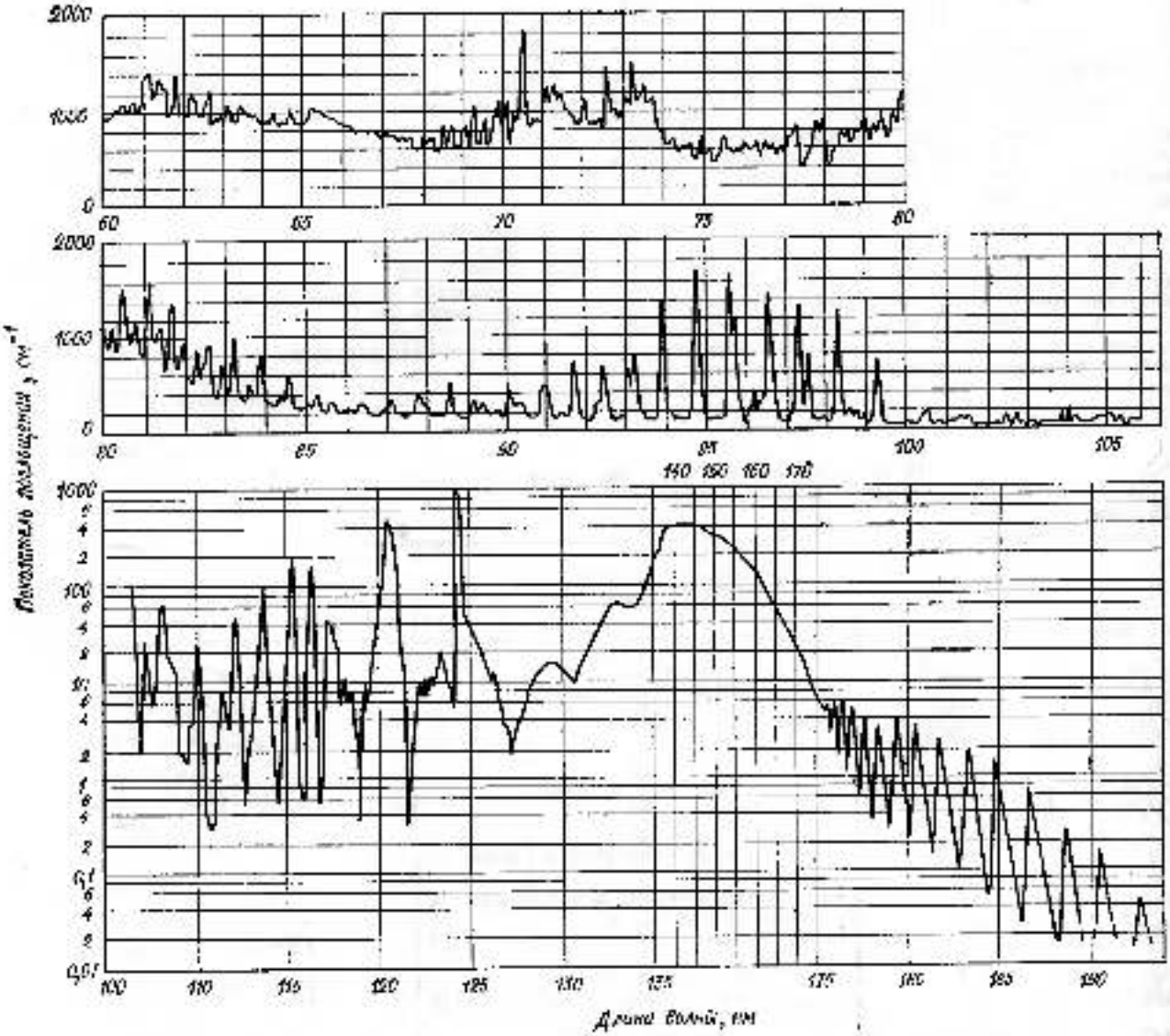


Рис.31.4. Коэффициент поглощения вакуумного ультрафиолета молекулярным кислородом в области 60—190 нм [11, 12].

Таблица 31.25

Области прозрачности некоторых веществ

Числа в скобках означают коэффициент пропускания в процентах для соответствующих значений длин волн и толщины слоя материала

Вещество	Толщина, мм	Границы, мк		Литература
		коротковолновая	длинноволновая	
Бромистый калий KBr	10	210 (50)	26 000 (50)	[4]
» цезий CsBr	5	—	40 800 (50)	[8]
Вода дистиллированная	20	188 (50)	—	[13]
» »	40	192 (50)	—	[13]
» »	80	202 (50)	—	[13]
Воск	2	223 (50)	—	[13]
Германий	2	1600 (20)	15 000 (40)	[8]
Гипс	1	161		[9]
Двуокись титана (рутил)	6	420 (40)	6 000 (10)	[14]
Иодистый калий KI	0,83	250	42 000 (50)	[5, 8]
» цезий CsI	10	290 (50)	52 000 (50)	[8]
Исландский шпат	—	200	2 000	[5]
Канадский бальзам	0,1	330	—	[6]
Кварц кристаллический	5	185 (50)	—	[13]
» »	10	193—200(50)	3 600 (50)	[4, 13]
» плавленый	10	194 (50)	—	[13]
Корунд Al_2O_3	1	145 (30)	6 000 (50)	[8, 13]
Кремний кристаллический	0,5	1600 (10)	20 000 (45)	[8]
КРС-5	10	500	36 000 (50)	[4]
КРС-6	—	—	30 000 (40)	[8]
Окись калия алюминия синтетическая $MgO \cdot 3Al_2O_3$	—	200	6 000	[5]
Оконное стекло	1	310 (50)	—	[13]
» »	3	330 (50)		[13]
Полиметилметакрилат	2,5	322 (50)	—	[13]
»	5	338 (50)		[13]
»	10	350 (50)	—	[13]
Стекло оптическое БК10	10	330 (50)	2 600 (50)	[4]
» » К 8	10	320 (50)	2 600 (50)	[4]
» » ТК 16	10	350 (50)	2 600 (50)	[4]
» » ТФ 1	10	330 (50)	2 700 (50)	[4]
» » ТФ 5	10	380 (50)	2 700 (50)	[4]
» » Ф 1	10	340 (50)	2 700 (50)	[4]
Слюда	0,01	260	—	[5]
Тефлон	0,006	168	—	[9]
Тефлон $(CF_2—CF_2)_n$	1,81	100 000 (65)	> 600 000(90)	[8]
Титанат стронция $SrTiO_3$	1	—	7 000 (12)	[8]
Топаз	1	163,7	—	[9]
Флюорит CaF_2	5	135 (50)	—	[13]
	10	167—170(50)	9 000 (50)	[4, 13]
Фтористый барий BaF_2	10	230 (50)	12 000 (50)	[4]
» кадмий CdF_2	5	160 (20)	10 000 (60)	[8]
» литий LiF	6	107 (50)	—	[13]
	10	142—160(50)	6 300 (50)	[4, 13]
» натрий NaF (шелковолент)	1	200	10 000 (10)	[8]
Хлористый калий KCl	10	260 (50)	21 000 (50)	[4]
» натрий NaCl	10	200 (50)	17 000 (50)	[4]
» серебро AgCl	6	—	25 000 (35)	[8]

31.4. ИЗЛУЧЕНИЕ

Излучение абсолютно черного тела

Постоянная Стефана-Больцмана

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2h^3} = \frac{\pi^2 c_1}{15c_2^4} = (5,6696 \pm 0,0011) \times$$

$$\times 10^{-5}\ эрг \cdot см^{-2} \cdot сек^{-1} \cdot град^{-4}.$$

Энергетическая светимость абсолютно черного тела F равна полному потоку излучения (в сторону внешней нормали) с единицы поверхности при абсолютной температуре T за единицу времени:

$$F = \sigma T^4.$$

Интенсивность излучения абсолютно черного тела

$$B = (c/\pi)\, T^4 = 1,8048 \cdot 10^{-5} T^4\ эрг \cdot см^{-2} \cdot сек^{-1} \cdotster^{-1} \times$$

$$\times\ град^{-4}.$$

Плотность излучения внутри полости при температуре T

$$u = (4\sigma/c)\,T^4 = 7{,}565 \cdot 10^{-15} T^4 \ эрг \cdot см^{-3} \cdot град^{-4}.$$

В среде с показателем преломления n

$$D = n^2 (c/\pi)\,T^3, \quad u = n^3 (4\sigma/c)\,T^4.$$

Такие же поправочные множители вводятся в формулу Планка; и есть функция частоты или длины волны: n_ν, n_λ. Плотность фотонного потока равна

$$p = 15{,}10611\,c/c_2^3 = 1{,}5210 \cdot 10^{11} \ фотон \cdot см^{-2} \cdot сек^{-1} \cdot град^{-3}.$$

Фотонный поток с единицы абсолютно черной поверхности

$$N = pT^3.$$

Поляризация. Излучение абсолютно черного тела неполяризовано, однако интенсивность линейно поляризованного излучения в избранном направлении составляет половину значения, вычисленного по приведенным выше формулам.

Функция Планка (отнесенная к единичному интервалу длин волн)

$$(c/4)\,u_\lambda = \pi B_\lambda = F_\lambda = 2\pi hc^2 k^5/(e^{hc/\lambda kT} - 1) =$$

$$= c_1 \lambda^{-5}/(e^{c_2/\lambda T} - 1);$$

$$c_1 = 2\pi hc^2 = (3{,}7403 \pm 0{,}0002) \cdot 10^{-5} \ эрг \cdot см^2/сек;$$

$$c_2 = hc/k = (1{,}43868 \pm 0{,}00001) \ см \cdot град;$$

$$c_2' = c_2 \lg e = 0{,}62481 \ см \cdot град,$$

где u_λ, B_λ и F_λ — соответственно плотность излучения, интенсивность и энергетическая светимость в единичном интервале длин волн.

Функция Планка (отнесенная к единичному интервалу частот)

$$(c/4)\,u_\nu = \pi B_\nu = F_\nu = 2\pi h\nu^3/(e^{h\nu/kT} - 1).$$

Закон распределения фотонов

$$N_\lambda = 2\pi c\lambda^{-4}/(e^{c_2/\lambda T} - 1);$$

$$N_\nu = 2\pi c^{-2}\nu^2/(e^{h\nu/kT} - 1)$$

[N_λ и N_ν — количество фотонов, испущенных во всех направлениях площадкой 1 $см^2$ за 1 сек, в единичном интервале длин волн (частот)].

Закон Вина. Длина волны $\lambda_{макс}$ соответствует максимуму функций F_λ или B_λ:

$$T\lambda_{макс} = 0{,}2014052\,c_2 = (0{,}28970 \pm 0{,}00003) \ см \cdot град;$$

$\lambda_{макс}$ — длина волны, соответствующая максимуму фотонного излучения

$$T\lambda_{макс} = 0{,}2500571\,c_2 = (0{,}36094 \pm 0{,}00003) \ см \cdot град;$$

$\nu_{макс}$ — частота, соответствующая максимумам функций F_ν или B_ν:

$$Tc/\nu_{макс} = 0{,}3544290\,c_2 = 0{,}50990 \pm 0{,}00004 \ см \cdot град.$$

Таблица функции Планка дает:

$F_{0-\lambda} = \int_0^\lambda F_\lambda\, d\lambda$ в долях $F_{0-\infty}$ (обозначенного далее F);

F_λ » » $F_{\lambda_{макс}}$;

$N_{0-\lambda} = \int_0^\lambda N_\lambda\, d\lambda$ » » $N_{0-\infty}$ (обозначенного далее N);

N_λ » » $N_{\lambda_{макс}}$;

F_ν » » $F_{\nu_{макс}}$.

Приближенные выражения для больших и малых длин волн даются как функции $x = c_2/\lambda T = h\nu/kT$.

Абсолютные значения можно получить, используя следующие данные:

$$F_{0-\infty} = 0{,}493930\,c_1\,(T/c_2)^4 =$$

$$= 0{,}6098 \cdot 10^{-5}\,T^4 \ эрг/(см^2 \cdot сек \cdot град^4);$$

$$F_{\lambda_{макс}} = 21{,}20144\,c_1\,(T/c_2)^5 =$$

$$= 1{,}287 \cdot 10^{-9}\,T^5 \ эрг/(см^2 \cdot сек \cdot град^5).$$

Для λ в микронах и $T = 10\,000°K$

$$F_{\lambda_{макс}} = 1{,}287 \cdot 10^{13} \ эрг/(см^2 \cdot сек \cdot микр)$$

$$N_{0-\infty} = 15{,}10611\,c\,(T/c_2)^3 =$$

$$= 1{,}5210 \cdot 10^{11}\,T^3 \ фотон/(см^2 \cdot сек \cdot град^3);$$

$$N_{\lambda_{макс}} = 30{,}03263\,c\,(T/c_2)^4 =$$

$$= 2{,}1018 \cdot 10^{11}\,T^4 \ фотон/(см^2 \cdot сек \cdot град^4);$$

$$F_{\nu_{макс}} = 1{,}421436\,(c_1/c)\,(T/c_2)^3 =$$

$$= 5{,}966 \cdot 10^{-10}\,T^3 \ эрг/(см^2 \cdot град^3).$$

В единицах волнового числа при $T = 10\,000°K$

$$F_{\nu_{макс}} = 1{,}7856 \cdot 10^3 \ эрг/(см \cdot сек).$$

Таблица значений функций Планка [1]

λT, см·град	$x = c_2/\lambda T$	$\frac{F_{0-\lambda}}{\sigma_{0-\infty}}$	$\frac{I_\lambda}{I_{\lambda max}}$	$\frac{N_{0-\lambda}}{N_{0-\infty}}$	$\frac{N_\lambda}{N_{\lambda max}}$	$\frac{E_\lambda}{E_{\lambda max}}$
	Большие x	$\frac{x^3 e^{-x}}{6,4939}$	$\frac{x^5 e^{-x}}{21,201}$	$\frac{x^2 e^{-x}}{2,404}$	$\frac{x^4 e^{-x}}{4,780}$	$\frac{x^3 e^{-x}}{1,4214}$
	↑	↑	↑	↑	↑	↑
0,00						
0,01	143,85	$0,0^{4}16$	$0,0^{4}08$	$0,0^{4}20$	$0,0^{4}30$	$0,0^{4}70$
0,02	71,925	$0,0^{4}35$	$0,0^{4}52$	$0,0^{4}12$	$0,0^{4}33$	$0,0^{4}15$
0,03	47,950	$0,0^{4}27$	$0,0^{4}16$	$0,0^{4}14$	$0,0^{4}17$	$0,0^{4}12$
0,04	35,962	$0,0^{4}19$	$0,0^{4}683$	$0,0^{4}13$	$0,0^{4}84$	$0,0^{4}79$
0,05	28,770	$0,0^{4}130$	$0,0^{4}297$	$0,0^{4}118$	$0,0^{4}456$	$0,0^{4}536$
0,06	23,975	$0,0^{4}92$	$0,0^{4}145$	$0,0^{4}100$	$0,0^{4}267$	$0,0^{4}375$
0,07	20,550	$0,0^{4}186$	$0,0^{4}206$	$0,0^{4}230$	$0,0^{4}444$	$0,0^{4}726$
0,08	17,981	$0,0^{4}165$	$0,0^{4}138$	$0,0^{4}223$	$0,0^{4}339$	$0,0^{4}633$
0,09	15,983	$0,0^{4}872$	$0,0^{4}563$	$0,0^{4}139$	$0,0^{4}156$	$0,0^{4}329$
0,10	14,385	$0,0^{3}321$	0,01644	$0,0^{4}79$	0,00507	0,00116
0,12	11,968	0,00214	0,07264	$0,0^{3}439$	0,09687	0,00754
0,14	10,275	0,00760	0,18627	0,00181	0,08041	0,02631
0,16	8,9906	0,01974	0,34518	0,00522	0,17031	0,06309
0,18	7,9917	0,03639	0,52069	0,01151	0,28977	0,12158
0,20	7,1925	0,06679	0,66344	0,02132	0,42144	0,19659
0,25	5,7540	0,16145	0,94612	0,06155	0,72936	0,42622
0,30	4,7950	0,27336	0,99712	0,11937	0,92241	0,64087
0,35	4,1100	0,38906	0,99271	0,18624	0,98574	0,81474
0,40	3,5962	0,48102	0,80010	0,25011	0,98674	0,92979
0,45	3,1967	0,56444	0,67136	0,32158	0,93161	0,97996
0,50	2,8770	0,63386	0,55407	0,38337	0,85519	0,99952
0,60	2,3975	0,73789	0,37378	0,49020	0,69155	0,97093
0,70	2,0550	0,80912	0,25394	0,57552	0,54810	0,89689
0,80	1,7981	0,87651	0,17508	0,64306	0,43408	0,81177
0,90	1,5983	0,89004	0,12471	0,69060	0,34613	0,72820
1,00	1,4385	0,91418	0,09037	0,74669	0,27670	0,65150
1,20	1,1989	0,94506	0,05040	0,80285	0,18552	0,52330
1,40	1,0275	0,96285	0,03010	0,84605	0,12997	0,42530
1,60	0,8991	0,97377	0,01902	0,87656	0,09270	0,35087
1,80	0,7992	0,98081	0,01207	0,89895	0,06971	0,29353
2,0	0,7192	0,98506	0,00862	0,91585	0,05318	0,24809
3,0	0,4795	0,99524	0,00194	0,95045	0,01798	0,12606
4,0	0,3596	0,99790	0,00655	0,97625	0,00808	0,07869
5,0	0,2877	0,99890	0,00279	0,98452	0,00430	0,05026
10	0,1438	0,99949	$0,0^{4}188$	0,99692	$0,0^{4}573$	0,01304
20	0,0719	$0,9^{4}801$	$0,0^{4}122$	0,99893	$0,0^{4}771$	0,00351
50	0,0288	$0,9^{4}878$	$0,0^{4}318$	$0,0^{3}826$	$0,0^{4}491$	$0,0^{4}574$
100	0,0144	$0,9^{4}949$	$0,0^{4}200$	$0,9^{4}570$	$0,0^{4}618$	0,0145
	↓	↓	↓	↓	↓	↓
	Малые x	$1-0,0534\ x^3$	$0,04717\ x^5$	$1-0,9860\ x^3$	$0,2092\ x^3$	$0,7000x^4$

Тепловое излучение тел

Излучение поверхности тела характеризуют спектральной степенью черноты $\varepsilon_{\lambda,T}$ и интегральной степенью черноты ε_T. Величина $\varepsilon_{\lambda,T}$ равна отношению интенсивностей излучения реального тела и абсолютно черного тела при фиксированных значениях λ и T. Интегральная степень черноты определяется как отношение полной интенсивности излучения реального тела к полной интенсивности излучения абсолютно черного тела, взятых при одной и той же температуре T. Для металлов значения ε_T невелики (0,1—0,3) и сильно зависят от качества поверхности металла. У грязных и неполированных поверхностей ε_T значительно выше, чем у отшлифованных и полированных. Для угля и сажеподобных веществ значения

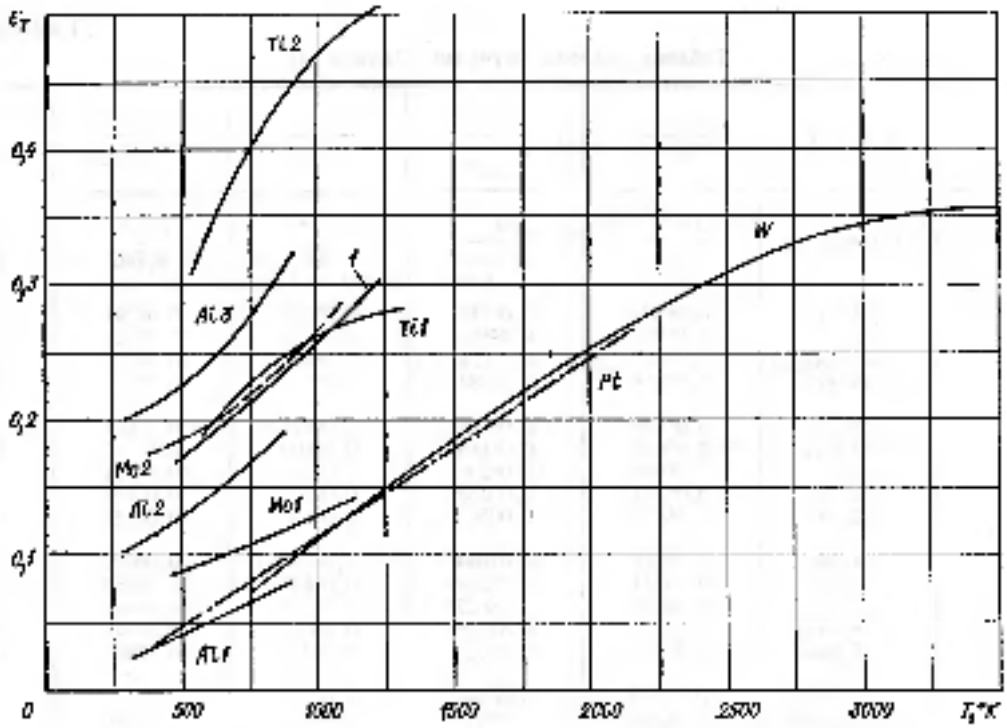


Рис. 31.5. Интегральная степень черноты ε_T для некоторых металлов [15, 16]:

1 — нержавеющая сталь марки 1Х18Н9Т [16] типа [16]: Ti1 — полированный отожженный, Ti2 — механически шлифованный; молибден: Mo1 — полированный отожженный, Mo2 — механически шлифованный; алюминий: Al1 — полированный отожженный, Al2 — сильно окислённый, Al3 — сильно окисленный.

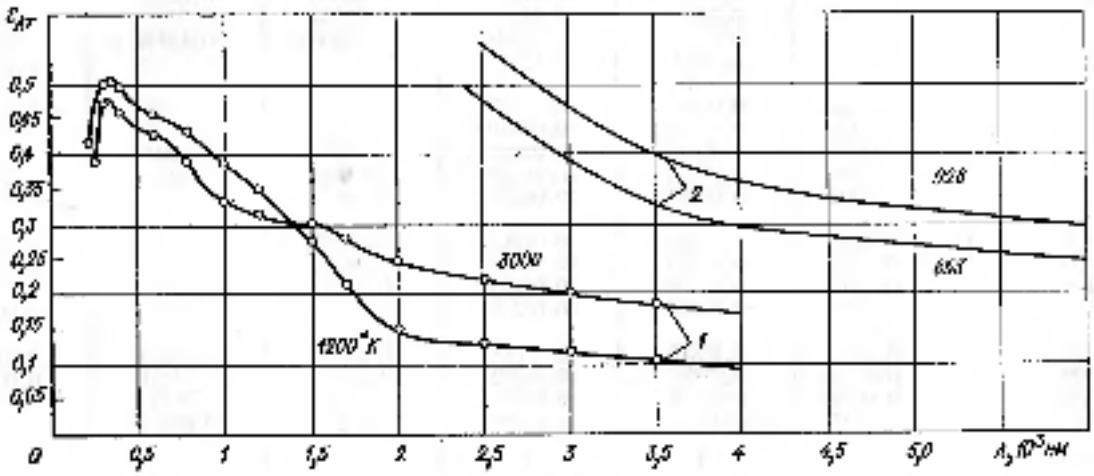


Рис. 31.6. Спектральная степень черноты $\varepsilon_{\lambda T}$ [15—17]:

1 — вольфрам; 2 — нержавеющая сталь марки 1Х18Н9Т.
Температура поверхности указана на кривых.

ε_T доходит до 0,9, у черненой сажи ε_T — до 0,93—0,97. Некоторые экспериментальные зависимости $\varepsilon_{\lambda, T}$ и ε_T от длины волны и температуры приведены на рис. 31.5 и 31.6 и в табл. 31.27. Если отсутствуют специальные указания в подписях к рисункам, данные получены для излучения в вакууме чистых, механически полированных поверхностей металлов.

Радиационной температурой $T_{рад}$ тела называется такая температура черного тела, при которой совпадают величины их полного излучения. Истинная температура излучающего тела T связана с $T_{рад}$ [18]:

$$T = T_{рад}\sqrt[4]{\varepsilon_T}.$$

Таблица 31.27

Интегральная степень черноты некоторых тел [18]

Вещество	T, °К	ε_T	Вещество	T, °К	ε_T
Железо	1500	0,11	Окись никеля	1500	0,85
Медь раскаленная	1400	0,15	Платина	1500	0,16
Никель	1500	0,06	Серебро	1500	0,04
Окись железа	1500	0,89	Тантал	2300	0,25
» меди	1400	0,54	Уголь	1500	0,52

Цветовая температура. Если распределение энергии на некотором участке спектра реального тела может быть отождествлено с распределением энергии абсолютно черного тела, имеющего температуру $T_{цв}$, то получаемое тело имеет такой же «цвет», как и черное тело температуры $T_{цв}$, а $T_{цв}$ называют цветовой температурой тела [13]. Для тел, характер излучения которых сильно отличается от излучения черного тела, понятие цветовой температуры теряет смысл.

Яркость некоторых источников света

Таблица 31.28

Яркость и цветовая температура $T_{цв}$ некоторых источников света

Источник	Яркость, кб	$T_{цв}$, °К
Ночное безлунное небо	10^{-4}	—
Полная луна, видимая сквозь атмосферу	0,25	—
Ясное дневное небо	0,15—0,4	$(12 \div 24) \cdot 10^3$
Пламя стеариновой свечи	0,6	1930
Люминесцентные лампы	0,53 —0,90	
Ацетиленовое пламя	10,8	2360
Шлифт Нернста (2,3 ом/см)	260	—
Солнце у горизонта	600	—
Электрическая лампочка с вольфрамовым волоском газонаполненная		
12,9 лм/вт	597	2740
15,2 лм/вт	772	2810
18,1 лм/вт	1000	2920
21,2 лм/вт	1325	3000
Кратер угольной дуги	$17,2 \cdot 10^3$	3780
Капиллярная ртутная дуга сверхвысокого давления	$4 \cdot 10^4$	—
Кратер угольной дуги (наибольшая яркость, ток 150 а)	$8 \cdot 10^7$	$(5,0 \div 5,5) \times \times 10^4$
Шаровая ртутная лампа СВДШ	$12 \cdot 10^7$	—
Солнце в зените	$16,5 \cdot 10^4$	5400
Искра разряда		
в водороде	$1,1 \cdot 10^9$	—
в аргоне	$1,5 \cdot 10^7$	—
в воздухе	$2,1 \cdot 10^9$	—
в гелии	$1,5 \cdot 10^9$	—

31.5. СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Светочувствительностью называют обратную освещенности H величину S, которая создает на фотографической слое определенную плотность почернения D [19]. В системе ГОСТ 2817—15 светочувствительность оценивается по критерию, представляющему собой диффузную оптическую плотность 0,2 сверх основы вуали D_0:

$$S_{0,2} = 1/H_{D=0,2+D_0},$$

где $[H] = [\text{люкс} \cdot \text{сек}]$.

В системе ДИН 4512

$$S = -10 \lg (H_{D=0,1+D_0}).$$

Таблица 31.29

Светочувствительность в различных сенситометрических системах

$ГОСТ_{0,2}$	11	16	22	32	45	65	90	130	180	250
X и $D_{ДИН}$	250	350	500	700	900	1400	2300	3000	4000	6000
ДИН	12	13	15	17	18	20	21	23	24	26
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллен К. У. Астрофизические величины. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
2. Крутер М. Я. и др. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Л., «Машиностроение», 1968.
3. Susman R. R. The Properties of Silica. N. Y., Chemical Catalog Co., USA, 1927.
4. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. Л., «Машиностроение», 1970.
5. Кэй Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1962.
6. Мотулевич Г. П. Металлооптика. — БСЭ, т. 16, с. 119.
7. Taschenbuch für Chemiker und Physiker. Berlin, Springer Verlag, 1943.
8. Воронкова Е. М. и др. Оптические материалы для инфракрасной техники. М., «Наука», 1965.

9. Gubb T. A., Friedman H. «Rev. Sci. Instrum.», 1955, v. 26, p. 403.
10. Сонт Р., Джонс Ф., Чесмер Р. Обнаружение и измерение инфракрасного излучения. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
11. Huffman R. E. e. a. «J. Chem. Phys.», 1964, v. 40, p. 350.
12. Ion E. G. V., Zelikoff M. «J. Chem. Phys.», 1973, v. 21, p. 1026.
13. Кливер Дж., Питтс Дж. Фотоэлементы. Пер. с англ. М., «Мир», 1968.
14. Тарасов К. И. Спектральные приборы. Л., «Машиностроение», 1968.
15. Gilbert C. G. e. a. Review of the Termal Radiation Property Values for Metals and Other Materials, 1957.
16. Садыков Б. С. Канд. диссертация. Московский энергет. ин-т им. Кржижановского, 1963.
17. Larrabee R. D. «J. Opt. Soc. Amer.», 1959, v. 49, p. 619.
18. Ландсберг Г. С. Оптика. М., Гостехиздат, 1962.
19. Краткий фотографический справочник. М., Госкиноиздат, 1952.

ГЛАВА 32

СПЕКТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ И НЕКОТОРЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОЛЕКУЛ

32.1. КЛАССИФИКАЦИЯ СПЕКТРОВ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

Современное состояние теории спектров атомов позволяет допускает достаточно строгое рассмотрение только в случае одноэлектронных атомов, т. е. в случае водорода и водородоподобных ионов He^+, Li^{2+}, Be^{3+} и т. д. Теория спектров многоэлектронных атомов основывается на приближении центрального самосогласованного поля, при котором состояние атома как целого определяется совокупностью состояний всех его электронов с учетом их взаимодействия.

В общем случае для атома с Z электронами уровни энергии характеризуются набором квантовых чисел отдельных электронов: главных квантовых чисел n_i, орбитальных (или азимутальных) квантовых чисел l_i, орбитальных магнитных квантовых чисел m_{l_i} и спиновых магнитных квантовых чисел m_{s_i} $(i = 1, 2, ..., Z)$. Набор главных квантовых чисел n_i принимает только целочисленные значения 1, 2, 3 и т. д.; квантовое число l_i может принимать целочисленные значения от 0 до $n_i - 1$; m_{l_i} при заданном l_i принимает $2l_i + 1$ значения: $l_i, (l_i - 1), ..., (-l_i)$, и определяет проекцию орбитального момента электрона на заданное направление; m_{s_i} дает значение проекции на то же направление спинового момента электрона и может равняться только $+1/2$ и $-1/2$. Для последовательных значений l_i обычно используют буквенные обозначения:

$l =$	0,	1,	2,	3,	4,	5,	6,	7,	8,	9,	10,	11,	12,	13, 14
	s,	p,	d,	f,	g,	h,	i,	k,	l,	m,	n,	o,	q,	r, t

Распределение электронов в атоме при заданном всех n_i и l_i определяет электронную конфигурацию. Минимуму энергии атома соответствует заполнение электронных оболочек с минимальными значениями n_i и соответствующими им минимальными l_i. Наибольшее число электронов, которые в соответствии с принципом Паули могут иметь одинаковые значения n_i и l_i, т. е. принадлежать одной оболочке, дает число заполнения оболочки $k = 2(2l_i + 1)$. Для обозначения различных оболочек используют запись nl^k. Таким образом, по мере роста заряда ядра атома при переходе от $Z = 1$ для водорода до все больших значений Z последовательно изменяется электронная конфигурация (табл. 32.1). Полностью заполненные внутренние оболочки обычно не указываются. Следует также отметить, что для больших значений Z последовательность заполнения, определенная выше, может нарушаться.

При нормальной связи между электронами в атоме, т. е. когда их электростатическое взаимодействие много больше магнитного, орбитальные моменты отдельных электронов складываются в полный орбитальный момент атома $\mathbf{L} = \sum_i \mathbf{l}_i$, а спиновые моменты $\mathbf{s}_i$ — в полный спиновый момент $\mathbf{S} = \sum_i \mathbf{s}_i$. Затем сложение $\mathbf{L}$ и $\mathbf{S}$ дает полный момент атома $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$. Уровни энергии атомов в этом случае обозначают символами $^{2S+1}L_J$ и называют спектральными термами, или просто термами. Для обозначения термов используются заглавные буквы латинского алфавита:

$L =$	0,	1,	2,	3,	4,	5,	6,	7,	8,	9,	10,	11,	12,	13, 14
	S,	P,	D,	F,	G,	H,	I,	K,	L,	M,	N,	O,	Q,	R, T

Величина $2S + 1$ носит название мультиплетности терма и указывает число компонент в тонкой структуре уровня энергии, если $S \geq L$. В случае $S \geq L$ число компонент равно $2L + 1$, однако и в этом случае название мультиплетности сохраняется за числом $2S + 1$. Если мультиплетность терма равна 1, терм называется синглетным, 2 — дублетным, 3 — триплетным, 4 — квартетным и т. д. Термы основных состояний атомов приведены в табл. 32.1. Электронной конфигурации может соответствовать несколько термов. Терм с минимальной энергией (основной) может быть найден по правилу Гунда [1]. Сомнительные случаи в табл. 32.1. помечены знаком вопроса «?». В тех случаях, когда необходимо указывать четность состояний, относящихся к данному терму, четные термы отмечаются индексом o (odd — нечетный), который ставится справа вверху от L. Отсутствие индекса o указывает на четность терма. Все термы данной электронной конфигурации имеют одинаковую четность, так как четность определяется знаком выражения $(-1)^{l_1+l_2+...+l_z}$ (+ для четных и — для нечетных термов).

В ряде случаев, особенно для атомов тяжелых элементов и многозарядных ионов, магнитное спин-орбитальное взаимодействие значительно сильнее электростатического взаимодействия. Этот тип связи носит название jj связи. Соответственно меняется и классификация уровней энергии атома [1].

Характерной особенностью спектров молекул, даже простейших — двухатомных, является то, что в них наряду с движением электронов существуют еще колебательные движения ядер относительно положения равновесия и вращательные движения молекулы в пространстве как целого. Это приводит к тому, что спектры молекул оказываются значительно сложнее спектров атомов.

Полная энергия молекулы складывается из трех частей (без учета взаимодействия различных движений)

$$E = E_{эл} + E(v) + E_{вр}(J),$$

где $E_{эл}$, $E(v)$ и $E_{вр}(J)$ — соответственно энергии электронного, колебательного и вращательного состояний.

В случае простейшей двухатомной молекулы имеем для колебательной энергии (в см$^{-1}$):

$$E(v) = \omega_e(v + {}^1/_2) - \omega_e x_e (v + {}^1/_2)^2 + \cdots,$$

где ω_e и x_e — колебательные постоянные; v — колебательное квантовое число; v используется также для обозначения колебательных состояний. Вращательная энергия молекулы (в см$^{-1}$):

$$E_{вр}(J) = B_v J(J+1) - D_v J^2 (J+1)^2 + \cdots,$$

где J — вращательное квантовое число; B_v и D_v — вращательные константы для колебательного состояния молекулы с квантовым числом v; J — также используется для обозначения соответствующего вращательного состояния.

Частота перехода в молекуле определяется разностью энергий верхнего (со штрихом) и нижнего (без штриха) уровней (в см$^{-1}$):

$$\nu = E'_{эл} + E(v') + E_{вр}(J') - E_{эл} - E(v) - E_{вр}(J).$$

Чисто вращательные переходы сопровождаются только изменением J в заданном электронном при колебательном состоянии. Переход из верхнего состояния $J+1$ в нижнее J обозначается $R(J)$. Колебательно-вращательные переходы сопровождаются изменением J и v в заданном электронном состоянии. В соответствии с правилами отбора переходы из вращательного состояния J верхнего колебательного уровня во вращательное состояние J нижнего колебательного уровня называют Q-ветвью. Такие переходы с $\Delta J = 0$ обозначают $Q(J)$. P-ветвь соответствует переходам из вращательного состояния $J - 1$ верхнего колебательного уровня во вращательные состояния J нижнего колебательного уровня и обозначается $P(J)$ ($\Delta J = -1$). Аналогично для R-ветви — $R(J)$ и $\Delta J = +1$ — нижний переход из состояния $J + 1$ в J. P-, Q- и R-ветви, связанные с верхним колебательным уровнем v' и нижним колебательным уровнем v, называются вращательно-колебательной полосой и обозначаются $v' - v$.

Колебательно-вращательные полосы, связанные с переходами между двумя электронными уровнями, называются электронными системами и обозначаются символами соответствующих электронных состояний.

Классификация электронных состояний двухатомных молекул определяется, прежде всего, наличием аксиальной симметрии, а не центральной, как в атоме. В результате оказывается более важной проекция полного орбитального момента L на ось молекулы L_z. Для модуля L_z вводится квантовое число Λ, которое по аналогии с обозначениями S, P, D, ... принято обозначать буквами греческого алфавита:

$$\begin{array}{cccccc} \Lambda = 0, & 1, & 2, & 3, & 4, & \ldots \\ \Sigma & \Pi & \Delta & \Phi & \Gamma & \ldots \end{array}$$

Молекула, как и атом, характеризуется мультиплетностью электронных состояний. Мультиплетность уровней определяется и обозначается по указанным выше правилам. По отношению к отражению в плоскости симметрии, проходящей через ось молекулы, электронные состояния разделяются на положительные (+) и отрицательные (—), что указывается вверху справа у квантового числа Λ. Для линейных молекул, обладающих центром симметрии, электронные состояния делятся на четные (g) и нечетные (u), что указывается справа внизу у Λ. В ряде случаев перед символом терма Λ ставят дополнительный символ (A, B, C, X, ..., a, b, c, ...), приписываемый каждому конкретному терму и не связанный однозначно со спектроскопическими характеристиками молекулы.

Электронные состояния многоатомных молекул в целом могут быть классифицированы по их свойствам симметрии. Для линейных многоатомных молекул применима та же классификация, что и для двухатомных. Для нелинейных многоатомных молекул не имеет определенного значения не только полный орбитальный момент L, но и его проекция L_z. В связи с этим классификация уровней энергии значительно усложняется [2].

Таблица 32.1

Электронные конфигурации и основные термы атомов [1]

Z	Атом	Электронная конфигурация	Основной терм	Z	Атом	Электронная конфигурация	Основной терм
1	H	$1s$	$^2S_{1/2}$	9	F	$2s^2 2p^5$	$^2P_{3/2}$
2	He	$1s^2$	$^1S_0$	10	Ne	$2s^2 2p^6$	$^1S_0$
3	Li	$2s$	$^2S_{1/2}$	11	Na	$3s$	$^2S_{1/2}$
4	Be	$2s^2$	$^1S_0$	12	Mg	$3s^2$	$^1S_0$
5	B	$2s^2 2p$	$^2P_{1/2}$	13	Al	$3s^2 3p$	$^2P_{1/2}$
6	C	$2s^2 2p^2$	$^3P_0$	14	Si	$3s^2 3p^2$	$^3P_0$
7	N	$2s^2 2p^3$	$^4S_{3/2}$	15	P	$3s^2 3p^3$	$^4S_{3/2}$
8	O	$2s^2 2p^4$	$^3P_2$	16	S	$3s^2 3p^4$	$^3P_2$

Z	Атом	Электронная конфигурация	Основной терм	Z	Атом	Электронная конфигурация	Основной терм
17	Cl	$3s^2 3p^5$	$^2P_{3/2}$	55	Cs	$6s$	$^2S_{1/2}$
18	Ar	$3s^2 3p^6$	$^1S_0$	56	Ba	$6s^2$	$^1S_0$
19	K	$4s$	$^2S_{1/2}$	57	La	$5d6s^2$	$^2D_{3/2}$
20	Ca	$4s^2$	$^1S_0$	58	Ce	$4f^2 6s^2$	$^3H_4$
21	Sc	$3d4s^2$	$^2D_{3/2}$	59	Pr	$4f^3 6s^2$	$^4I_{9/2}$
22	Ti	$3d^2 4s^2$	$^3F_2$	60	Nd	$4f^4 6s^2$	$^5I_4$
23	V	$3d^3 4s^2$	$^4F_{3/2}$	61	Pm	$4f^5 6s^2$	$^6H_{5/2}$
24	Cr	$3d^5 4s$	$^7S_3$	62	Sm	$4f^6 6s^2$	$^7F_0$
25	Mn	$3d^5 4s^2$	$^6S_{5/2}$	63	Eu	$4f^7 6s^2$	$^8S_{7/2}$
26	Fe	$3d^6 4s^2$	$^5D_4$	64	Gd	$4f^7 5d6s^2$	$^9D_2$
27	Co	$3d^7 4s^2$	$^4F_{9/2}$	65	Tb	$4f^9 6s^2$	$^6H_{15/2}$
28	Ni	$3d^8 4s^2$	$^3F_4$	66	Dy	$4f^{10} 6s^2$	$^5I_8$
29	Cu	$3d^{10} 4s$	$^2S_{1/2}$	67	Ho	$4f^{11} 6s^2$	$^4I_{15/2}$
30	Zn	$3d^{10} 4s^2$	$^1S_0$	68	Er	$4f^{12} 6s^2$	$^3H_6$
31	Ga	$4s^2 4p$	$^2P_{1/2}$	69	Tm	$4f^{13} 6s^2$	$^2F_{7/2}$
32	Ge	$4s^2 4p^2$	$^3P_0$	70	Yb	$4f^{14} 6s^2$	$^1S_0$
33	As	$4s^2 4p^3$	$^4S_{3/2}$	71	Lu	$4f^{14} 5d6s^2$	$^2D_{3/2}$
34	Se	$4s^2 4p^4$	$^3P_2$	72	Hf	$5d^2 6s^2$	$^3F_2$
35	Br	$4s^2 4p^5$	$^2P_{3/2}$	73	Ta	$5d^3 6s^2$	$^4F_{3/2}$
36	Kr	$4s^2 4p^6$	$^1S_0$	74	W	$5d^4 6s^2$	$^5D_0$
37	Rb	$5s$	$^2S_{1/2}$	75	Re	$5d^5 6s^2$	$^6S_{5/2}$
38	Sr	$5s^2$	$^1S_0$	76	Os	$5d^6 6s^2$	$^5D_2$
39	Y	$4d5s^2$	$^2D_{3/2}$	77	Ir	$5d^7 6s^2$	$^4F_{9/2}$
40	Zr	$4d^2 5s^2$	$^3F_2$	78	Pt	$5d^9 6s$	$^3D_3$
41	Nb	$4d^4 5s$	$^6D_{1/2}$	79	Au	$5d^{10} 6s$	$^2S_{1/2}$
42	Mo	$4d^5 5s$	$^7S_3$	80	Hg	$5d^{10} 6s^2$	$^1S_0$
43	Tc	$4d^5 5s^2$	$^6S_{5/2}$	81	Tl	$6s^2 6p$	$^2P_{1/2}$
44	Ru	$4d^7 5s$	$^5F_5$	82	Pb	$6s^2 6p^2$	$^3P_0$
45	Rh	$4d^8 5s$	$^4F_{9/2}$	83	Bi	$6s^2 6p^3$	$^4S_{3/2}$
46	Pd	$4d^9$	$^1S_0$	84	Po	$6s^2 6p^4$	$^3P_2$
47	Ag	$4d^{10} 5s$	$^2S_{1/2}$	85	At	$6s^2 6p^5$	$^2P_{3/2}$
48	Cd	$4d^{10} 5s^2$	$^1S_0$	86	Rn	$6s^2 6p^6$	$^1S_0$
49	In	$5s^2 5p$	$^2P_{1/2}$	87	Fr	$7s$	$^2S_{1/2}$
50	Sn	$5s^2 5p^2$	$^3P_0$	88	Ra	$7s^2$	$^1S_0$
51	Sb	$5s^2 5p^3$	$^4S_{3/2}$	89	Ac	$d^1 7s^2$	$^2D_{3/2}$
52	Te	$5s^2 5p^4$	$^3P_2$	90	Th	$6d^2 7s^2$	$^3F_2$
53	I	$5s^2 5p^5$	$^2P_{3/2}$	91	Pa	$5f^2 6d^1 7s^2$	$^4K_{11/2}$
54	Xe	$5s^2 5p^6$	$^1S_0$	92	U	$5f^3 6d^1 7s^2$	$^5L_6$

Z	Атом	Электронная конфигурация	Основной терм	Z	Атом	Электронная конфигурация	Основной терм
93	Np	$5f^{4}6s^{2}7s^{2}$	$^{6}L_{11/2}$	97	Bk	$5f^{9}7s^{2}$	$^{6}H_{15/2}$
94	Pu	$5f^{6}6s^{2}7s^{2}$	$^{7}F_{0}$	98	Cf	$5f^{10}7s^{2}$	$^{5}I_{8}$
95	Am	$5f^{7}7s^{2}$	$^{8}S_{7/2}$	99	Es	$5f^{11}7s^{2}$	$^{4}I_{15/2}$
96	Cm	$5f^{7}6s^{2}7s^{2}$	$^{9}D_{2}$				

32.2. ПЕРЕХОД ОТ ДЛИН ВОЛН, ИЗМЕРЕННЫХ В В ВОЗДУХЕ, К ДЛИНАМ ВОЛН В ВАКУУМЕ

Для перехода к значениям длин волн в вакууме $\lambda_{вак}$ от значений длин волн в воздухе $\lambda_{возд}$ используется формула:

$$\lambda_{вак} = n\lambda_{возд},$$

где n — показатель преломления сухого воздуха при температуре t = 15°С и давлении 760 *мм рт. ст.*

Таблица 32.2

Поправки $\Delta\lambda$, Å, для перехода к длинам волн в вакууме
$\Delta\lambda = \lambda_{вак} - \lambda_{возд}$ для $\lambda_{возд}$ = 200÷5000 *нм*.

При λ < 200 *нм* обычно приводятся длины волн в вакууме. Таблица перехода составлена для сухого воздуха. Для воздуха с влажностью до 100% поправки в видимой области изменяются приблизительно на 0,01 *нм* [3].

$\lambda_{возд}$, *нм*	00	10	20	30	40	50	60	70	80	90
200	0,651	0,670	0,689	0,710	0,731	0,754	0,776	0,800	0,824	0,848
300	0,872	0,897	0,922	0,947	0,972	0,998	1,023	1,049	1,075	1,101
400	1,127	1,153	1,179	1,205	1,232	1,258	1,285	1,311	1,338	1,364
500	1,391	1,417	1,444	1,471	1,497	1,524	1,551	1,578	1,604	1,631
600	1,658	1,685	1,712	1,739	1,766	1,792	1,819	1,846	1,873	1,900
700	1,927	1,954	1,981	2,008	2,035	2,062	2,089	2,116	2,143	2,170
800	2,197	2,224	2,251	2,278	2,305	2,332	2,360	2,387	2,414	2,441
900	2,468	2,495	2,522	2,549	2,576	2,604	2,631	2,658	2,685	2,712
1000	2,739	2,766	2,793	2,821	2,848	2,875	2,902	2,929	2,956	2,983
1100	3,011	3,038	3,065	3,092	3,119	3,146	3,174	3,201	3,228	3,255
1200	3,282	3,309	3,336	3,364	3,391	3,418	3,445	3,472	3,500	3,527
1300	3,554	3,581	3,608	3,636	3,663	3,690	3,717	3,744	3,772	3,799
1400	3,826	3,853	3,880	3,908	3,935	3,962	3,989	4,016	4,044	4,071
1500	4,098	4,125	4,152	4,180	4,207	4,234	4,261	4,288	4,316	4,343
1600	4,370	4,397	4,425	4,452	4,479	4,506	4,533	4,560	4,588	4,615
1700	4,642	4,669	4,697	4,723	4,751	4,778	4,806	4,832	4,860	4,887
1800	4,915	4,942	4,969	4,996	5,023	5,051	5,078	5,105	5,132	5,159
1900	5,187	5,214	5,241	5,268	5,296	5,323	5,350	5,377	5,405	5,432
$\lambda_{возд}$, *нм*	000	100	200	300	400	500	600	700	800	900
2000	5,459	5,731	6,004	6,276	6,549	6,821	7,093	7,366	7,638	7,911
3000	8,183	8,456	8,728	9,001	9,274	9,546	9,818	10,091	10,363	10,636
4000	10,909	11,181	11,454	11,727	11,999	12,272	12,544	12,817	13,089	13,362
5000	13,635									

32.3. ВЕРОЯТНОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ПЕРЕХОДОВ В АТОМЕ ВОДОРОДА

Вероятность спонтанного радиационного перехода A_{ki} (в единицу времени) с уровня k на уровень i в атоме водорода определяется выражением

$$A_{ik} = \frac{2e^2 (E_k - E_i)^2}{mc^3} \cdot \frac{n_i^2}{n_k^2} f_{ik},$$

где e, m — заряд и масса электрона; c — скорость света в вакууме; n, E — главные квантовые число и энергия уровня; f_{ik} — сила осциллятора.

Таблица 32.3

Переходы $n_i \to n_k$ в атоме водорода [4]

$n_i \to n_k$	λ, нм	E_i, см$^{-1}$	E_k, см$^{-1}$	A_{ki}, сек$^{-1}$	f_{ik}
1—2 (L_α)	121,567	0	82 259	$4,699 \cdot 10^8$	0,4162
1—3 (L_β)	102,572	0	97 492	$5,575 \cdot 10^7$	$7,910 \cdot 10^{-2}$
1—4 (L_γ)	97,2537	0	102 824	$1,278 \cdot 10^7$	$2,899 \cdot 10^{-2}$
1—5 (L_δ)	94,9743	0	105 292	$4,125 \cdot 10^6$	$1,394 \cdot 10^{-2}$
1—6 (L_ε)	93,7803	0	106 632	$1,644 \cdot 10^6$	$7,799 \cdot 10^{-3}$
1—7	93,0748	0	107 440	$7,508 \cdot 10^5$	$4,814 \cdot 10^{-3}$
1—8	92,6226	0	107 905	$3,669 \cdot 10^5$	$3,183 \cdot 10^{-3}$
1—9	92,3150	0	108 325	$2,143 \cdot 10^5$	$2,216 \cdot 10^{-3}$
1—10	92,0903	0	108 592	$1,263 \cdot 10^5$	$1,605 \cdot 10^{-3}$
1—11	91,9352	0	108 772	$7,834 \cdot 10^4$	$1,281 \cdot 10^{-3}$
1—12	91,8129	0	108 917	$5,066 \cdot 10^4$	$9,214 \cdot 10^{-4}$
1—13	91,7181	0	109 030	$3,393 \cdot 10^4$	$7,227 \cdot 10^{-4}$
1—14	91,6429	0	109 119	$2,348 \cdot 10^4$	$5,774 \cdot 10^{-4}$
1—15	91,5824	0	109 191	$1,657 \cdot 10^4$	$4,696 \cdot 10^{-4}$
1—16	91,5329	0	109 250	$1,200 \cdot 10^4$	$3,856 \cdot 10^{-4}$
1—17	91,4919	0	109 299	8858	$3,261 \cdot 10^{-4}$
1—18	91,4576	0	109 340	6654	$2,702 \cdot 10^{-4}$
1—19	91,4286	0	109 375	5077	$2,296 \cdot 10^{-4}$
1—20	91,4039	0	109 405	3928	$1,967 \cdot 10^{-4}$
1—21	91,3826	0	109 430	3077	$1,699 \cdot 10^{-4}$
1—22	91,3641	0	109 452	2436	$1,476 \cdot 10^{-4}$
1—23	91,3480	0	109 471	1952	$1,291 \cdot 10^{-4}$
1—24	91,3339	0	109 488	1578	$1,136 \cdot 10^{-4}$
1—25	91,3215	0	109 503	1286	$1,005 \cdot 10^{-4}$
1—26	91,3104	0	109 517	1057	$8,928 \cdot 10^{-5}$
1—27	91,3006	0	109 529	875,3	$7,975 \cdot 10^{-5}$
1—28	91,2918	0	109 539	729,7	$7,144 \cdot 10^{-5}$
1—29	91,2832	0	109 548	612,2	$6,429 \cdot 10^{-5}$
1—30	91,2764	0	109 557	516,7	$5,806 \cdot 10^{-5}$
1—31	91,2703	0	109 565	438,6	$5,261 \cdot 10^{-5}$
1—32	91,2645	0	109 572	374,2	$4,782 \cdot 10^{-5}$
1—33	91,2592	0	109 578	320,8	$4,360 \cdot 10^{-5}$
1—34	91,2543	0	109 584	276,3	$3,980 \cdot 10^{-5}$
1—35	91,2499	0	109 589	239,0	$3,653 \cdot 10^{-5}$
1—36	91,2458	0	109 594	207,6	$3,367 \cdot 10^{-5}$
1—37	91,2420	0	109 599	181,0	$3,099 \cdot 10^{-5}$
1—38	91,2385	0	109 603	158,4	$2,854 \cdot 10^{-5}$
1—39	91,2353	0	109 607	139,1	$2,640 \cdot 10^{-5}$
1—40	91,2324	0	109 610	122,6	$2,446 \cdot 10^{-5}$
2—3 (H_α)	656,280	82 259	97 492	$4,410 \cdot 10^7$	0,6407
2—4 (H_β)	486,132	82 259	102 824	$8,419 \cdot 10^6$	0,1193
2—5 (H_γ)	434,046	82 259	105 292	$2,530 \cdot 10^6$	$4,467 \cdot 10^{-2}$
2—6 (H_δ)	410,173	82 259	106 632	$9,732 \cdot 10^5$	$2,209 \cdot 10^{-2}$
2—7 (H_ε)	397,007	82 259	107 440	$4,389 \cdot 10^5$	$1,270 \cdot 10^{-2}$
2—8	388,905	82 259	107 905	$2,215 \cdot 10^5$	$8,036 \cdot 10^{-3}$
2—9	383,538	82 259	108 325	$1,216 \cdot 10^5$	$5,429 \cdot 10^{-3}$
2—10	379,790	82 259	108 592	$7,122 \cdot 10^4$	$3,851 \cdot 10^{-3}$
2—11	377,063	82 259	108 772	$4,397 \cdot 10^4$	$2,835 \cdot 10^{-3}$
2—12	375,015	82 259	108 917	$2,874 \cdot 10^4$	$2,151 \cdot 10^{-3}$
2—13	373,437	82 259	109 030	$1,893 \cdot 10^4$	$1,672 \cdot 10^{-3}$

$n_i \to n_k$	λ, нм	E_i, см$^{-1}$	E_k, см$^{-1}$	A_{ki}, с$^{-1}$	f_{ik}
2—14	372,194	82 259	109 119	$1,303 \cdot 10^{8}$	$1,326 \cdot 10^{-3}$
2—15	371,197	82 259	109 191	9210	$1,070 \cdot 10^{-3}$
2—16	370,385	82 259	109 250	6658	$8,764 \cdot 10^{-4}$
2—17	369,716	82 259	109 299	4910	$7,270 \cdot 10^{-4}$
2—18	369,155	82 259	109 340	3685	$6,095 \cdot 10^{-4}$
2—19	368,683	82 259	109 375	2800	$5,167 \cdot 10^{-4}$
2—20	368,281	82 259	109 405	2172	$4,416 \cdot 10^{-4}$
2—21	367,935	82 259	109 430	1700	$3,806 \cdot 10^{-4}$
2—22	367,636	82 259	109 452	1347	$3,302 \cdot 10^{-4}$
2—23	367,376	82 259	109 471	1076	$2,884 \cdot 10^{-4}$
2—24	367,146	82 259	109 488	870,7	$2,534 \cdot 10^{-4}$
2—25	366,946	82 259	109 503	709,6	$2,238 \cdot 10^{-4}$
2—26	366,768	82 259	109 517	583,0	$1,987 \cdot 10^{-4}$
2—27	366,610	82 259	109 528	482,6	$1,772 \cdot 10^{-4}$
2—28	366,468	82 259	109 539	402,2	$1,587 \cdot 10^{-4}$
2—29	366,340	82 259	109 548	337,4	$1,427 \cdot 10^{-4}$
2—30	366,226	82 259	109 557	284,7	$1,288 \cdot 10^{-4}$
2—31	366,122	82 259	109 565	241,0	$1,167 \cdot 10^{-4}$
2—32	366,028	82 259	109 572	206,1	$1,060 \cdot 10^{-4}$
2—33	365,942	82 259	109 578	176,7	$9,668 \cdot 10^{-5}$
2—34	365,864	82 259	109 584	152,2	$8,825 \cdot 10^{-5}$
2—35	365,792	82 259	109 589	131,6	$8,066 \cdot 10^{-5}$
2—36	365,727	82 259	109 594	114,3	$7,427 \cdot 10^{-5}$
2—37	365,666	82 259	109 599	99,66	$6,837 \cdot 10^{-5}$
2—38	365,611	82 259	109 603	87,20	$6,369 \cdot 10^{-5}$
2—39	365,559	82 259	109 607	76,57	$5,834 \cdot 10^{-5}$
2—40	365,512	82 259	109 610	67,46	$5,406 \cdot 10^{-5}$
3—4 (P_k)	1875,10	97 492	102 824	$8,986 \cdot 10^{7}$	0,8421
3—5 (P_9)	1281,81	97 492	105 292	$2,901 \cdot 10^{8}$	0,1506
3—6 (P_i)	1093,61	97 492	106 632	$7,783 \cdot 10^{8}$	$5,584 \cdot 10^{-2}$
3—7 (P_i)	1004,94	97 492	107 440	$3,358 \cdot 10^{8}$	$2,769 \cdot 10^{-2}$
3—8 (P_i)	954,598	97 492	107 965	$1,651 \cdot 10^{8}$	$1,604 \cdot 10^{-2}$
3—9	922,902	97 492	108 325	$8,906 \cdot 10^{7}$	$1,023 \cdot 10^{-2}$
3—10	901,491	97 492	108 582	$5,156 \cdot 10^{7}$	$6,960 \cdot 10^{-3}$
3—11	886,979	97 492	108 772	$3,158 \cdot 10^{7}$	$4,996 \cdot 10^{-3}$
3—12	876,047	97 492	108 917	$2,021 \cdot 10^{7}$	$3,711 \cdot 10^{-3}$
3—13	866,502	97 492	109 030	$1,343 \cdot 10^{7}$	$2,839 \cdot 10^{-3}$
3—14	859,839	97 492	109 119	9211	$2,224 \cdot 10^{-3}$
3—15	854,579	97 492	109 191	6490	$1,776 \cdot 10^{-3}$
3—16	850,240	97 492	109 250	4690	$1,443 \cdot 10^{-3}$
3—17	846,726	97 492	109 299	3466	$1,188 \cdot 10^{-3}$
3—18	843,796	97 492	109 340	2590	$9,916 \cdot 10^{-4}$
3—19	841,332	97 492	109 375	1964	$8,361 \cdot 10^{-4}$
3—20	839,240	97 492	109 406	1507	$7,118 \cdot 10^{-4}$

32.4. СПЕКТРЫ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ

На рис. 32.1—32.7 — приведены диаграммы энергетических уровней нейтральных атомов Li, H, Na, Cs, K, Cs и Hg. На диаграммах указаны наиболее интенсивные переходы с соответствующими им длины волн λ, нм. В табл. 32.4—32.7 приведены наиболее яркие линии излучения благородных газов Ne, Ar, Kr и Xe и даны их классификации. При составлении диаграмм и таблиц использовались [работы 6—7]. Звездочками отмечены линии, рекомендуемые в работе [3] в качестве стандартов длин волн. Символами E_n и E_m обозначены соответственно значения энергии нижнего и верхнего уровней, между которыми происходит переход.

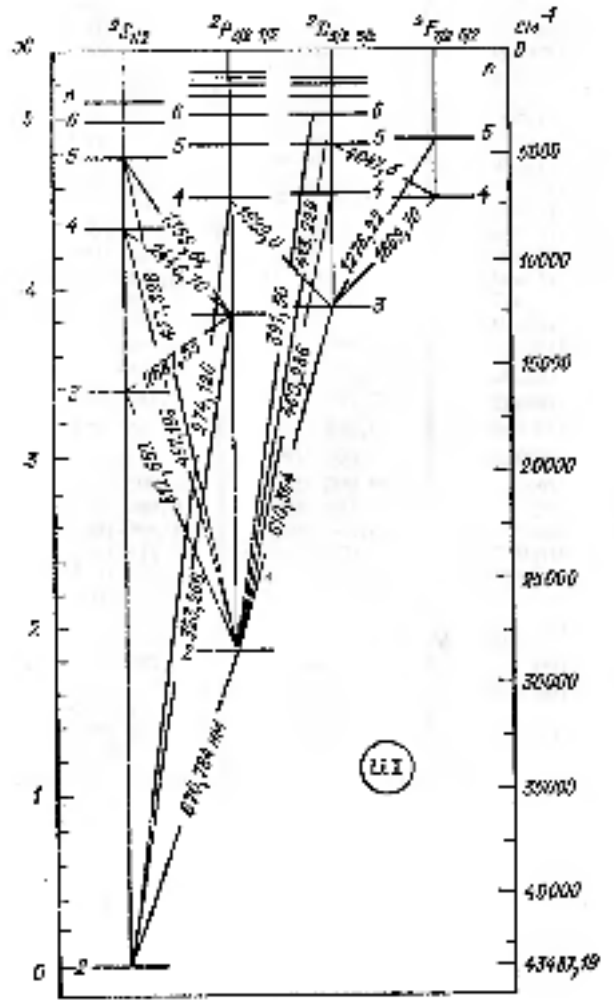


Рис. 32.1. Спектр лития [6].

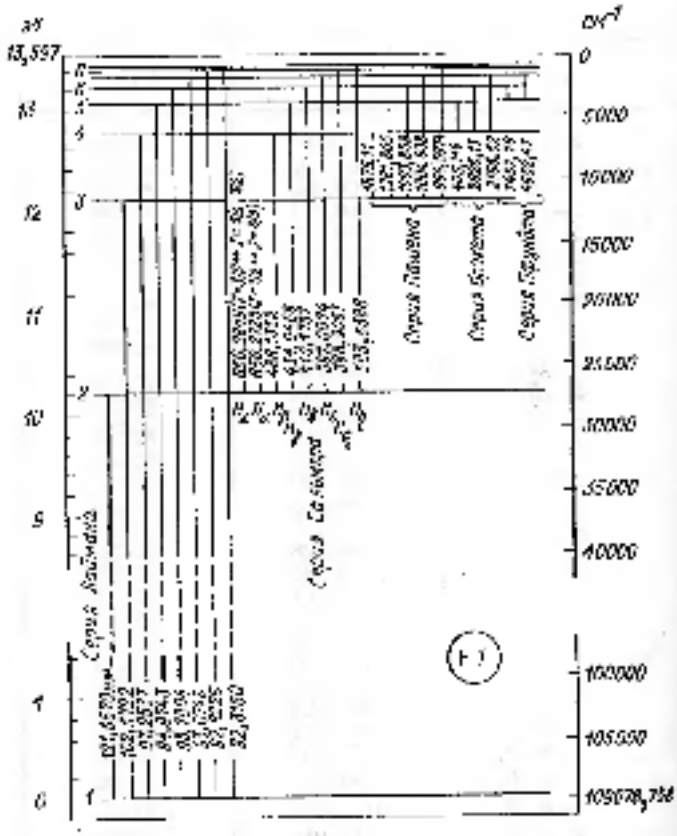


Рис. 32.2. Спектр атомарного водорода [6].

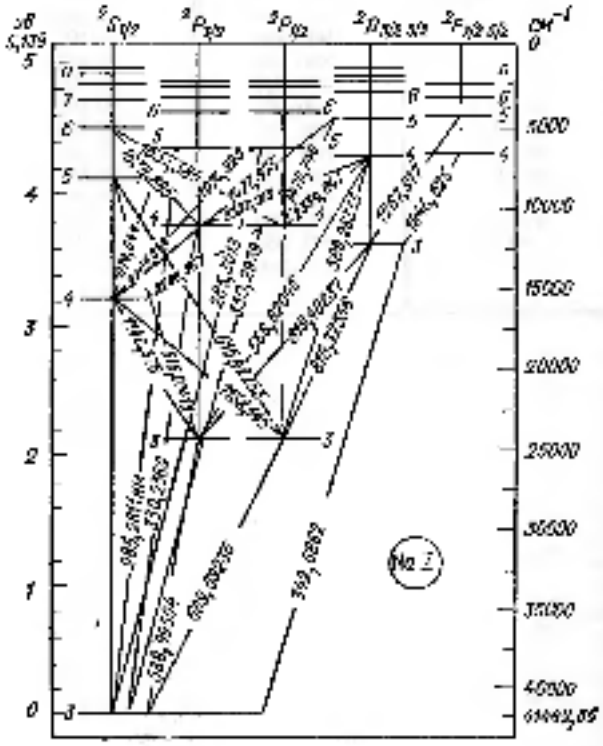


Рис. 32.3. Спектр натрия [5].

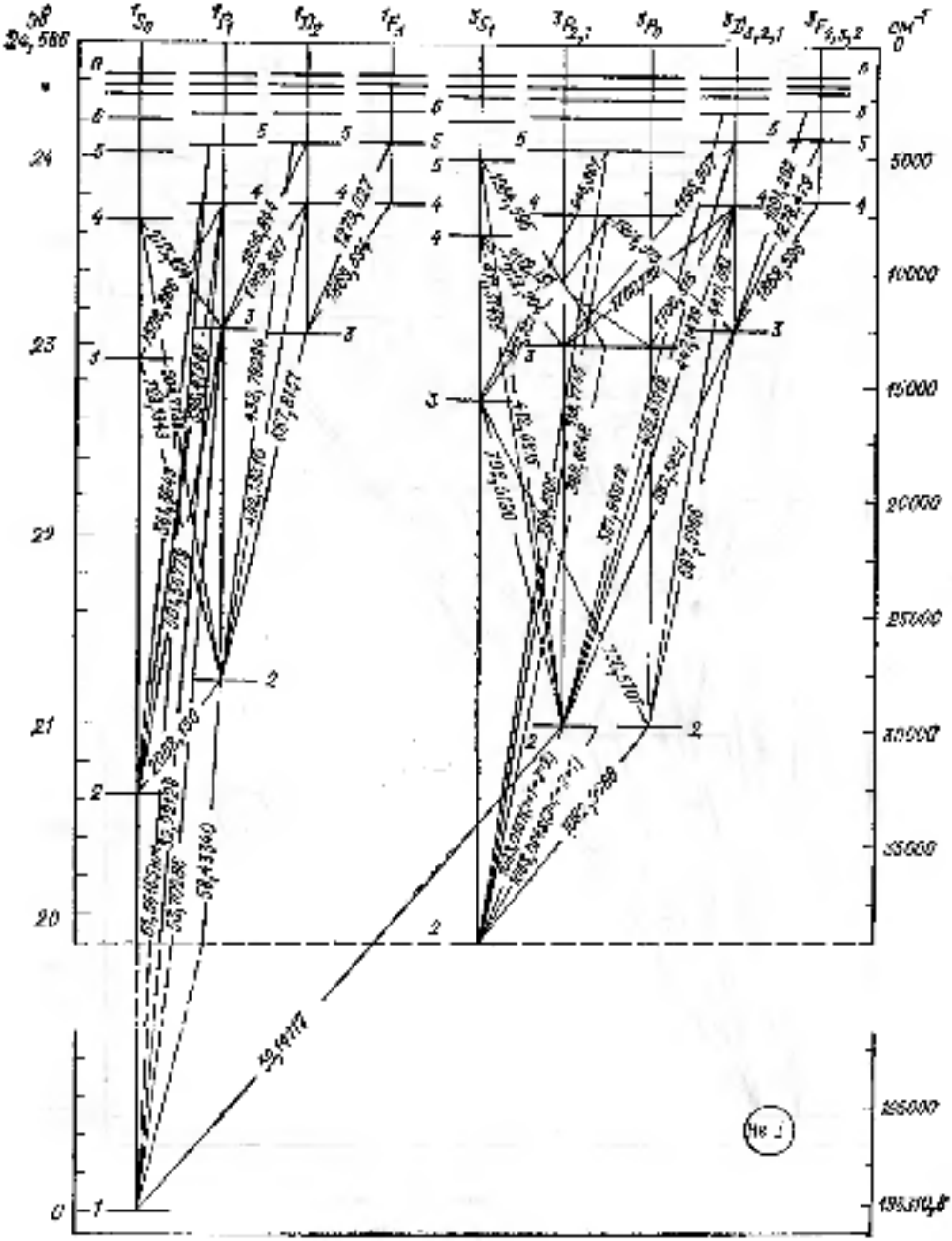


Рис. 32.4. Спектр гелия [5].

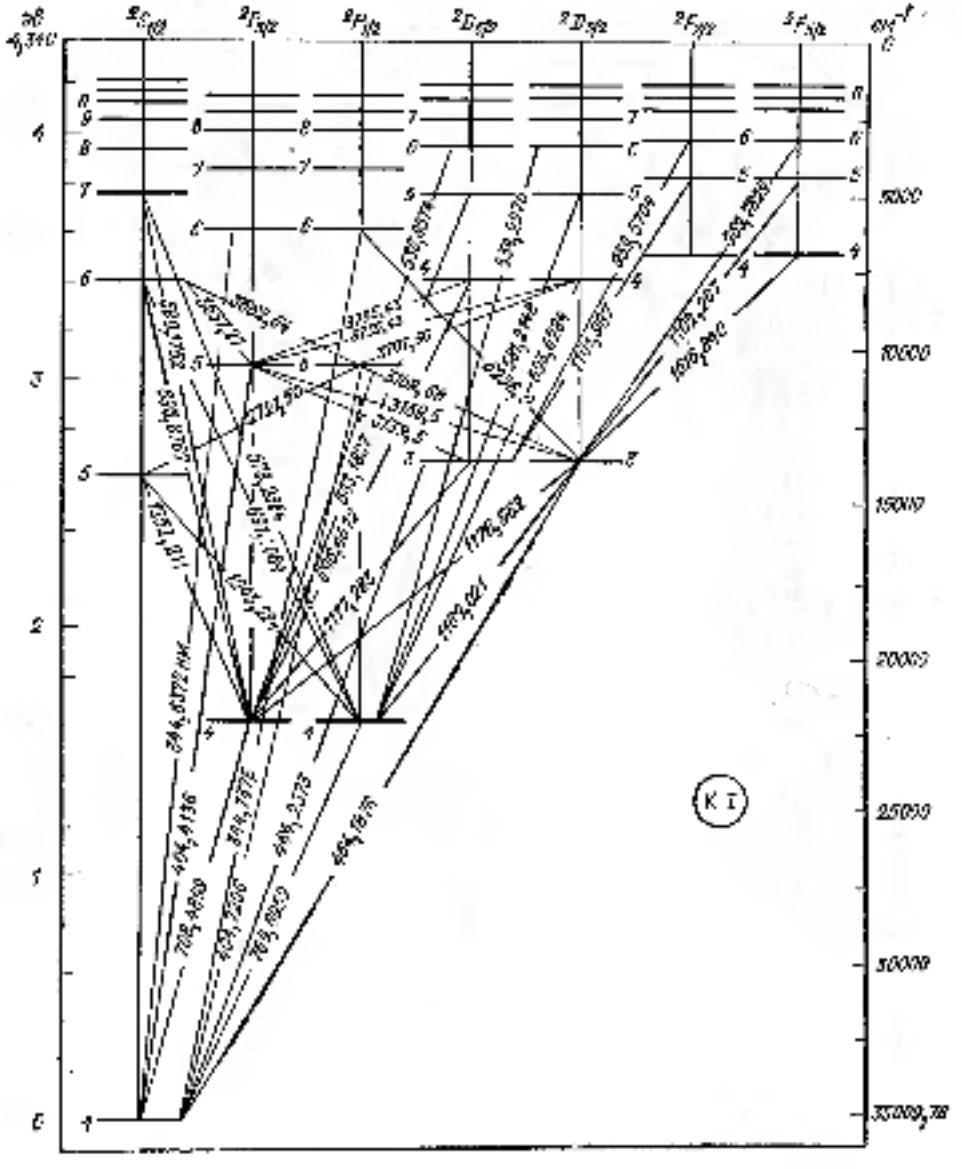


Рис. 32.5. Спектр калия [5].

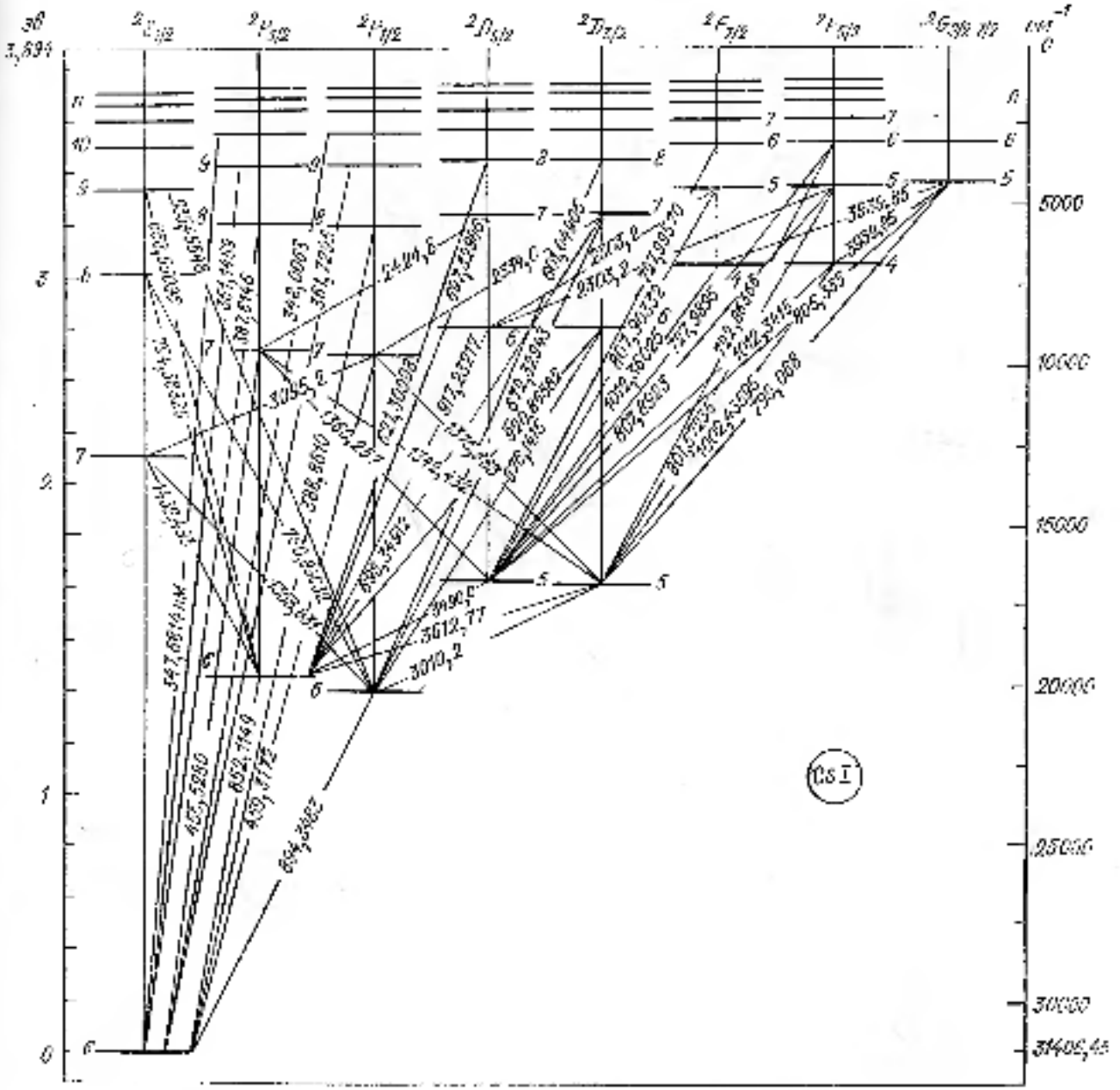


Рис. 32.6. Спектр цезия [6].

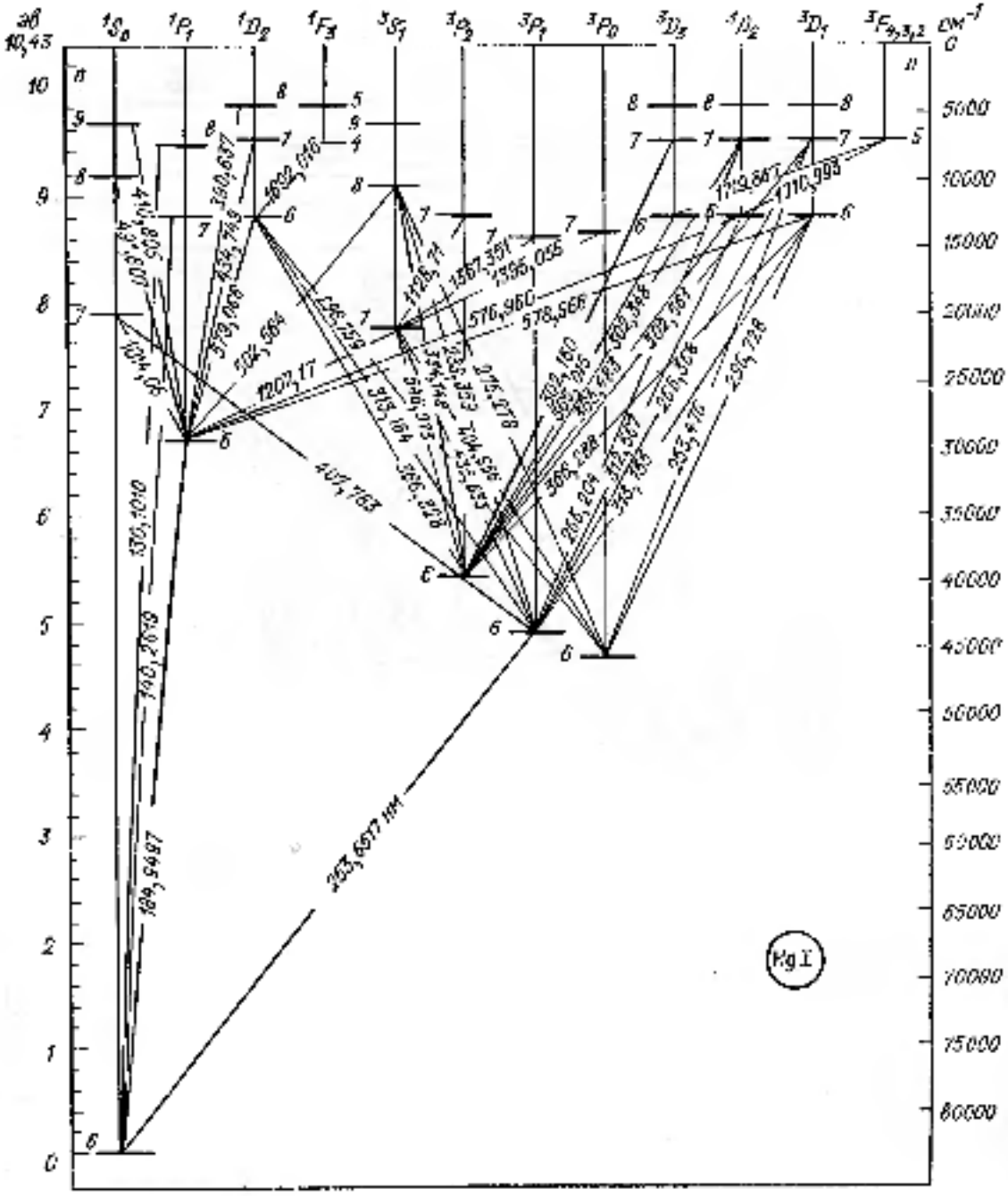


Рис. 32.1. Спектр ртути [5, 6].

Таблица 32.4

Спектральные линии Ne I [5]

λ, нм	$E_н$, эВ	$E_к$, эВ	Переход
2385,15	19,78	20,30	$4s'[^3/_2]_1 - 4p'[1^1/_2]_0$
2363,03	19,66	20,19	$4s[1^1/_2]_2 - 4p[2^1/_2]_3$
2252,97	19,66	20,21	$4s[1^1/_2]_0 - 4p[1^1/_2]_1$
1659,770	20,05	20,71	$3d[2^1/_2]_3 - 4f[3^1/_2]_{3,4}$
1842,343	20,14	20,81	$3d'[1^1/_2]_2 - 4f'[2^1/_2]_{2,3}$
1839,010	20,14	20,81	$3d'[2^1/_2]_3 - 4f'[3^1/_2]_{3,4}$
1838,517	20,14	20,81	$3d'[2^1/_2]_2 - 4f'[3^1/_2]_3$
1830,400	20,04	20,71	$3d[1^1/_2]_2 - 4f[2^1/_2]_{2,3}$
1828,255	20,04	20,71	$3d[2^1/_2]_1 - 4f[4^1/_2]_1$
1827,659	20,03	20,71	$3d[3^1/_2]_4 - 4f[4^1/_2]_{4,5}$
1809,271	20,02	20,71	$3d[1^1/_2]_1 - 4f[1^1/_2]_{1,2}$
1152,292	18,70	19,78	$3p'[1^1/_2]_2 - 5s'[1^1/_2]_1$
1140,924	18,69	19,78	$3p'[1^1/_2]_1 - 4s'[1^1/_2]_0$
1139,053	18,57	19,66	$3p[2^1/_2]_2 - 4s[1^1/_2]_2$
1117,739	18,56	19,66	$3p[2^1/_2]_3 - 4s[1^1/_2]_2$
1114,309	18,57	19,69	$3p[1^1/_2]_2 - 5s[1^1/_2]_1$
1064,454	18,63	19,76	$3p[1^1/_2]_1 - 4s'[1^1/_2]_1$
1059,812	18,61	19,76	$3p[1^1/_2]_0 - 4s'[1^1/_2]_1$
1056,241	18,94	20,14	$3p'[1^1/_2]_0 - 3d[1^1/_2]_1$
986,1424	18,38	19,66	$3p[1^1/_2]_1 - 4s[1^1/_2]_2$
932,652	18,71	20,04	$3p[1^1/_2]_1 - 3d[1^1/_2]_1$
920,176	18,69	20,04	$3p'[1^1/_2]_1 - 3d[1^1/_2]_1$
914,868	18,69	20,05	$3p'[1^1/_2]_1 - 3d[2^1/_2]_2$
885,38709	18,63	20,04	$3p[1^1/_2]_2 - 3d[1^1/_2]_2$
878,37509	18,72	20,14	$3p'[1^1/_2]_1 - 3d'[1^1/_2]_1$
874,05233	18,63	20,05	$3p[1^1/_2]_2 - 3d[2^1/_2]_3$
865,43937	18,70	20,14	$3p'[1^1/_2]_2 - 3d[2^1/_2]_3$
863,46172	18,61	20,05	$3p[1^1/_2]_1 - 3d[2^1/_2]_2$
837,70062	18,65	20,03	$3p[2^1/_2]_3 - 3d[3^1/_2]_4$
830,03245	18,55	20,05	$3p[2^1/_2]_3 - 3d[2^1/_2]_3$
808,24576	18,85	19,38	$3s'[1^1/_2]_2 - 3p[1^1/_2]_1$
743,88681	18,71	19,38	$3s'[1^1/_2]_0 - 3p[1^1/_2]_1$
724,51605	18,67	19,38	$3s[1^1/_2]_1 - 3p[1^1/_2]_1$
717,39380	18,85	19,67	$3s'[1^1/_2]_1 - 3p[2^1/_2]_1$
703,24126*	18,62	19,38	$3s[1^1/_2]_2 - 3p[1^1/_2]_1$
702,40000	18,85	19,61	$3s'[1^1/_2]_1 - 3p[1^1/_2]_1$
692,94672	18,85	19,63	$3s'[1^1/_2]_1 - 3p[1^1/_2]_2$
667,82704*	18,85	19,70	$3s'[1^1/_2]_1 - 3p'[1^1/_2]_2$
585,28925	18,85	19,71	$3s'[1^1/_2]_1 - 3p[1^1/_2]_1$
659,89529*	18,85	19,72	$3s'[1^1/_2]_1 - 3p'[1^1/_2]_1$
640,22480	18,62	19,55	$3s[1^1/_2]_2 - 3p[2^1/_2]_3$
638,29914*	18,67	19,61	$3s[1^1/_2]_1 - 3p[1^1/_2]_0$
630,44279*	18,62	19,57	$3s[1^1/_2]_2 - 3p[2^1/_2]_2$
626,64956*	18,71	19,69	$3s'[1^1/_2]_1 - 3p'[1^1/_2]_1$
621,72813*	18,62	19,61	$3s[1^1/_2]_2 - 3p[1^1/_2]_1$
616,35989*	18,71	19,72	$3s'[1^1/_2]_0 - 3p'[1^1/_2]_1$
614,30623*	18,62	19,63	$3s[1^1/_2]_2 - 3p[1^1/_2]_2$
609,61630*	18,67	19,70	$3s[1^1/_2]_1 - 3p'[1^1/_2]_1$
607,43377*	18,67	19,71	$3s[1^1/_2]_1 - 3p[1^1/_2]_0$
602,99971*	18,67	19,72	$3s[1^1/_2]_1 - 3p'[1^1/_2]_1$
597,55340*	18,62	19,69	$3s[1^1/_2]_2 - 3p'[1^1/_2]_1$
588,18950*	18,69	19,72	$3s[1^1/_2]_0 - 3p'[1^1/_2]_1$
585,24878*	18,65	19,96	$3s'[1^1/_2]_1 - 3p'[1^1/_2]_0$
576,44188	18,55	20,70	$3p[2^1/_2]_3 - 4d[1^1/_2]_2$
540,05616	18,67	19,96	$3s[1^1/_2]_1 - 3p'[1^1/_2]_0$
534,72834	18,38	20,70	$3p[1^1/_2]_1 - 4d[1^1/_2]_0$
534,10388	18,38	20,70	$3p[1^1/_2]_1 - 4d[1^1/_2]_1$
533,67775	18,38	20,71	$3p[1^1/_2]_1 - 4d[1^1/_2]_2$
495,70335	18,61	21,11	$3p[1^1/_2]_0 - 5d'[1^1/_2]_2$
488,49170	18,70	21,24	$3p'[1^1/_2]_2 - 7s'[1^1/_2]_1$
	18,57	21,11	$3p[2^1/_2]_2 - 5d'[2^1/_2]_3$

Продолжение табл. 32.4

λ, нм	$E_н$, эВ	$E_к$, эВ	Переход
482,73144	18,38	21,95	$3p[1^1/_2]_1 - 6s[1^1/_2]_2$
478,69970	18,35	21,14	$3p[2^1/_2]_2 - 7s[1^1/_2]_0$
471,53466	18,55	21,18	$3p[2^1/_2]_3 - 6d[3^1/_2]_4$
471,2066	18,55	21,18	$3p[2^1/_2]_2 - 6d[2^1/_2]_2$
471,00620	18,38	21,01	$3p[1^1/_2]_1 - 5d[1^1/_2]_0$
470,88619	18,38	21,01	$3p[1^1/_2]_1 - 5d[1^1/_2]_1$
470,43949	18,39	21,02	$3p[1^1/_2]_1 - 5d[1^1/_2]_2$
453,77545	18,38	21,11	$3p[1^1/_2]_2 - 5d'[2^1/_2]_2$
442,48196	18,38	21,18	$3p[1^1/_2]_1 - 6d[1^1/_2]_1$
443,25205	18,38	21,18	$3p[1^1/_2]_1 - 6d[1^1/_2]_2$
359,3540	16,85	20,30	$3s'[1^1/_2]_1 - 4p'[1^1/_2]_1$
339,35263	16,85	20,30	$3s'[1^1/_2]_1 - 4p'[1^1/_2]_2$
352,04714	16,85	20,37	$3s'[1^1/_2]_1 - 4p'[1^1/_2]_0$
351,51930	16,67	20,20	$3s[1^1/_2]_1 - 4p[2^1/_2]_2$
346,12154	16,67	20,21	$3s[1^1/_2]_1 - 4p[1^1/_2]_0$
347,25706	16,62	20,19	$3s[1^1/_2]_2 - 4p[2^1/_2]_3$
346,05781	16,71	20,29	$3s'[1^1/_2]_0 - 4p'[1^1/_2]_1$
344,77062	16,62	20,21	$3s[1^1/_2]_2 - 4p[1^1/_2]_1$
341,79031	16,67	20,30	$3s[1^1/_2]_1 - 4p'[1^1/_2]_1$
338,99109	16,62	20,30	$3s[1^1/_2]_2 - 4p'[1^1/_2]_1$
336,98376	16,62	20,30	$3s[1^1/_2]_2 - 4p'[1^1/_2]_2$
335,1744	16,67	20,37	$3s[1^1/_2]_1 - 4p'[1^1/_2]_0$
297,4714	16,62	20,79	$3s[1^1/_2]_2 - 5p[1^1/_2]_2$
264,742	16,62	21,30	$3s[1^1/_2]_2 - 8p[1^1/_2]_{2,3}$
74,3721	0,00	16,67	$2p^6\,{}^1S_0 - 3s[1^1/_2]_1$
73,5892	0,00	16,85	$2p^6\,{}^1S_0 - 3s'[1^1/_2]_1$
62,9729	0,00	19,69	$2p^6\,{}^1S_0 - 4s[1^1/_2]_1$
62,6819	0,00	19,78	$2p^6\,{}^1S_0 - 4s'[1^1/_2]_1$
61,9092	0,00	20,02	$2p^6\,{}^1S_0 - 3d[1^1/_2]_1$
61,8668	0,00	20,04	$2p^6\,{}^1S_0 - 3d[1^1/_2]_1$
61,0721	0,00	20,34	$2p^6\,{}^1S_0 - 3d'[1^1/_2]_1$
60,2712	0,00	20,56	$2p^6\,{}^1S_0 - 5s[1^1/_2]_1$

Таблица 32.5

Спектральные линии Ar I [5]

λ, нм	$E_н$, эВ	$E_к$, эВ	Переход
2036,616	13,27	13,86	$4p[^3/_2]_2 - 3d[^1/_2]_1$
2031,021	13,30	13,90	$4p'[1^1/_2]_1 - 3d[1^1/_2]_2$
1744,403	13,30	14,01	$4p'[1^1/_2]_2 - 3d[3^1/_2]_3$
	13,15	13,86	$4p'[1^1/_2]_1 - 3d[^1/_2]_1$
1730,226	14,10	14,91	$3d[2^1/_2]_2 - 4f[3^1/_2]_{3,4}$
1409,361	13,27	14,15	$4p[1^1/_2]_2 - 3d[1^1/_2]_1$
1391,047	14,04	14,90	$3d[3^1/_2]_3 - 4f[4^1/_2]_4$
1371,877	13,08	13,98	$4p[2^1/_2]_3 - 3d[3^1/_2]_3$
1367,657	13,33	14,23	$4p'[1^1/_2]_2 - 3d'[1^1/_2]_2$
1362,238	13,15	14,06	$4p[1^1/_2]_1 - 3d[2^1/_2]_2$
1350,399	13,09	14,01	$4p[2^1/_2]_2 - 3d[3^1/_2]_3$
1340,657	13,98	14,90	$3d[3^1/_2]_4 - 4f[4^1/_2]_5$
1336,738	13,17	14,10	$4p[1^1/_2]_0 - 3d[2^1/_2]_1$
1331,339	13,28	14,21	$4p'[1^1/_2]_1 - 3d'[2^1/_2]_2$
1327,300	13,30	14,24	$4p'[1^1/_2]_2 - 3d'[2^1/_2]_3$
1322,849	13,09	14,01	$4p[2^1/_2]_1 - 3d[3^1/_2]_2$
1300,847	13,30	14,25	$4p'[1^1/_2]_2 - 5s'[1^1/_2]_1$
1295,659	12,91	13,86	$4p[^1/_2]_0 - 3d[1^1/_2]_1$
1290,268	13,09	14,06	$4p[2^1/_2]_3 - 3d[2^1/_2]_3$
1248,763	13,08	14,07	$4p[2^1/_2]_2 - 5s[1^1/_2]_2$
1245,605	13,09	14,09	$4p[2^1/_2]_2 - 5s[1^1/_2]_1$
1243,919	12,91	13,90	$4p[1^1/_2]_1 - 3d[1^1/_2]_2$

λ, нм	$E_{ул}$, эВ	$E_{ув}$, эВ	Переход
1240,268	13,15	14,15	$4p[1/2]_1 - 3d[3/2]_1$
1211,220	13,08	14,10	$4p[3/2]_2 - 7d[2/2]_3$
1148,512	11,83	12,91	$4s'[1/2]_1 - 4p[1/2]_1$
1107,867	13,10	14,21	$4p[3/2]_2 - 3d'[3/2]_2$
1095,074	13,17	14,30	$4p[1/2]_2 - 3d'[1/2]_1$
1068,096	13,09	14,23	$4p[3/2]_2 - 3d'[1/2]_2$
1068,176	13,08	14,24	$4p[3/2]_1 - 3d'[3/2]_2$
1067,355	12,91	14,07	$4p[1/2]_1 - 5s[1/2]_0$
1047,810	12,91	14,09	$4p[1/2]_1 - 5s[1/2]_1$
1047,0051	11,72	12,91	$4s'[1/2]_1 - 4p[1/2]_1$
1000,210	13,98	15,21	$3d[3/2]_{2,4} - 5f[4/2]_{4,5}$
974,45010	11,83	13,09	$4s'[1/2]_1 - 4p[3/2]_2$
966,77841	11,62	12,91	$4s[3/2]_1 - 4p[1/2]_1$
935,4215	11,83	13,15	$4s'[1/2]_1 - 4p[1/2]_1$
922,44955	11,83	13,17	$4s'[1/2]_1 - 4p[1/2]_2$
912,29660	11,83	12,91	$4s[1/2]_2 - 4p[1/2]_1$
868,79438	11,72	13,15	$4s'[1/2]_0 - 4p[1/2]_1$
852,14428	11,83	13,28	$4s[1/2]_1 - 4p'[1/2]_1$
842,46473	11,62	13,09	$4s[1/2]_1 - 4p[3/2]_2$
840,82094	11,83	13,30	$4s'[1/2]_1 - 4p'[1/2]_2$
826,45221	11,83	13,33	$4s'[1/2]_1 - 4p'[1/2]_1$
811,53108	11,66	13,08	$4s[3/2]_1 - 4p[2/2]_2$
810,36826	11,62	13,15	$4s[1/2]_1 - 4p[1/2]_1$
801,47833	11,66	13,09	$4s[3/2]_1 - 4p[2/2]_2$
801,61566	11,62	13,17	$4s[1/2]_1 - 4p[1/2]_2$
794,81733	11,72	13,28	$4s'[1/2]_0 - 4p'[1/2]_1$
777,42064	11,72	13,33	$4s'[1/2]_0 - 4p'[1/2]_1$
772,37599	11,55	13,15	$4s[1/2]_0 - 4p[1/2]_1$
769,51066	11,66	13,17	$4s[3/2]_1 - 4p[1/2]_2$
751,16514	11,62	13,27	$4s[1/2]_1 - 4p[1/2]_0$
740,35685	11,83	13,48	$4s'[1/2]_1 - 4p'[1/2]_0$
738,39795	11,62	13,30	$4s[1/2]_1 - 4p'[1/2]_1$
706,72175	11,55	13,30	$4s[1/2]_0 - 4p'[1/2]_1$
696,51304	11,55	13,33	$4s[1/2]_0 - 4p'[1/2]_1$
666,40534	13,09	14,95	$4p[3/2]_2 - 4d'[3/2]_3$
614,54452	13,30	15,32	$4p'[1/2]_2 - 5d'[2/2]_1$
591,20851	12,91	15,00	$4p[1/2]_1 - 4d'[3/2]_0$
573,97207	13,15	15,31	$4p[1/2]_1 - 5d'[2/2]_2$
565,47054	12,91	15,10	$4p[1/2]_1 - 5d[1/2]_0$
549,5876	13,18	15,33	$4p[3/2]_2 - 6d[3/2]_1$
518,77507	12,91	15,30	$4p[1/2]_1 - 5d'[1/2]_2$
470,23155	11,83	14,46	$4s'[1/2]_1 - 6p[1/2]_1$
462,84490	11,83	14,51	$4s'[1/2]_1 - 5p[2/2]_2$
459,07664	11,83	14,52	$4s'[1/2]_1 - 5p'[1/2]_1$
452,23238	11,72	14,46	$4s'[1/2]_0 - 5p[1/2]_1$
451,07335	11,83	14,58	$4s'[1/2]_1 - 5p[1/2]_1$
444,5467	11,83	14,46	$4s'[1/2]_1 - 5p'[1/2]_1$
433,53381	11,83	14,69	$4s'[1/2]_1 - 5p'[1/2]_2$
430,37612	11,83	14,60	$4s'[1/2]_1 - 5p'[1/2]_0$
430,01011	11,62	14,51	$4s[1/2]_1 - 5p[2/2]_2$
427,21490	11,62	14,52	$4s[1/2]_1 - 5p[1/2]_1$
426,12868	11,62	14,53	$4s[1/2]_1 - 5p[1/2]_2$
425,90617	11,55	14,74	$4s[1/2]_0 - 5p'[1/2]_0$
425,11850	11,55	14,46	$4s[1/2]_0 - 5p[1/2]_1$
420,06746	11,55	14,50	$4s[1/2]_0 - 5p[2/2]_0$
419,53170	11,62	14,59	$4s[1/2]_1 - 5p[1/2]_0$
419,10288	11,72	14,66	$4s'[1/2]_0 - 5p'[1/2]_1$
416,18837	11,72	14,69	$4s'[1/2]_0 - 5p'[1/2]_1$
416,41790	11,66	14,62	$4s[3/2]_1 - 5p[1/2]_1$
415,85906	11,55	14,53	$4s[1/2]_0 - 5p[1/2]_1$
404,44160	11,62	14,69	$4s[1/2]_1 - 5p'[1/2]_1$
394,89785	11,55	14,69	$4s[1/2]_0 - 5p'[1/2]_1$
394,70648	11,55	14,69	$4s[1/2]_0 - 5p'[1/2]_1$
383,46788	11,83	15,06	$4s'[1/2]_1 - 6p[1/2]_1$
346,96370	11,83	15,22	$4s'[1/2]_1 - 6p'[1/2]_0$

λ, нм	$E_{ул}$, эВ	$E_{ув}$, эВ	Переход
340,05924	11,62	15,06	$4s[1/2]_1 - 6p[1/2]_0$
336,10785	11,62	15,20	$4s[1/2]_1 - 6p'[1/2]_2$
337,34926	11,62	15,30	$4s[1/2]_1 - 7p[1/2]_0$
331,98416	11,55	15,28	$4s[1/2]_0 - 7p[1/2]_2$
317,2961	11,55	15,45	$4s[1/2]_0 - 7p'[1/2]_1$
101,6066	0,00	11,62	$3p^5\,^2S_0 - 4s[1/2]_1$
101,5218	0,00	11,87	$3p^5\,^2S_0 - 4s'[1/2]_1$
89,4310	0,00	13,86	$3p^5\,^2S_0 - 3d[1/2]_1$
87,9949	0,00	14,09	$3p^5\,^2S_1 - 5s[1/2]_0$
87,6453	0,00	14,15	$3p^5\,^2S_0 - 3d[1/2]_1$
86,6806	0,00	14,30	$3p^5\,^2S_1 - 3d'[1/2]_1$
85,3103	0,00	14,50	$3p^5\,^2S_0 - 6s[1/2]_1$
85,2397	0,00	14,56	$3p^5\,^2S_1 - 3d[1/2]_1$
81,6466	0,00	15,18	$3p^5\,^2S_0 - 7s[1/2]_1$
81,0273	0,00	15,19	$3p^5\,^2S_1 - 5d[1/2]_1$

Таблица 32.6

Спектральные линии Kr I [5]

λ, нм	$E_{ул}$, эВ	$E_{ув}$, эВ	Переход
2190,031	11,55	12,11	$5p[1/2]_0 - 4d[1/2]_1$
1816,712	11,44	12,12	$5p[2/2]_2 - 4d[3/2]_1$
1695,571	11,53	12,26	$5p[1/2]_1 - 4d[2/2]_2$
1689,658	11,30	12,04	$5p[1/2]_1 - 4d[1/2]_1$
1669,040	11,44	12,18	$5p[2/2]_3 - 4d[3/2]_3$
1678,405	11,55	12,28	$5p[1/2]_0 - 4d[2/2]_1$
1533,529	11,30	12,11	$5p[1/2]_1 - 4d[1/2]_2$
1523,915	11,44	12,26	$5p[2/2]_2 - 4d[2/2]_2$
1473,446	11,44	12,38	$5p[2/2]_1 - 4d[2/2]_1$
1442,693	11,53	12,38	$5p[1/2]_1 - 6s[1/2]_1$
1363,422	11,44	12,30	$5p[2/2]_2 - 6s[1/2]_1$
1302,228	11,44	12,35	$5p[2/2]_2 - 4d[1/2]_1$
1317,738	11,44	12,38	$5p[2/2]_2 - 6s[1/2]_1$
1287,500	12,18	13,14	$4d[3/2]_3 - 4f[4/2]_4$
1220,439	12,12	13,14	$4d[3/2]_2 - 4f[4/2]_5$
1101,943	11,30	12,35	$5p[1/2]_1 - 6s[1/2]_1$
985,724	11,55	12,80	$5p[1/2]_0 - 4d'[1/2]_2$
975,1769	10,03	11,30	$5s[1/2]_1 - 5p[2/2]_1$
892,86950	9,91	11,30	$5s[1/2]_0 - 5p[1/2]_1$
877,07490	10,03	11,44	$5s[1/2]_1 - 5p[2/2]_2$
850,88700	10,03	12,10	$5s'[1/2]_1 - 5p'[1/2]_2$
829,81077	10,03	11,53	$5s[1/2]_1 - 5p[1/2]_1$
828,10416	10,03	12,14	$5s'[1/2]_1 - 5p'[1/2]_1$
826,35398	10,03	12,14	$5s'[1/2]_1 - 5p'[1/2]_2$
819,01543	10,03	11,53	$5s[1/2]_1 - 5p[1/2]_0$
811,2900	9,91	11,44	$5s[1/2]_0 - 5p[2/2]_2$
810,43663	9,91	11,44	$5s[1/2]_0 - 5p[2/2]_1$
810,402	11,41	12,97	$5p[2/2]_3 - 5d[3/2]_3$
805,95018	10,56	12,10	$5s'[1/2]_0 - 5p'[1/2]_1$
785,48215	10,56	12,14	$5s'[1/2]_0 - 5p'[1/2]_1$
769,45188	9,91	11,53	$5s[1/2]_1 - 5p[1/2]_1$
760,15445	9,91	11,55	$5s[1/2]_1 - 5p[1/2]_0$
758,74130	10,03	11,67	$5s[1/2]_1 - 5p[1/2]_0$
645,02910	11,44	13,36	$5d[2/2]_3 - 6d[3/2]_3$
642,10785*	11,44	13,37	$5p[2/2]_2 - 6d[3/2]_3$
605,61280	11,30	13,35	$5p[1/2]_1 - 6d[1/2]_1$
588,38506*	10,03	12,10	$5s[1/2]_1 - 5p'[1/2]_0$
587,09153*	10,03	12,14	$5s[1/2]_1 - 5p'[1/2]_1$
583,29600	11,44	13,57	$5p[2/2]_1 - 7d[3/2]_3$
564,19820*	10,56	12,76	$5s'[1/2]_0 - 6p[1/2]_1$
557,02590*	9,91	12,14	$5s[1/2]_0 - 5p'[1/2]_1$
556,22254	9,91	12,14	$5s[1/2]_0 - 5p'[1/2]_2$

Продолжение табл. 32,6

λ, нм	E_k, эВ	E_p, эВ	Переход
450,23546*	10,03	12,78	$5s[1^1/_2]_1 - 6p[2^1/_2]_2$
446,78801*	10,03	12,81	$5s[1^1/_2]_1 - 6p[1^1/_2]_1$
440,50177*	10,03	12,82	$5s[1^1/_2]_1 - 6p[1^1/_2]_2$
442,31906	10,04	13,44	$5s'[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_1$
430,99670*	10,04	13,46	$5s'[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_2$
437,64219*	10,03	12,86	$5s[1^1/_2]_1 - 6p[1^1/_2]_0$
436,26427*	9,91	12,76	$5s[1^1/_2]_2 - 6p[1^1/_2]_1$
435,13603*	10,04	13,49	$5s'[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_0$
431,96784*	9,91	12,78	$5s[1^1/_2]_2 - 6p[2^1/_2]_1$
431,85527*	9,91	12,78	$5s[1^1/_2]_2 - 6p[1^1/_2]_2$
428,20766	9,91	12,81	$5s[1^1/_2]_2 - 6p[1^1/_2]_1$
427,39700	9,91	12,82	$5s[1^1/_2]_2 - 6p[1^1/_2]_2$
417,34241	10,00	13,32	$5s[1^1/_2]_1 - 7p[1^1/_2]_0$
323,17217	9,91	13,53	$5s[1^1/_2]_2 - 8p[2^1/_2]_3$
123,5830	0,00	10,03	$4p^6\,{}^1S_0 - 5s[1^1/_2]_1$
116,4868	0,00	10,64	$4p^6\,{}^1S_0 - 5p'[1^1/_2]_1$
107,0890	0,00	12,04	$4p^6\,{}^1S_0 - 4d[1^1/_2]_1$
103,3542	0,00	12,35	$4p^6\,{}^1S_0 - 5d[1^1/_2]_1$
100,1046	0,00	12,38	$4p^6\,{}^1S_0 - 6s[1^1/_2]_1$
96,334	0,00	12,87	$4p^6\,{}^1S_0 - 5p[1^1/_2]_1$
95,342	0,00	13,00	$4p^6\,{}^1S_0 - 4f'[1^1/_2]_1$
94,652	0,00	13,10	$4p^6\,{}^1S_0 - 5d[1^1/_2]_1$

Таблица 32,7

Спектральные линии Xe I [5]

λ, нм	E_k, эВ	E_p, эВ	Переход
1932,272	9,56	10,10	$6p[1^1/_2]_1 - 7s[1^1/_2]_1$
1103,925	10,16	11,27	$5d[2^1/_2]_2 - 4f[3^1/_2]_3$
1049,631	8,44	9,88	$6s[1^1/_2]_1 - 6p[1^1/_2]_1$
992,3192	8,44	9,29	$6s[1^1/_2]_1 - 6p[2^1/_2]_2$
979,9799	8,31	9,58	$6s[1^1/_2]_2 - 6p[1^1/_2]_1$
916,3084	8,44	9,79	$6s[1^1/_2]_1 - 6p[1^1/_2]_2$
904,5226	8,31	9,69	$6s[1^1/_2]_2 - 6p[2^1/_2]_2$
895,9254	8,44	9,82	$6s[1^1/_2]_1 - 6p[1^1/_2]_0$
850,232	9,58	10,98	$6p[1^1/_2]_2 - 5d[1^1/_2]_1$
861,9419	8,31	9,72	$6s[1^1/_2]_2 - 6p[2^1/_2]_0$
873,939	9,58	11,00	$6p[1^1/_2]_1 - 6d[1^1/_2]_1$
864,854	9,57	11,00	$6s'[1^1/_2]_1 - 7p[1^1/_2]_1$
842,9193	8,31	9,79	$6s[1^1/_2]_2 - 6p[1^1/_2]_1$
834,6823	9,57	11,05	$6s'[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_2$
828,01103	8,44	9,93	$6s[1^1/_2]_1 - 6p[2^1/_2]_0$
826,4519	9,57	11,07	$6s'[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_0$
823,10348	8,31	9,82	$6s[1^1/_2]_2 - 6p[1^1/_2]_2$
820,6311	9,45	10,96	$6s'[1^1/_2]_0 - 6p'[1^1/_2]_1$
796,7361	9,45	11,00	$6s'[1^1/_2]_0 - 7p[1^1/_2]_1$
788,7095	9,57	11,14	$6s'[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_1$
764,9035	9,45	11,07	$6s'[1^1/_2]_0 - 6p'[1^1/_2]_1$
711,9096	9,72	11,46	$6p[2^1/_2]_3 - 7d[3^1/_2]_4$
696,2155	9,10	11,43	$6p[2^1/_2]_2 - 7d[3^1/_2]_3$
616,9705	9,58	11,60	$6p[1^1/_2]_1 - 7d[1^1/_2]_2$
671,9069	9,72	11,65	$6p[2^1/_2]_3 - 8d[3^1/_2]_4$
668,2820	9,69	11,69	$6p[2^1/_2]_2 - 8d[3^1/_2]_3$
582,3900	9,45	11,57	$6s'[1^1/_2]_0 - 6j[1^1/_2]_1$
492,31522	9,44	10,95	$6s[1^1/_2]_1 - 7p[2^1/_2]_2$
491,6506	8,44	10,96	$6s[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_1$
484,3294	8,44	10,99	$6s[1^1/_2]_1 - 7p[1^1/_2]_1$
482,9709	8,44	11,00	$6s[1^1/_2]_1 - 7p[1^1/_2]_0$
480,7019	8,44	11,01	$6s[1^1/_2]_1 - 7p[2^1/_2]_1$
473,44524	8,44	11,05	$6s[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_0$
469,7020	8,31	10,95	$6s[1^1/_2]_2 - 7p[2^1/_2]_2$
467,1226	8,31	10,97	$6s[1^1/_2]_2 - 7p[2^1/_2]_3$

Продолжение табл. 32,7

λ, нм	E_k, эВ	E_p, эВ	Переход
462,42767	8,31	10,99	$6s[1^1/_2]_2 - 7p[1^1/_2]_1$
458,27474	8,44	11,14	$6s[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_0$
452,48606	8,31	11,05	$6s[1^1/_2]_2 - 6p'[1^1/_2]_1$
450,09772	8,31	11,07	$6s[1^1/_2]_2 - 6p'[1^1/_2]_0$
448,39394	8,44	11,26	$6s[1^1/_2]_1 - 4f[1^1/_2]_2$
419,33290	8,31	11,27	$6s[1^1/_2]_2 - 4f[2^1/_2]_3$
407,88207	8,44	11,47	$6s[1^1/_2]_1 - 8p[1^1/_2]_0$
146,9610	0,00	8,44	$5p^6\,{}^1S_0 - 6s[1^1/_2]_1$
129,5587	0,00	9,57	$5p^6\,{}^1S_0 - 6s'[1^1/_2]_1$
125,6913	0,00	9,92	$5p^6\,{}^1S_0 - 5d[1^1/_2]_1$
119,2040	0,00	10,40	$5p^6\,{}^1S_0 - 5d[1^1/_2]_1$

Таблица 32,8

Резонансные линии ионов изоэлектронного ряда водорода [8, 9] и гелия [9, 10]

Атом, ион		λ, нм	Атом, ион		λ, нм
H	I	121,567	He	I	58,433
He	II	30,378	Li	II	19,926
Li	III	13,500	Be	III	10,495
Be	IV	7,593	B	IV	6,091
B	V	4,859	C	V	4,098
C	VI	3,374	N	VI	2,879
N	VII	2,478	O	VII	2,100
O	VIII	1,897	F	VIII	1,681
F	IX	1,498	Ne	IX	1,364
Ne	X	1,213	Mg	XI	0,9168
Na	XI	1,002	Al	XII	0,7757
Mg	XII	0,8421	S	XV	0,5038
Al	XIII	0,7172	Ca	XIX	0,3177
Si	XIV	0,6182	Fe	XXV	0,1850
S	XVI	0,4726			

32.5 Стандарты длины волны

Решением XI Генеральной конференции по мерам и весам 1960 г. в качестве первичного эталона длины принята длина волны (в вакууме) оранжевой линии чистого изотопа криптона ^{86}Kr, соответствующей переходу $2p_{10} - 5d_5$, $\lambda_{Kr} = 605{,}6$ нм. В соответствии с этим международная единица длины *метр* определяется как величина, равная 1 650 763,73 λ_{Kr}. Первичный эталон длины волны идентичен первичному эталону длины в 1 метром только равен 10^{-10} м.

Первичный эталон длины волны в вакууме и воздухе равен соответственно $\lambda_{вак} = 605{,}7802117$ *нм*, $\lambda_{возд} = 605{,}612525$ *нм*.

Установлены стандартные условия возбуждения криптона: а) чистота изотопа ^{86}Kr должна быть не ниже 99%; б) температура самой холодной точки лампы должна быть не выше тройной точки азота, т. е. 63°К, и соответственно с этим давление криптона должно быть 0,02 *мм рт. ст.* или ниже; в) плотность тока в лампе должна быть не выше 1 *ма/мм²*. При этих условиях смещение линии криптона меньше, чем ±0,001 *нм*, по отношению к величине принятого первичного стандарта.

Дальнейшая классификация стандартов длин волн выделяется сравнительно небольшая группа линий класса А, длины волн которых воспроизводятся с высокой точностью. Они могут заменять первичный стандарт и тем обеспечить интерферометрические измерения

Стандартные длины волн Fe I ($\lambda_{стд}$) [7, 11]
Интенсивности линий I взяты из работы [5]

λ, нм	I	λ, нм	I	λ, нм	I	λ, нм	I
1197,9067	8	710,7462	—	613,7003		516,74905	40
1188,4097	—	706,8413	40	613,3021	20	516,02841	4
1188,2661	7	702,4066	10	606,5988	15	515,19143	—
1178,3275	6	701,0062	60	602,7057	—	515,09495	6
1173,9588	8	696,8631	—	595,0107	—	514,29320	6
1163,8570	7	697,3896	100	591,6252	—	514,17494	—
1150,7597	—	694,5206	150	570,96864	10	513,94702	20
1150,3080	5	693,0807		570,15511	7	513,02578	10
1143,9129	15	680,6851	10	567,88947	10	513,14754	—
1149,2275	6	675,0185	100	562,45501	10	512,73021	6
1137,4096	—	670,3574	10	561,06421	50	512,37251	6
1111,9869	10	667,7894	100	561,53039	—	511,04159	10
1039,5911	8	666,3444	80	560,29529	10	510,76439	—
1034,0968	—	660,9117	50	558,67034	40	510,74505	6
987,9004	6	660,3875	60	557,28511	30	509,87030	8
976,2371	—	659,2920	300	556,97275	20	508,33213	7
935,9415	—	657,6024	30	550,67524	18	507,97426	—
921,0033	6	657,4231	—	550,14095	12	507,62279	—
914,6136	—	654,0245	200	549,75196	15	506,87750	10
911,8892	25	651,8374	20	545,56131	40	505,16379	10
906,9415	30	649,8940	5	544,05197	40	504,09253	15
903,8724	50	649,4985	1000	543,45258	30	504,17585	10
899,9554	200	648,1877	20	542,90899	90	504,10747	7
897,5410	10	647,5762	12	540,57781	40	502,81231	4
894,3078	—	646,2730	30	539,71311	40	501,20712	12
886,6402	—	643,0832	300	539,31752	10	500,61254	30
883,8434	30	642,1355	400	537,14926	60	500,27998	6
882,4227	250	641,1675	400	536,54082	—	499,41390	8
880,4137	10	640,8076	60	534,10255	20	498,55539	7
875,7192	95	640,0321	—	533,90371	12	496,60019	8
868,9642	1500	640,0313	800	533,29020		495,71059	60
867,1753	60	639,3905	400	532,83336	15	493,73064	20
863,1907	600	638,6747	—	532,80413	50	493,01144	—
862,1613	10	635,8696	—	532,41804	30	494,63044	—
861,1407	40	635,3035		532,20450		493,90808	4
858,2918	15	634,4104	—	530,79603	5	493,68208	10
851,5122	20	633,6833		530,24073	10	492,47753	3
851,4059	150	633,5337	10	528,36283	18	492,05486	60
846,8414	300	632,2101	—	528,17070	10	491,90003	30
838,7780	1200	631,6023	10	527,31708	—	491,06253	9
836,3844	20	630,1510	15	527,03002	30	490,37159	12
832,7063	1200	629,7798		526,96402	60	489,34980	50
829,3869	20	628,0621	—	526,65526	70	489,07816	25
827,5136	8	626,5140	—	526,30134	6	487,82182	12
820,0681	—	626,1367	—	525,06150	6	487,21441	40
807,5156	—	625,4263	6	524,24850	5	487,13244	25
804,7521	15	625,2701	20	523,20474	40	486,97486	15
791,2867	6	624,0329	15	522,71511	40	485,50819	—
774,8278	195	624,0169	—	522,09140	15	484,40158	—
772,3213	—	623,9350	—	521,73964	5	483,95610	—
765,4301	80	623,0728	25	521,62770	10	478,50357	7
756,3797	50	621,9256	—	521,51871	6	478,87605	—
744,3019	—	621,3435	—	520,86007	7	478,08106	5
741,8673	—	620,0219	—	520,40640	5	477,17008	—
740,1650	—	619,1703	20	520,25395	8	474,15791	—
726,4842	—	617,3341	—	519,87149	—	474,10434	—
722,3608	12	616,6364		519,49441	10	473,67807	12
721,9880	—	615,7732	—	519,23509	30	473,30056	—
720,7116	500	615,1623	—	519,14015	20	471,02864	—
718,2890		614,1741	—	517,13987	20	470,74908	—
714,2177	—	613,7697	18	516,89003	—	470,72807	8

λ, нм	I	λ, нм	I	λ, нм	I	λ, нм	I
469,14144	6	432,07555	—	412,18050	5	391,36339	4
468,35640	—	432,07047	35	412,09187	—	391,08461	·
468,02983	—	431,50872	10	411,85184	15	390,79371	4
466,81422	6	430,53771	4	411,44486	—	390,54814	5
465,19756	—	430,79048	35	410,09053	9	390,39011	5
465,46020		430,54545	—	410,74517	42	390,29484	20
464,74370	6	430,46476	—	410,07389	—	389,97086	20
463,29146	—	430,21882	—	409,53571	·	389,80111	10
463,01248		429,99400	16	409,11561	—	389,74515	—
462,50527	3	429,80408	3	407,98411		389,56579	25
461,87704	·	429,41271	16	407,83503	—	389,39141	·
460,29446	9	428,81464	—	407,47889	—	389,33935	7
460,20040	—	428,54153	3	407,17390	60	388,95165	20
459,53627	—	428,24057	12	406,72738	—	388,70504	—
459,28947	6	427,17634	35	406,35563	45	388,62870	40
457,47225		427,11589	20	406,24440	10	388,55121	6
454,78506	4	426,59675	—	405,87562		388,43109	—
454,70206		426,04704	35	405,73456	—	387,85745	100
453,11520	6	425,83174	—	405,50376	—	387,80206	60
452,86175	18	425,07606	25	404,58147	60	387,00414	—
451,75269	—	425,01248	25	404,46125	6	387,37624	6
451,41806	—	424,89975	4	403,91894	—	387,25032	60
449,45669	12	424,52584	6	403,01855	—	387,17513	4
449,00852	—	423,59433	25	402,18596	12	386,91105	4
448,87416	3	423,36089	18	401,71534	6	386,72184	7
448,32503	6	422,97561	—	400,97154	10	386,66466	30
448,21720	4	422,64203	—	400,72735	6	385,93152	300
448,01397	—	422,22181	12	400,52440	25	385,92143	10
447,60206	10	421,97641	12	400,10727	—	385,63731	50
446,85742	12	421,51654	6	400,04596	·	385,25752	6
446,47051	—	421,03497	16	399,80154	10	385,08193	12
446,18944	6	420,71298	—	399,73952	15	384,90694	40
445,91213	16	420,66585	3	399,55861	—	384,18023	8
445,67894	—	420,39857	10	399,41166	—	384,51705	5
445,43835	5	420,20320	30	399,03776	—	384,37209	8
444,77212	9	419,90981	20	398,38503	10	384,10499	60
444,31963	7	419,83016	20	398,17743	7	384,04307	80
444,23428	12	419,56205		397,77437	12	383,92584	7
443,96840	—	419,14358	16	397,13250	9	383,71370	—
443,69246		418,78016	20	396,92205	30	383,42241	100
443,51500	—	418,70430	20	396,74231	6	381,33103	6
443,25729		418,48941	10	396,60046	10	381,08638	—
443,06476	6	418,27846	—	396,45173		383,07607	—
442,73118	10	418,17571	15	396,67796	12	382,07657	
442,25703	6	417,77049	4	395,64574	9	382,78250	70
441,51269	20	417,56385	10	395,31146	—	382,75746	—
440,84176	6	417,49107	6	395,26015	8	382,58834	200
440,77130	5	417,39230	—	394,99658	10	382,44455	50
440,47526	30	417,33176	—	394,87778	10	382,40763	·
440,14450	·	417,27454	—	394,48624	—	382,16367	—
439,09412	4	417,09044	—	394,33414	—	382,11807	10
438,99407	·	415,58091	12	394,24116	6	382,04274	200
438,78939	4	415,45021	12	394,06797	6	381,63421	—
438,35473	45	415,21704	—	393,73310	·	381,58150	100
437,53318	9	414,76719	10	393,58143	8	381,45845	—
436,97745	7	414,38703	30	393,42581	25	381,29658	40
436,79069	·	414,34174	15	392,79210	30	380,87306	4
436,70811	5	413,99288	—	392,36450	—	380,75392	7
435,85637	—	413,46798	12	392,29134	25	380,68952	10
436,27371	9	413,29024	8	392,02601	20	380,53150	12
435,15465	·	413,20403	25	391,50681	—	380,11947	—
434,88819	—	412,76113	7	391,83174	·	379,95406	50
434,65571	·	412,58830	—	391,71834	8	379,85131	40
434,70481	10						

λ, нм	I	λ, нм	I	λ, нм	I	λ, нм	I
379,79502	12	360,88009	100	335,39806	6	309,08986	20
379,50845	60	360,66821	20	335,24042	—	309,38063	—
379,00943	12	360,33008	10	335,01117	8	309,15786	20
378,91783	—	358,94063	8	337,90700	6	308,37430	20
378,78895	50	358,69801	30	337,20711	—	307,57214	25
378,66781	8	358,57068	20	337,07854	10	305,81725	8
377,89963	—	358,53200	30	335,91675	—	306,79457	30
377,74021	—	358,46627	8	335,64030	—	306,71196	8
377,64503	6	358,16489	—	335,52287	6	306,06849	—
377,45266	6	357,12265	—	335,17157		305,90871	100
376,71969	80	357,00666	100	335,15939	—	305,74471	40
376,55414	20	356,89776	—	334,70271	6	305,52635	12
376,37910	100	356,03847	60	334,22163	—	304,76090	100
376,14103	—	355,85170	30	334,06185	6	304,26657	15
376,03375	6	355,41196	—	333,76684	6	304,20915	15
375,52350	150	354,07111	—	333,57089	4	304,17460	15
375,36134	8	352,64695	—	333,42201	4	304,16366	10
374,94875	200	352,61576	15	333,16133	4	304,04281	15
374,89639	60	352,60415	—	332,88987	5	303,77869	—
374,59013	40	352,42417	—	332,74970	—	303,73901	80
374,55621	100	352,19640	25	332,45389	4	303,01494	15
374,33040	20	351,38196	30	332,37375	7	302,92351	—
373,83079	10	350,66004	—	331,47420	7	302,64037	15
373,71333	150	350,48836	—	330,50715	20	302,58442	50
373,46679	200	350,05076	—	329,81331	6	302,46337	15
373,33191	40	349,78420	40	329,25910	8	302,10743	150
373,13761	—	349,52679	8	329,06690	5	302,00105	200
373,03894	—	349,05749	100	328,67541	20	302,04518	100
372,66696	—	348,63416	7	328,40888	5	301,89848	15
372,78411	50	348,30000	—	328,02613	8	301,76288	15
372,43796	8	347,67036	40	327,14713	4	301,41747	—
372,25149	50	347,54911	70	327,15812	—	300,96707	25
372,20263	—	347,13460	6	327,10014	15	300,90345	—
371,55365	250	347,12672	—	326,56182	15	300,81399	60
371,84092	—	346,85474	—	326,50471	8	300,72832	—
371,59136	—	346,65001	—	326,33697	—	300,51400	8
371,12243	—	346,38021	60	325,71940	8	300,30323	10
370,99464	75	346,33044	—	325,43626	10	300,09489	100
370,79216	8	346,23539	—	325,20160	—	300,04527	8
370,78931	20	345,99700	10	325,06250	—	299,95125	30
370,55671	100	345,19166	10	324,64816	—	299,63864	—
370,44635	10	345,03304	10	324,00054	6	299,45033	—
368,74589	40	344,72797	8	323,62231	6	299,44281	100
368,70992	—	344,51609	20	323,40138	7	299,03933	5
368,41102	15	344,38775	50	322,91221	—	298,84730	—
368,30662	10	344,26709	—	322,07137	-	298,72923	10
367,90152	60	344,06689	75	321,43964	8	298,54589	3
367,86620	3	344,06069	100	320,07884	—	296,35714	125
367,76300	12	342,81948	8	319,82368	10	296,14459	20
367,63136	6	342,71213	90	319,16569	7	297,32368	60
366,95229	10	342,42801	10	318,48966	7	297,31336	50
365,05188	8	342,26583	7	318,26798	4	296,94759	10
365,54671	—	341,78428	12	318,07549	5	296,89606	5
365,14699	20	341,55316	—	316,13728	—	296,69567	125
365,02811	-	341,31399	15	314,84069	—	296,52561	20
364,93190	12	340,74611	20	314,32134	—	295,99029	10
364,91124	—	340,68021	6	314,26908	—	295,73860	30
364,78439	100	340,43357	6	313,41115	10	295,46543	5
364,03916	15	340,15280	6	312,93349	5	295,35411	60
363,82998	12	339,93356	15	312,49364	6	294,78773	60
363,20769	—	339,75403	—	311,92955	6	294,10438	15
363,14646	125	339,60774	2	311,60357	12	293,69049	60
362,31978	8	339,45851	5	310,66667	20	292,96195	—
362,14640	15	339,20740	15	310,03064	20	292,90085	25
361,87050	125	339,23068	8	309,99605	15	292,36012	—

λ, нм	I	λ, нм	I	λ, нм	I	λ, нм	I
292,09815	5	275,73170	10	258,04542	—	239,38262	25
291,43055	—	275,63295	20	258,00002	·	239,26249	30
291,22582	—	275,52677	30	257,66016	—	239,14274	15
291,21589	20	275,44973	·	256,49006	·	238,72510	30
290,13820	5	275,40334	—	256,18662	—	238,40864	40
289,30372	6	275,01415	25	256,05375	—	238,30047	12
289,15055	10	274,75504	—	255,53043		238,33045	9
288,38892	—	274,43287	8	254,28016	—	237,60033	12
288,03174	—	274,40891	10	254,50142	40	237,20703	15
288,00806	—	274,22064	30	254,59755	40	237,05028	18
287,73021	8	274,19564	20	254,05734	10	236,90000	18
287,13004	5	274,20104	—	253,93570	7	236,70851	9
287,41733	10	274,16781	·	253,74598	—	236,51646	20
287,23146	7	273,83143	—	253,56086	8	235,95109	10
286,06093	40	273,73109	30	253,28704	—	235,18749	12
286,75832	—	273,51702	8	252,98370	—	235,07941	10
286,66914	7	273,40165	—	252,91361	10	234,66306	45
286,38641	8	273,42701	—	252,74358	15	234,25725	40
286,34311	8	273,40060	—	252,42006	8	233,12108	15
286,24652	—	273,35810	15	252,28705	40	232,96735	35
285,88090	5	273,09622	—	252,10157	7	232,81723	10
285,36855	—	272,89706	—	251,96306	10	231,12364	7
285,17965	15	272,90212	5	251,81029	12	231,08594	9
284,87153	—	272,50721	·	251,65710		230,70682	6
284,58712		272,45542	10	251,08362	15	219,60427	50
284,55359	8	272,30785	15	250,16046	·	219,12052	10
284,39775	20	272,09035	40	250,11332	20	218,71966	40
284,36314	10	271,84165	6	249,65343	6	218,68553	—
284,08389	—	271,77874	—	249,42525	—	218,06702	—
284,04229	6	271,48357	·	249,11569	20	217,66114	6
283,61206	10	271,16560	4	249,06451	30	217,32146	8
283,59511	—	270,65959	—	248,61437	40	217,20858	6
283,54574	6	269,91075	6	248,73705	—	217,12976	40
283,24364	25	269,70624	—	248,39718	50	216,45495	7
282,88094	7	269,50357	—	247,97774	40	216,38633	6
282,78931	5	269,22496	—	247,94313	6	216,15802	5
282,04866	6	269,01644	—	247,48151	8	216,06663	—
282,55369	20	268,98305		247,28962	5	215,89207	—
282,32767	20	268,92130	8	246,68803	—	215,77851	5
282,08039	—	268,04546		246,77330	—	215,50203	—
281,97017	6	267,90628	10	246,51500	6	215,30075	5
281,82877	30	267,32149	—	246,36483	40	215,01800	—
280,83781	·	266,79138	—	246,21522	—	214,51501	—
280,72101	—	266,65665	·	245,76580	6	214,37188	—
280,12012	—	266,58133	8	245,34767	—	214,10872	—
280,45214	20	266,63009		244,79108	·	213,91987	·
280,31075	·	266,20571	—	244,52134	·	213,85892	—
279,77705	15	265,57033		244,38728	20	213,20177	—
279,69721		265,17075	—	243,81831	—	212,62408	—
279,55409	—	264,70789	5	238,95739	25	211,51097	20
279,10015		264,54230	—	238,18366	—	211,46003	—
279,17033	—	264,39092	·	237,65192	10	211,29056	25
279,17907	—	264,16408	4	237,30250	20	210,80556	30
278,79351	5	263,14794	—	237,14313	15	210,69027	12
278,18768	—	263,58100	8	236,94967	8	210,61371	12
277,82314	30	263,26951	—	232,56413	—	210,62563	35
277,21107	20	263,22382	4	232,08585	40	210,30594	25
277,20748	—	262,33009	—	231,31046	40	210,23542	30
276,90717		261,87111	—	230,80005	30	210,07984	30
276,92865	—	261,80151	5	230,33815	20	210,01464	30
276,75939	20	261,44952	—	230,16849	30	209,36839	40
276,65104	—	261,27734	·	229,92209	25	209,09837	30
276,27739	—	260,68280	6	229,81100	10	208,70115	25
276,20275	15	260,50776	6	229,77877	30	208,41218	50
276,17810	18	259,45370	8	229,07033	15		

в различных областях спектра. К классу А отнесены линии благородных газов [3, 11] (см. разд. 32.3). Резкие линии ^{198}Hg с успехом могут быть использованы в качестве стандартов длин волн. Рекомендуются [1] следующие яркие линии ^{198}Hg I: 366,01669; 404,65715; 407,78379; 435,83376; 546,07532; 576,95961; 579,06627 нм.

Стандарты второго типа, или линии класса Д, получают интерполяцией в спектрах, даваемых призменными или дифракционными спектрографами. Для них достаточна погрешность ±0,01 нм, но является дополнительное требование, чтобы бленды линии не слишком различались по интенсивности. К линиям класса В отнесены линии железа, возбуждаемые в дуге в воздухе (табл. 32.9).

В тех областях спектра, где интерферометрические измерения невозможны, пользуются комбинационным процессом Ритца; по линиям, длины волн которых измерены интерферометрически с хорошей точностью, определяют относительные энергии уровней, и комбинации между этими уровнями дают так называемые стандарты Ритца в вакуумной, ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра.

Таблица 32.10

Параметры двухатомных молекул [12]

За единицу массы молекулы M принята масса протона.

Молекула	M	Электронное состояние	$E_{эл}$, см$^{-1}$	$\hbar\omega_e$, см$^{-1}$	$\hbar\omega_e x_e$, см$^{-1}$	B_e, см$^{-1}$	α_e, см$^{-1}$	r_e, нм
$Br^{79}Br^{81}$	39,958	$X^1\Sigma_g^+$	0	323,2	1,07	0,0909	$2,75\cdot10^{-4}$	0,2284
		$B^3\Pi_{0u}^+$	15951	169,7	1,91	0,0866	$8,95\cdot10^{-4}$	0,266
Cl_2	17,489	$X^1\Sigma_g^+$	0	564,9	4,0	0,244	$1,7\cdot10^{-4}$	0,1988
		$A^3\Pi_{1u}^+$	18310	290,4	5,42	0,158	$3\cdot10^{-4}$	0,247
CO	6,858	$X^1\Sigma^+$	0	2170	13,46	1,931	0,0175	0,1128
		$A^1\Pi$	65075	1516	17,25	1,612	0,0223	0,1235
CO^+	6,858	$X^2\Sigma^+$	0	2214	15,16	1,977	0,0190	0,1115
		$A^2\Pi$	20594	1562	13,53	1,569	0,0194	0,1244
		$B^2\Sigma^+$	45877	1734	27,36	1,800	0,0302	0,1169
H_2	0,5041	$X^1\Sigma_g^+$	0	4395	118	60,81	2,99	0,07417
		$B^1\Sigma_u^+$	91698	1367	19,9	20,02	1,19	0,1293
		$C^1\Pi_u$	100013	2443	67,0	31,34	1,63	0,1033
		$D^1\Pi_u$	100062	2369	130	32,69	1,82	0,1012
		$C^3\Pi_u$	90744	2155	61,4	31,67	1,42	0,1038
		$e^3\Sigma_u^+$	95936	2265	71,6	34,72	1,67	0,0969
		$e^3\Sigma_g^+$	107777	2196	65,8	27,39	1,52	0,1107
		$d^3\Pi_g$	112762	2372	66,3	30,36	1,64	0,1060
HBr	0,9956	$X^1\Sigma^+$	0	2650	45,2	8,473	0,220	0,1414
HCl	0,9790	$X^1\Sigma^+$	0	2990	52,05	10,59	0,302	0,1275
HF	0,9574	$X^1\Sigma^+$	0	4138	90,1	20,94	0,770	0,0917
HI	1,0082	$X^1\Sigma^+$	0	2310	39,7	6,551	0,183	0,1604
I_2	63,466	$X^1\Sigma_g^+$	0	214,6	0,613	0,03736	$1,17\cdot10^{-4}$	0,2667
		$B^3\Pi_{0u}^+$	19642	125,0	0,834	0,0292	$1,7\cdot10^{-4}$	0,3016
K_2	19,488	$X^1\Sigma_g^+$	0	92,64	0,354	0,0562	$2,19\cdot10^{-4}$	0,3923
Li_2	3,3501	$X^1\Sigma_g^+$	0	351,4	2,59	0,6799	$7,84\cdot10^{-3}$	0,2672
N_2	7,0036	$X^1\Sigma_g^+$	0	2360	14,46	2,010	0,0187	0,1094
		$B^3\Pi_g$	59620	1460	13,9	1,440	0,013	0,1293
		$B'^3\Pi_g$	59620	1731	14,5	1,636	0,0184	0,1212
		$a'^1\Pi_g$	65290	1692	12,6	1,637	0,022	0,1213

Молекула	M	Электронное состояние	$T_{эл}$, см$^{-1}$	ω_e, см$^{-1}$	$\omega_e x_e$, см$^{-1}$	r_e, см$^{-1}$	D_e, см$^{-1}$	r_e, нм
		$C^2\Pi_u$	89117	2065	17,4	1,826	0,0197	0,1148
N_2^+	7,0036	$X^2\Sigma_g^+$	0	2207	16,1	1,932	0,020	0,1110
		$B^2\Sigma_u^+$	25461	2420	23,2	2,083	0,0136	0,1075
Na_2	11,498	$X^1\Sigma_g^+$	0	159,2	0,720	0,1547	$7,9\cdot10^{-4}$	0,3076
NO	7,4669	$X^2\Pi_{1/2}$	0	1904	13,95	1,705	0,0178	0,1151
		$X^2\Pi_{3/2}$	121,1					
		$A^2\Sigma^+$	43 965	2371	14,5	1,095	0,0164	0,1064
		$B^2\Pi_{1/2}$	45 918	1037	7,6	1,076	0,0146	0,1448
		$B^2\Pi_{3/2}$	45 947	1038	7,6	1,177	0,0189	0,1385
O_2^+	8,000	$X^2\Sigma_g^-$	0	1580	12,1	1,446	0,0158	0,1207
		$a^4\Pi_g$	7 918	1509	12,9	1,426	0,0171	0,1215
		$b^4\Sigma_g^+$	13 195	1439	14,0	1,400	0,0182	0,1227
		$B^2\Sigma_g^-$	49 602	900,4	6,0	0,815	0,11	0,1624
O_2	8,000	$X^3\Sigma_g^-$	0	1876	16,5	1,672	0,0198	0,1173
		$c^1\Pi_u$	-	1030	10,4	1,106	0,0157	0,1391
		$A^3\Sigma_u^+$	38 795	900	13,4	1,652	0,0191	0,1409
CH	0,94838	$X^2\Pi$	0	2735	82,8	18,87	0,714	0,10706
		$A^2\Sigma^-$	32 662	3190	94,9	17,36	0,807	0,1012
SO	10,664	$X^3\Sigma$	0	1124	5,12	6,7789	$5,62\cdot10^{-3}$	0,1439

32.6. ПАРАМЕТРЫ МОЛЕКУЛ

Для учета колебательно-вращательного взаимодействия B_v (см. разд. 32.4) представляют в виде

$$B_v = B_e - \alpha_e(v + 1/2),$$

где $B_e = \hbar^2/(2I) = \hbar^2/(2Mr_e^2)$ — чисто вращательная постоянная; α_e — константа колебательно-вращательного взаимодействия; $M = M_1M_2/(M_1 + M_2)$ — приведенная масса двухатомной молекулы; M_1 и M_2 — массы атомов, составляющих молекулу; r_e — равновесное расстояние между ядрами атомов, при котором потенциальная энергия молекулы минимальна; $E_{эл}$ — энергия электронного состояния, ω_e и x_e — колебательные константы молекулы.

Таблица 32.11

Дипольные моменты молекул [13]

Дипольный момент μ нейтральной молекулы определяют произведением числа элементарных (или положительных) зарядов N_χ, разделенных пространственно на среднее расстояние между их центрами масс $\overline{r_{ij}}$: $\mu = N_\chi \times \overline{r_{ij}}$. Величина μ измеряется в дебаях. 1 дебай — 10^{-18} ед. СГСЭ.

Молекула	Формула	μ, дебай
Азот	N_2	0
Азотс		
» двуокись	NO_2	0,3
» закись	N_2O	0,2
» окись	NO	0,16
Альдегид уксусный	C_2H_4O	2,7
Аммиак	NH_3	1,4
Ангидрид сернистый	SO_2	1,6
Анилин	C_6H_5N	1,2
Ацетил хлористый	C_2H_3OCl	2,3
Ацетон	$(CH_3)_2CO$	3,0
Ацетонитрил	C_2H_3N	3,4
Бензонитрил	C_7H_5N	3,9
Бромбензол	C_6H_5Br	1,5
Бромоформ	$CHBr_3$	1,0

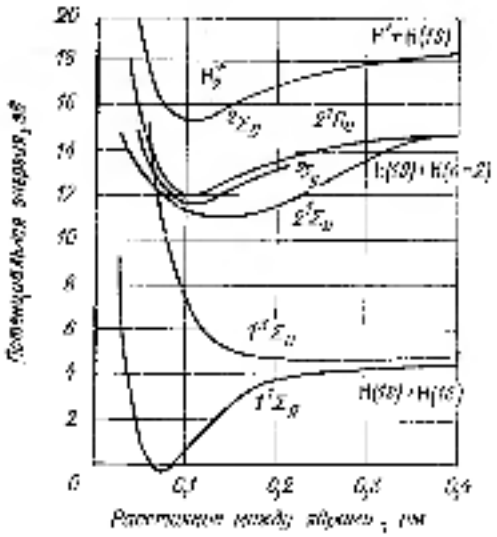


Рис. 32.8. Электронные термы молекулы H₂ [14].

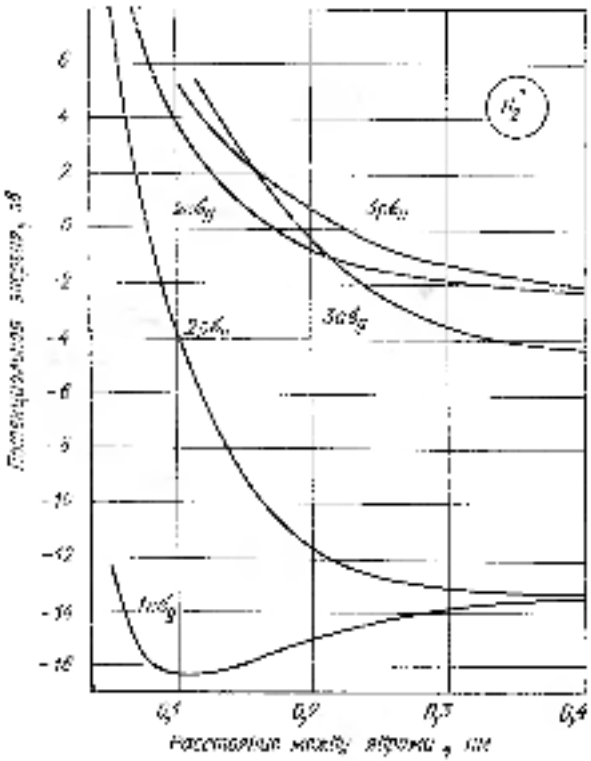


Рис. 32.9. Электронные термы молекулы H_2^+ [15].

Продолжение табл. 32.11

Молекула	Формула	μ, дебай
Бензол		
» бромистый	C_6H_5Br	1,48
» иодистый	C_6H_5I	1,30
» хлористый	C_6H_5Cl	1,44
Вода	H_2O	1,85
Водород	H_2	0
» бромистый	HBr	0,8
» цианистый	HCN	2,9
» фтористый	HF	1,9
Водород хлористый	HCl	1,1
Диметиланилин	$C_8H_{11}N$	1,6
Дифторметан	CH_2F_2	1,96
Дихлорметан	CH_2Cl_2	1,6
Иодоформ	CHI_3	1,0
Калий		
» бромистый	KBr	9,0
» хлористый	KCl	9,0
Кислород	O_2	0
Кислота уксусная	$C_2H_4O_2$	1,7
Литий бромистый	LiBr	6,2
» иодистый	LiI	6,6
» фтористый	LiF	6,3
Литий гидрид	LiH	5,9
Метил		
» бромистый	CH_3Br	1,8
» иодистый	CH_3I	1,6
» хлористый	CH_3Cl	1,86
Нитробензол	$C_6H_5NO_2$	3,8
Нитрометан	CH_3NO_2	3,1
Нитроэтилен	$C_2H_5NO_2$	3,4
Пиридин	C_5H_5N	2,2
Сероводород	H_2S	1,1
Спирт метиловый	CH_3O	1,69
Трифторметан	CHF_3	1,6
Угарный газ	CO	0,1
Углекислый газ	CO_2	0
Формальдегид	CH_2O	2,2
Хлорбензол	C_6H_5Cl	1,5
Хлороформ	$CHCl_3$	1,2
Цезий		
» иодистый	CsI	11,0
» фтористый	CsF	7,6
» хлористый	CsCl	10,4
Циан		
» бромистый	CNBr	2,9
» иодистый	CNI	3,7
» хлористый	CNCl	2,8
Эфир		
» метиловый	C_2H_6O	1,3
» этиловый	$(C_2H_5)_2O$	1,1

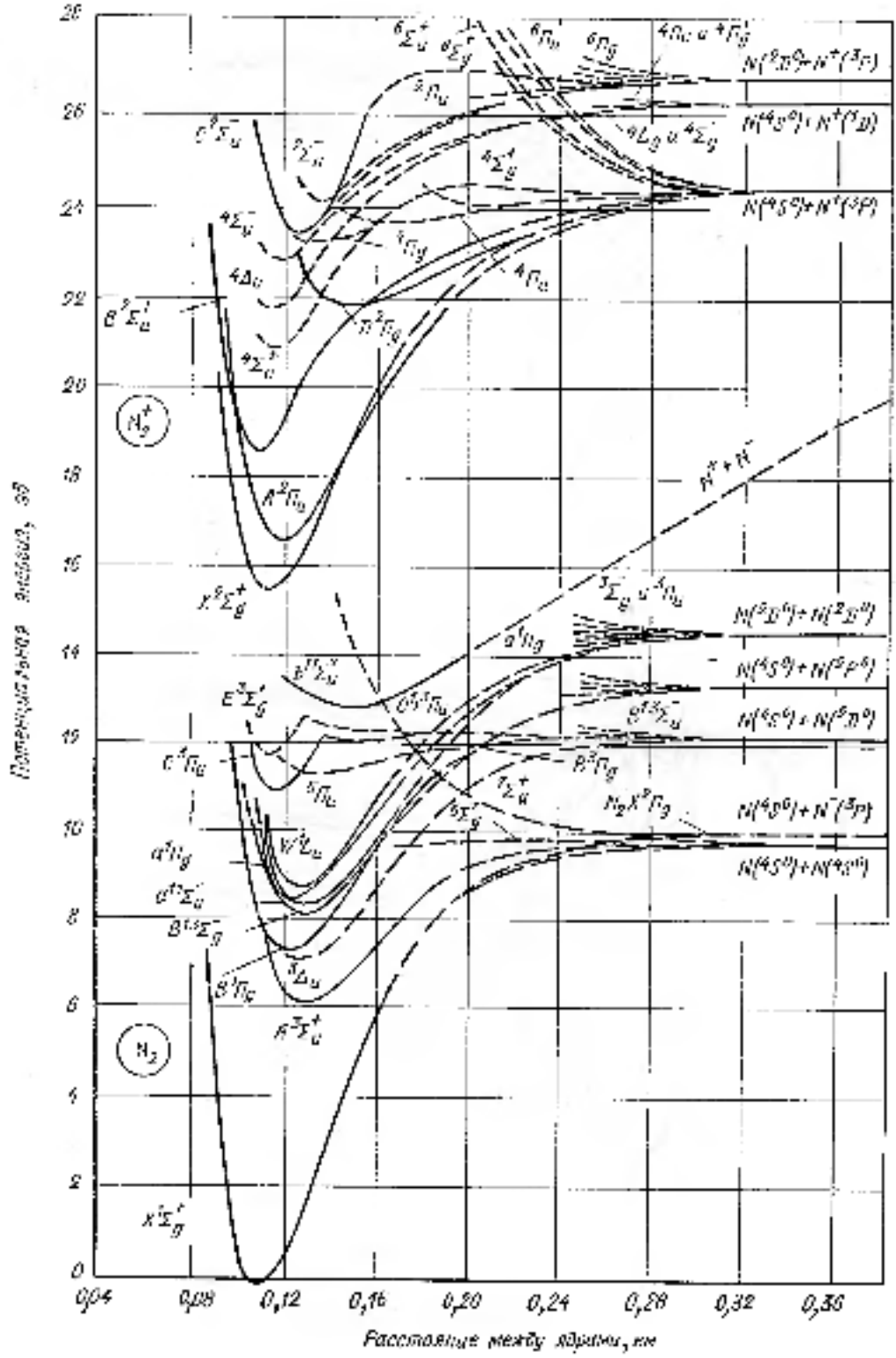


Рис. 32.10. Электронные термы молекул N_2 и N_2^+ [16].

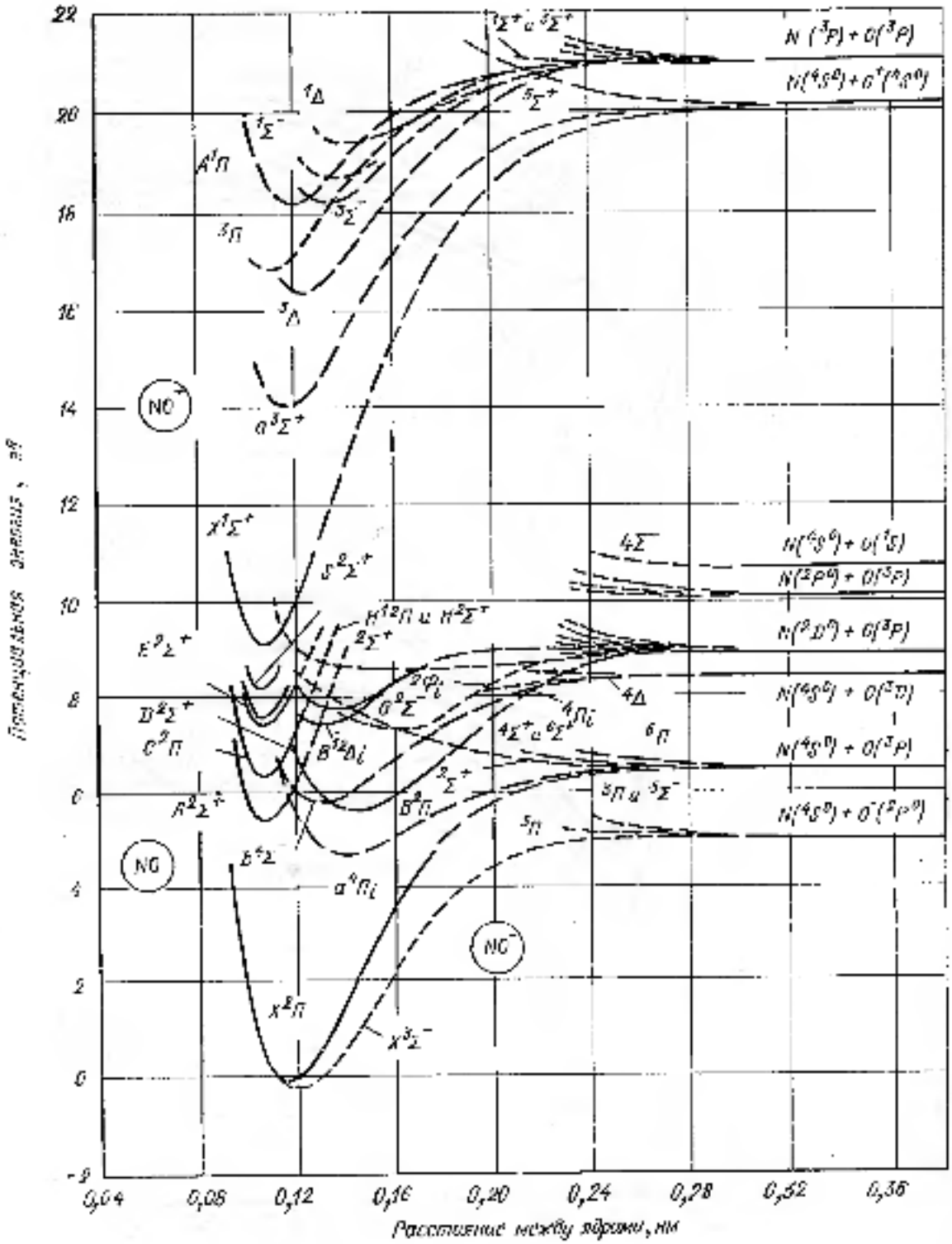


Рис. 39.11. Электронные термы молекул NO, NO^+ и NO^- [16].

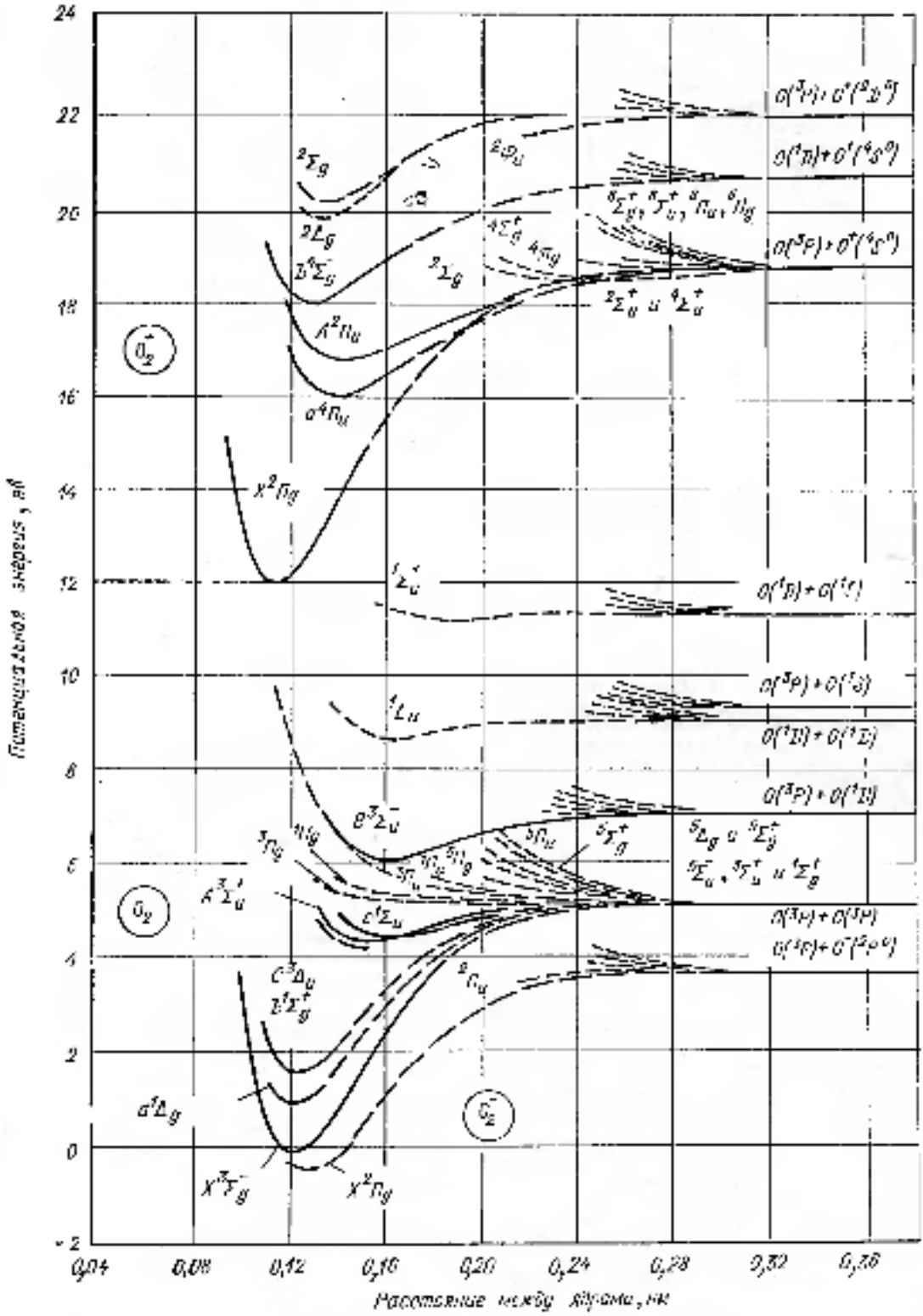


Рис. 32.12. Электронные термы молекул O_2, O_2^+ и O_2^- [16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Собельман И. И.** Введение в теорию атомных спектров. М., Физматгиз, 1963.
2. **Елютин М. А.** Атомная и молекулярная спектроскопия. М., Физматгиз, 1962.
3. **Аллен К. У.** Астрофизические величины. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
4. **Wiese W. L. e. a.** Atomic Transition Probabilities, NSRDS-NBS4, Washington, 1966.
5. **Стриганов А. Р., Свентицкий Н. С.** Таблицы спектральных линий нейтральных и однозарядных атомов. М., Атомиздат, 1966.
6. Taschenbuch für Chemiker und Physiker. Berlin, Springer Verlag, 1949.
7. **Зайдель А. Н.** и др. Таблицы спектральных линий. М.—Л., Гостехиздат, 1962.
8. **Fleischer H.** «Ann. Phys.», 1942, Bd 29A, K. 13, S. 1.
9. **Kelly R. L.** Naval Research Laboratory. Report 6846, Washington, 1968.
10. **Вайнштейн Л. А., Сафронова У. И.** «Краткие сообщения по физике», 1972, т. 3, с. 46.
11. «Trans. IAU», 1952, v. XI B, p. 253.
12. **Герцберг Г.** Электронные спектры и строение многоатомных молекул. Пер. с англ. М., «Мир», 1969.
13. **Осипов О. А., Минкин В. И.** Справочник по дипольным моментам. М., «Высшая школа», 1965.
14. **Габович М. Д.** Физика и техника плазменных источников ионов. М., Атомиздат, 1972.
15. **Madden M. M., Peek J. M.** Eigenparameters for the Lowest Twenty Electronic States of the Hydrogen Molecule Ion. — «Atomic Data», 1971, v. 2 (2), p. 171.
16. **Сапронов Б. М.** Физика слабоионизованного газа. М., «Наука», 1972.

ГЛАВА 33

ЛАЗЕРЫ

Название лазер (по другой терминологии — оптический квантовый генератор — ОКГ) образовано по первым буквам сочетания английских слов: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation — усиление света с помощью вынужденного излучения, что отражает основной физический принцип устройства, генерирующего когерентное излучение в оптическом диапазоне частот от вакуумного ультрафиолета до далекой инфракрасной области.

Основными элементами лазера являются: активная среда, источник энергии, возбуждающий вещество активной среды, и резонатор. В обычных условиях отдельные возбужденные атомы вещества переходят на более низкие энергетические уровни спонтанно, т. е. независимо друг от друга. Целью возбуждения активной среды в лазере является такое распределение атомов по возбужденным уровням, при котором между двумя выбранными уровнями достигается инверсия. Состояние с инверсией населенности отличается от равновесного тем, что на верхнем уровне скапливается существенно больше частиц, чем это допускается условием равновесия. В результате число переходов с излучением фотона между данными уровнями оказывается больше числа переходов с поглощением. Такое селективное возбуждение верхних уровней и обеспечивается источником энергии.

Резонатор лазера (система зеркал, между которыми располагается активная среда) обеспечивает обратную связь между световой волной, испущенной какой-либо частью атомов вещества, и атомами, еще находящимися в возбужденном состоянии. В результате этого происходит упорядоченное испускание фотонов атомами активного вещества независимо от момента своего акта испускания, т. е. переходы между верхним и нижним лазерными уровнями осуществляются когерентно. Одновременно лазерное излучение оказывается также монохроматическим. Благодаря применению резонатора лазерное излучение обладает и еще одним отличительным свойством высокой направленности. Все вместе это приводит к тому, что с помощью лазерных источников света можно создать напряженность электромагнитного поля, близкую к внутриатомным.

С точки зрения существования механизмов инверсии и методов накачки лазеры классифицируют по типу фазового состояния активного вещества. Газовые лазеры — на нейтральных и ионизованных атомах, молекулярные газовые лазеры; твердотельные — на диэлектрических кристаллах, стекле и полупроводниках; жидкостные — на растворах редкоземельных элементов и на основе красителей. Многообразие длин волн, генерируемых лазерами, может быть расширено методами нелинейной оптики.

33.1. ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ НА НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМАХ

Классификация газовых лазеров

В настоящее время интересная таблица по генерации на нейтральных атомах в тлеющем разряде получена более чем на 450 переходах, принадлежащих 28 элементам (рис. 33.1 и табл. 33.1). По типу возбуждения газовые лазеры можно разделить на три большие группы:

1) лазеры с возбуждением в слабоионизованном состоянии, или высокочастотном разряде;

2) лазеры с возбуждением импульсным разрядом с большим током;

3) лазеры с возбуждением импульсным разрядом с малым током, фронтом выравнивания.

Слабоионизованный постоянный высокочастотный разряд. В качестве среды для непрерывно действующих газовых лазеров на нейтральных атомах чаще всего используется положительный столб тлеющего разряда. Плотность тока в таком разряде обычно порядка 100—250 *ма/см*². Свойства плазмы положительного столба определяются электрическим полем плазмы разряда. В установившемся, квазистационарном, однородном продольном столбе продольное электрическое поле таково, что число возникающих электронов и ионов равно диффузионным потерям заряженных частиц на стенках разрядной трубки. Электронная температура в плазме разряда автоматически устанавливается такой, которая необходима для поддержания потока положительных ионов и потерь электронов на стенках. В большинстве случаев, когда можно пренебречь обратной ионизацией и соударениями между электронами и атомами в метастабильных состояниях, средняя электронная температура определяется главным образом произведением давления газа в трубке P и диаметром трубки D. Чтобы воспроизвести заданные условия разряда в каком-либо чистом газе, необходимо только обеспечить постоянство про-

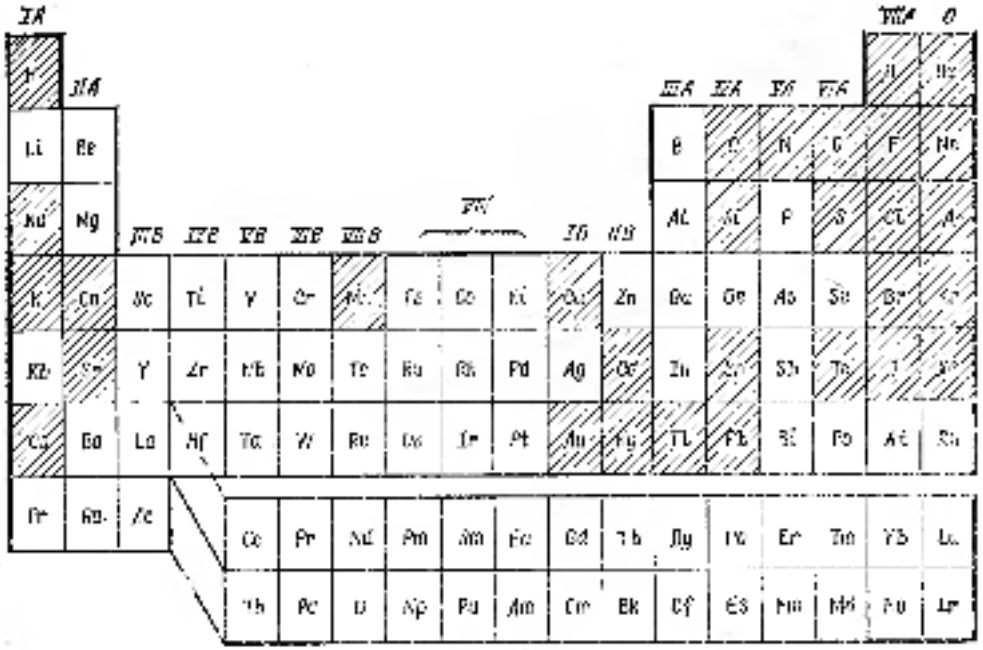


Рис. 32.1. Схематическая периодическая таблица. Заштрихованы элементы, для которых получена генерация в газовом разряде по нейтральному атому [1].

кладывая PD при постоянной электронной концентрации. В слабоионизованной плазме положительного столба электронная концентрация прямо пропорциональна плотности тока через разряд.

Импульсный разряд с послесвечением. Плотность тока в импульсном разряде, в отличие от случая постоянного разряда, достигает значительно большого значения — до 300 а/см², в результате чего имеет место сильная ионизация. В послесвечении импульсного разряда преобладают процессы с большими временами диссоциации и рекомбинации. Как в чистых газах, так и смесях, эти процессы приводят к импульсной генерации с большим усилением и большой выходной мощностью, но оптимальные условия в импульсном разряде или в послесвечении не устанавливаются простым произведением PD, а определяются интенсивностью пробоя газа, видом газа, потерями энергии в разряде, соотношением внешней цепи, формой переднего и заднего фронта импульса тока.

Импульсное возбуждение с малым фронтом нарастания. Импульсные разряды короткой длительности использовались в качестве для возбуждения мощных лазеров на самоограниченных переходах. В таких разрядах время нарастания импульса тока должно быть сравнимо с радиационным временем жизни верхнего лазерного уровня. Только в этом случае возможно достижение инверсной населенности в разряде. Плотность тока в максимуме импульсов, необходимая для создания инверсии, оказывается порядка сотен и тысяч ампер на квадратный сантиметр. Условия возбуждения в разряде зависят от потерь энергии в единицу времени, давления газа, напряженности пробоя в газе, геометрии электродов и их расположения.

Механизмы селективного возбуждения

Во всех газовых системах инверсия населенности достигается в результате действия одного или сразу нескольких перечисленных ниже механизмов возбуждения.

Передача возбуждения (атом—атом). В случае столкновений второго рода происходит передача потенциальной энергии от возбужденного атома другому атому в результате неупругого соударения. Этот процесс можно записать следующим образом:

$$A' + B \rightleftarrows A + B' + \Delta E_{\infty}, \qquad (33.1)$$

где ΔE_{∞} — разность потенциальных энергий возбужденных состояний A' и B' при бесконечном разделении атомов; A и B — одно всего основные состояния атомов. Если A' — метастабильное состояние, а B' может опустошаться за счет излучательных переходов, то реакция (33.1) идет в прямом направлении. Сечение такого процесса перехода от возбуждения частицы, если энергии возбуждения рассматриваемых уровней A' и B' достаточно хорошо совпадают, т. е. $\Delta E_{\infty} \to 0$ (резонансное столкновение). При $\Delta E_{\infty} \to 0$ и сечение передачи возбуждения мало. Передача возбуждения при столкновениях более вероятна в случае сохранения полного спина ($\Delta S = 0$). Примером системы, в которой используется селективное возбуждение путем передачи возбуждения, является лазер на смеси гелий-неон (рис. 33.2).

Передача возбуждения при диссоциации (атом—молекула). Такой процесс можно записать в форме

$$N' + ABK \rightleftarrows M + A' + B + T \qquad (33.2а)$$

$$N' + ABK \rightleftarrows M + A + B' + T, \qquad (33.2б)$$

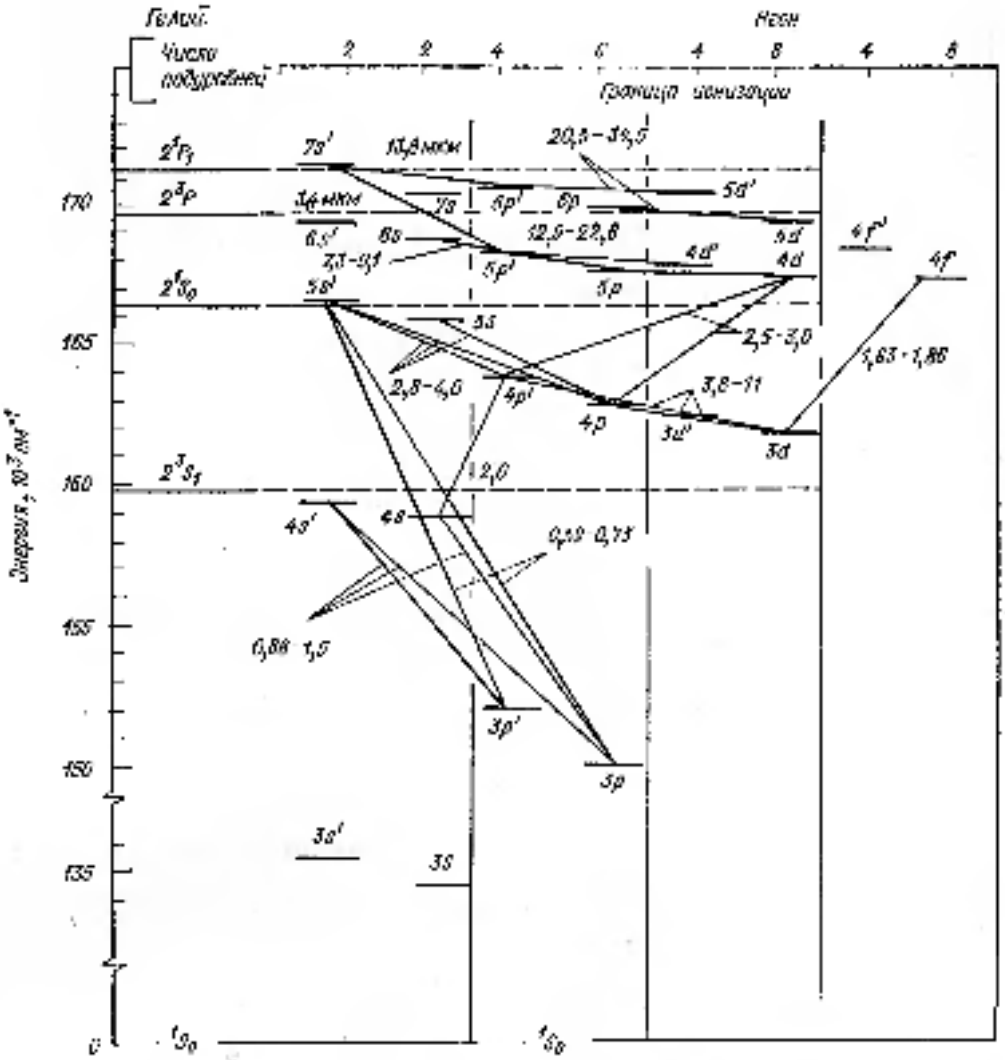


Рис. 33.2. Энергетическая схема уровней гелия, показывающая совпадение уровней гелия с уровнями гелия $2^3P_{2,1,0}$, 2^3S_1, 2^1S_0 и 2^1P_1 и лазерные переходы, наблюдаемые в смеси He—Ne [1].

где M' — атом в возбужденном (обычно метастабильном) состоянии; T — кинетическая энергия. В таких реакциях атом M' взаимодействует с молекулой AB и вызывает переход молекулы из основного состояния в состояние с сильным отталкиванием $(AB)^*$ или $(AB)'$ (рис. 33.3). В состоянии с силами отталкивания или предиссоциативном состоянии у молекулы нет равновесия, и она диссоциирует на $A^* + B$ или $A + B'$. Так как несколько предиссоциативных состояний имеют энергию, приблизительно равную потенциальной энергии M', а в реакции участвуют более двух атомов, то строгого требования на точность совпадения энергий, как это имеет место в передаче возбуждения между двумя атомами, нет. Избыток потенциальной энергии переходит в кинетическую энергию атомов A' и B'. Такой тип селективного возбуждения осуществляется, например, в лазерах на смеси аргона с водородом и неона с кислородом.

Оптическая накачка. Если длина волны интенсивной линии совпадает с длиной волны резонансного перехода какого-либо атома (в пределах допплеровской ширины), то возможно селективное возбуждение этого резонансного состояния (рис. 33.4). Получение инверсной населенности возможно также и с возбужденного уровня, если он достаточно хорошо заселен. Следует отметить, что для нейтральных атомов случаи совпадения двух или оптических переходов крайне редки.

Возбуждение электронным ударом. Если возбужденное состояние связано радиационными переходами с основным состоянием, то из приближения Борна без учета электронного обмена следует, что это возбужденное состояние селективно возбуждается в результате неупругих столкновений электронов с атомами. Так, для благородных газов селективное возбуждение из основного состояния осуществляется следующим образом:

$$(np)^6 + e^- \rightarrow T \begin{cases} (np)^5\,ns + e^- & (33.3a) \\ (np)^5\,nd + e^-, & (33.3б) \end{cases}$$

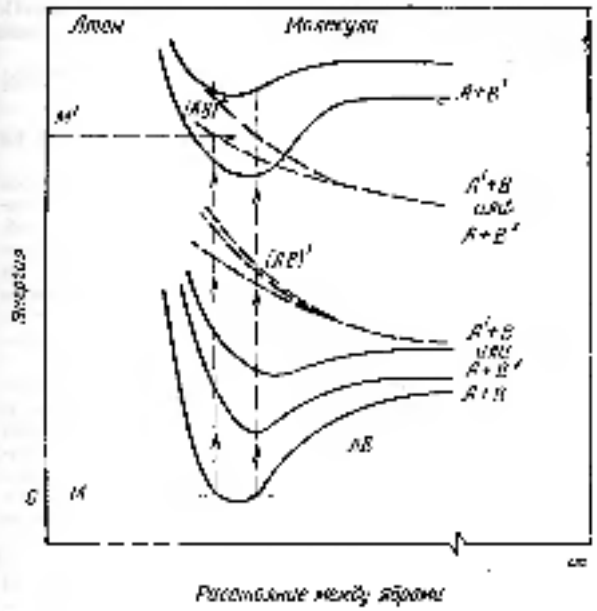


Рис. 33.3. Кривые потенциальной энергии двухатомной молекулы. Передача возбуждения при диссоциации молекулы через состояния с силами отталкивания $(AB)^*$ или (ABY) показана стрелками; пунктирными линиями показано несколько состояний с силами отталкивания, которые сближаются уровнями с одинаковым возбуждением. M' — метастабильное состояние [1].

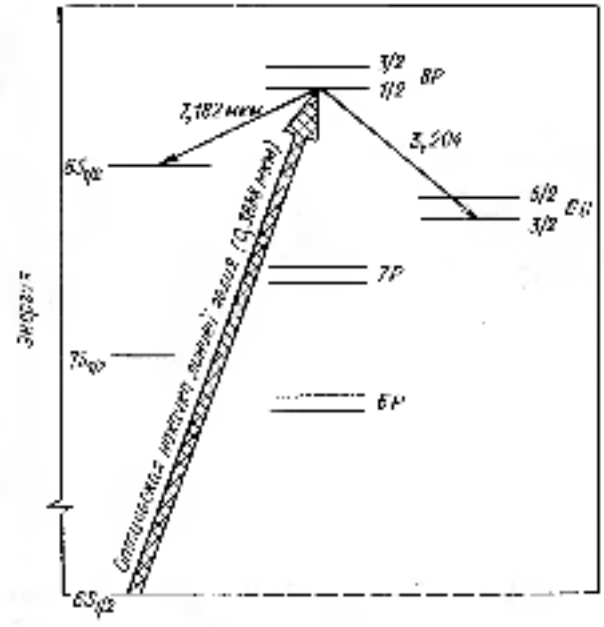


Рис. 33.4. Лазерные переходы в парах цезия (7,204 и 7,182 мкм) при оптической накачке [1].

где $(np)^6$, $(np)^5 ns$ и $(np)^5 nd$ — электронные оболочки; $n = 6$ для Ne, $n = 2$ и 3 и т. д., а $s = 2$ для Ne, 3 для Ar, 4 для Kr и 5 для Xe. Если произведение $F \cdot D$ достаточно велико для радиационного захвата резонансной линии, но при столкновениях возбуждение еще не передается другим электронным конфигурациям, то радиационный распад может происходить только через переходы, обозначенные на рис. 33.5 сплошными линиями. Этот тип селективного возбуждения в системе, где радиационный распад нижнего лазерного уровня происходит с достаточной скоростью, может привести к реализации непрерывной генерации. Возбуждение газовых лазеров на самоограниченных переходах осуществля-

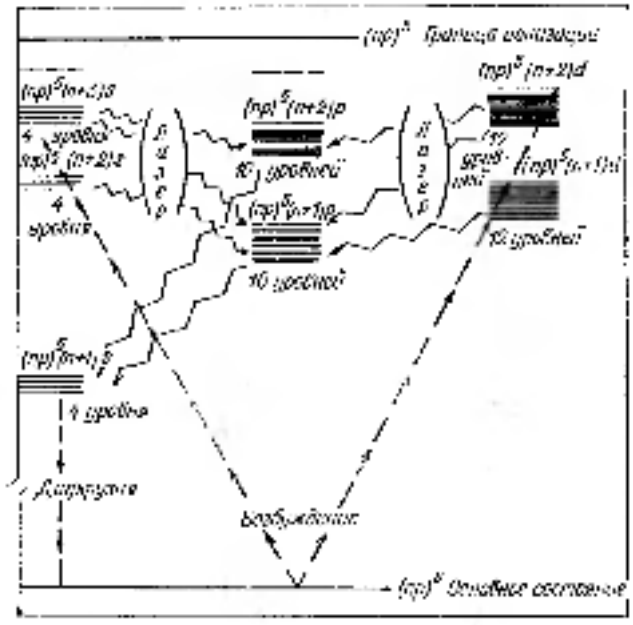


Рис. 33.5. Схематическая диаграмма электронных конфигураций, ответственных за лазерные переходы в чистом неоне, аргоне, криптоне и ксеноне [1]. (Стрелками указаны основные пути возбуждения и генерации.)

ется также столкновениями возбуждения электронными ударами. Такие лазерные системы, обладающие большим усилением и малой длительностью импульса генерации, уже осуществлены на парах Pb, Cu, Au, Ca, Sr и Mn, а также на благородных газах He, Ne, Ar, Kr и Xe. Расположение энергетических уровней лазера на самоограниченном переходе показано на рис. 33.6. Верхний лазерный уровень 1 возбуждается электронным ударом с основного состояния, а нижний лазерный уровень 2 — метастабилен (или квазиметастабилен). В такой трехуровневой системе при быстром возбуждении уровня 1 инверсия населенности между уровнями 1 и 2 из-за быстрого нарастания населенности нижнего лазерного уровня возможна только на время, меньшее, чем радиационное время жизни верхнего лазерного уровня.

Накачка излучательными каскадными переходами. Интенсивные лазерные переходы могут быть использованы для получения селективного возбуждения верхних уровней других лазерных переходов, которые, несмотря на то что их четность совпадает с четностью основного состояния, не могут эффективно возбуждаться прямыми электронными ударами. Эта ситуация осуществляется на ряде лазерных переходов в гелий-неоновом лазере.

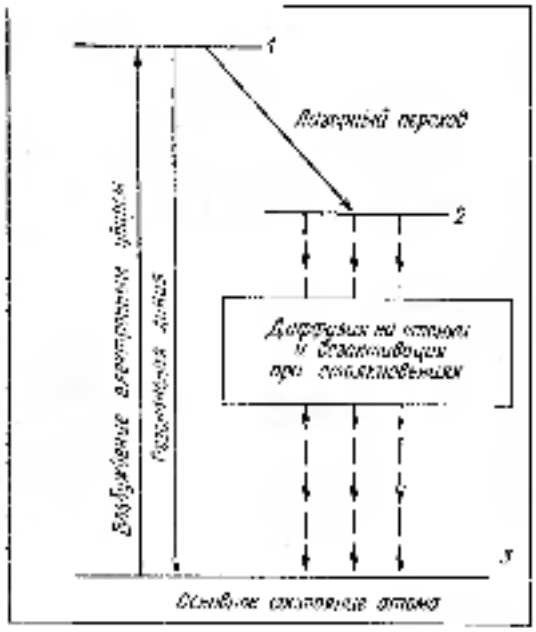


Рис. 33.6. Обобщенная схема процессов возбуждения и генерации в газах на самоограниченных переходах [1].

Нейтрализация заряда (ион-ионная рекомбинация). Нейтрализацию заряда можно записать в общем виде таким образом:

$$A^+ + B^- \rightarrow A^* + B + T \qquad (33.4а)$$

$$\rightarrow A + B^* + T. \qquad (33.4б)$$

Избыток энергии, уносимой в виде кинетической энергии T одной из частиц A^* или B^*, заряда электронов, позволяет A^* и B^* снова образовывать определенные A^* и B или A и B^*, осуществляя тем самым селективное возбуждение одного из состояний A^* или B^*. Такой тип получения инверсии имеет место в лазере на смеси гелия и водорода, а также в послесвечении разряда в чистом кислороде в смесях бинарных газов при больших давлениях.

Фотодиссоциация молекул. Широкие полосы поглощения молекул позволяют использовать большие количества энергии световой накачки. Получение атомов, полученных в результате диссоциации, происходит в узких характеристических линиях спонтанного излучения атомов. При фотодиссоциации двухатомных молекул обычно один атом оказывается в возбужденном состоянии, а другой — в основном:

$$AB + h\nu \rightarrow A^* + B + T. \qquad (33.5)$$

Энергия кванта должна быть больше D для диссоциации молекулы AB, возбуждения атома и передачи кинетической энергии образовавшимся атомам. Примером возбуждения атома при фотодиссоциации молекулы является фотолиз галогенсодержащих CF_3I и CH_3I.

Таблица 33.1

Лазерные переходы в нейтральных газах [1]

Лазерные переходы объединены по атомным группам, показанным на рис. 33.1, в порядке возрастания атомных номеров. Для большинства идентифицированных лазерных переходов значения длин волн линий указаны для измерений в воздухе. Для значений длин волн в вакууме приписывается курсив. В соответствии с установившимся традиционным стилем пишется верхний уровень, а затем нижний. Возбуждение газа указано сокращенно: непр. — непрерывный, слабоионизованный, тлеющий или высокочастотный разряд; имп. — импульсный разряд; кор. имп. — короткий импульсный разряд с малым фронтом нарастания тока. Иногда при идентификации переходов указаны все возможные уровни. Сомнительные идентификации помечены знаком (?). В ряде случаев указано значение PD или отдельно давление компонент смеси P и диаметр разрядной трубки D.

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация	Возбуждение	Примечания
IA				
Водород (рис. 33.7)	1,8751	Первый член серии Пашена $4f^2F^0_{7/2} - 3d^2D_{5/2}$	имп.	Малая добавка водорода (0,01 мм рт. ст.) к гелию (9,5 мм рт. ст.), D — 7 мм
Натрий (рис. 33.8)	1,1382	$4s^2S_{1/2} - 3p^2P_{1/2}$	»	0,001—0,003 мм рт. ст. паров натрия в смеси с водородом, гелием или неоном (1—10 мм рт. ст.), D—19 мм
	1,1404	$4s^2S_{1/2} - 3p^2P_{3/2}$	»	Условия те же

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Классификация	Возбуждение	Примечания
Калий (рис. 33.10)	1,2434	$5s\,^4S_{1/2} - 4p\,^4P_{1/2}$	инд.	0,1 мм рт. ст. пары калия в смеси с аргоном. S—5 мм рт. ст., D—19 мм
	1,2523	$5s\,^4S_{1/2} - 4p\,^4P_{3/2}$	»	Условия те же
Цезий	3,9040	$6p\,^2P^0_{1/2} - 6d\,^2D_{3/2}$	исп. р	Пары цезия при 175°С, D — 10 мм
	7,1891	$8p\,^2P^0_{1/2} - 8s\,^2S_{1/2}$	»	Условия те же
IB Медь (рис. 33.11)	0,510554	$4p\,^2P^0_{3/2} - 4s\,^2D_{5/2}$	хор. пит.	0,1 мм рт. ст. пары меди в смеси с гелием (1—5 мм рт. ст.), D — 10 мм
	0,578213	$4p\,^2P^0_{1/2} - 4s\,^2D_{3/2}$	»	Условия те же
Золото	0,577818	$6p\,^2P^0_{1/2} - 6s\,^2D_{3/2}$	»	Пары золота при 1500°С, D — 10 мм
IIA Кальций	5,1417	$4p\,^1P^0_1 - 3d\,^1D_2$	»	Пары кальция при 460°С в смеси с углем или песком (3 мм рт. ст.)
Стронций	6,4567	$5p\,^1P^0_1 - 4d\,^1D_2$	хор. пит.	Давление паров стронция при 46 °С, 3 мм рт. ст. углем или песком
IIB Кадмий	0,6200*	—	исп.	0,03—0,05 мм рт. ст. паров кадмия, 2—20 мм рт. ст. гелия, D—12 мм
	1,1860*	—	»	0,03—0,05 мм рт. ст. паров кадмия, 0,05—1 мм рт. ст. гелия или неона, D — 12 мм

* Относится к иону Cd II.

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация	Разбросание	Примечание
II *B* Калий	1,4330	$6p\,^2P^0_{1/2} - 6s\,^2S_{1/2}$	инт.	0,43—0,05 *мм рт. ст.* паров калия, 2—20 *мм рт. ст.* гелия, D — 12 *мм*
	1,4665	$4f\,^2F_{1,3/2} - 5d\,^2D_{3/2}$	«	Условия те же
Ртуть (рис. 33.11)	0,3045	—	слаб.	Смесь паров ртути и аргона —10⁻⁸ *мм рт. ст.* ртути и аргона, D — 5 *мм*
	0,7063*	—	»	
	0,8677	—	»	0,001 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,8—1,2 *мм рт. ст.* гелия, D—15 *мм*
	1,11768	$7p\,^1P^0_1 - 7s\,^3S_1$	»	0,09—0,19 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,005—0,05 *мм рт. ст.* гелия
	1,8892	—	»	0,001 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,2 *мм рт. ст.* аргона, D — 5 *мм*
	1,9246	—	»	Смесь паров ртути и аргона, D — 5 *мм*
	1,2545	—	»	0,001 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,8—1,2 *мм рт. ст.* гелия, D — 15 *мм*
	1,2740	—	»	0,001 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,2 *мм рт. ст.* аргона, D — 5 *мм*
	1,2981	—	«	0,001 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,8 *мм рт. ст.* аргона или 1,2 *мм рт. ст.* гелия, D — 15 *мм*
	1,3663	—	»	0,001 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,8—1,2 *мм рт. ст.* гелия, D — 15 *мм*
	1,36755	$7p\,^3P^0_1 - 7s\,^3S_1$	»	0,09—0,12 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,005—0,05 *мм рт. ст.* гелия, D — 6 *мм*
	1,3295	$6p'\,^3P^0_2 - 7s\,^3S_1$	непр.	0,09—0,12 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,1—1,0 *мм рт. ст.* гелия, неона, криптона или аргона, D — 6 *мм*

* Возможно, что это линия Ar I.

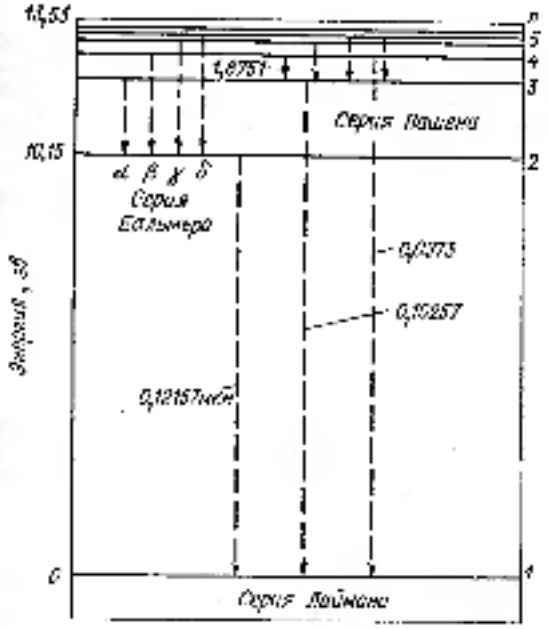


Рис. 33.7. Лазерный переход в водороде (1,875 мкм в серии Пашена) [1].

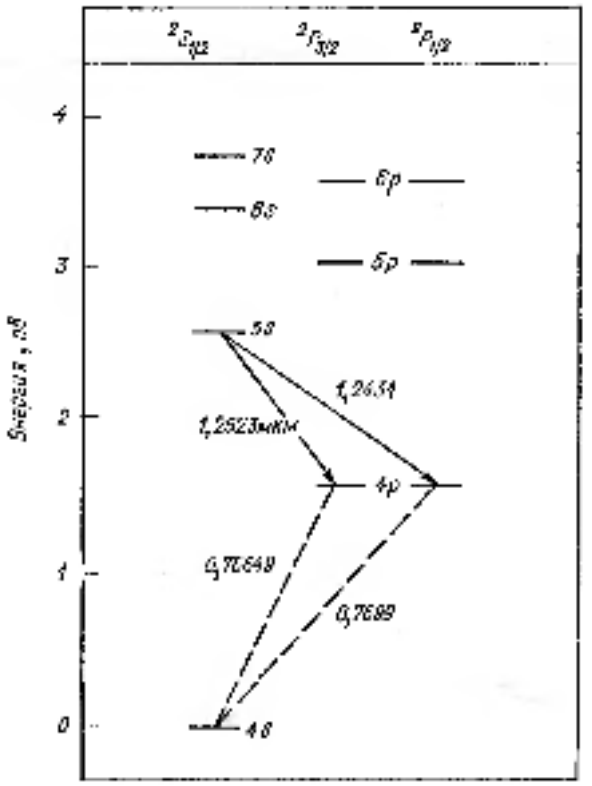


Рис. 33.9. Схема лазерных переходов в водороде [1].

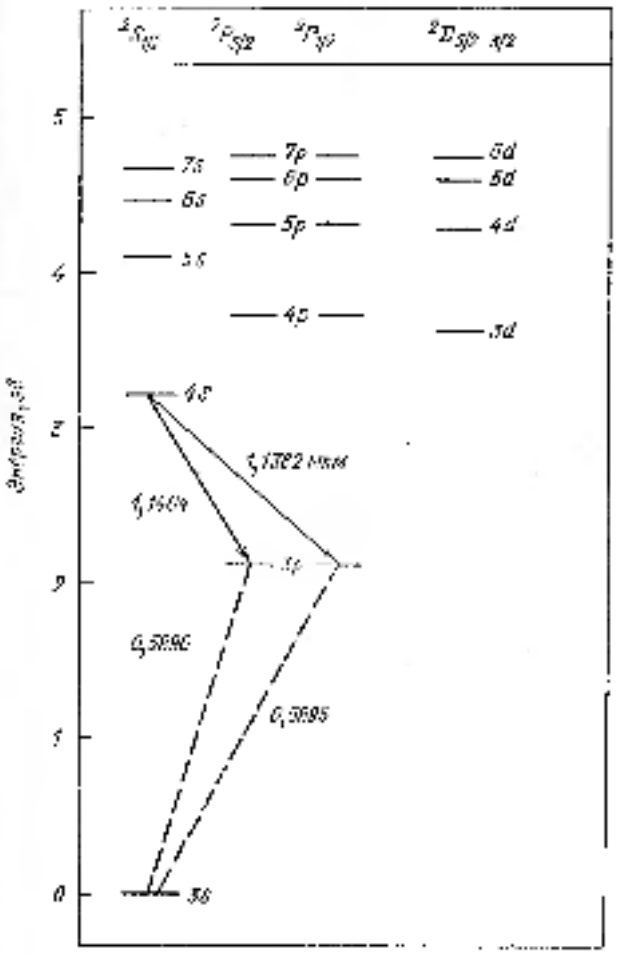


Рис. 33.8. Схема лазерных переходов в натрии [1].

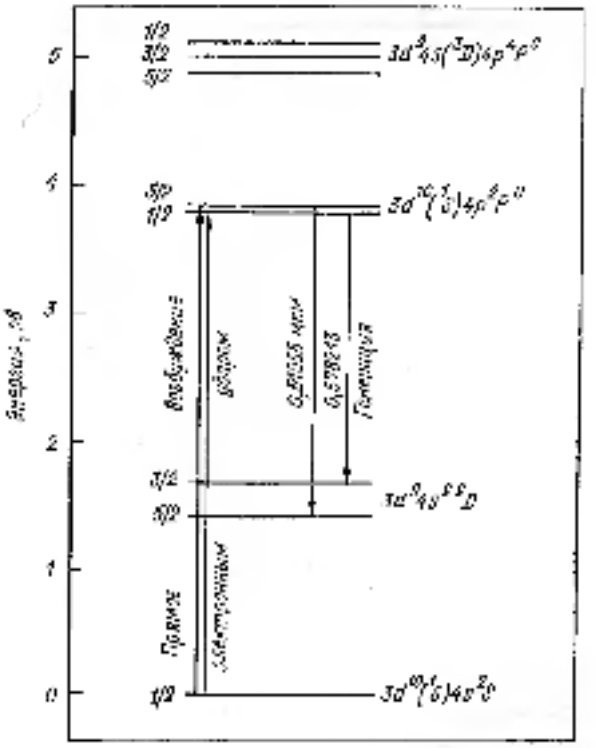


Рис. 33.10. Схема лазерных переходов в парах меди (0,6105 и 0,5782 мкм) [1].

Группа, элемент	Длина волны, мк	Идентификация	Возбуждение	Примечания
IIБ				
Ртуть	1,66609	$5f\,^3F_3^0 - 6d\,^3D_2$	инт.	0,09—0,12 мм рт. ст. пары ртути, 0,005—0,05 мм рт. ст. гелия, D — 6 мм
	1,69493	$5f\,^3F_4^0 - 6d\,^3D_3$	»	Условия те же
	1,70713	$5f\,^3F_3^0 - 6d\,^3D_2$	»	
	1,71096	$5f\,^3F_2^0 - 6d\,^3D_1$	»	
	1,73297	$7d\,^1D_2 - 7p\,^1F_1^0$	»	0,08—0,3 мм рт. ст. пары ртути, 0,005—0,1 мм рт. ст. гелия, неона, аргона или пенуха, D — 6 мм
	1,81296	$6p'\,^3F_4^0 - 7d\,^3D_3$	непр.	Условия те же
	3,342*	$6p^2\,^3P_0 - 8s\,^3S_1$	инт.	0,3 мм рт. ст. пары ртути, 0,26 мм рт. ст. аргона, D = 8 мм
	3,930	$6d\,^3D_2 - 6p'\,^3P_2^0$ или $5p6s - 5p^6$	»	Условия те же
	5,880	$6p'\,^3P_1^0 - 7d\,^3D_2$	»	
	6,490	$9s\,^1S_0 - 8p\,^1P_1^0$ или $10p\,^1P_1^0 - 10s\,^1S_0$	»	
III				
Таллий	0,5350	$7s\,^2S_{1/2} - 6p\,^2P_{3/2}^0$	пор. инт.	Более 0,01 мм рт. ст. пары таллия, несколько мм рт. ст. гелия или аргона, D = 1,3 ÷ ÷ 3,0 мм
IV				
Углерод	0,833515	$3p\,^1S_0 - 3s\,^1P_1^0$	инт.	4 мм рт. ст. смеси углекислого газа и гелия, D — 15 мм
	0,94167	$3p\,^1D_2 - 3s\,^1P_1^0$	»	Условия те же или 2—16 мм рт. ст. смеси CO и гелия
	1,06851	$3p\,^3D_3 - 3s\,^3P_2^0$	»	Условия те же
	1,06857	$3p\,^3D_1 - 3s\,^3P_0$	»	0,05 мм рт. ст. окиси углерода и 2—16 мм рт. ст. гелия
	1,66012	$3p\,^3D_2 - 3s\,^3P_2^0$	непр.	0,01 мм рт. ст. углекислого газа или окиси углерода, 2 мм рт. ст. гелия, D — 6 мм
	1,45425	$3p\,^1P_1 - 3s\,^1P_1^0$	»	Условия те же
	2,0625	$5d\,^1F_3^0 - 4p\,^1F_4$	»	0,02 мм рт. ст. окиси углерода, 1 мм рт. ст. гелия, D = 10 мм

* Сомнительно, это линия не $1p\,1_1$, а $1s\,1_1$.

Группа, элемент	Длина волны, *нм*	Идентификация	Возбуждение	Примечания
IV				
Углерод	3,4046	$4d\,^3D_2^0 - 4p\,^3P_2$	непр.	0,02 *мм рт. ст.* смеси углерода, 1 *мм рт. ст.* гелия, $D = 10$ *мм*
	3,6155	$6d\,^3F_2^0 - 5p\,^3D_3$	»	
	5,5056	$4p\,^3S_1 - 3d\,^3P_1^0$	»	
Кремний	1,198418	$4p\,^3D_2 - 4s\,^3P_1^0$	непр.	0,03 *мм рт. ст.* $SiCl_4$ или 0,04 *мм рт. ст.* $SiCl_4$ и 0,5 *мм рт. ст.* неона, $D = 6$ *мм*
	1,203146	$4p\,^3D_3 - 4s\,^3P_2^0$	»	Условия те же
	1,268402	$5s\,^3P_1^0 - 4p\,^3D_1$	»	0,03—0,05 *мм рт. ст.* $SiCl_4$, 1—5 *мм рт. ст.* неона, $D = 6$ *мм*
Олово	0,657903	$10d\,^3D_{3,2} - 6p\,^3P_2$	непр.	Пары $SnCl_4$ при комнатной температуре, $D = 5,6$ *мм*
Свинец (рис. 33.12)	0,363954	$6p\,7s\,^3P_1^0 - 6p^2\,^3P_1$	непр.	Давление паров ^{208}Pb при 800—900°С с добавлением гелия, неона или аргона, $D = 2$ *мм*
	0,405779	$6p7s\,^3P_1^0 - 6p^2\,^3P_0$	»	Условия те же
	0,406213	$6p6d\,^3F_1^0 - 6p^2\,^3D_2$	»	
	0,72280	$7s\,^3P_1^0 - 6p^2\,^3D_2$	»	0,9—2,0 *мм рт. ст.* паров свинца, 3 *мм рт. ст.* гелия, $D = 10$ *мм*
V				
Азот	0,4120*	—	непр.	0,001—0,02 *мм рт. ст.* смеси азота и ртути, $D = 3$ *мм*
	0,4391	—	»	Разряд (Н-пары) в азоте (1 *мм рт. ст.*), $D = 25$ *мм*
	0,4529	—	»	Условия те же
	0,4525*	—	»	0,001—0,02 *мм рт. ст.* смеси азота и ртути, $D = 3$ *мм*
	0,4750*	—	»	Условия те же
	0,5440*	—	»	
	0,5580*	—	»	
	0,5540*	—	»	
	0,85940	$3p\,^3P_{1/2}^0 - 3s\,^3P_{1/2}$	непр.	4 *мм рт. ст.* смеси азота и гелия, $D = 15$ *мм*
	0,86284	$3p\,^3P_{3/2}^0 - 3s\,^3P_{3/2}$	»	0,2—0,7 *мм рт. ст.* азота, 3 *мм рт. ст.* гелия, $D = 15$ *мм*
	0,91876	$3p'\,^3D_{3/2}^0 - 3s'\,^3D_{3/2}$	»	4 *мм рт. ст.* смеси азота и гелия, $D = 15$ *мм*
	0,93868	$3p\,^3P_{1/2}^0 - 3s\,^3P_{1/2}$	непр.	0,02—0,2 *мм рт. ст.* азота, 0,01—0,1 *мм рт. ст.* кислорода, водорода, гелия и неона, $D = 3$ *мм*; или 4 *мм рт. ст.* смеси азота и гелия, $D = 15$ *мм*
	0,93928	$3p\,^3D_{1/2}^0 - 3s\,^3P_{3/2}$	»	Условия те же
	1,34295	$3p\,^3S_{3/2}^0 - 3s\,^3P_{1/2}$	непр.	0,2—0,7 *мм рт. ст.* азота, или 0,15 *мм рт. ст.* азота, 3 *мм рт. ст.* гелия, $D = 15$ *мм*
	1,3583	$3p\,^3S_{3/2}^0 - 3s\,^3P_{3/2}$	непр.	0,01 *мм рт. ст.* смеси или азота, 2 *мм рт. ст.* гелия или 1 *мм рт. ст.* неона, $D = 6$ *мм*

* Есть некоторая неясность относительно точности измерения длины волны этой линии, причину не определение с полной долей вероятности ошибочности.

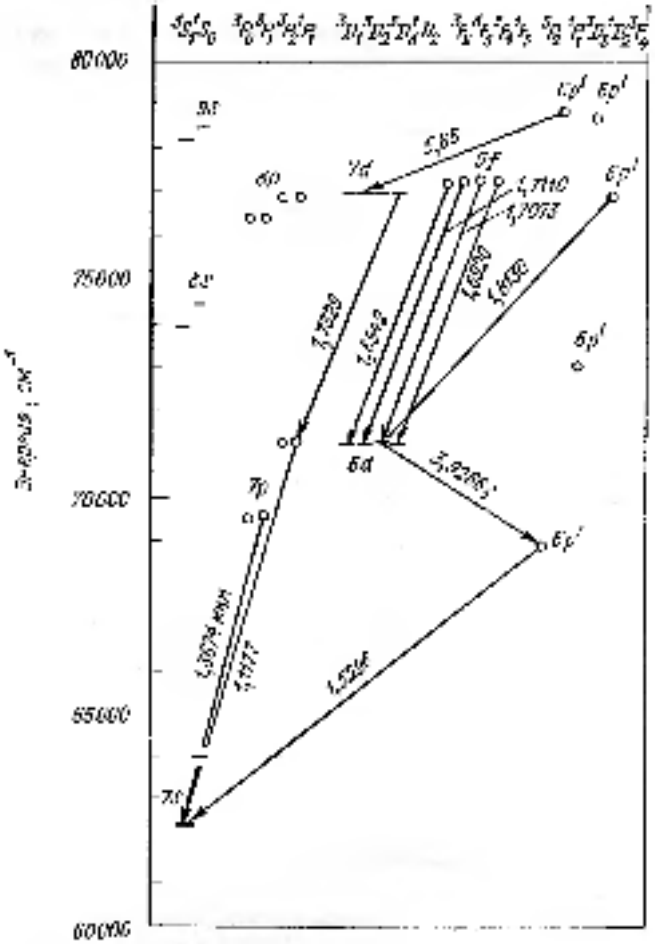


Рис. 35.11. Схема большинства лазерных переходов в парах ртути [1]. (Кружками обозначены нечетные, в горизонтальными линиями — четные уровни атома.)

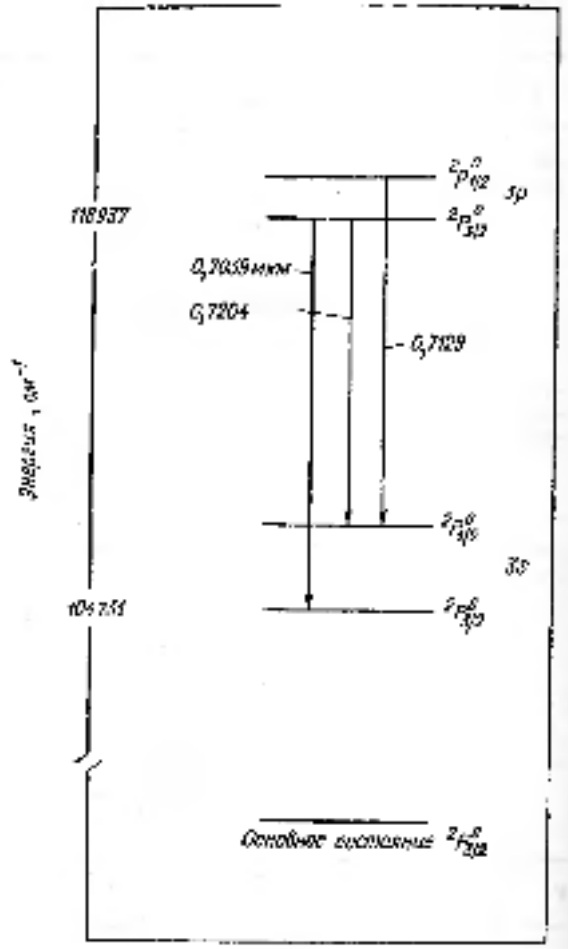


Рис. 35.13. Схема лазерных переходов по фтору [1].

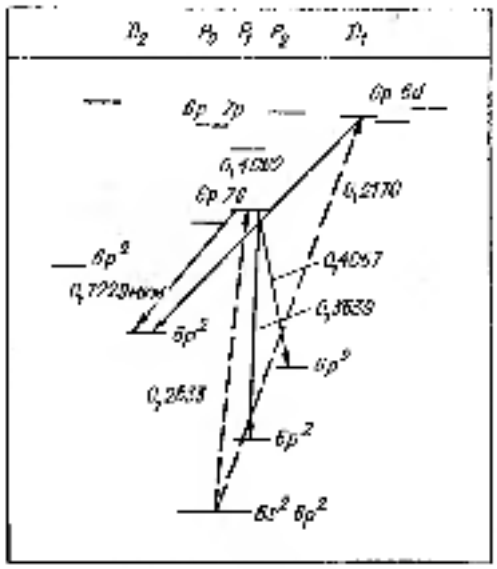


Рис. 35.12. Схема лазерных переходов в парах цезия [1].

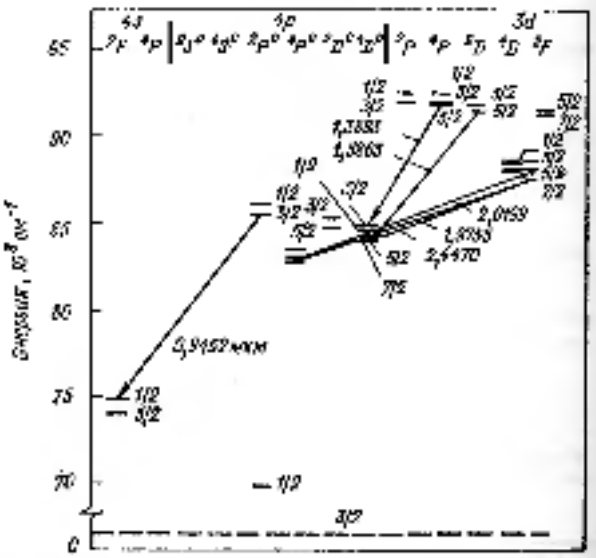


Рис. 35.14. Схема лазерных переходов в хлоре [1].

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация	Возбуждение	Примечания
V Азот	1,45423	—	имп.	0,2—0,7 мм рт. ст. азота; или 0,15 мм рт. ст. азота, 3 мм рт. ст. гелия, $D = 15$ мм
	1,4677	$4s\,^4P_{1/2} - 3p\,^4D^0_{3/2}$	непр.	0,03 мм рт. ст. окиси или закиси азота, 2 мм рт. ст. гелия или 1 мм рт. ст. неона, $D = 5$ мм
	3,7942	—	имп.	0,2—0,7 мм рт. ст. азота; или 0,15 мм рт. ст. азота, 3 мм рт. ст. гелия, $D = 15$ мм
	3,8154	—	»	Условия те же
VI Кислород	0,844628 0,844638 0,844672 0,844681 } *	$3p\,^5P_{0,1,2} - 3s\,^5S^0_2$	непр.	0,01—0,04 мм рт. ст. кислорода, 0,35 мм рт. ст. гелия, 1,4 мм рт. ст. аргона, окиси углерода, углекислого газа или гелия, $D = 7$ мм; или 0,1—2 мм рт. ст. кислорода, $D = 10$ мм
	0,882045	$3p\,^1F_3 - 3s'\,^1D^0_2$	имп.	В смеси углекислого газа с неоном (4 мм рт. ст.), $D = 15$ мм
	2,840	$4p\,^3P - 4s\,^3S^0$	непр.	0,08 мм рт. ст. кислорода, 0,5—1,0 мм рт. ст. гелия или неона, $D = 5 \div 7$ мм
	4,563	$4p\,^3P - 3d\,^3D^0$	»	Условия те же
	5,981	$7d\,^3D^0 - 6p\,^3P$	»	0,08 мм рт. ст. кислорода, 0,5—1,0 мм рт. ст. гелия или неона, $D = 5 \div 7$ мм
	6,8161	$3s'\,^5D^0_2 - 4p\,^5P_{1,2,3}$	имп.	В чистом кислороде, $D = 15$ мм
	6,858	$5p\,^3P - 5s\,^3S^0$	непр.	0,08 мм рт. ст. кислорода, 0,5—1,0 мм рт. ст. гелия или неона, $D = 5 \div 7$ мм
	6,8731	$3s'\,^5D^0_3 - 4p\,^5P_3$	имп.	В чистом кислороде, $D = 15$ мм
	10,409	$5p\,^3P - 4d\,^3D^0$	непр.	0,08 мм рт. ст. кислорода, 0,5—1,0 мм рт. ст. гелия или неона, $D = 5 \div 7$ мм
Сера	0,516032**		имп.	0,010—0,08 мм рт. ст. двуокиси серы, $D = 1,5$—6 мм
	0,919602**	—	»	Условия те же
	1,0456	$4p\,^3P_2 - 4s\,^3S^0_1$	непр.	0,03 мм рт. ст. SF_6 или 0,03 SF_6, 2 мм рт. ст. гелия. Так же в смеси H_2S с гелием, неоном или аргоном, $D = 5$ мм
	1,0830	$4p'\,^3F_3 - 4s'\,^3D^0_2$	»	Условия те же
Теллур	0,5454**		имп.	Теллур при температуре 125—250°С, 0,1—0,25 мм рт. ст. неона, $D = 6$ мм
	0,5640**			0,001—0,002 мм рт. ст. теллура, 0,2 мм рт. ст. гелия, $D = 3$ мм
	0,6350	—	»	Условия те же
VIIA Фтор (рис. 33.13)	0,7024	$3p\,^2P^0_{1/2} - 3s\,^2P_{1/2}$	»	0,03—0,1 мм рт. ст. CF_4, CF_6 или C_2F_6, 2—10 мм рт. ст. гелия, прокачка этой смеси, $D = 25$ мм
	0,7039	$3p\,^2P^0_{3/2} - 3s\,^2P_{1/2}$	»	Условия те же
	0,7129	$3p\,^2P^0_{1/2} - 3s\,^2P_{1/2}$	»	

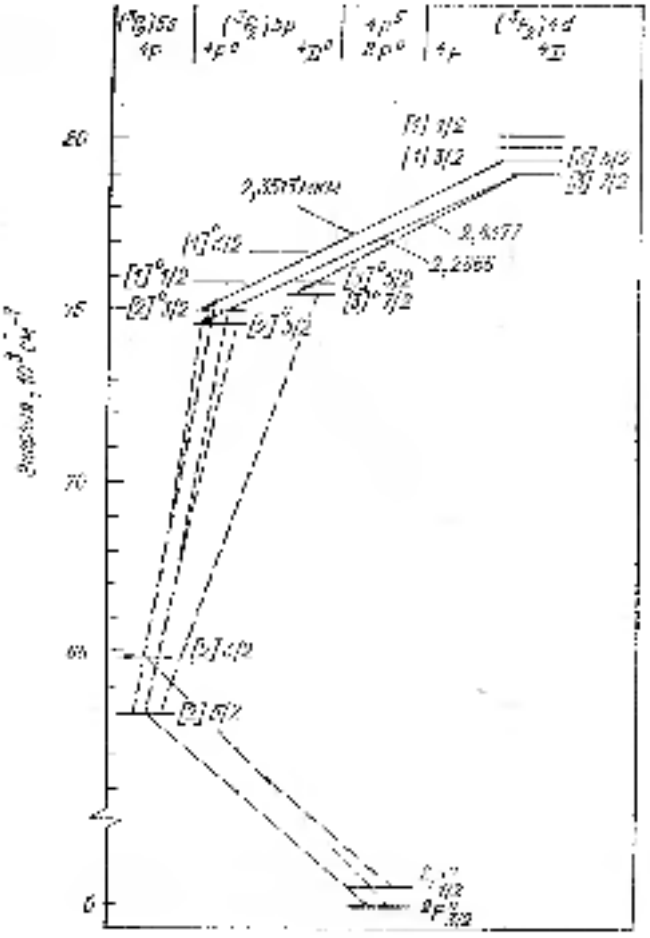
* Это триплет О I. Четыре линии в середине исчезают из-за большой доплеровской ширины линии (высокая t° возбуждения и высокоскоростной молекулярной диссоциации) и радиационного захвата центра линии. Вследствие этого уширение на крыльях линии больше.

** Полагают, что линия тонка.

Группа, элемент	Длина волны, мк	Идентификация	Возбуждение	Примечание
VIIA Хлор (рис. 33.14)	0,945206	$4p\,^2P^0_{1/2} - 4s\,^2P_{3/2}$	непр.	0,03—0,08 мм рт. ст. хлора, 0,3—3 мм рт. ст. гелия или неона, $D = 6$ мм
	1,3873	$3d\,^4D_{7/2} - 4p\,^4D^0_{7/2}$	пит.	0,3 мм рт. ст. HCl, 0,1 мм рт. ст. гелия или неона, $D = 14$ мм
	1,3893	$3d\,^4D_{5/2} - 4p\,^4D^0_{5/2}$	»	Условия те же
	1,56697	$3d\,^4F_{9/2} - 4p\,^4D_{7/2}$	непр.	В смеси фреона и гелия (0,3 мм рт. ст.)
	1,9555	$3d\,^4D_{7/2} - 4p\,^4P^0_{5/2}$	»	В HCl или 0,1 мм рт. ст. хлора, $D = 6$ мм
	2,0199	$3d\,^4D_{1/2} - 4p\,^4P^0_{3/2}$	»	Условия те же
	2,4470	$3d\,^4D_{3/2} - 4p\,^4D^0_{1/2}$	»	0,09 мм рт. ст. хлора, 1,5—7,2 мм рт. ст. гелия, $D = 25$ мм
	3,0672	$5p\,^2D^0_{3/2} - 5s\,^2P_{1/2}$	»	0,09 мм рт. ст. хлора, 2,1 мм рт. ст. аргона $D = 25$ мм
Бром (рис. 33.15)	2,2866	$4d[2]_{5/2} - 5p[2]^0_{5/2}$	непр	0,3 мм рт. ст. бромистого водорода, $D = 12$ мм
	2,3513	$4d[3]_{7/2} - 5p[2]^0_{5/2}$	»	Условия те же
	2,8377	$4d[3]_{5/2} - 5p[3]^0_{7/2}$	»	
Иод	0,930*		эмп.	0,1 мм рт. ст. — давление паров иода, несколько мм рт. ст. гелия, $D = 5$ мм
	1,010*	—	»	Условия те же
	1,090*	—	»	
	1,090*	—	»	
	1,3159	$5p^5\,^2P^0_{1/2} - 5p^4\,^3P_{3/2}$	эмп. (фотолиз)	30 мм рт. ст. CF_3I или CH_3I, $D = 7$ мм
	1,4542	$7p[1]^0_{3/2} - 4d[2]_{5/2}$	»	0,3 мм рт. ст. HI, $D = 14$ мм
	2,5687	$5d[2]_{5/2} - 6p[1]^0_{3/2}$	непр.	0,3 мм рт. ст. HI, 0,3 мм рт. ст. неона, $D = 14$ мм
	2,7572	$(^1D_2)5d[2]_{5/2} - (^1D_2)6p[1]^0_{3/2}$	»	В HI, $D = 12$ мм
	3,030	$5d[2]_{5/2} - 6p[1]^0_{3/2}$	»	В смеси CH_3I и паров воды или CF_3I с гелием, аргоном или ксеноном, $D = 36$ мм
	3,236	$(^3P_2)5d[2]_{3/2} - (^3P_2)6p[1]^0_{3/2}$	»	В парах иода или HI, $D = 12$ мм
	3,429	$(^3P_2)5d[4]_{7/2} - (^3P_2)6p[3]^0_{5/2}$	»	В парах иода, $D = 12$ мм
	4,858	$5d[1]_{3/2} - 6p[2]_{5/2}$	»	В смеси CF_3I, CH_3I или паров иода с гелием, аргоном или ксеноном, $D = 36$ мм
	4,912	$5d[4]_{7/2} - 6p[3]_{5/2}$	»	Условия те же
	5,497	$5d[2]_{5/2} - 6p[1]_{3/2}$	»	
	6,730	$5d[2]_{3/2} - 6p[1]_{3/2}$	»	
	6,902	$5d[3]_{7/2} - 6p[2]_{5/2}$	»	
	9,016	$5d[3]_{5/2} - 6p[2]_{3/2}$	»	
VIIB Марганец (рис. 33.16)	0,5341[illegible]*	$y\,6P^0_{3/2} - a\,^6D_{7/2}$	сор. пит.	0,1—2,0 мм рт. ст. паров марганца (температура 1100—1300 °С), 1,0—3,0 мм рт. ст. гелия, $D = 10$ мм

* Установлено, что линии принадлежат иону молекулы MnO_2.
** Температура наблюдалась по виду молекулярной спектральной структуры этой полосы.

Рис. 33.15. Схема лазерных переходов в эксимерном броме [1]. (Штриховыми показаны сильные спонтанные переходы.)



Продолжение табл. 33.1

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация	Возбуждение	Примечания
VIIB Марганец (рис. 33.16)	0,5420368	$^6P^5_{5/2} - {}^6D_{7/2}$	нер. изл.	0,1—2,0 мм рт. ст. пара марганца (температура 1100—1300°С), 1,0—2,0 мм рт. ст. гелия, D — 10 мм
	0,5170640	$^6P^5_{3/2} - {}^6D_{5/2}$	< >	
	0,5481345	$^6P^5_{5/2} - {}^4D_{3/2}$	> <	
	0,5516777	$^6P^5_{3/2} - {}^4D_{1/2}$	< <	
	0,6337149	$^4P^5_{3/2} - {}^6D_{7/2}$	> >	
	1,2899	$^6P^5_{7/2} - {}^6D_{9/2}$	< >	
	1,3903	$^6P^5_{5/2} - {}^4D_{3/2}$	< >	
	1,33179	$^6P^5_{3/2} - {}^4D_{5/2}$	> >	
	1,38357	$^6P^5_{5/2} - {}^4D_{7/2}$	> >	
	1,38636	$^6P^5_{3/2} - {}^6D_{5/2}$	> >	
	1,39075	$^6P^5_{3/2} - {}^4D_{1/2}$	> <	
0 Гелий (рис. 33.17)	1,8816	$3p\,^3P - 3d\,^3D$	нер.	0,1 мм рт. ст. гелия, D — 6 мм
	1,9513	$4s\,^3P - 3d\,^3D$	>	Условия те же
	2,06813	$2\,^1P_1 - 2\,^1S_0$	нер. изл.	2,7 мм рт. ст. гелия, D — 1,3 мм
	2,0603	$7d\,^3D_3 - 4p\,^3P$	нер.	8,0 мм рт. ст. гелия, примесь аргона или азота*, D — 7 мм
	56,8	$3p\,^1P_1 - 3d\,^1D_2$	>	0,1 мм рт. ст. гелия, D — 10 мм
	216,3	$4s\,^1P - 4d\,^1D$	>	Условия те же

* Возбуждение молекулы азота или окиси углерода метастабильным уровнем He 2^3S, с последующим тушением возбужденных молекулярных уровней до 3^1P электронным ударом.

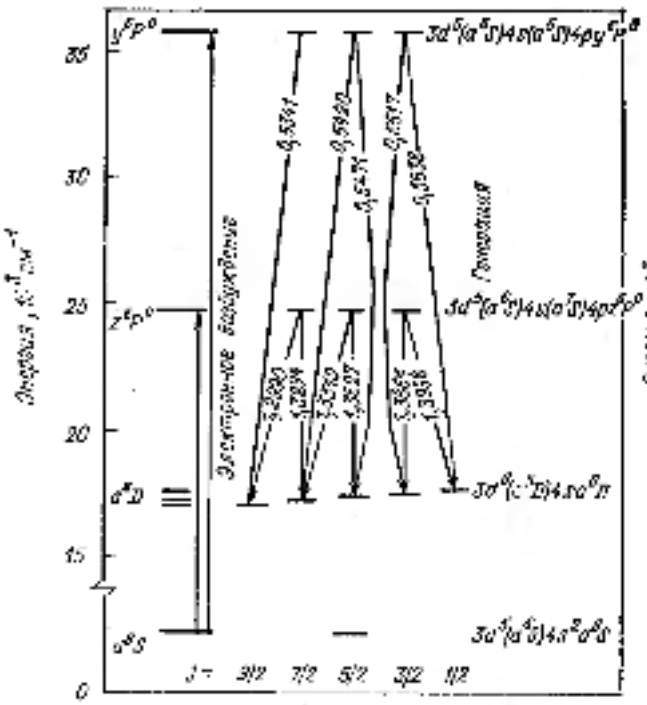


Рис. 33.16. Схема лазерных переходов и электронного возбуждения в парах марганца [1].

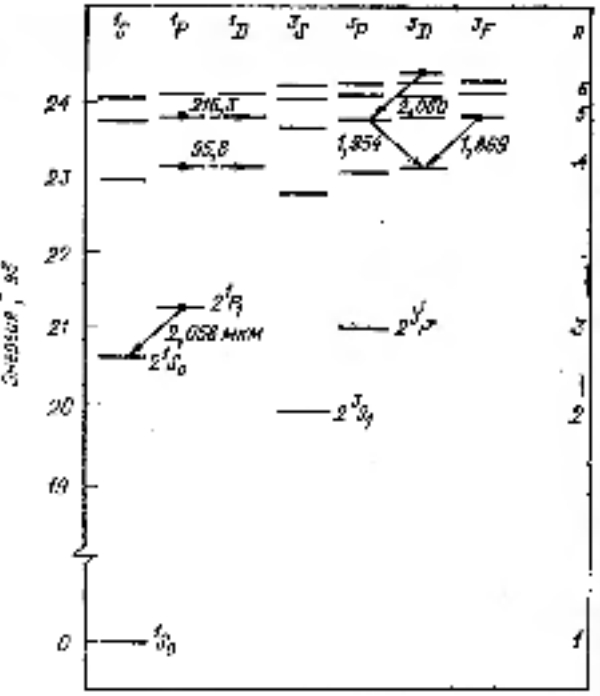


Рис. 33.17. Схема лазерных переходов в гелии [1].

Продолжение табл. 33.1

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация: Газ	Идентификация: Переход	Возбуждение	Примечания
6 Неон (рис. 33.18)	0,594096	$3p'[^1/_2]_0 - 3s[^3/_2]_1^0$	$2p_1 - 1s_2$	кор. комп.	3 мм рт. ст. неона, $D = 5$ мм. В длинных разрядных трубках
	0,585249	$3p'[^1/_2]_0 - 3s'[^1/_2]_1^0$	$2p_1 - 1s_2$	» »	0,001 0,2 мм рт. ст. смеси гелия и неона с примесью аргона*, $D = 3$ мм
	0,585193	$5s'[^1/_2]_0^0 - 3p[^3/_2]_1$	$3s_2 - 2p_4$	непр.	В смеси He—Ne (5:1), $PD = 3{,}6$ мм рт. ст.·мм**
	0,594483	$3p'[^3/_2]_1 - 3s[^3/_2]_1^0$	$2p_4 - 1s_3$	кор. комп.	0,3 мм рт. ст. неона, $D = 5$ мм
	0,60161	$3s'[^1/_2]_1^0 - 3p[^3/_2]_1$	$2s_2 - 2p_7$	непр.	В смеси He—Ne (5:1), $PD = 3{,}6$ мм рт. ст.·мм**
	0,61180	$5s'[^1/_2]_1^0 - 3p[^3/_2]_2$	$2s_2 - 2p_6$	»	Условия те же
	0,614300	$3p[^3/_2]_2 - 3s[^3/_2]_1^0$	$2p_6 - 1s_5$	кор. комп.	0,3 мм рт. ст. неона, $D = 5$ мм
	0,62937	$5s'[^1/_2]_1^0 - 3p'[^1/_2]_1$	$2s_2 - 2p_5$	непр.	В смеси He—Ne (5:1) $PD = 3{,}6$ мм рт. ст.·мм**
	0,63282	$5s'[^1/_2]_1^0 - 3p'[^3/_2]_2$	$2s_2 - 2p_4$	»	Сильная линия из линий перехода $2s_2 - 2p$. В смеси He—Ne (5:1) $PD = 3{,}6$ мм рт. ст.·мм
	0,63518	$5s'[^1/_2]_1^0 - 3p[^1/_2]_0$	$2s_2 - 2p_3$	»	Как для линии 0,6328 мм**
	0,64011	$5s'[^1/_2]_1^0 - 3p'[^1/_2]_0$	$2s_2 - 2p_2$	»	Условия те же
	0,72046	$5s'[^1/_2]_1^0 - 3p[^1/_2]_0$	$2s_2 - 2p_1$	»	

* Примесь аргона необходима для обеспечения достаточного уровня мощности.
** Для генерации на этих линиях необходимо подавление генерации на линиях 0,6328 и 3,39 мкм.

Группа элемента	Длина волны, мкм	Переходы, мкм: Рис.	Переходы, мкм: Пашен	Возбуждение	Примечания
0					
Гелий	0,88653	$4s'\,[^1/_2]_1^0 - 3p[^3/_2]_1$	$2s_2-2p_{10}$	непр.	Наблюдается в очень длинных разрядных трубках
	0,88688	$4s'\,[^1/_2]_0^0 - 3p[^1/_2]_1$	$2s_1-2p_{10}$	»	Условия те же
	0,9186	$4s\,[^3/_2]_1^0 - 3p[^1/_2]_0$	$2s_3-2p_{10}$	инс.	В смеси неона с водородом*
	0,9003	$4s\,[^3/_2]_2^0 - 3p[^1/_2]_1$	$2s_5-2p_{10}$	»	Условия те же
	1,0295	$4s'\,[^1/_2]_1^0 - 3p\,[^3/_2]_2$	$2s_2-2p_8$	непр.	Наблюдается в очень длинных разрядных трубках
	1,0321	$4s'\,[^1/_2]_1^0 - 3p\,[^3/_2]_1$	$2s_3-2p_7$	»	2,8 *мм рт. ст.* смеси He—Ne, парциальное давление неона 0,15 *мм рт. ст.*, $D = 5 \div 10$ *мм*[10]
	1,0798	$4s'\,[^1/_2]_0^0 - 3p\,[^3/_2]_1$	$2s_2-2p_7$	»	В смеси He—Ne (10:1), PD — —10 *мм рт. ст.-см*
	1,0844	$4s'\,[^1/_2]_1^0 - 3p[^3/_2]_2$	$2s_2-2p_6$	»	Условия те же
	1,1143	$4s\,[^3/_2]_1^0 - 3p[^3/_2]_2$	$2s_4-2p_9$	»	Как для линии 1,0798 *мкм*. Наблюдается также в чистом неоне и смеси неона с водородом
	1,1177	$4s\,[^3/_2]_2^0 - 3p[^3/_2]_2$	$2s_5-2p_9$	»	Условия те же
	1,1390	$4s\,[^3/_2]_2^0 - 3p[^3/_2]_2$	$2s_5-2p_6$	»	Как для линии 1,0798 *мкм*
	1,1409	$4s'\,[^1/_2]_1^0 - 3p'\,[^3/_2]_1$	$2s_2-2p_5$	»	Как для линии 1,1143 *мкм*
	1,15228	$4s'\,[^1/_2]_1^0 - 3p'\,[^3/_2]_2$	$2s_2-2p_4$	»	Снимок сделан из линий 2s—2p-перехода. В смеси He—Ne (10:1) PD — 11 *мм рт. ст.-см*
	1,16250	$4s\,[^3/_2]_1^0 - 3p[^1/_2]_0$	$2s_5-2p_3$	»	Тлеющий разряд в чистом неоне, оптимум PD меньше 0,5 *мм рт. ст.-см*
	1,1602	$4s'\,[^1/_2]_1^0 - 3p[^1/_2]_1$	$2s_2-2p_3$	»	В смеси He—Ne
	1,1614	$4s\,[^1/_2]_0^0 - 3p'\,[^3/_2]_1$	$2s_5-2p_8$	»	Условия те же
	1,1767	$4s'\,[^1/_2]_1^0 - 3p'\,[^1/_2]_0$	$2s_2-2p_2$	»	Как для линии 1,1143 *мкм*
	1,1789	$4s\,[^3/_2]_1^0 - 3p[^3/_2]_2$	$2s_4-2p_8$	»	В очень длинных разрядных трубках в смеси неона с водородом
	1,1985	$4s'\,[^1/_2]_0^0 - 3p'[^1/_2]_1$	$2s_3-2p_2$	»	В смеси He—Ne
	1,2066	$4s\,[^3/_2]_2^0 - 3p[^3/_2]_1$	$2s_5-2p_7$	»	В смеси He—Ne
	1,2460	$4s\,[^3/_2]_1^0 - 3p'\,[^3/_2]_2$	$2s_4-2p_6$	»	В очень длинных разрядных трубках в смеси неона и водорода
	1,2586	$5V\,[^9/_2]_{6,5} - 3d[^5/_2]_2^0$	$5V-3d_1'$	инс.**	0,2 *мм рт. ст.* неона, 3—4 *мм рт. ст.* гелия, $D = 5,2$ *мм*
	1,2594	$4s\,[^3/_2]_1^0 - 3p'\,[^3/_2]_2$	$2s_4-2p_4$	»	В смеси гелия и водорода
	1,2659	$4s\,[^3/_2]_1^0 - 3p[^1/_2]_0$	$2s_4-2p_3$	непр.	Как для линии 1,2460 *мкм*
	1,2707	$4s\,[^3/_2]_2^0 - 3p'\,[^3/_2]_1$	$2s_5-2p_3$	»	Условия те же
	1,2887	$4s\,[^3/_2]_1^0 - 3p'\,[^1/_2]_1^0$	$2s_4-2p_2$	»	В очень длинных разрядных трубках в смеси He—Ne
	1,2912	$4s\,[^3/_2]_2^0 - 3p'\,[^3/_2]_2$	$2s_5-2p_2$	»	Как для линии 1,2460 *мкм*
	1,3912	$4s\,[^3/_2]_2^0 - 3p'\,[^1/_2]_1$	$2s_5-2p_1$	инс.	В смеси неона и водорода
	1,5231	$4s'\,[^1/_2]_1^0 - 3p'\,[^1/_2]_0$	$2s_2-2p_1$	непр.	Как для линии 1,0798 *мкм*
	1,6305	$6s\,[^3/_2]_2^0 - 4p[^3/_2]_2$	$4s_5-3p_9$	инс.**	0,2 *мм рт. ст.* неона, 3—4 *мм рт. ст.* гелия, $D = 5,2$ *мм*
	1,7161	$4s\,[^3/_2]_1^0 - 3p'\,[^1/_2]_0$	$2s_4-2p_1$	непр.	Как для линии 1,2887 *мкм*
	1,8210	$4p'\,[^1/_2]_1 - 4s[^3/_2]_1^0$	$3p_1-2s_4$	» »	Условия те же

* Для генерации на этой линии необходимо возбуждение генерации на других линиях перехода 2s—2p.
** Оптическая лампа тонкой линии.

Группа элементов	Длина волны, мкм	Переходы: Ранг	Переходы: Терм	Возбуждение	Примечания
Ne	1,8281	$4f\,[^3/_2]_{1,2} - 3d\,[^3/_2]_1^0$	$4f - 3d_4'$	нейтр	В смеси He — Ne (10:1) $pD = 8$ мм рт. ст.·мм
	1,8287	$4f\,[^3/_2]_1 - 3d\,[^3/_2]_3^0$	$4F - 3d_4$	»	Условия те же
	1,8406	$4f\,[^5/_2]_{2,3} - 3d\,[^3/_2]_2^0$	$4F - 3d_3$	»	
	1,8458	$4f\,[^5/_2]_3 - 3d\,[^3/_2]_1^0$	$4F - 3d_2$	»	В смеси He — Ne (100:1) $pD = 8$ мм рт. ст.·мм
	1,8556	$4f\,[^7/_2]_4 - 3d\,[^3/_2]_2^0$	$4F - 3d_1$	»	Как для линии 1,8281 мкм
	1,8662	$4f\,[^7/_2]_{3,4} - 3d\,[^5/_2]_3^0$	$4F - 3d_1'$	»	Условия те же
	1,9514	$4p'\,[^3/_2]_2 - 4s'\,[^3/_2]_1^0$	$4p_3 - 2s_4$	»	В смеси He — Ne. Также в чистом неоне, $pD = 0,1 - 0,5$ мм рт. ст. мм
	1,9577	$4p'\,[^1/_2]_1 - 4s\,[^1/_2]_0^0$	$3p_2 - 2s_5$	»	В смеси He — Ne
	2,0350	$4p'\,[^3/_2]_2 - 4s\,[^3/_2]_1^0$	$3p_4 - 2s_3$	»	Как для линии 1,9574 мкм
	2,0556	$4p'\,[^3/_2]_1 - 4s\,[^3/_2]_2^0$	$3p_2 - 2s_4$	»	В смеси He — Ne
	2,1019	$4d'\,[^3/_2]_1^0 - 4p\,[^3/_2]_2$	$2s'''' - 2p_4(?)$	»	В очень длинных разрядных трубках
	2,1041	$4d'\,[^3/_2]_2^0 - 4p'\,[^3/_2]_1^0$	$3p_1 - 2s_5$	»	Как для линии 1,9577 мкм
	2,1708	$4p\,[^1/_2]_1 - 4s\,[^1/_2]_1^0$	$3p_5 - 2s_4$	»	0,05 мм рт. ст. чистого неона
	2,326	$4p\,[^3/_2]_2 - 4s\,[^3/_2]_2^0$	$3p_6 - 2s_3$	»	В длинных разрядных трубках. В чистом неоне или смеси He—Ne
	2,3951	$4p'\,[^3/_2]_2 - 4s\,[^3/_2]_1^0$	$3p_4 - 2s_2$	»	В смеси He — Ne или в чистом неоне
	2,3958	$4p'\,[^1/_2]_1 - 4s\,[^1/_2]_0^0$	$3p_2 - 2s_3$	»	0,6 мм рт. ст. смеси He — Ne (5:1), $D = 8$ мм
	2,42	$5s'\,[^1/_2]_1^0 - 4p\,[^1/_2]_0$	$3s_2 - 3p_{10}$	»	0,86 мм рт. ст. смеси He — Ne (13:1), $D = 22$ мм. В длинной разрядной трубке
	2,4226	$4d\,[^3/_2]_1^0 - 4p\,[^3/_2]_2$	$3d_1 - 3p_4$	»	0,15 мм рт. ст. неона, $D = 15$ мм
	2,4250	$4d'\,[^3/_2]_1 - 4p'\,[^3/_2]_1^0$	$3p_1 - 2s_4$	»	В смеси He — Ne
	2,5400	$4d\,[^3/_2]_1^0 - 4p\,[^3/_2]_2$	$4d_4 - 3p_1$	»	0,01 — 0,2 мм рт. ст. неона, 0,0—1,5 мм рт. ст. гелия, $D = 10$ мм
	2,5524	$4p\,[^3/_2]_1 - 4s\,[^3/_2]_1^0$	$3p_{10} - 2s_3$	»	В длинной разрядной трубке, в чистом неоне или в смеси He — Ne, $D = 10$ мм
	2,7552	$4d\,[^3/_2]_1^0 - 4p\,[^3/_2]_1$	$4d_1 - 3p_2$	»	Как для линии 2,5400 мкм
	2,7620	$5s'\,[^3/_2]_{2,3}^0 - 4p\,[^3/_2]_2$	$3s_3 - 3p_3$	»	Условия те же
	2,864	$4d'\,[^3/_2]_1^0 - 4p'\,[^3/_2]_2$	$4s_4' - 3p_4$	»	
	2,9450	$5s\,[^3/_2]_1^0 - 4p\,[^3/_2]_1$	$3s_4 - 3p_{10}$	»	
	2,9670	$4d\,[^1/_2]_1^0 - 4p'\,[^3/_2]_1$	$4d_2 - 3p_3$	»	
	2,9872	$5s\,[^3/_2]_2^0 - 4p'\,[^3/_2]_1$	$4d_3 - 3p_2$	»	
	3,0968	$4d\,[^3/_2]_2^0 - 4p'\,[^3/_2]_1$	$4d_5 - 3p_2$	»	
	3,1720	$5s'\,[^1/_2]_1^0 - 4p\,[^1/_2]_0$	$3s_1 - 3p_5$	»	0,65 мм рт. ст. смеси He — Ne (12:1), $D = 10$ мм. Необходимо охлаждение. Генерация на линии 3,39 мкм

Группа элемент	Длина волны, мкм	Переходы: Ритц	Переходы: Пашен	Возбуждение	Примечания
0					
Неон	3,3182	$5s[^3/_2]_1^0 - 4p[^1/_2]_0$	$3s_4 - 3p_8$	непр.	Как для линии 2,5400 мкм
	3,3342	$6s'[^1/_2]_1^0 - 4p'[^3/_2]_1$	$3s_2 - 3p_5$	»	
	3,3362	$5s[^3/_2]_2^0 - 4p[^5/_2]_3$	$3s_3 - 3p_8$	»	Условия те же
	3,3813	$7s'[^1/_2]_1^0 - 5p'[^3/_2]_1$	$5s_2 - 4p_5$	»	
	3,3840	$7s'[^1/_2]_0^0 - 5p'[^1/_2]_1$	$5s_3 - 4p_7$	»	
	3,3913	$5s'[^1/_2]_1^0 - 4p'[^1/_2]_1$	$3s_2 - 3p_4$	»	В смеси He—Ne (5:1) $PD = 3,6$ мм рт. ст.·мм
	3,3918	$5s'[^1/_2]_1^0 - 4p'[^3/_2]_0$	$3s_2 - 3p_2$	»	В смеси He—Ne (6:1) $PD = 3,6$ мм рт. ст.·мм Очень большой коэффициент усиления
	3,4481	$5s[^3/_2]_1^0 - 4p[^3/_2]_1$	$3s_3 - 3p_7$	»	Как для линии 2,5400 мкм
	3,5845	$5s[^3/_2]_2^0 - 4p[^3/_2]_2$	$3s_4 - 3p_6$	»	
	3,7746	$4p'[^1/_2]_0 - 3d[^3/_2]_2^0$	$3p_2 - 3d_1$	»	Условия те же
	3,9517	$5s[^3/_2]_1^0 - 4p[^1/_2]_0$	$3s_3 - 3p_5$	»	
	4,2183	$6s'[^1/_2]_1^0 - 4p'[^1/_2]_0$	$3s_2 - 3p_3$	»	Как для линии 3,0720 мкм
	5,4048	$4p'[^1/_2]_0 - 3d'[^3/_2]_1^0$	$3p_2 - 3s_2$	»	0,01—0,2 мм рт. ст. неона, 0,00—1,0 мм рт. ст. гелия, $D = 10$ мм
	6,6096	$4p[^5/_2]_3 - 3d[^3/_2]_1^0$	$3p_8 - 3d_2$	»	
	7,3226	$6s[^3/_2]_2^0 - 6p[^5/_2]_3$	$4s_3 - 4p_8$	»	Условия те же
	7,4211	$6s'[^1/_2]_0^0 - 5p'[^3/_2]_1$	$4s_2 - 4p_5(7)$ или	»	
		$6s'[^1/_2]_0^0 - 5p'[^3/_2]_1$	$4s_2 - 4p_6$	»	
	7,4287	$5p'[^1/_2]_1 - 4d[^3/_2]_2$	$4p_0 - 4d_3$	»	
	7,4799	$4p[^3/_2]_2 - 3d[^5/_2]_2^0$	$3p_2 - 3d_3$	»	
	7,4994	$6s[^3/_2]_2^0 - 5p[^5/_2]_3$	$4s_3 - 4p_8$	»	
	7,5313	$6s[^3/_2]_1^0 - 5p[^3/_2]_1$	$4s_4 - 4p_5$	»	0,16 мм рт. ст. неона, 0,3 мм рт. ст. гелия, $D = 10$ мм
	7,6163	$4p[^3/_2]_1 - 3d[^3/_2]_2^0$	$3p_5 - 3d_1$	»	0,01—0,2 мм рт. ст. неона, 0,0—1,0 мм рт. ст. гелия, $D = 10$ мм
	7,6461	$5p'[^3/_2]_1 - 4d[^5/_2]_2^0$	$4p_0 - 4d_1$	»	
	7,6510	$4p[^5/_2]_2 - 3d[^7/_2]_3^0$	$3p_8 - 3d_4$	»	
	7,6925	$4p'[^3/_2]_2 - 3d'[^5/_2]_2^0$	$3p_6 - 3s_4$	»	
	7,7015	$4p'[^3/_2]_2 - 3d'[^5/_2]_3^0$	$3p_6 - 3s_1''$	»	
	7,7401	$4p[^5/_2]_3 - 3d[^5/_2]_2^0$	$3p_8 - 3d_3$	»	
	7,7665	$4p'[^3/_2]_1 - 3d'[^3/_2]_1^0$	$3p_2 - 3s_3$	»	
	7,7815	$6s[^3/_2]_1^0 - 5p[^3/_2]_2$	$4s_4 - 4p_7$	»	Условия те же
	7,8368	$6s[^3/_2]_2^0 - 5p[^3/_2]_2$	$4s_3 - 4p_6$	»	
	8,0063	$4p'[^3/_2]_1 - 3d'[^5/_2]_3^0$	$3p_5 - 3s_1''$	»	
	8,0621	$4p[^5/_2]_3 - 3d[^7/_2]_4^0$	$3p_8 - 3d_4$	»	
	8,3370	$4p'[^5/_2]_2 - 3d[^5/_2]_2^0$	$3p^1 - 3d_1''$	»	
	8,8418	$4p[^5/_2]_3 - 3d[^5/_2]_2^0$	$3p_{10} - 3d_1''$	»	
	9,0533	$6s[^3/_2]_1^0 - 5p[^3/_2]_0$	$4s_4 - 4p_{10}$	»	
	или 9,0896			»	

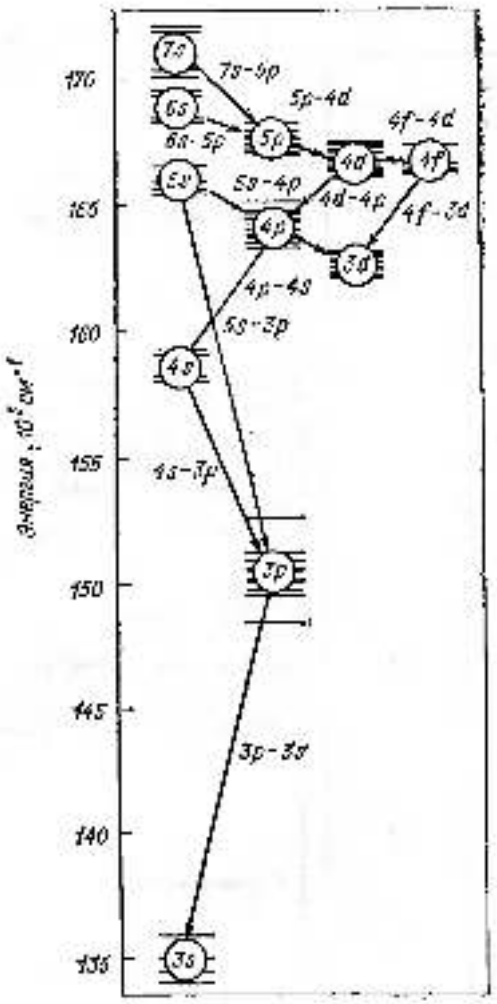


Рис. 33.18. Схема основных групп лазерных переходов в неоне [1].

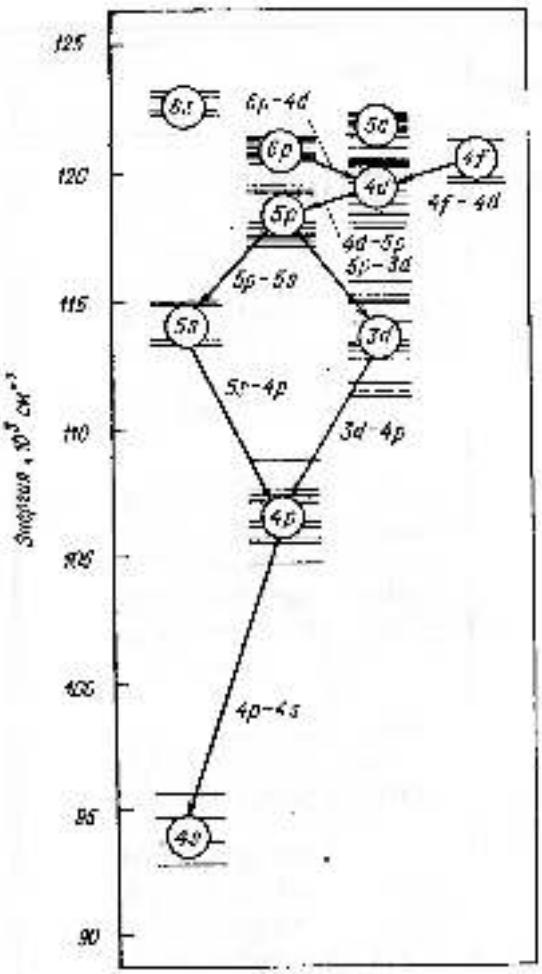


Рис. 33.19. Схема основных групп лазерных переходов в аргоне [1].

Продолжение табл. 33.1

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация: Рен	Идентификация: Пашен	Возбуждение	Примечания
0 Неон	10,0637	$4p\,[^1/_2]_1 - 3d\,[^3/_2]_1^0$	$3p_{10} - 3d_7$	непр.	0,01—0,2 мм рт. ст. неона, 0,1—1,0 мм рт. ст. гелия, $D = 10$ мм
	10,981	$4p[^3/_2]_2 - 3d\,[^3/_2]_3^0$	$3p_{10} - 3d_9$	»	
	11,861	$5p[^3/_2]_2 - 5s'[^1/_2]_0^0$	$4p_{10} - 5s_5$	»	
	11,902	$5p[^1/_2]_0 - 4d[^3/_2]_1^0$	$4p_9 - 4d_2$	»	
	12,835	$5p[^3/_2]_0 - 4d'[^3/_2]_1^0$	$4p_1 - 4s_4$	»	
	13,759	$7s'[^1/_2]_1^0 - 6p'[^3/_2]_2$ или $4d'[^3/_2]_2^0 - 4f[^5/_2]_3$	$6s_2 - 5p_4$	»	
	14,930	—	—	»	
	16,688	$5p[^3/_2]_2 - 4d[^5/_2]_2^0$	$4p_8 - 4d_4^*$	»	

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация: Пьюз	Идентификация: Пашен	Возбуждение	Примечание
0 Пьюз	16,668	$5p[^3/_2]_2 - 4d[^5/_2]^0_{2}$	$4p_8 - 4d_1'$	непр.	0,01—0,2 *мм рт. ст.* неона, 0,0—1,0 *мм рт. ст.* гелия, D — 10 *мм*
	16,553	$5p[^3/_2]_1 - 4d[^5/_2]^0_{2}$	$4p_7 - 4d_1'$	»	Условия те же
	16,947	$5p[^1/_2]_2 - 4d[^3/_2]^0_{1}$	$4p_8 - 4d_4$	»	
	17,156	$5p'[^3/_2]_2 - 4d'[^5/_2]^0_{3}$	$4p_4 - 4s_1''''$	»	
	17,186	$5p'[^3/_2]_2 - 4d'[^3/_2]^0_{2}$	$4p_5 - 4s_1''$	»	
	17,804	$5p'[^1/_2]_1 - 4d'[^3/_2]^0_{2}$	$4p_2 - 4s_1''$	»	
	17,841	$5p'[^3/_2]_1 - 4d'[^5/_2]^0_{2}$	$4p_3 - 4s_1''''$	»	
	17,888	$5p[^3/_2]_3 - 4d[^3/_2]^0_{2}$	$4p_9 - 4d_2'$	»	
	18,286	$5p[^3/_2]_2 - 4d[^5/_2]^0_{2}$	$4p_8 - 4d_1'$	»	
	20,430	$6p[^1/_2]_0 - 5d[^3/_2]^0_{1}$	$5p_8 - 5d_6$	»	
	21,762	$6p[^1/_2]_0 - 5d[^3/_2]^0_{1}$	$5p_8 - 5d_7$	»	
	22,836	$5p[^1/_2]_1 - 4d[^3/_2]^0_{2}$	$4p_{10} - 4d_8$	»	
	25,423	$6p'[^1/_2]_1 - 5d'[^3/_2]^0_{1}$	$5p_2 - 6s_1'$	»	
	28,553	$6p[^3/_2]_1 - 5d[^3/_2]^0_{1}$	$5p_3 - 5d_6$	»	
	31,553	$6p[^3/_2]_2 - 5d[^5/_2]^0_{3}$	$5p_7 - 6d_1'$	»	
	31,928	$6p[^3/_2]_1 - 5d[^5/_2]^0_{2}$	$5p_7 - 6d_1'$	»	В чистом неоне P — 0,05 *мм рт. ст.*, D — 21 *мм*
	32,916	$6p[^1/_2]_2 - 5d[^3/_2]^0_{1}$	$5p_6 - 5d_4$	»	0,01—0,2 *мм рт. ст.* неона, 0—1,0 *мм рт. ст.* гелия, D — 10 *мм*
	32,516	$6p'[^3/_2]_2 - 5d'[^5/_2]^0_{3}$	$5p_4 - 5s_1'''$	»	Условия те же
	33,824	$6p'[^3/_2]_1 - 5d'[^5/_2]^0_{2}$	$5p_5 - 5s_1''''$	»	
	или	» или	или	»	
	33,837	$6p[^3/_2]_3 - 5d[^7/_2]^0_{4}$	$5p_9 - 5d_1'$	»	
	34,552	$6p'[^1/_2]_1 - 5d'[^3/_2]^0_{2}$	$5p_2 - 5s_2'$	»	
	34,679	$6p[^5/_2]_3 - 5d[^5/_2]^0_{2}$	$5p_8 - 5d_1'$	»	В чистом неоне P — 0,05 *мм рт. ст.*, D — 21 *мм*
	35,602	$7p[^1/_2]_0 - 6d[^3/_2]^0_{1}$	$6p_3 - 6d_2$	»	Условия те же
	37,291	$7p'[^1/_2]_0 - 6d'[^3/_2]^0_{1}$	$6p_1 - 6s_1'$	»	
	41,741	$6p[^1/_2]_1 - 5d[^3/_2]^0_{1}$	$5p_{10} - 5d_3$	»	
	50,705	$7p[^3/_2]_2 - 6d[^5/_2]^0_{3}$	$6p_6 - 6d_3$	»	
	52,425	$7p'[^1/_2]_1 - 6d'[^3/_2]^0_{2}$	$6p_2 - 6s_1'$	»	В чистом неоне P — 0,02 *мм рт. ст.*, D — 47 *мм*

Группа, элемент	Длина волны, *нм*	Идентификация: Ранее	Идентификация: Теперь	Возбуждение	Примечания
0					
Неон	53,486	$7p\,[^3/_2]_2 - 6d\,[^3/_2]_1^0$	$6p_8 - 6d_1'$	непр.	Как для линии 34,679 *нм*
	54,019	$7p\,[^3/_2]_1 - 6d\,[^3/_2]_2^0$	$6p_7 - 6d_1'$	»	0,05 *мм рт. ст.* неона, 0,1 *мм рт. ст.* гелия, D — 21 *мм*
	54,117	$7p\,[^5/_2]_2 - 6d\,[^5/_2]_3^0$	$6p_9 - 6d_4$	»	Условия те же
	55,587	$7p'\,[^3/_2]_1 - 6d'\,[^3/_2]_2^0$	$6p_6 - 6s_1''$	»	Как для линии 52,425 *нм*
	57,355	$7p\,[^5/_2]_3 - 6d\,[^7/_2]_4^0$	$6p_5 - 6d_6'$	»	0,03 *мм рт. ст.* неона, 0,07 *мм рт. ст.* гелия, D — 21 *мм*
	68,829	$7p\,[^3/_2]_1 - 6d\,[^3/_2]_2^0$	$6p_{10} - 6d_2$	»	В чистом неоне $P = 0,035$ *мм рт. ст.*, $D = 21$ *мм*
	72,109	$8p'\,[^1/_2]_0 - 7d'\,[^3/_2]_1^0$	$7p_1 - 7s_2'$	»	Как для линии 52,425 *нм*
	85,010	$8p\,[^3/_2]_2 - 7d\,[^5/_2]_3^0$	$7p_4 - 7d_1'$	»	В чистом неоне $P = 0,035$ *мм рт. ст.*, $D = 21$ *мм*
	86,562	$8p'\,[^3/_2]_2 - 7d\,[^3/_2]_2^0$	$7p_4 - 7s_1''$	»	Условия те же
	88,471	$8p\,[^3/_2]_1 - 7d\,[^5/_2]_2^0$	$7p_6 - 7d_1'$	»	
	89,859	$8p\,[^5/_2]_3 - 7d\,[^5/_2]_3^0$	$7p_3 - 7d_4$	»	
	93,02	—		»	В чистом неоне $P = 0,05$ *мм рт. ст.*, $D = 47$ *мм*
	105,07	$10p\,[^1/_2]_0 - 9d\,[^3/_2]_1^0$	$9p_2 - 9s_2$	»	Условия те же
	124,52	$9p\,[^3/_2]_1 - 8d\,[^3/_2]_2^0$	—	»	
	или	или			
	124,76	$9p\,[^3/_2]_0 - 8d\,[^3/_2]_3^0$	—		
	126,1	—	—	»	
	132,6	—	—	»	
Аргон (рис. 33.19)	0,706721	$4p'\,[^3/_2]_2 - 4s\,[^3/_2]_2^0$	$2p_8 - 1s_5$	кор. изм.	
	0,7503	$4p'\,[^3/_2]_0 - 4s'\,[^1/_2]_1^0$	$2p_1 - 1s_2$	»	В смеси аргона с неоном (гелием)
	0,8280	—	—	изм.	(0,001—0,02) *мм рт. ст.* аргона, $D = 3$ *мм*
	1,0955	—	—	»	Условия те же
	1,213962	$3d'\,[^3/_2]_1^0 - 4p'\,[^3/_2]_1$	$3s_1' - 2p_4$	»	0,03 *мм рт. ст.* аргона, $D = 3$ *мм*
	1,240275	$3d\,[^3/_2]_1^0 - 4p\,[^3/_2]_4$	$3d_3 - 2p_7$	»	Условия те же
	1,270121	$3d'\,[^3/_2]_1^0 - 4p'\,[^1/_2]_1$	$3s_1' - 2p_2$	»	
	1,3472	$7d\,[^5/_2]_2^0 - 5p\,[^3/_2]_2$	$7d_5 - 3p_8$	непр.	0,26 *мм рт. ст.* аргона, $D = 2,2$ *мм*
	1,4053640	$3d\,[^3/_2]_1^0 - 4p\,[^3/_2]_2$	$3d_2 - 2p_4$	изм.	0,04 *мм рт. ст.* аргона, $D = 7$ *мм*
	1,616	$5s\,[^3/_2]_2^0 - 4p'\,[^3/_2]_2$	$2s_4 - 2p_5$	непр.	0,06 *мм рт. ст.* аргона, $D = 7$ *мм*
	1,694058	$3d\,[^3/_2]_2^0 - 4p\,[^3/_2]_2$	$3d_5 - 2p_6$	»	2,5 *мм рт. ст.* аргона, $D = 7$ *мм*
	1,791437	$3d\,[^3/_2]_1^0 - 4p\,[^3/_2]_2$	$3d_3 - 2p_6$	»	0,085 *мм рт. ст.* аргона, $D = 7$ *мм*
		или	или		
		$3d\,[^3/_2]_0^0 - 4p\,[^3/_2]_1$	$3d_4 - 2p_5$	»	

Группа, элемент	Длина волны, мк	Идентификация: Ридберг	Идентификация: Пашен	Возбуждение	Примечания
0 Аргон					
	1,6407	$3d\,[^7/_2]^0_4 - 4p\,[^5/_2]_3$	$3d'_4 - 2p_2$	неупр.	
	2,0616	$3d\,[^3/_2]^0_2 - 4p'\,[^3/_2]_2$	$3d_3 - 2p_3$	»	0,036 *мм рт. ст.* аргона, $D = 7$ *мм*
	2,0885	$3d\,[^1/_2]^0_1 - 4p\,[^1/_2]_0$	$3d'_2 - 2p_4$	»	0,012 *мм рт. ст.* аргона
	2,133	$3d\,[^1/_2]^0_1 - 4p'\,[^3/_2]^0_1$	$3d_4 - 2p_4$	»	0,01—0,05 *мм рт. ст.* аргона, $D = 10$ *мм*
	2,1534	$3d\,[^3/_2]^0_2 - 4p'\,[^1/_2]_1$	$3d_2 - 2p_2$	»	0,018 *мм рт. ст.* аргона
	2,2044	$3d\,[^3/_2]^0_1 - 4p'\,[^3/_2]_1$	$3d_1 - 2p_3$	»	0,01—0,05 *мм рт. ст.* аргона, $D = 10$ *мм*
	или 2,2083	или $3d\,[^5/_2]^0_1 - 4p'\,[^3/_2]_2$	или $3d_5 - 2p_5$		
	2,313320	$3d\,[^3/_2]^0_1 - 4p'\,[^1/_2]_1$	$3d_6 - 2p_2$	»	Условия те же
	2,3773	$3d\,[^1/_2]^0_2 - 4p'\,[^1/_2]_1$	$3d_2 - 2p_2$	»	
	2,5614	$6d'\,[^3/_2]^0_2 - 6p\,[^1/_2]_1$	$6s'_1 - 4p_{10}$	»	0,01—0,05 *мм рт. ст.* аргона, $D = 10$ *мм*
	2,5494	$5d\,[^5/_2]_3 - 3d\,[^7/_2]^0_4$	$3p_0 - 3d_4$	»	
	2,5512	$5p\,[^1/_2]_0 - 5s\,[^3/_2]^0_1$	$7p_3 - 2s_4$	»	
	2,5634	$6d'\,[^5/_2]^0_2 - 6p\,[^5/_2]_3$	$6s_1 - 4p_9$	»	
	2,5668	$5p'\,[^1/_2]_0 - 5d'\,[^1/_2]^0_1$	$3p_1 - 2s_4$	»	
	2,6642	$5p\,[^3/_2]_1 - 3d\,[^5/_2]^0_2$	$3p_2 - 3d_1$	»	
	2,7364	$5p'\,[^1/_2]_1 - 3d'\,[^3/_2]^0_2$	$3p_1 - 3s_1$	»	
	2,8262	$6p'\,[^3/_2]_1 - 5d'\,[^1/_2]^0_0$	$3p_2 - 2s_4$	»	
		или $6p\,[^3/_2]_2 - 5s\,[^3/_2]^0_1$	или $3p_7 - 2s_4$		
	2,8763	$5p\,[^3/_2]_2 - 5s\,[^3/_2]^0_2$	$3p_9 - 2s_3$	»	
	2,8843	$5p\,[^5/_2]_2 - 3d\,[^5/_2]^0_3$	$3p_8 - 3d_3$	»	Условия те же
	2,9260	$5p\,[^3/_2]_0 - 3d\,[^3/_2]^0_1$	$3p_8 - 3d_2$	»	
	2,9796	$5p\,[^5/_2]_2 - 5s\,[^3/_2]^0_1$	$3p_6 - 2s_5$	»	
	3,0462	$5p\,[^5/_2]_2 - 3d\,[^5/_2]^0_3$	$3p_6 - 3d_1$	»	
	3,0896	$6p\,[^5/_2]_3 - 3d\,[^5/_2]^0_2$	$3p_5 - 3d_1$	»	
	3,1333	$5p\,[^3/_2]_1 - 5s\,[^3/_2]^0_2$	$3p_{10} - 2s_5(?)$	»	
	3,1346	$6p'\,[^3/_2]_1 - 4d\,[^5/_2]^0_2$	$4p_1 - 4d_2$	»	
	4,7330	$5p\,[^1/_2]_1 - 3d'\,[^3/_2]^0_1$	$3p_{10} - 3s_1$	»	
	4,9160	$6p'\,[^3/_2]^1_2 - 4d'\,[^3/_2]^0_2$	$4p_1 - 4s_1$	»	
	4,9213	$5d\,[^5/_2]^0_2 - 4f\,[^7/_2]_3$	$5d'_1 - 4U$	»	
	5,1216	$6p\,[^3/_2]_1 - 4d\,[^7/_2]_3$	$4p_7 - 4d_3$	»	
	5,1218	$5d\,[^7/_2]^0_3 - 4f\,[^9/_2]_4$	$5d_3 - 4V$	»	0,05 *мм рт. ст.* аргона, $D = 10$ *мм*
	5,4680	$5d\,[^7/_2]^0_4 - 4f\,[^9/_2]_5$	$5d'_4 - 4V$	»	
		или	или		
	5,4694	$5d\,[^7/_2]^0_4 - 4f\,[^9/_2]_4$	$5d'_4 - 4V$		Условия те же
	5,5477	$6p\,[^1/_2]_0 - 6s\,[^3/_2]^0_1$	$4p_5 - 3s_4$	»	
	5,8666	$6p\,[^3/_2]_2 - 4d\,[^5/_2]^0_3$	$4p_6 - 4d_1$	»	0,01—0,05 *мм рт. ст.* аргона, $D = 10$ *мм*

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация: Фиолет	Идентификация: Пашен	Возбуждение	Примечания
0					
Аргон					
	6,0531	$4d\,[^1/_2]_1^0 - 5p\,[^3/_2]_2$	$4p_5 - 3p_4$	непр.	Условия те же
	6,9429	$4d\,[^3/_2]_1^0 - 6p'\,[^3/_2]_1$	$4d_4 - 3p_4$	»	
	6,9448	$6p'\,[^1/_2]_1 - 6s'\,[^1/_2]_1^0$	$4p_2 - 3s_2$	»	
	7,2165	$6p\,[^1/_2]_1 - 6s\,[^3/_2]_2^0$	$4p_{10} - 3s_4$	»	0,05 *мм рт. ст.* аргона
	7,8000 или 7,8025	$4f\,[^3/_2]_2 - 4d\,[^3/_2]_2^0$ или $4f\,[^3/_2]_1 - 4d\,[^3/_2]_2^0$	$4X_4 - 4d_3$ или $4X_1 - 4d_2$	»	Условия те же
	7,8363	$7s'\,[^1/_2]_1^0 - 4p'\,[^1/_2]_0$	$4s_2 - 2p_2$	»	0,01—0,05 *мм рт. ст.* аргона, $D = 10$ *мм*
	12,141 или 12,146	$4d'\,[^1/_2]_1^0 - 4f\,[^3/_2]_{1,2}$	$4s_1' - 4X$	»	Условия те же
	15,037 или 15,042	$5d'\,[^3/_2]_2^0 - 5f\,[^5/_2]_3$	$5s_1' - 5Y$	»	0,05 *мм рт. ст.* аргона, $D = 10$ *мм*
	26,944	$4d'\,[^3/_2]_2^0 - 4f\,[^5/_2]_3$	$4s_1' - 4Y$	»	Условия те же
Криптон (рис. 33.20)	0,3030	—	—	изл.	Криптон при очень малом давлении
	0,8104365	$5p\,[^5/_2]_3 - 5s\,[^3/_2]_2^0$	$2p_8 - 1s_5$	кор. инд.	0,1 *мм рт. ст.* криптона, $D = 3$ *мм*
	0,8569	—	—	инд.	0,001—0,02 *мм рт. ст.* криптона, $D = 3,0$ *мм*
	1,1457951	$6s\,[^3/_2]_1^0 - 5p\,[^1/_2]_1$	$2s_4 - 2p_{10}$	»	0,04 *мм рт. ст.* криптона, $D = 7$ *мм*
	1,3177412	$6s\,[^3/_2]_1^0 - 5p\,[^3/_2]_2$	$2s_4 - 2p_8$	»	0,06 *мм рт. ст.* криптона, $D = 7$ *мм*
	1,3622416	$6d\,[^3/_2]_1^0 - 5p\,[^3/_2]_2$	$3d_2 - 2p_8$	»	0,03 *мм рт. ст.* криптона, $D = 7$ *мм*
	1,4426795	$6s\,[^3/_2]_1^0 - 5p\,[^3/_2]_1$	$2s_4 - 2p_7$	»	0,08 *мм рт. ст.* криптона, $D = 7$ *мм*
	1,4765471	$6s\,[^3/_2]^0 - 5p\,[^3/_2]_2$	$2s_4 - 2p_6$	»	0,2 *мм рт. ст.* криптона, $D = 7$ *мм*
	1,6853498	$4d\,[^3/_2]_2^0 - 5p\,[^5/_2]_3$	$3d_5 - 2p_{10}$	»	0,07 *мм рт. ст.* криптона, $D = 7$ *мм*
	1,669677	$4d\,[^3/_2]_1^0 - 5p\,[^1/_2]_1$	$3d_3 - 2p_{10}$	»	0,08 *мм рт. ст.* криптона, $D = 7$ *мм*
	1,694	$4d\,[^5/_2]_2^0 - 5p\,[^3/_2]_1$	$3d_1' - 2p_7$	непр.	0,06 *мм рт. ст.* криптона, $D = 7$ *мм*
	1,781	$4d\,[^1/_2]_0^0 - 5p\,[^1/_2]_1$	$3d_2 - 2p_{10}$	»	0,07 *мм рт. ст.* криптона, $D = 7$ *мм*
	1,819	$4d'\,[^5/_2]_2^0 - 5p'\,[^3/_2]_2$	$3s_1'' - 2p_7$	»	Условия те же
	1,921	$6s\,[^3/_2]_1^0 - 6p\,[^5/_2]_2$	$4s_3 - 3p_8$	»	0,035 *мм рт. ст.* криптона, $D = 7$ *мм*

Графы элемент	Длина волны, мк	Идентификация: Ряд	Идентификация: Полная	Возбуждение	Примечание
Криптон					
	2,1171	$4d\,[^3/_2]_2^0 - 5p\,[^3/_2]_1$	$3d_3 - 2p_7$	интер.	Условия те же
	2,1102532	$4d\,[^3/_2]_3^0 - 5p\,[^3/_2]_2$	$3d_3 - 2p_8$	»	
	2,42537	$4d\,[^1/_2]_1^0 - 5p\,[^1/_2]_1$	$3d_6 - 2p_7$	»	
	2,523365	$4d\,[^1/_2]_2^0 - 5p\,[^3/_2]_2$	$3d_5 - 2p_6$	»	1,0 *мм рт. ст.* криптона, $D = 7$ *мм*
	2,6267	$4d\,[^3/_2]_1^0 - 5p\,[^3/_2]_1$	$3d_2 - 2p_3$	»	0,02 *мм рт. ст.* криптона, $D = 10$ *мм*
	2,6288	$7p\,[^3/_2]_2 - 4d'\,[^5/_2]_3^0$	$4p_6 - 3s_1''''(P)$	»	0,03 *мм рт. ст.* криптона, $D = 5$ *мм*
	2,8618	$6p\,[^3/_2]_2 - 6s\,[^3/_2]_1^0$	$3p_6 - 2s_5$	»	0,02 *мм рт. ст.* криптона, $D = 10$ *мм*
	или	или	или		
	2,8655	$6p\,[^3/_2]_2 - 6s\,[^3/_2]_2^0$	$3p_6 - 2s_5$		
	2,9845	$6p'\,[^1/_2]_1 - 5d\,[^3/_2]_2^0$	$3p_8 - 4d_1'$	»	Условия те же
	2,9878	$6p'\,[^3/_2]_2 - 6s'\,[^1/_2]_1^0$	$3p_8 - 2s_3$	»	0,03 *мм рт. ст.* криптона, $D = 15$ *мм*
	3,0536	$6p'\,[^3/_2]_2 - 5d\,[^3/_2]_2^0$	$3p_8 - 4d_1'$	»	0,02 *мм рт. ст.* криптона, $D = 10$ *мм*
	3,1072	$6p\,[^1/_2]_1 - 6s\,[^3/_2]_2^0$	$3p_{10} - 2s_5$	»	0,03 *мм рт. ст.* криптона, $D = 15$ *мм*
	3,1515	$6p'\,[^1/_2]_0 - 5d\,[^3/_2]_1^0$	$3p_8 - 4d_2$	»	0,02 *мм рт. ст.* криптона, $D = 10$ *мм*
	3,3409	$6p\,[^1/_2]_1 - 6s\,[^3/_2]_1^0$	$3p_{11} - 2s_4$	»	0,03 *мм рт. ст.* криптона, $D = 15$ *мм*
	3,3419	$4d\,[^1/_2]_1^0 - 5p\,[^1/_2]_0$	$3d_5 - 2p_5$	»	0,02 *мм рт. ст.* криптона, $D = 10$ *мм*
	3,4680	$7s\,[^3/_2]_1^0 - 6p\,[^1/_2]_1$	$3s_4 - 3p_{10}$	»	Условия те же
	3,4688	$7s\,[^3/_2]_2^0 - 6p'\,[^1/_2]_1$	$3s_5 - 3p_8$	»	
	3,4696	$5d\,[^3/_2]_1^0 - 6p'\,[^1/_2]_1$	$4d_2 - 3p_8$	»	0,03 *мм рт. ст.* криптона, $D = 15$ *мм*
	4,8746	$5d\,[^3/_2]_1^0 - 6p\,[^3/_2]_2$	$4d_2 - 3p_9$	»	Условия те же
	4,3767	$7s\,[^3/_2]_2^0 - 6p\,[^3/_2]_2$	$3s_6 - 3p_6$	»	0,02 *мм рт. ст.* криптона, $D = 10$ *мм*
	4,8773	$4d\,[^3/_2]_1^0 - 5p'\,[^3/_2]_1$	$3d_2 - 2p_4$	»	Условия те же
	4,8832	$5d\,[^5/_2]_3^0 - 6p\,[^5/_2]_3$	$4d_1' - 3p_9$	»	
	5,3006	$5d\,[^5/_2]_2^0 - 6p\,[^3/_2]_1$	$4d_3 - 3p_5$	»	0,02 *мм рт. ст.* криптона, $D = 10$ *мм*
	или	или	или		
	5,3019	$5d\,[^3/_2]_2^0 - 6p\,[^5/_2]_2$	$4d_3 - 3p_9$		
	5,3700	$5d\,[^7/_2]_3^0 - 6p\,[^5/_2]_3$	$4d_3 - 3p_9$	»	Условия те же
	5,3863	$5d\,[^7/_2]_4^0 - 4f\,[^9/_2]_4$	$5d_4' - 4U$	»	0,03 *мм рт. ст.* криптона, $D = 15$ *мм*
	5,6806	$6d\,[^3/_2]_1^0 - 4f\,[^5/_2]_2$	$5d_2 - 4T$	»	Условия те же
	7,0681	$4f\,[^7/_2]_{3,4} - 5d\,[^3/_2]_2^0$	$4W - 4d_4$	»	0,02 *мм рт. ст.* криптона, $D = 10$ *мм*

Группа линий	Длина волны, мкм	Идентификация: Пэш	Идентификация: Пашен	Возбуждение	Примечания
0 Ксенон (рис. 33.21)	0,840919	$6p\,[^3/_2]_1 - 6s\,[^3/_2]_2^0$	$2p_9 - 1s_5$	кор. комп.	0,04 *мм рт. ст.* ксенона, $D = 7$ *мм*
	0,904545	$6p\,[^3/_2]_0 - 6s\,[^3/_2]_1^0$	$2p_8 - 1s_4$	»	0,12 *мм рт. ст.* ксенона
	0,97997	$6p\,[^3/_2]_1 - 6s\,[^3/_2]_2^0$	$2p_{10} - 1s_5$	эмп.	0,2—0,4 *мм рт. ст.* ксенона
	1,0634	—	—	»	0,001—0,02 *мм рт. ст.* ксенона, $D = 3,0$ *мм*
	1,0950	—	—	»	Условия то же
	1,365701	$7s\,[^3/_2]_1^0 - 6p\,[^3/_2]_2$	$2s_4 - 2p_8$	»	0,04 *мм рт. ст.* ксенона, $D = 7$ *мм*
	1,605327	$7s\,[^3/_2]_1^0 - 6p\,[^3/_2]_2$	$2s_4 - 2p_8$	»	0,1 *мм рт. ст.* ксенона, $D = 7$ *мм*
	1,732078	$5d\,[^3/_2]_1^0 - 6p\,[^3/_2]_2$	$3d_6 - 2p_8$	»	0,03—0,1 *мм рт. ст.* ксенона, $D = 5$ *мм*
	2,026229	$5d\,[^3/_2]_1^0 - 6p\,[^3/_2]_1$	$3d_6 - 2p_7$	непр.	10 *мм рт. ст.* смеси He—Xe (100:1), $D = 5$ *мм*

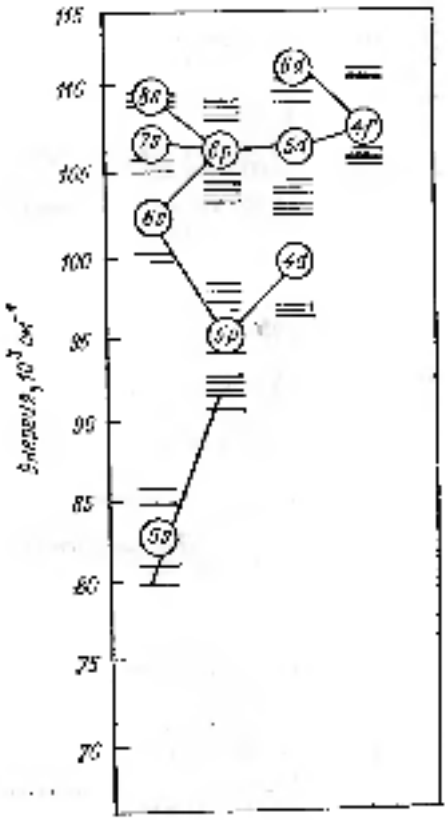


Рис. 33.20. Схема основных групп лазерных переходов в криптоне [1].

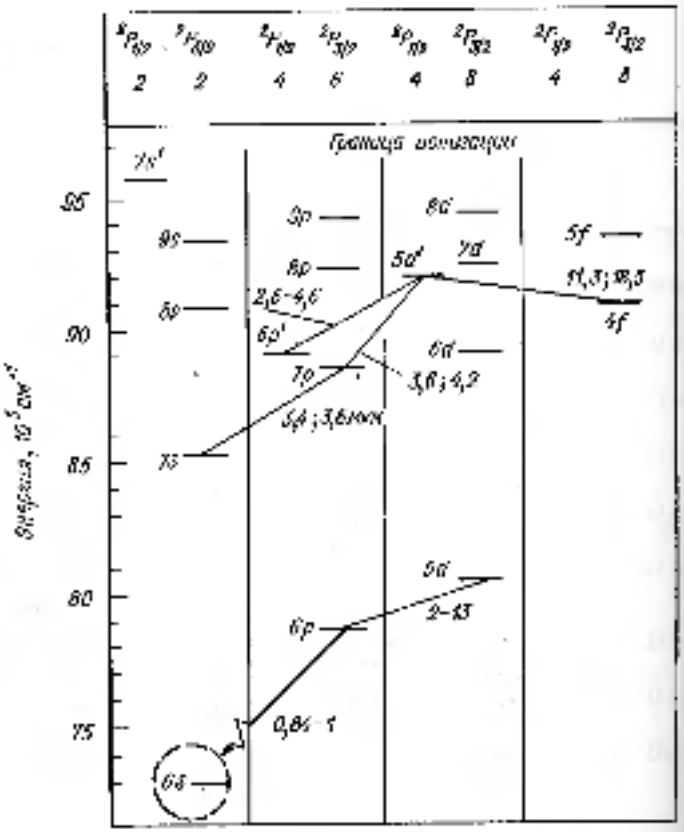


Рис. 33.21. Схема основных групп лазерных переходов в ксеноне [1].

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Изотопы: Ряд	Изотопы: Линия	Возбуждение	Примечания
Ксенон	2,3269	$5d\,[^3/_2]^0_3 - 6p\,[^5/_2]_2$	$3d'_1 - 2p_1$	непр.	0,01—0,04 мм рт. ст. ксенона, 1 мм рт. ст. гелия, $D = 7$ мм
	2,4825	$5d\,[^3/_2]^0_3 - 6p\,[^3/_2]_3$	$3d'_1 - 2p_8$	»	0,03—0,1 мм рт. ст. ксенона, $D = 5$ мм
	2,6276	$5d\,[^3/_2]^0_2 - 6p\,[^3/_2]_2$	$3d'_1 - 2p_9$	»	0,01—0,04 мм рт. ст. ксенона, 1 мм рт. ст. гелия, $D = 7$ мм
	2,651093	$5d\,[^3/_2]^0_1 - 6p\,[^1/_2]_0$	$3d_2 - 2p_2$	»	Условия те же
	2,6608	$5d'\,[^3/_2]^0_1 - 6p'\,[^1/_2]_0$	$3s'_1 - 2p_1$	»	
	3,1018	$5d\,[^3/_2]^0_2 - 6p\,[^3/_2]_2$	$3d'_1 - 2p_8$	»	
	3,27459	$5d\,[^3/_2]^0_2 - 6p\,[^3/_2]_1$	$3d_5 - 2p_{10}$	»	0,4 мм рт. ст. смеси He—Xe (250:1), $D = 11$ мм
	3,3676	$5d\,[^3/_2]^0_2 - 6p\,[^3/_2]_1$	$3d'_1 - 2p_7$	»	0,01—0,04 мм рт. ст. ксенона, 1 мм рт. ст. гелия, $D = 7$ мм
	3,4345	$7p\,[^3/_2]_2 - 7s\,[^3/_2]^0_1$	$3p_{10} - 2s_4$	»	
	3,5080	$5d\,[^3/_2]^0_3 - 6p\,[^3/_2]_2$	$3d_4 - 2p_9$	»	0,005—0,05 мм рт. ст. ксенона, 10 мм рт. ст. гелия, $D = 5$ мм
	3,6219	$5d'\,[^3/_2]^0_3 - 7p\,[^3/_2]_2$	$3s'''_1 - 3p_6$	»	0,01—0,04 мм рт. ст. ксенона, 1,0 мм рт. ст. гелия, $D = 7$ мм
	3,6518	$7p\,[^3/_2]_1 - 7s\,[^3/_2]^0_2$	$3p_{10} - 2s_4$	»	0,02 мм рт. ст. ксенона, $D = 7$ мм
	3,6798	$5d\,[^3/_2]^0_1 - 6p\,[^3/_2]_1$	$3d_6 - 2p_{12}$	»	0,01—0,04 мм рт. ст. ксенона, 1,0 мм рт. ст. гелия, $D = 7$ мм
	3,6859	$5d\,[^3/_2]^0_2 - 6p\,[^3/_2]_2$	$3d'_1 - 2p_6$	»	Условия те же
	3,8697	$5d'\,[^3/_2]^0_3 - 6p'\,[^3/_2]_2$	$3s'_1 - 2p_8$	»	
	3,8950	$5d\,[^3/_2]^0_2 - 6p\,[^3/_2]_3$	$3d_4 - 2p_8$	»	
	3,9066	$5d\,[^3/_2]^0_1 - 6p\,[^3/_2]_1$	$3d_7 - 2p_{16}$	»	
	4,1527	$5d'\,[^3/_2]^0_3 - 7p\,[^3/_2]_2$	$3s'_1 - 3p_7$	»	
	4,3393	$5d\,[^3/_2]^0_2 - 6p\,[^3/_2]_2$	$3d_3 - 2p_8$	»	
	4,6169	$5d'\,[^3/_2]^0_2 - 6p'\,[^3/_2]_1$	$3s'''_1 - 2p_5$	»	
	5,8566	$5d\,[^1/_2]^0_1 - 6p\,[^3/_2]_2$	$3d_6 - 2p_9$	»	0,01 мм рт. ст. ксенона, 0,1 мм рт. ст. гелия, $D = 10$ мм Необходимо исключение генерации на линии 2,169 мкм
	5,9254	$5d\,[^3/_2]^0_4 - 6p\,[^3/_2]_3$	$3d'_1 - 2p_8$	»	0,01—0,04 мм рт. ст. ксенона, 1,0 мм рт. ст. гелия, $D = 7$ мм
	6,384	$6p\,[^3/_2]_2 - 8s\,[^3/_2]^0_1$	$4p_7 - 3s_4$	»	0,01 мм рт. ст. ксенона, $D = 6$ мм
	7,3167	$5d\,[^3/_2]^0_1 - 6p\,[^1/_2]_1$	$3d_8 - 2p_7$	»	Как для линии 5,5754 мкм
	8,191	$6p\,[^1/_2]_1 - 8s\,[^3/_2]^0_1$	$4p_{16} - 3s_4$	»	0,01 мм рт. ст. ксенона, $D = 6$ мм
	9,6565	$5d\,[^1/_2]^0_2 - 6p\,[^3/_2]_2$	$3d_3 - 2p_8$	»	0,01—0,04 мм рт. ст. ксенона, 1,0 мм рт. ст. гелия, $D = 7$ мм
	9,7029	$5d\,[^1/_2]^0_1 - 6p\,[^3/_2]_1$	$3d_6 - 2p_5$	»	Условия те же
	11,299	$8p\,[^3/_2]^0_1 - 5d'\,[^3/_2]_1$ или $5d'\,[^3/_2]^0_2 - 4f\,[^5/_2]_3$	$4p_7 - 3s'_1$ или $3s'''_1 - 4Z$	»	
	12,266	$5d\,[^3/_2]^0_0 - 6p\,[^3/_2]_1$	$3d_0 - 2p_5$	»	
	12,917	$5d\,[^1/_2]^0_1 - 6p\,[^3/_2]_2$	$3d_4 - 2p_8$	»	
	18,306	$5d'\,[^3/_2]^0_2 - 4f\,[^5/_2]_3$	$3s''_1 - 4U$	»	
	75,5778	$6p'\,[^3/_2]_1 - 5d\,[^3/_2]^0_1$	$2p_5 - 3d_6$	»	3,5 мм рт. ст. смеси He—Xe (100:1), $D = 6$ мм

33.2. ИОННЫЕ ЛАЗЕРЫ

Инверсная населённость и генерация на ионизованных атомах в газовом разряде получена на переходах, принадлежащих 29 элементам. Так как для работы лазеров данного типа требуется значительная ионизация, поэтому плотности тока через разряд значительно выше, чем для лазеров на нейтральных атомах. Процесс создания инверсии обычно протекает в две ступени: сначала электронным ударом образуется ионизация, а затем уже происходит возбуждение ионов в нужное лазерное состояние. Механизмы возбуждения на второй ступени по-прежнему подобны механизмам, описанным в разд. 33.1.

Лазерные переходы в ионных лазерах приведены в табл. 33.2 и объединены по группам элементов, указанным на рис. 33.22.

В таблице даны: длины волн спектральных переходов (звездочкой слева помечены сильные или характеристические линии иона), идентификация иона (II — для однократно-, III — для двукратно-ионизованного атома и т. д.), спектроскопическая идентификация лазерного перехода, в которой указаны верхний и нижний уровни, а также терм атомного остатка (в скобках) данного перехода (случаи неизвестной идентификации обозначены знаком «?» или прочерком). Возбуждение указано сокращенно: непр. — для данного перехода генерация получена в непрерывном режиме работы, послеист. — генерация наблюдается только в послесвечении разрядного импульса.

Для ряда наиболее важных ионных лазеров в данном разделе приводится энергетические диаграммы остовных переходов. Причем обозначение электронных конфигураций, уровней и термов атомных остатков соответствует таблицам [2]. Все длины волн на рисунках приведены в нанометрах (нм). Шкалы энергии даны в обратных сантиметрах (слева) и в электронвольтах (справа). В этих же единицах проведены ионизационные потенциалы лазерных ионов (и. п.). Лазерные переходы, для которых возможны различные идентификации, вместе отдельных линий на рисунках обозначены штрихами.

Таблица 33.2

Лазерные переходы в ионизованных газах [3]

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Изменение энергии, см⁻¹	Ион	Уровни: верхний — нижний	Возбуждение
IIA					
Кальций	0,854209	0,854180±100	Ca II	$(^1S)\,4p\ ^2P^0_{3/2} - (^1S)\,3d\ ^2D_{5/2}$	—
	0,866214	0,866200±100	Ca II	$(^1S)\,4p\ ^2P^0_{1/2} - (^1S)\,3d\ ^2D_{3/2}$	—
Стронций	1,033014	1,033050±50	Sr II	$(^2S)\,5p\ ^2P^0_{1/2} - (^2S)\,4d\ ^2D_{3/2}$	послесв.
	1,091797	1,091750±50	Sr II	$(^2S)\,5p\ ^2P^0_{3/2} - (^2S)\,4d\ ^2D_{5/2}$	»
IIB					
Цинк	0,491160	0,491160	Zn II	$(^1S)\,4f\ ^2F^0_{7/2} - (^1S)\,4d\ ^2D_{5/2}$	—
	0,492404	0,492500	Zn II	$(^1S)\,4f\ ^2F^0_{5/2} - (^1S)\,4d\ ^2D_{3/2}$	непр.
	*0,589442	0,589400	Zn II	$4d\ ^2D_{3/2} - (^2S)\,4p\ ^2P^0_{1/2}$	»
	0,610253	0,610280±70	Zn II	$(^2S)\,5d\ ^2D_{3/2} - (^1S)\,5p\ ^2P^0_{3/2}$	»
	*0,747879	0,747830±160	Zn II	$4s^2\ ^2D_{3/2} - (^1S)\,4p\ ^2P^0_{3/2}$	непр.
	0,758546	0,758750±160	Zn II	$(^1S)\,5p\ ^2P^0_{1/2} - (^1S)\,5s\ ^2S_{1/2}$	»
	0,761290	0,761118±160	Zn II	$(^1S)\,6s\ ^2S_{1/2} - (^1S)\,5p\ ^2P^0_{3/2}$	—
	0,775786	0,775700	Zn II	$(^1S)\,6s\ ^2S_{1/2} - (^1S)\,5p\ ^2P^0_{1/2}$	—
Кадмий (рис. 33.23)	*0,325031	0,325000	Cd II	$5d\ ^2D_{3/2} - (^1S)\,5p\ ^2P^0_{1/2}$	непр.
	*0,441563	0,441560±70	Cd II	$5d\ ^2D_{5/2} - (^2S)\,5p\ ^2P^0_{3/2}$	»
	0,488179	0,488200	Cd II	$(^2D)\,6p\ ^2F^0_{5/2} - (^1S)\,5d\ ^2D_{5/2}$	»
	0,502548	0,502500	Cd II	$(^2D)\,6p\ ^2F^0_{7/2} - (^1S)\,5d\ ^2D_{5/2}$	»
	*0,533749	0,533700	Cd II	$(^2S)\,4f\ ^2F^0_{5/2} - (^1S)\,5d\ ^2D_{3/2}$	»
	0,537864	0,537600	Cd II	$(^1S)\,4f\ ^2F^0_{7/2} - (^1S)\,5d\ ^2D_{5/2}$	»
	0,635450	0,635480	Cd II	$(^1S)\,6g\ ^2G_{9/2} - (^1S)\,4f\ ^2F^0_{7/2}$	»

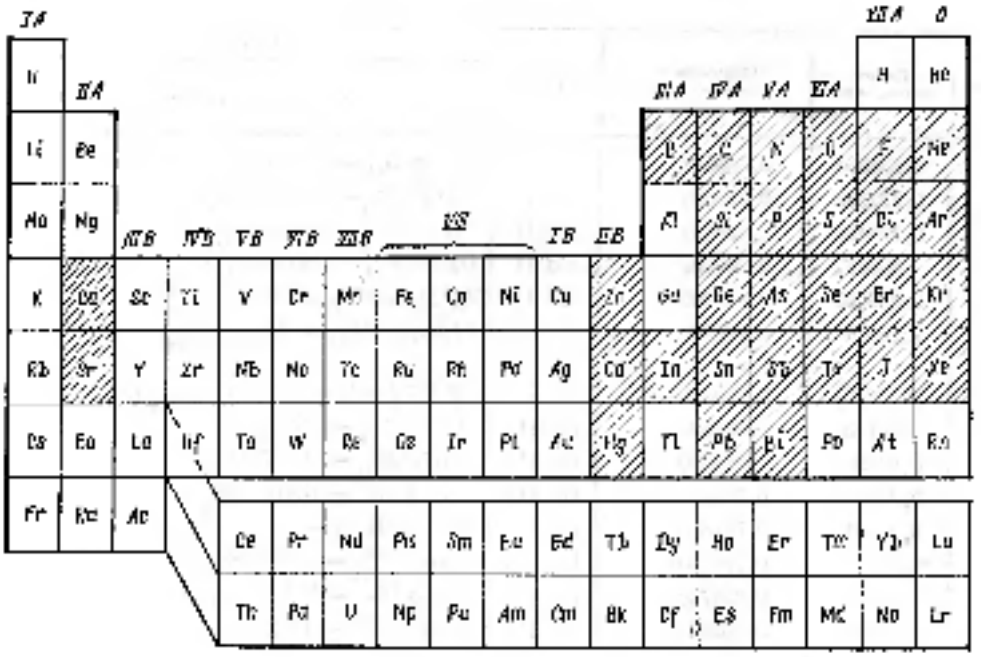


Рис 33.22. Схематическая периодическая таблица (Заштрихованы элементы, для которых получена генерация в газовом разряде на монопольных атомах [13].)

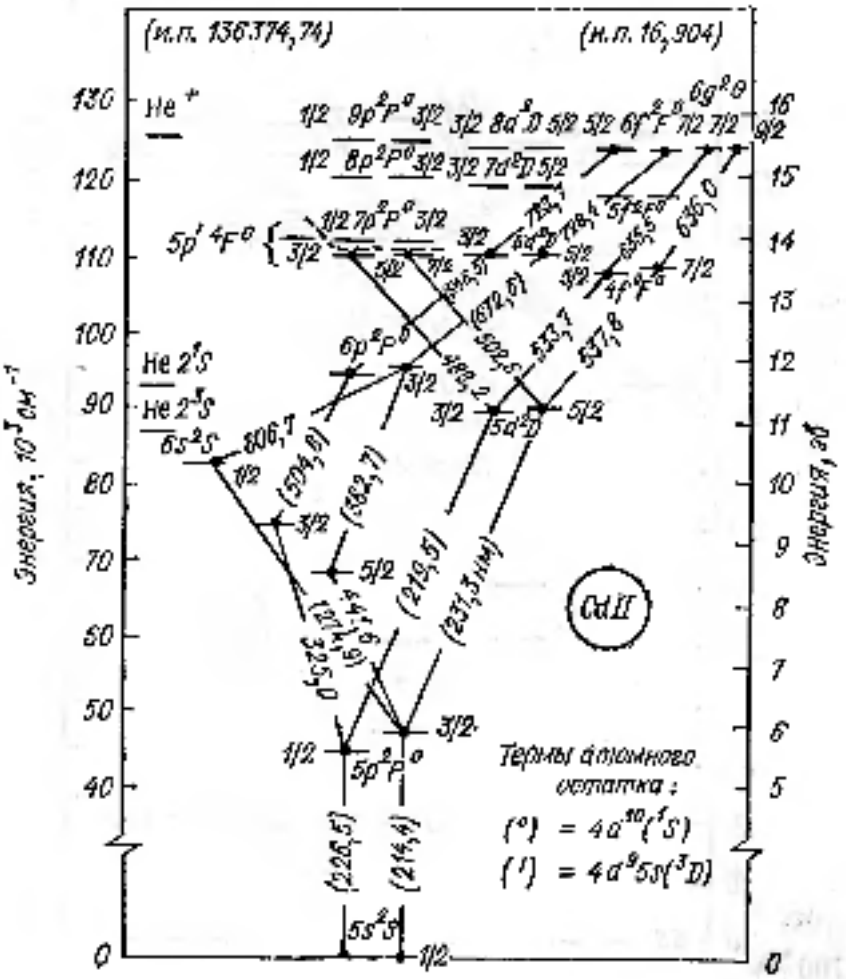


Рис. 33-23. Схема энергетических уровней и лазерных переходов в кадмии Cd II [3]. В скобках указаны переходы, для которых наблюдались только спонтанные переходы.

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренные значения, мкм	Ион	Уровни верхний — нижний	Возбуждение
IIB Кадмий (рис. 33.23)	0,636004	0,636010	Cd II	$(^1S)6g\ ^2G_{9/2} - (^1S)\ 4f\ ^2F^0_{7/2}$	непр.
	0,723689	0,723690	Cd II	$(^1S)6f\ ^2F^0_{5/2} - (^1S)\ 6d\ ^2D_{3/2}$	»
	0,728423	0,728430	Cd II	$(^1S)6f\ ^2F^0_{7/2} - (^1S)\ 6d\ ^2D_{5/2}$	»
	0,806387	0,806390	Cd II	$(^1S)6p\ ^2P^0_{3/2} - (^1S)\ 6s\ ^2S_{1/2}$	»
	0,839002	0,839000	Cd II	?$[(^1S)11p\ ^2P^0_{3/2} - (^1S)\ 8s\ ^2S_{1/2}]$	—
	1,18636	1,186900	Cd II	?$[(^1S)10d\ ^2D_{5/2} - (^1S)\ 5p\ ^2D^0_{5/2}]$	—
Ртуть (рис. 33.24)	0,479701	0,479700 ± 10	Hg III	$5d^9\ 6s^2 (J = 4) - 5d^{10}\ (^2D_{5/2})\ 6p_{1/2}\ (J = 3)$	—
	*0,56778	0,567800	Hg II	$(^1S)6f\ ^2F^0_{7/2} - (^1S)6d\ ^2D_{5/2}$	—
	*0,614947	0,615000	Hg II	$(^1S)7p\ ^2P^0_{3/2} - (^1S)\ 7s\ ^2S_{1/2}$	непр.
	0,73466	0,734600	Hg II	$(^1S)7d\ ^2D_{5/2} - (^1S)7p\ ^2P^0_{3/2}$	—
	0,74181	0,741810	Hg II	$^2P^0_{3/2}\ (109189) - (^1S)7s\ ^2S_{1/2}$	—
	*0,79447	0,794600	Hg II	$(^1S)7p\ ^2P^0_{1/2} - (^1S)7s\ ^2S_{1/2}$	непр.
	0,85456	0,854700	Hg II	$(^1S)5g\ ^2G_{7/2} - ^2F^0_{5/2}\ (121960)$	—
	0,86220	0,862800	Hg II	?$(^1S)8p\ ^2P^0_{1/2} - 110800\ (J = 1/2)$	—

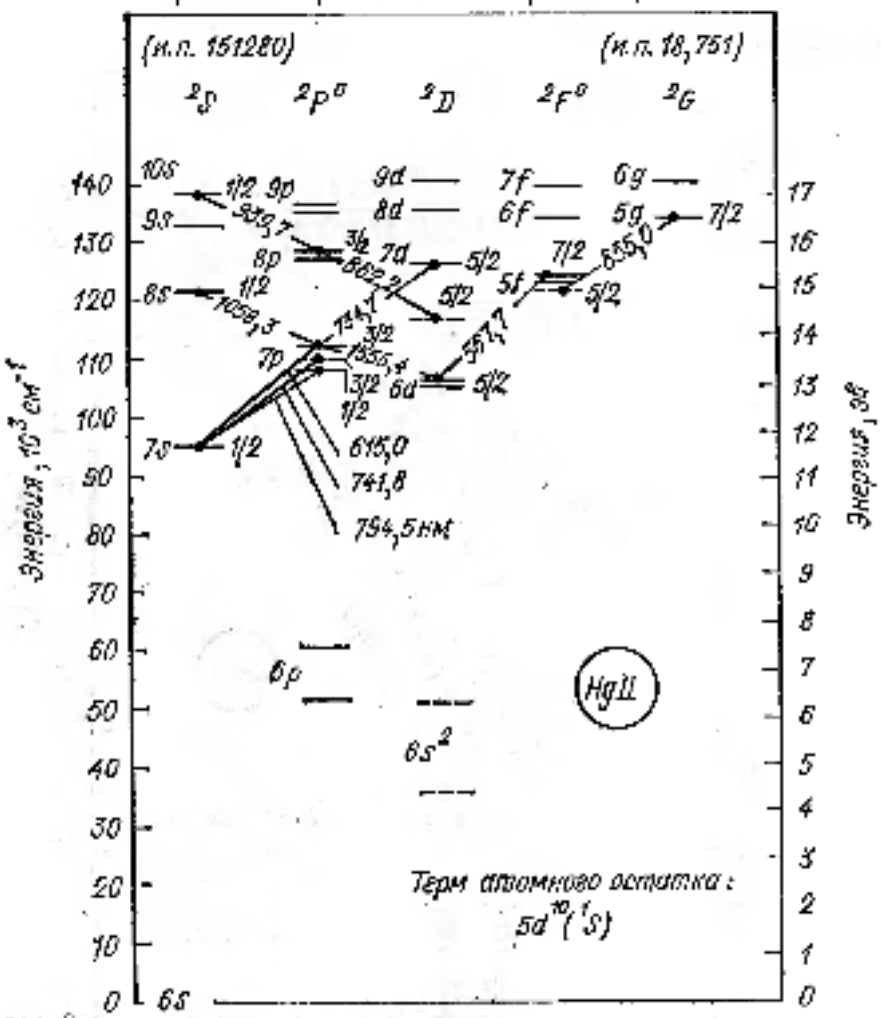


Рис. 33.24. Схема энергетических уровней и лазерных переходов в ртути Hg II [3]. Уровни, соответствующие возбуждению электронов, обозначены штрихами. J указано только для лазерных уровней.

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренная длина волны, мкм	Ион	Уровни: верхний — нижний	Возбуждение
IIB Ртуть (рис. 33.24)	0,8677	0,867700	Hg III?	—	—
	0,93968	0,939600	Hg II	$(^1S)10s\ ^2S_{1/2} - (^1S)8p\ ^2P^0_{3/2}$	—
	1,0583	1,058600	Hg II	$(^1S)8s\ ^2S_{1/2} - (^1S)7p\ ^2P^0_{3/2}$	—
	1,117696	1,117682 ± 10	Hg I	(Линии нейтрального атома)	—
	1,2545	1,254500	Hg III?	—	—
	1,2981	1,298100	Hg III?	—	—
	1,3655	1,365500	Hg III?	—	—
	1,5564	1,555000	Hg II	$(^1S)7p\ ^2P^0_{3/2} - (^1S)6d\ ^2D_{5/2}$	—
IIIA Бор	0,345131	0,345132	B II	$2p^2\ ^2D_2 - (^2S)\ 2p\ ^2P^0_1$	—
Индий	0,469092	0,469050 ± 70	In II	$(^2S)\ 4f\ ^2F^0_4 - (^2S)5d\ ^2D_5$	—
IVA Углерод	0,464745	0,464740 ± 04	C III	$(^2S)\ 3p\ ^2P^0_2 - (^2S)\ 3s\ ^2S_1$	—
	0,465016	0,465021 ± 04	C III	$(^2S)\ 3p\ ^2P^0_1 - (^2S)3s\ ^2S_1$	—
Кремний	0,408889	0,408890 ± 10	Si IV	$4p\ ^2P^0_{3/2} - 4s\ ^2S_{1/2}$	—
	0,455269	0,455259 ± 06	Si III	$(^2S)4p\ ^2P^0_2 - (^2S)4s\ ^2S_1$	—
	0,456782	0,456784 ± 06	Si III	$(^2S)4p\ ^2P^0_1 - (^2S)4s\ ^2S_1$	—
	0,634710	0,634724 ± 06	Si II	$(^1S)4p\ ^2P^0_{3/2} - (^1S)\ 4s\ ^2S_{1/2}$	послеоп.
	0,637136	0,637148 ± 06	Si II	$(^1S)4p\ ^2P^0_{1/2} - (^1S)\ 4s\ ^2S_{1/2}$	—
	0,667188	0,667193 ± 06	Si II	$(^2P^0)4p\ ^2D_{5/2} - (^2P^0)\ 4s\ ^2P^0_{3/2}$	—
Германий	0,513175	0,513150 ± 70	Ge II	$(^1S)\ 4f\ ^2F^0_{5/2} - (^1S)\ 4d\ ^2D_{3/2}$	—
	0,517865	0,517840 ± 70	Ge II	$(^1S)\ 4f\ ^2F^0_{7/2} - (^1S)\ 4d\ ^2D_{5/2}$	—
Олово	0,579918	0,579870 ± 70	Sn II	$(^1S)4f\ ^2F^0_{7/2} - (^1S)\ 5d\ ^2D_{5/2}$	—
	0,643360	0,643300 ± 70	Sn II	$(^1S)6p\ ^2P^0_{3/2} - (^1S)\ 6s\ ^2S_{1/2}$	непр.
	0,657926	0,657909 ± 06	Sn	—	—
	0,684406	0,684400 ± 70	Sn II	$(^1S)6p\ ^2P^0_{1/2} - (^1S)\ 6s\ ^2S_{1/2}$	непр.
Свинец	0,53721	0,537210 ± 70	Pb II	$(^1S)5f\ ^2F^0_{5/2} - (^2P^0)6p\ ^4P_{3/2}$	—
	0,56089	0,56086 ± 50	Pb II	$(^1S)7p\ ^2P^0_{3/2} - (^1S)\ 7s\ ^2S_{1/2}$	—
	0,60599	0,60601 ± 50	Pb II	$(^1S)7p\ ^2P^0_{1/2} - (^1S)\ 7s\ ^2S_{1/2}$	—
VA Азот	0,330734	0,330732 ± 06	N III	$(^2P^0)3p\ ^4P_{3/2} - (^2P^0)\ 3s\ ^4P^0_{5/2}$	—
	0,347867	0,347876 ± 06	N IV	$(^2S)3p\ ^2P^0_2 - (^2S)3s\ ^2S_1$	—
	0,348296	0,348302 ± 06	N IV	$(^2S)3p\ ^2P^0_1 - (^2S)\ 3s\ ^2S_1$	—
	0,399501	0,399499 ± 02	N II	$(^2P^0)3p\ ^1D_2 - (^2P^0)\ 3s\ ^1P^0_1$	—
	0,409732	0,409729 ± 06	N III	$(^1S)3p\ ^2P^0_{3/2} - (^1S)\ 3s\ ^2S_{1/2}$	—
	0,410338	0,410336 ± 09	N III	$(^1S)3p\ ^2P^0_{1/2} - (^1S)\ 3s\ ^2S_{1/2}$	—

Группа элемента	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровни: верхний — нижний	Возбуждение
VA					
Азот	0,451089	0,451045 ± 23	N III	$(^2P^0)3p\ ^4D_{3/2} - (^2P^0)3s\ ^4P^0_{3/2}$	—
	0,451487	0,451486 ± 03	N III	$(^2P^0)3p\ ^4D_{5/2} - (^2P^0)3s\ ^4P^0_{3/2}$	—
	0,462140	0,462100 ± 60	N II	$[(^3P^0)3p\ ^3P_0 - (^3P^0)3s\ ^4P^0_1]$	—
	0,463065	0,463061 ± 02	N II	$[(^3P^0)3p\ ^3P_2 - (^3P^0)3s\ ^4P^0_2]$	—
	0,464319	0,464390 ± 80	N II	$[(^3P^0)3p\ ^3P_1 - (^3P^0)3s\ ^4P^0_2]$	—
	0,566663	0,566602 ± 03	N II	$(^3P^0)3p\ ^2D_2 - (^3P^0)3s\ ^3P^0_1$	—
	0,567601	0,567603 ± 03	N II	$(^3P^0)3p\ ^2D_3 - (^3P^0)3s\ ^3P^0_0$	—
	*0,567956	0,567953 ± 03	N II	$(^3P^0)3p\ ^2D_2 - (^3P^0)3s\ ^3P^0_2$	—
	0,568622	0,568690 ± 80	N II	$[(^3P^0)3p\ ^2D_1 - (^3P^0)3s\ ^3P^0_1]$	—
	0,648209	0,648260 ± 60	N II	$(^3P^0)3p\ ^3P_1 - (^3P^0)3s\ ^3P_1$	—
Фосфор	0,334769	0,334770 ± 06	P IV	$(^2S)4p\ ^3P^0_2 - (^2S)4s\ ^3S_1$	—
	0,422208	0,422225 ± 06	P III	$(^1S)4p\ ^2P^0_{1/2} - (^1S)4s\ ^2S_{1/2}$	—
	*0,602421	0,602427 ± 06	P II	$(^4P^0)4p\ ^3D_2 - (^3P^0)4s\ ^3P^0_1$	непр.
	0,603421	0,603419 ± 06	P II	$(^4P^0)4p\ ^3D_1 - (^3P^0)4s\ ^3P_0$	—
	*0,604325	0,604322 ± 06	P II	$(^4P^0)4p\ ^3D_3 - (^3P^0)4s\ ^3P^0_2$	непр.
	0,608780	0,608804 ± 06	P II	$(^4P^0)4p\ ^3D_1 - (^3P^0)4s\ ^3P^0_1$	—
	0,616577	0,616574 ± 06	P II	$(^4P^0)4p\ ^1D_2 - (^3P^0)4s\ ^3P_2$	—
	0,784565	0,784600	P II	$(^4P^0)4p\ ^1P_1 - (^3P^0)4s\ ^3P^0_1$	—
Мышьяк	0,54980	0,549800 ± 100	As II	$(^3P^0)5p\ ^3D_1 - (^3P^0)5s\ ^3P^0_0$	—
	0,55593	0,556000 ± 100	As II	$(^3P^0)5p\ ^3D_2 - (^3P^0)5s\ ^3P^0_1$	—
	0,56516	0,565200 ± 100	As II	$(^3P^0)5p\ ^3D_3 - (^3P^0)5s\ ^3P^0_2$	—
	0,61703	0,617100 ± 100	As II	$(^3P^0)5p\ ^1P_1 - (^3P^0)5s\ ^3P^0_1$	—
Сурьма	0,61299	0,613000 ± 100	Sb II	$(^3P^0)6p\ ^3D_3 - (^3P^0)6s\ ^3P^0_2$	—
Висмут	0,456084	0,456070 ± 10	Bi III	$6s^2(^1S)7p\ ^2P^0_{1/2} - 6s^2(^1S)7s\ ^2S_{1/2}$	—
	0,571921	0,571920 ± 10	Bi II	$6p_{1/2}7p_{1/2}\ ^3P_0 - 6p_{1/2}7s\ ^3P^0_1$	—
	0,76990	0,769870 ± 50	Bi III	$6s^2(^1S)6f\ ^2F^0_{7/2} - 6s^2(^1S)7d\ ^2D_{5/2}$	—
	0,80689	0,806920 ± 50	Bi III	$6s^2(^1S)6f\ ^2F^0_{5/2} - 6s^2(^1S)7d\ ^2D_{3/2}$	—
VIA					
Кислород	*0,298376	0,298380 ± 06	O III	$(^2P^0)3p\ ^3D_2 - (^2P^0)3s\ ^3P^0_1$	—
	0,304713	0,304715 ± 06	O III	$(^2P^0)3p\ ^3P_2 - (^2P^0)3s\ ^3P^0_2$	—
	0,306345	0,306346 ± 06	O IV	$(^1S)3p\ ^2P^0_{3/2} - (^1S)3s\ ^2S_{1/2}$	—
	0,33813	0,338134 ± 06	O IV или O IV	$(^3P^0)3p\ ^4D_{1/2} - (^3P^0)3s\ ^4P^0_{3/2}$; $(^3P^0)3p\ ^2D_{1/2} - (^3P^0)3s\ ^4P^0_{3/2}$	—
	0,338554	0,338554 ± 06	O IV	$(^3P^0)3p\ ^4D_{3/2} - (^3P^0)3s\ ^4P^0_{3/2}$	—
	0,374949	0,374947 ± 04	O II	$(^3P)3p\ ^3S^0_{1/2} - (^3P)3s\ ^4P_{3/2}$	—
	0,375467	0,375468 ± 04	O III	$(^2P^0)3p\ ^3D_2 - (^2P^0)3s\ ^3P^0_1$	—

Группа элемента	Длина волны, нм	Интерпретация измерения, нм	Ион	Уровни: верхний — нижний	Контур линии
VI A	0,375988	0,375969 ± 06	O III	$(^3P^0)3p\ ^3D_3 - (^3P^0)3s\ ^3P^0_2$	—
Кислород	*0,434738	0,434738 ± 04	O II	$(^4D)3p\ ^2D^*_{5/2} - (^4D)3s\ ^2D_{3/2}$	—
	*0,435128	0,435129 ± 04	O II	$(^4D)3p\ ^2D^*_{3/2} - (^4D)3s\ ^2D_{3/2}$	—
	*0,441498	0,441497 ± 04	O II	$(^3P)3p\ ^2D^0_{5/2} - (^3P)3s\ ^2P_{3/2}$	—
	*0,441697	0,441697 ± 04	O II	$(^3P)3p\ ^2D^0_{3/2} - (^3P)3s\ ^2P_{1/2}$	—
	0,460558	0,460562 ± 06	O	—	—
	0,464914	0,464908 ± 10	O II	$(^3P)3p\ ^2D^0_{3/2} - (^3P)3s\ ^4P_{5/2}$	—
	0,559237	0,660237 ± 06	O III	$(^3P^0)3p\ ^1P_1 - (^3P^0)3s\ ^1P^0_1$	—
	0,664099	0,664020 ± 100	O II	$(^3P)3p\ ^4S^0_{3/2} - (^3P)3s\ ^4P_{1/2}$	—
	0,672136	0,672138 ± 04	O II	$(^3P)3p\ ^2S^0_{1/2} - (^3P)3s\ ^2P_{3/2}$	—
Сера	0,263898	0,263898 ± 06	S V	—	—
	0,332486	0,332480 ± 06	S III	$(^3P^0)4p\ ^3P_2 - (^3P^0)3d\ ^3P^0_2$	—
	0,349737	0,349737 ± 06	S III	—	—
	0,370937	0,370941 ± 06	S III	$(^3P^0)4p\ ^4D_3 - (^3P^0)3d\ ^4P^0_1$	—
	0,492532	0,492560 ± 06	S II	$(^4P)4p\ ^4P^*_{3/2} - (^4P)4s\ ^4P_{1/2}$	—
	0,501401	0,501424 ± 06	S II	$(^4P)4p\ ^4P^*_{5/2} - (^4P)4s\ ^4P_{3/2}$	—
	0,503239	0,503262 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^2P^*_{3/2} - (^3P)4s\ ^2P_{1/2}$	—
	0,516032	0,516032 ± 06	S	—	—
	0,521962	0,521902 ± 06	S	—	—
	*0,532070	0,532089 ± 06	S II	$(^2D)4p\ ^2F^*_{7/2} - (^2D)4s\ ^2D_{5/2}$	непр.
	*0,534567	0,534587 ± 06	S II	$(^2D)4p\ ^2F^*_{5/2} - (^2D)4s\ ^2D_{3/2}$	»
	0,542864	0,542874 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^4D^*_{3/2} - (^3P)4s\ ^4P_{1/2}$	»
	*0,543277	0,543287 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^4D^*_{2/2} - (^3P)4s\ ^4P_{3/2}$	непр
	*0,545380	0,545388 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^4D^*_{3/2} - (^3P)4s\ ^4P_{3/2}$	»
	0,547360	0,547374 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^4D^*_{3/2} - (^3P)4s\ ^4P_{5/2}$	—
	0,550037	0,550090 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^4D^*_{5/2} - (^3P)4s\ ^4P_{3/2}$	—
	0,556495	0,556514 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^4D^*_{1/2} - (^3P)4s\ ^4P_{5/2}$	—
	*0,563999	0,564012 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^4D^*_{3/2} - (^3P)4s\ ^4P_{5/2}$	непр
	0,564698	0,564716 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^2D^*_{5/2} - (^3P)4s\ ^2P_{1/2}$	—
	0,581919	0,581935 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^2D^*_{3/2} - (^3P)4s\ ^2P_{3/2}$	—
Селен	0,460434	0,460460 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^2D^*_{3/2} - (^3P)5s\ ^2P_{3/2}$	непр.
	0,464644	0,464660 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^4P^*_{3/2} - (^3P)5s\ ^4P_{1/2}$	»
	0,476365	0,476410 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^2D^*_{5/2} - (^3P)5s\ ^2P_{3/2}$	»
	0,484063	0,484060 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^2S^*_{1/2} - (^3P)5s\ ^4P_{3/2}$	»
	0,484493	0,484500 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^4S^*_{3/2} - (^3P)5s\ ^4P_{5/2}$	»
	*0,497566	0,497610 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^2D^*_{3/2} - 4s\,4p^2\ ^2P_{3/2}$	»
	*0,499776	0,499820 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^4P^*_{5/2} - (^3P)5s\ ^4P_{5/2}$	»
	*0,506865	0,506870 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^4P^*_{3/2} - (^3P)5s\ ^4P_{3/2}$	»
	0,509650	0,500610 ± 50	Se II	$2(^3P)5p\ ^2D^*_{3/2} - (^3P)4d\ ^2P_{3/2}$	»
	0,514214	0,514190 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^4D^*_{5/2} - (^3P)5s\ ^4P_{3/2}$	»
	*0,517568	0,517600 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^4D^*_{3/2} - (^3P)5s\ ^4P_{5/2}$	»

Группа, элемент	Длина волны, нм	Измеренное значение, нм	Ион	Уровни: верхний — нижний	Возбуждение
VIA Селен	*0,522751	0,522760±50	Se II	$(^3P)\,5p\,^4D^0_{3/2} - (^3P)\,5s\,^4P_{1/2}$	непр.
	0,525307	0,525260±50	Se II	$(^3P)\,6p\,^2D^0_{3/2} - (^3P)\,5s\,^2P_{3/2}$	»
	0,525363	0,525320±50	Se II	$(^3P)\,5p\,^4D^0_{3/2} - (^3P)\,5s\,^4P_{3/2}$	»
	0,527111	0,527130±50	Se II	$(^3P)\,5p\,^4D^0_{5/2} - (^3P)\,4d\,^4F_{7/2}$	»
	*0,530535	0,530550±50	Se II	$(^3P)\,6p\,^2D^0_{3/2} - (^3P)\,5s\,^2P_{1/2}$	»
	0,552242	0,552260±50	Se II	$(^3P)\,5p\,^4P^0_{3/2} - (^3P)\,5s\,^4P_{5/2}$ или $(^3P)\,5p\,^4P^0_{5/2} - 4s\,4p^4\,^4P_{3/2}$	»
	0,559116	0,559160±50	Se II	$(^3P)\,5p\,^4P^0_{3/2} - (^3P)\,5s\,^2P_{3/2}$	»
	0,566768	0,566790±50	Se II	$(^3P)\,5p\,^4D^0_{3/2} - (^3P)\,5s\,^4P_{3/2}$	»
	0,574702	0,574790±50	Se II	$(^3P)\,5p\,^4D^0_{5/2} - (^3P)\,5s\,^4P_{5/2}$	»
	0,605596	0,605630±50	Se II	$(^3P)\,5p\,^2P^0_{3/2} - **$	»
	0,644425	0,644390±50	Se II	$(^3P)\,5p\,^2D^0_{5/2} - **$	»
	0,649048	0,649010±50	Se II	$(^3P)\,5p\,^4D^0_{1/2} - (^3P)\,5s\,^2P_{1/2}$	»
	0,653495	0,653460±50	Se II	$(^3P)\,5p\,^2P^0_{1/2} - **$	»
Теллур	0,54540	0,545400±50	Te II ?	·	—
	0,557134	0,557000±50	Te II	$5s^2\,5p^2\,(^1D)\,6p\,^0_{7/2} - 94860,95\,(J=5/2)$	—
	0,56406	0,564050±50	Te II ?	· ·	· ·
	0,570821	0,570850±50	Te II	$103106,12\,(^0_{3/2}) - 85592,36\,(_{5/2})$	—
	0,593018	0,593050±50	Te II	$99585,02\,(^0_{1/2}) - 82743,83\,(_{3/2})$	послеизл.
	0,624549	0,624550±50	Te II	$95585,02\,(^0_{3/2}) - 83577,50\,(_{1/2})$	»
	0,703904	0,703900±50	Te II	$97780,47\,(^0_{1/2}) - 83577,50\,(_{1/2})$	»
VIIA Фтор	0,275069	0,275069±06	F III	$(^4D)\,3p\,^2D^0_{3/2} - (^4D)\,3s\,^2D_{5/2}$	—
	0,282613	0,282608±06	F IV	$(^2F^0)\,3p\,^4D_2 - (^2P^0)\,3s\,^2P^0_{1/2}$	—
	0,312151	0,312156±06	F III	$(^3P)\,3p\,^2D^0_{3/2} - (^3P)\,3s\,^2P_{3/2}$	—
	0,317417	0,317418±06	F III	$(^3P)\,3p\,^2D^0_{5/2} - (^3P)\,3s\,^2P_{3/2}$	· ·
	0,320275	0,320274±06	F III	$(^2D^0)\,3p\,^2D_{3/2} - (^2D^0)\,3s\,^2D^0_{5/2}$	—
	0,402472	0,402478±06	F II	$(^4S^0)\,3p\,^4P_2 - (^4S^0)\,3s\,^4S^0_1$	—
Хлор	0,263267	0,263270±06	Cl III	$(^1D)\,4d\,^2D_{3/2} - (^1D)\,4p\,^2F^0_{5/2}$	—
	0,319146	0,319143±06	Cl III	$(^3P)\,4p\,^2S^0_{1/2} - (^3P)\,4s\,^2P_{3/2}$	—
	0,339287	0,339287±06	Cl III	$(^1D)\,4p\,^2D^0_{3/2} - (^1D)\,4s\,^2D_{3/2}$	—
	0,339313	0,339346±06	Cl III	$(^1D)\,4p\,^2D^0_{5/2} - (^1D)\,4s\,^2D_{3/2}$	· ·
	0,353004	0,353003±06	Cl III	$(^1D)\,4p\,^2P^0_{1/2} - (^1D)\,4s\,^2D_{3/2}$	—
	0,356069	0,356069±06	Cl III	$(^1D)\,4p\,^2F^0_{5/2} - (^1D)\,4s\,^2D_{3/2}$	· ·
	0,360240	0,360210±06	Cl III	$(^3P)\,4p\,^4D^0_{3/2} - (^3P)\,4s\,^4P_{1/2}$	—
	0,361289	0,361210±06	Cl III	$(^3P)\,4p\,^4D^0_{1/2} - (^3P)\,4s\,^4P_{3/2}$	·
	0,362368	0,362368±06	Cl III	$(^3P)\,4p\,^4D^0_{5/2} - (^3P)\,4s\,^4P_{3/2}$	—
	0,372046	0,372046±06	Cl III	$(^3P)\,4p\,^2D^0_{3/2} - (^3P)\,4s\,^2P_{3/2}$	—
	0,374869	0,374878±06	Cl III	$(^3P)\,4p\,^2D^0_{5/2} - (^3P)\,4s\,^2P_{3/2}$	—

** Классификацию нижних уровней см. в [4].

Группа, элемент	Длина волны, нм	Измеренное значение, нм	Ион	Уровни верхний — нижний	Разрешение
VIIA Хлор	0,413250	0,413260 ± 10	Cl II	$(^2D^0)\,4p\,^1D_2 — (^2D^0)\,4s\,^1D_2^0$	непр
	0,474042	0,474040 ± 10	Cl II	$(^2P^0)\,4p\,^1P_1 — (^2P^0)\,3d\,^1D_2^0$	»
	0,476871	0,476874 ± 06	Cl II	$(^2P^0)\,4p\,^3D_2 — (^2P^0)\,4s\,^3P_1^0$	»
	0,478134	0,478131 ± 03	Cl II	$(^2P^0)\,4p\,^3D_3 — (^2P^0)\,4s\,^3P_2^0$	»
	0,489685	0,489685 ± 03	Cl II	$(^2D^0)\,4p\,^3F_4 — (^2D^0)\,4s\,^3D_3^0$	»
	0,490482	0,490473 ± 03	Cl II	$(^2D^0)\,4p\,^3F_3 — (^2D^0)\,4s\,^3D_2^0$	»
	0,491781	0,491766 ± 03	Cl II	$(^2D^0)\,4p\,^3F_2 — (^2D^0)\,4s\,^3D_1^0$	»
	0,507828	0,507830 ± 03	Cl II	$(^2D^0)\,4p\,^1D_2 — (^2D^0)\,4s\,^1D_2^0$	»
	0,510310	0,510310 ± 10	Cl II	$(^2D^0)\,4p\,^3D_3 — (^2D^0)\,4s\,^3D_2^0$	»
	*0,521792	0,521790 ± 03	Cl II	$(^4S^0)\,4p\,^3P_2 — (^4S^0)\,4s\,^3S_1^0$	»
	0,522136	0,522130 ± 03	Cl II	$(^4S^0)\,4p\,^3P_1 — (^4S^0)\,4s\,^3S_1^0$	»
	0,539216	0,539215 ± 03	Cl II	$(^2D^0)\,4p\,^1F_3 — (^2D^0)\,4s\,^1D_2^0$	»
	0,609472	0,609474 ± 03	Cl II	$(^2D^0)\,4p\,^1P_1 — (^2D^0)\,4s\,^1D_2^0$	»
Бром	0,474270	0,474266 ± 03	Br II	$(^2P^0)\,5p\,^3D_3 — (^2P^0)\,5s\,^3P_2^0$	—
	0,503400	0,503403 ± 05	Br II	$(^2D^0)\,5p\,^3F_4 — (^4S^0)\,4d\,^3D_3^0$	—
	0,518227	0,518238 ± 02	Br II	$(^4S^0)\,5p\,^3P_2 — (^4S^0)\,5s\,^3S_1^0$	непр.
	0,523825	0,523825 ± 04	Br II	$(^4S^0)\,5p\,^3P_1 — (^4S^0)\,5s\,^3S_1^0$	»
	0,533203	0,533203 ± 03	Br II	$(^2D^0)\,5p\,^1F_3 — (^2D^0)\,5s\,^1D_2^0$	»
	0,611761	0,611756 ± 06	Br II	$(^4S^0)\,5p\,^3P_2 — (^4S^0)\,5s\,^3S_1^0$	—
	0,616870	0,616876 ± 06	Br II	$(^4S^0)\,5p\,^3P_1 — (^4S^0)\,5s\,^3S_1^0$	—
Иод	*0,453379	0,453379 ± 03	I, III, IV?	—	—
	0,467440	0,467440 ± 03	I, III, IV?	—	—
	0,493467	0,493467 ± 03	I, III, IV?	—	—
	0,496809	0,496800	I II	$(^2D^0)\,6p\,^3D_3 — (^4S^0)\,6s\,^3D_2^0$	послесв.
	0,521627	0,521600	I II	$(^2D^0)\,6p\,^3F_2 — (^2S^0)\,5d\,^3D_1^0$	»
	*0,540736	0,540700	I II	$(^2D^0)\,6p\,^3D_2 — (^2D^0)\,6s\,^3D_2^0$	»
	0,562509	0,562500	I II	$(^4S^0)\,6p\,^3P_2 — (^4S^0)\,6s\,^3S_1^0$	—
	*0,567808	0,567800	I II	$(^2D^0)\,6p\,^3F_3 — (^2D^0)\,6s\,^3D_2^0$	послесв.
	*0,576072	0,576000	I II	$(^2D^0)\,6p\,^3D_2 — (^2D^0)\,6s\,^3D_1^0$	»
	0,606893	0,606900	I II	$(^2D^0)\,6p\,^3F_3 — (^2D^0)\,6s\,^3D_1$	—
	*0,612749	0,612700	I II	$(^2D^0)\,6p\,^3D_1 — (^2D^0)\,6s\,^3D_2^0$	послесв.
	0,651618	0,651600	I II	$(^2D^0)\,6p\,^3F_2 — 5s\,5p\,^3P_1^0$	—
	*0,658521	0,658500	I II	$(^2D^0)\,6p\,^3D_1 — (^2D^0)\,6s\,^3D_1^0$	послесв.
	0,682523	0,682523	I II	$(^2D^0)\,6p\,^3F_3 — (^2D^0)\,6s\,^3D_3$	—
	0,690377	0,690400	I II	$(^2D^0)\,6p\,^3D_2 — (^2D^0)\,6s\,^3D_2^0$	послесв.
	*0,703269	0,703200	I II	$(^2D^0)\,6p\,^3F_2 — (^2D^0)\,5d\,^3D_2^0$	»
	0,713897	0,713897	I II	$(^2D^0)\,6p\,^3D_3 — (^2D^0)\,5d\,^3D_3$	—
	0,825384	0,825000 ± 10⁴	I II	$?\,(^2D^0)\,6p\,^3D_1 — (^2D^0)\,5d\,^3P_0^0$	послесв.
	0,880423	0,880000 ± 10⁴	I II	$?\,(^2D^0)\,6p\,^3F_2 — (^2D^0)\,5d\,^3F_3^0$	»
	1,04172	1,041720 ± 06	I, III, IV?	—	—

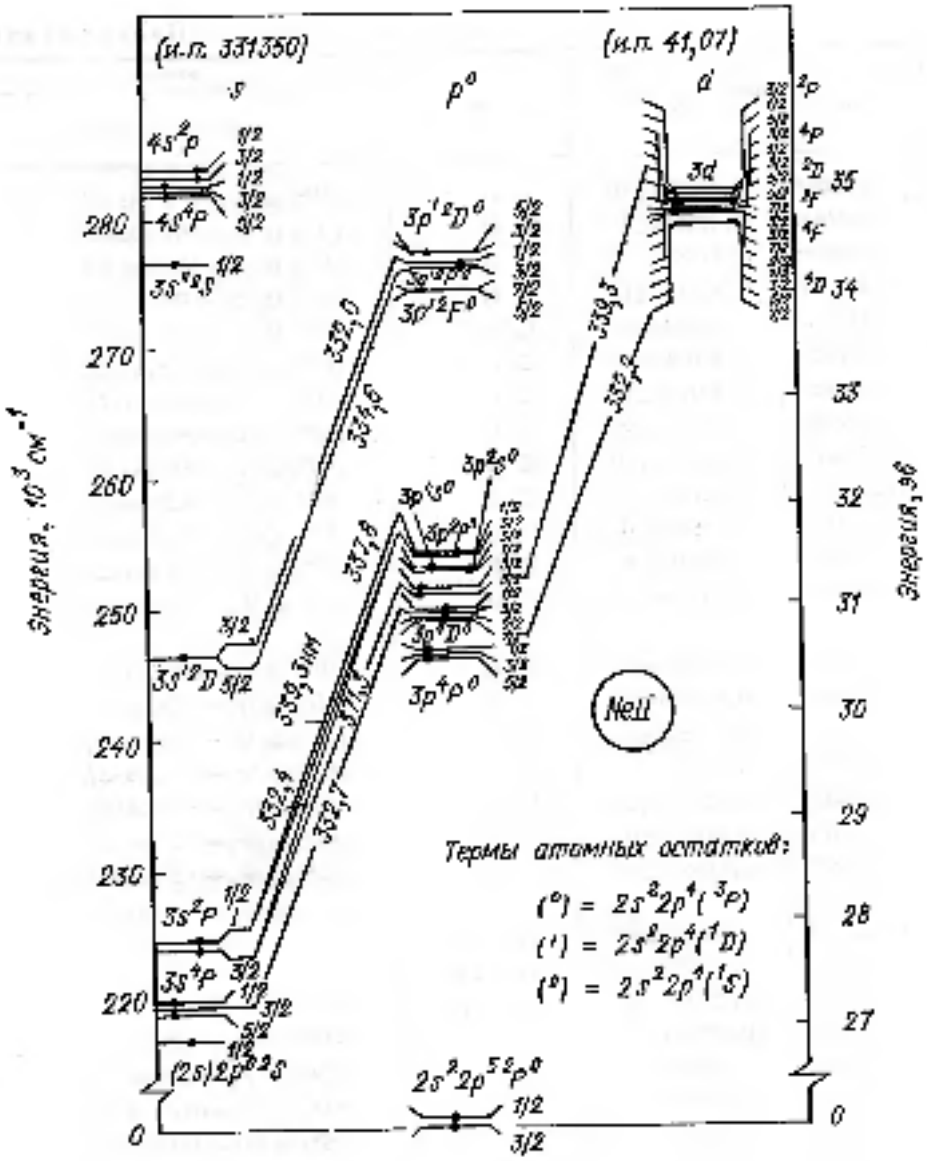


Рис. 33.25. Схема линейных переходов в NeII [3].

Продолжение табл. 33.2

Группа, элемент	Длина волны, нм	Измеренное значение, нм	Ион	Кроме верхний—нижний	Возбуждение
II	0,236786	0,235810±06	Ne IV	$(^4P)\,3p\,^4D^0_{1/2}-(^4P)\,3s\,^4P_{3/2}$	—
	0,247340	0,247350±06	Ne IIII?	—	—
Неон (рис. 33.26)	0,267790	0,267799±06	Ne III	$(^4S^0)\,3p\,^4P_{2,0}-(^4S^0)\,3s\,^4S^0_1$	—
	0,267854	0,267868±06	Ne III	$(^4S^0)\,3p\,^4P_1-(^4S^0)\,3s\,^4S^0_1$	—
	0,277765	0,277750±50	Ne III	$(^4D^0)\,3p\,^4D_5-(^4D^0)\,3s\,^4D^0_5$	—
	0,286688	0,286688±06	Ne	—	—
	0,331975	0,331984±06	Ne II	$(^1D)\,3p\,^2P^0_{1/2}-(^1D)\,3s\,^2D_{3/2}$	—

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровни: нижний — верхний	Возбуждение
0	*0,332777	0,332774 ± 05	Ne II	$(^3P)\,3p\,^2P^0_{3/2} - (^3P)\,3s\,^2P_{3/2}$	непр.
Неон (рис. 33.25)	0,332437	0,332437 ± 10	Ne	—	—
	0,332715	0,332750 ± 50	Ne II	$(^3P)\,3p\,^4D^0_{5/2} - (^3P)\,3s\,^4P_{3/2}$	»
	0,332923	0,332902 ± 10	Ne II	$(^3P)\,3d\,^4D_{7/2} - (^3P)\,3p\,^4D^0_{5/2}$	—
	0,333114	0,333107 ± 10	Ne III	$(^2P^0)\,3p\,^3D_3 - (^2P^0)\,3s\,^3P^0_1$	—
	*0,334652	0,334650 ± 06	Ne II	$(^1D)\,3p\,^2P^0_{3/2} - (^1D)\,3s\,^2D_{3/2}$	непр.
	*0,337830	0,337826 ± 05	Ne II	$(^3P)\,3p\,^2P^0_{3/2} - (^3P)\,3s\,^2P_{1/2}$	»
	*0,338280	0,338286 ± 06	Ne II	$(^3P)\,3p\,^2P^0_{3/2} - (^3P)\,3s\,^2P_{1/2}$	»
	0,339320	0,339340 ± 10	Ne II	$(^3P)\,3d\,^2D_{5/2} - (^3P)\,3p\,^2D^0_{3/2}$	—
	*0,371309	0,371300 ± 100	Ne II	$(^3P)\,3p\,^2D^0_{3/2} - (^3P)\,3s\,^2P_{3/2}$	непр.
Аргон (рис. 33.26 и рис. 33.27)	0,262497	0,262490 ± 06	Ar IV	$(^1D)\,4p\,^2D^0_{5/2} - (^1D)\,4s\,^2D_{3/2}$	—
	0,275382	0,275301 ± 06	Ar III?	—	—
	0,286416	0,286424 ± 06	Ar III	$(^2D^0)\,4p\,^3F_3 - (^2D^0)\,4s\,^3D^0_3$	—
	*0,291500	0,291292 ± 06	Ar IV	$(^3P)\,4p\,^2D^0_{3/2} - (^3P)\,4s\,^2P_{3/2}$	—
	*0,292827	0,292824 ± 06	Ar IV	$(^3P)\,4p\,^2D^0_{5/2} - (^3P)\,4s\,^2P_{3/2}$	—
	0,300266	0,300264 ± 06	Ar		—
	0,302405	0,302400 ± 50	Ar III	$(^2P^0)\,4p\,^3D_3 - (^2P^0)\,4s\,^3P^0_2$	—
	0,306484	0,306480 ± 50	Ar III	$(^2P^0)\,4p\,^3D_2 - (^2P^0)\,4s\,^3P^0_1$	—
	*0,333613	0,333621 ± 06	Ar III	$(^2D^0)\,4p\,^3F_4 - (^2D^0)\,4s\,^3D^0_3$	непр.
	*0,334472	0,334470 ± 06	Ar III	$(^2D^0)\,4p\,^3F_3 - (^2D^0)\,4s\,^3D^0_2$	»
	*0,335646	0,335652 ± 06	Ar III	$(^2D^0)\,4p\,^3F_2 - (^2D^0)\,4s\,^3D^0_1$	»
	*0,351112	0,351113 ± 05	Ar III	$(^1S^0)\,4p\,^3P_2 - (^1S^0)\,4s\,^3S^0_1$	»
	0,351418	0,351415 ± 06	Ar III	$(^1S^0)\,4p\,^3P_1 - (^1S^0)\,4s\,^3S^0_1$	»
	0,357661	0,357690 ± 50	Ar II	$(^3P)\,4d\,^4F_{3/2} - (^3P)\,4p\,^4D^0_{1/2}$	—
	*0,363789	0,363786 ± 04	Ar III	$(^2D^0)\,4p\,^3F_3 - (^2D^0)\,4s\,^3D^0_2$	непр.
	0,37052	0,370520 ± 50	Ar	—	—
	0,379632	0,379628 ± 06	Ar III	$(^2P^0)\,4p\,^3D_3 - (^2P^0)\,3d\,^3P^0_2$	непр.
	0,385829	0,385826 ± 06	Ar III	$(^2P^0)\,4p\,^3D_2 - (^2P^0)\,3d\,^3P^0_1$	»
	0,40866	0,408660 ± 20	Ar	—	»
	0,414671	0,414600 ± 04	Ar III	$(^2D^0)\,4p\,^3P_2 - (^2P^0)\,4s\,^3P^0_2$	»
	*0,418298	0,418292 ± 06	Ar III?	—	»
	0,437071	0,437073 ± 06	Ar II	$(^1D)\,4p\,^2D^0_{5/2} - (^3P)\,3d\,^2D_{3/2}$	»
	0,438375	0,438360 ± 60	Ar II	$(^3P)\,4p\,^4S^0_{3/2} - (^3P)\,4s\,^4P_{3/2}$	—
	0,448181	0,448200 ± 100	Ar II	$(^1D)\,4p\,^2D^0_{5/2} - (^3P)\,3d\,^2D_{3/2}$	—
	0,454506	0,454504 ± 10	Ar II	$(^3P)\,4p\,^2P^0_{3/2} - (^3P)\,4s\,^2P_{3/2}$	—

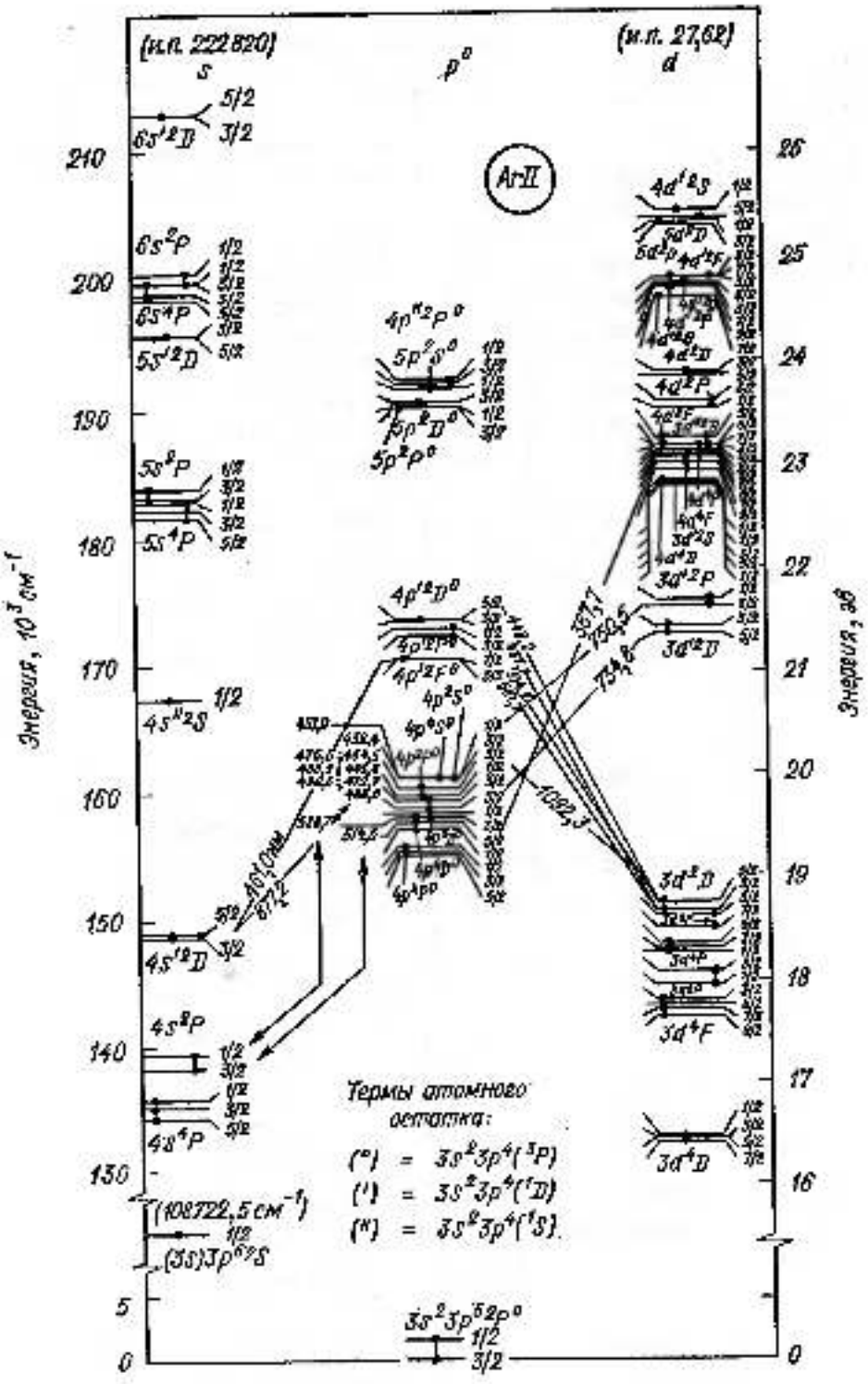


Рис. 33.26. Схема лазерных переходов в Ar II [3].

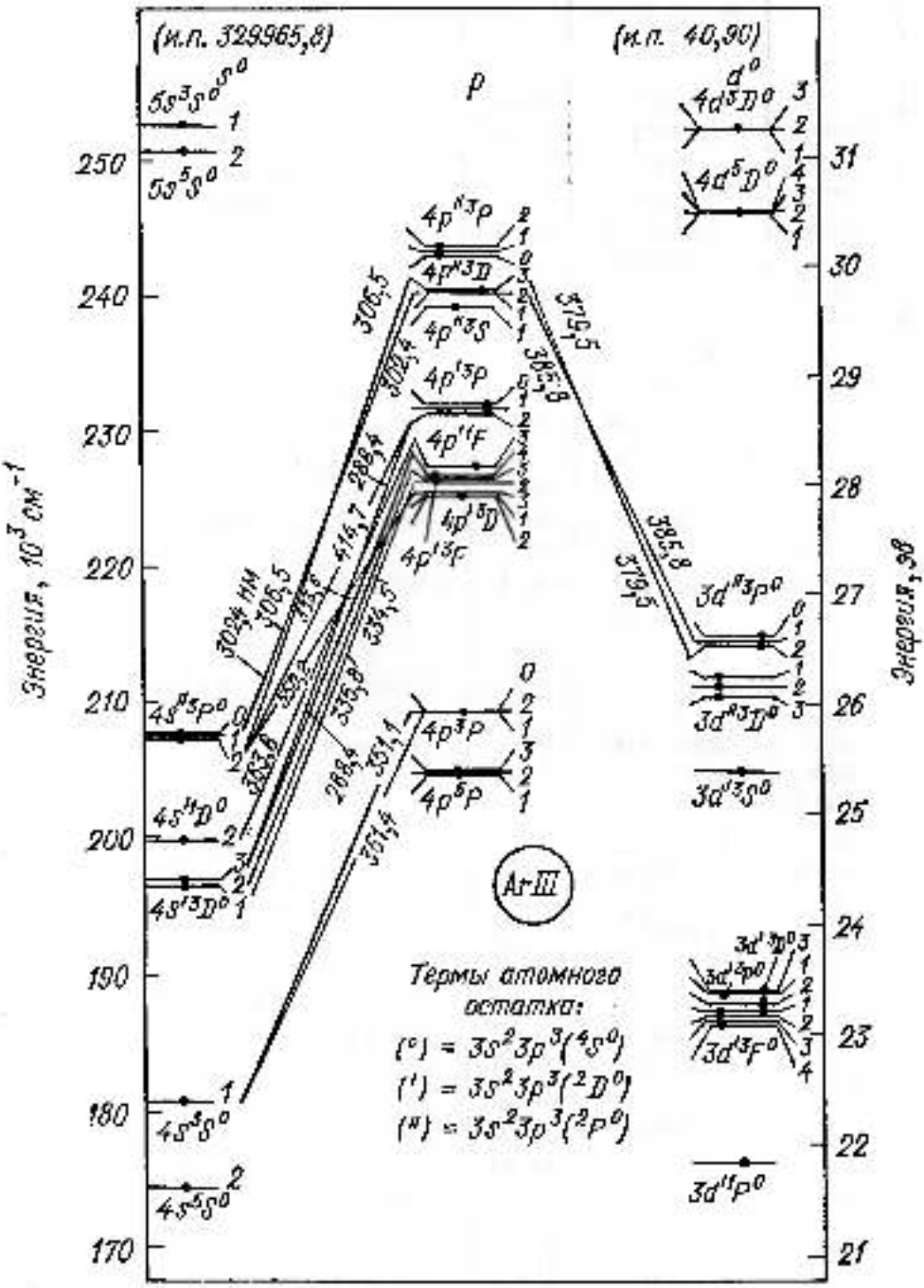


Рис. 33.27. Схема лазерных переходов в Ar III [3].

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровни: верхний—нижний	Возбуждение
0					
Аргон (рис. 33.26 и рис. 33.27)	*0,457935	0,457936±16	Ar II	$(^3P)\,4p\,^2S^0_{1/2}-(^3P)\,4s\,^2P_{1/2}$	—
	0,460966	0,460957±10	Ar II	$(^1D)\,4p\,^2F^0_{7/2}-(^1D)\,4s\,^2D_{5/2}$	—
	0,465789	0,465795±02	Ar II	$(^3P)\,4p\,^2P^0_{1/2}-(^3P)\,4s\,^2P_{3/2}$	непр.
	0,472686	0,472685±04	Ar II	$(^3P)\,4p\,^2D^0_{3/2}-(^3P)\,4s\,^2P_{1/2}$	»
	*0,476488	0,476488±04	Ar II	$(^3P)\,4p\,^2P^0_{3/2}-(^3P)\,4s\,^2P_{1/2}$	»
	*0,487986	0,487986±04	Ar II	$(^3P)\,4p\,^2D^0_{5/2}-(^3P)\,4s\,^2P_{3/2}$	»
	0,488903	0,488903±05	Ar II	$(^3P)\,4p\,^2P^0_{1/2}-(^3P)\,4s\,^2P_{1/2}$	»
	*0,496507	0,496509±02	Ar II	$(^3P)\,4p\,^2D^0_{3/2}-(^3P)\,4s\,^2P_{1/2}$	»
	0,49928	0,49925±05	Ar	—	—
	*0,501716	0,501717±02	Ar II	$(^1D)\,4p\,^2F^0_{5/2}-(^1D)\,3d\,^2D_{5/2}$	непр.
	0,514179	0,514180±05	Ar II	$(^1D)\,4p\,^2F^0_{7/2}-(^1D)\,3d\,^2D_{5/2}$	»
	*0,514532	0,514533±02	Ar II	$(^3P)\,4p\,^4D^0_{5/2}-(^3P)\,4s\,^4P_{3/2}$	»
	*0,528350	0,528700±100	Ar II	$(^3P)\,4p\,^4D^0_{3/2}-(^3P)\,4s\,^4P_{1/2}$	»
	0,550220	0,550220±50	Ar III	$(^2D^0)\,4p\,^3D_3-(^2D^0)\,4s\,^3P^0_2$	—
	0,673000	0,673000±50	Ar	—	—
	0,734805	0,734804±05	Ar II	$(^1D)\,3d\,^2D_{3/2}-(^3P)\,4p\,^2D^0_{3/2}$	—
	0,760514	0,760509±05	Ar II	$(^1D)\,3d\,^2P_{3/2}-(^3P)\,4p\,^2S^0_{1/2}$	—
	0,877186	0,878000±300	Ar II	$[(^3P)\,4p\,^2P^0_{3/2}-(^1D)\,4s\,^2D_{3/2}]$	—
	*1,092344	1,092300±100	Ar II	$(^3P)\,4p\,^2P^0_{3/2}-(^3P)\,3d\,^2D_{5/2}$	непр.
Криптон (рис. 33.28 и рис. 33.29)	0,264927	0,264941±06	Kr III?	? $[(^3P)\,5f\,^2L^0_{9/2}-(^3P)\,4d\,^4P_{3/2}]$	—
	0,266141	0,266450±06	Kr III?	? $[(^1D)\,5d\,^2P_{3/2}-(^3P)\,5p\,^4D^0_{1/2}]$	—
	0,274139	0,274151±06	Kr	—	—
	0,304970	0,304974±06	Kr	—	—
	0,312438	0,312443±06	Kr III	$(^2D^0)\,5p\,^1D_2-(^2D^0)\,5s\,^1D^0_2$	—
	0,323951	0,323943±03	Kr III	$(^3P^0)\,5p\,^1D_2-(^3P^0)\,5s\,^1P^0_1$	—
	0,337496	0,337500±50	Kr III	$(^3P^0)\,5p\,^3D_3-(^3P^0)\,5s\,^3P^0_2$	непр.
	*0,350742	0,350742±06	Kr III	$(^4S^0)\,5p\,^3P_2-(^4S^0)\,5s\,^3S^0_1$	»
	*0,356421	0,356420±06	Kr III	$(^4S^0)\,5p\,^3P_1-(^4S^0)\,5s\,^3S^0_1$	»
	0,377134	0,377131±05	Kr II	$(^3P)\,6d\,^4P_{1/2}-(^3P)\,5p\,^4D^0_{3/2}$	—
	*0,406737	0,406736±06	Kr III	$(^2D^0)\,5p\,^1F_3-(^2D^0)\,5s\,^1D^0_2$	непр.
	*0,413133	0,413138±06	Kr III	$(^4S^0)\,5p\,^3P_2-(^4S^0)\,5s\,^3S^0_1$	»
	0,415444	0,415445±04	Kr III	$(^2D^0)\,5p\,^3F_2-(^2D^0)\,5s\,^1D^0_2$	»
	0,417179	0,417181±10	Kr III	$(^4S^0)\,5p\,^5P_1-(^4S^0)\,5s\,^3S^0_1$	—
	0,422659	0,422651±06	Kr III	$(^2D^0)\,5p\,^3P_2-(^2D^0)\,4d\,^3D^0_1$	—
	0,431781	0,431800±100	Kr II	$(^3P)\,6s\,^4P_{1/2}-(^3P)\,5p\,^4P^0_{3/2}$	послесв.
	0,438654	0,438700±100	Kr II	$(^3P)\,6s\,^4P_{3/2}-(^3P)\,5p\,^4P^0_{3/2}$	—
	0,444329	0,444328±04	Kr III	$(^2D^0)\,5p\,^3D_3-(^2D^0)\,4d\,^3D^0_2$	—
	0,457720	0,457720±10	Kr II	$(^1D)\,5p\,^2F^0_{7/2}-(^1D)\,5s\,^2D_{5/2}$	непр.
	0,458285	0,458300±100	Kr II	$(^3P)\,6s\,^4P_{3/2}-(^3P)\,5p\,^4D^0_{5/2}$	послесв.
	0,461528	0,461520±10	Kr II	$(^3P)\,5p\,^4P^0_{3/2}-(^3P)\,5s\,^4P_{3/2}$	—
	*0,461915	0,461917±10	Kr II	$(^3P)\,5p\,^2D^0_{3/2}-(^3P)\,5s\,^2P_{1/2}$	непр.

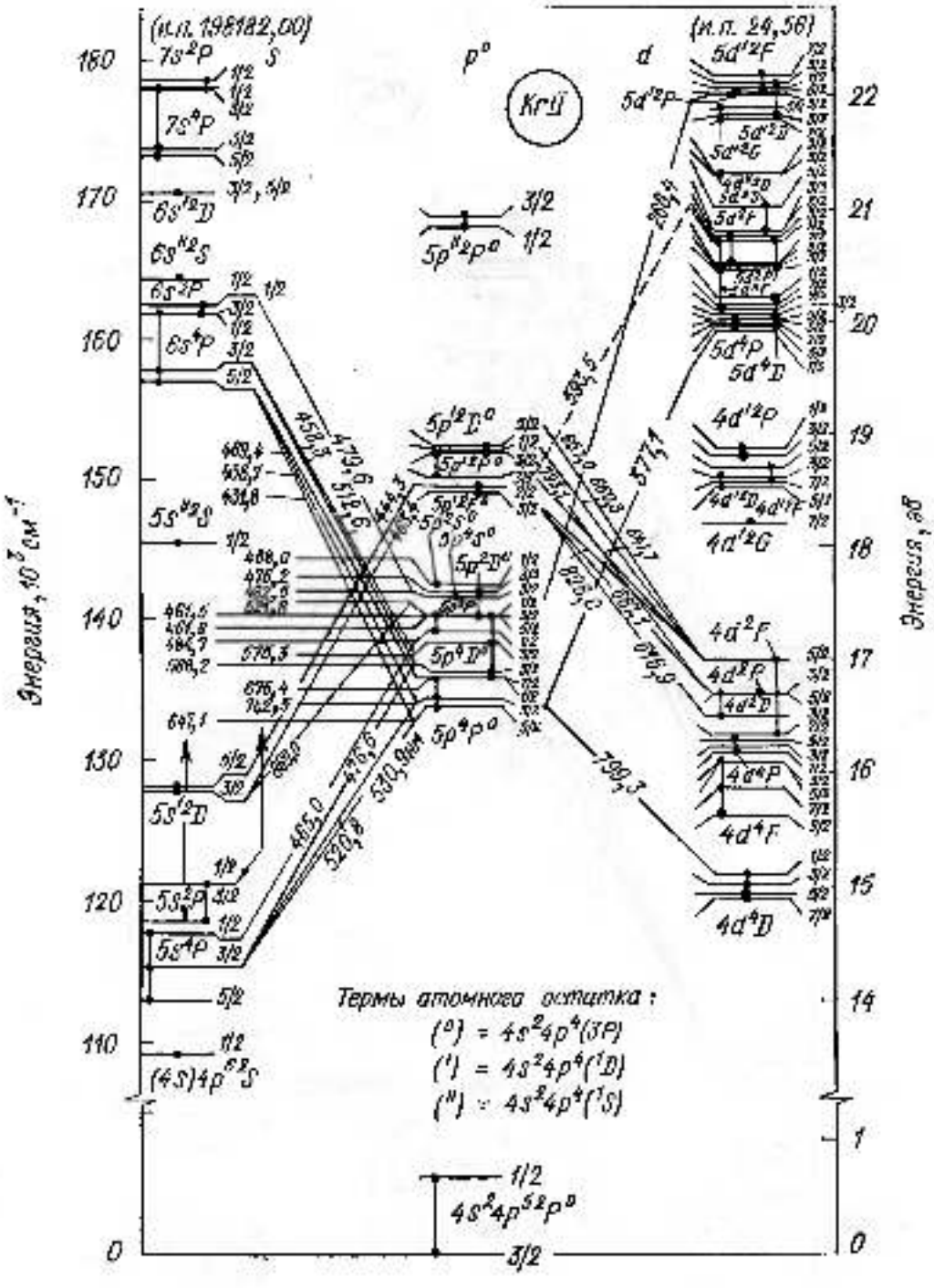


Рис. 33.28. Схема лазерных переходов в Kr II [8].

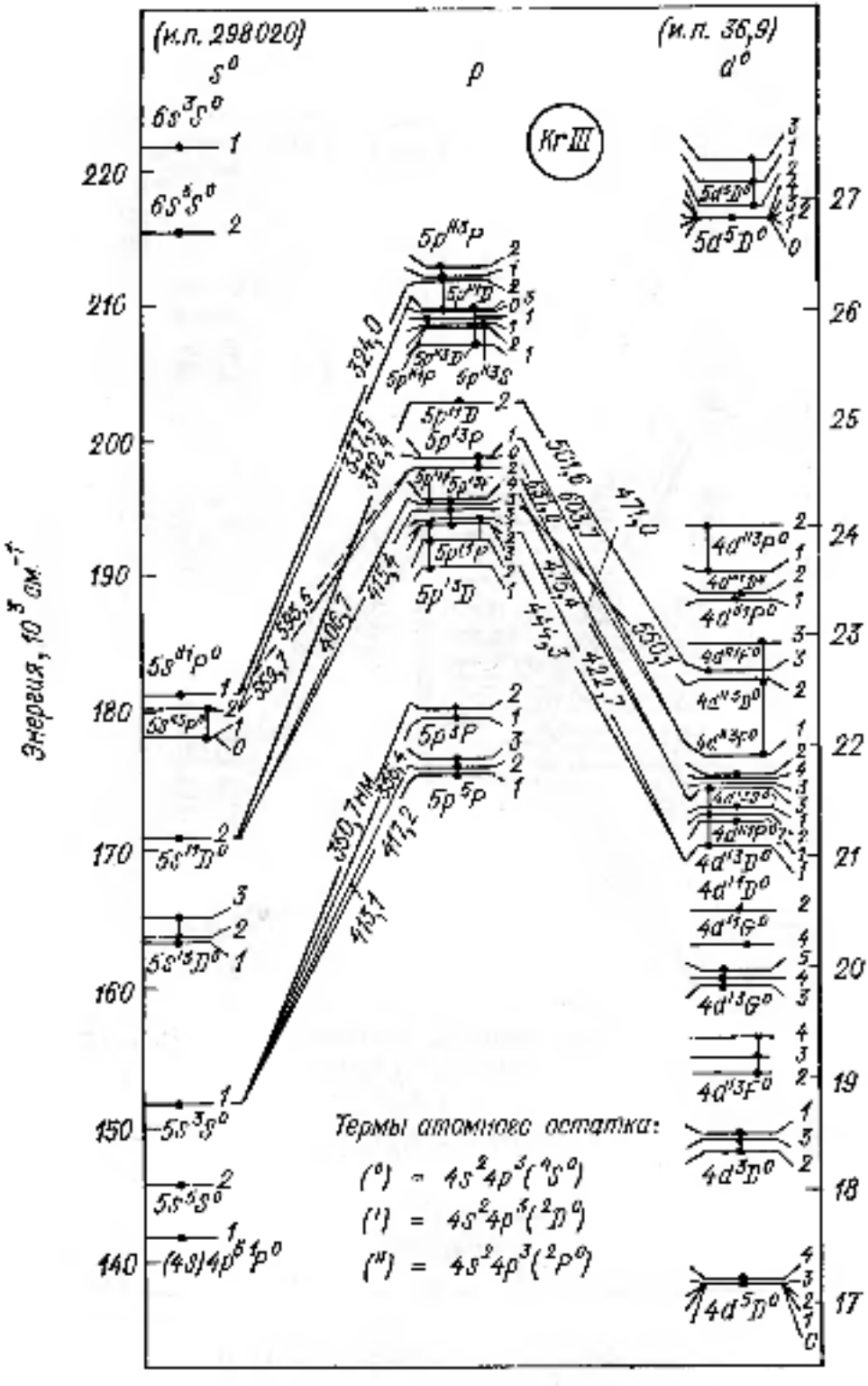


Рис. 33.29. Схема лазерных переходов в Kr III [31].

Группа, элемент	Длина волны, нм	Интервал энергии, мэВ	Ион	Уровни: верхний—нижний	Выбывание
0 Криптон (рис. 33.2б и рис. 33.2в)	0,463386	0,463392±06	Kr II	$(^1D)\,5p\,^2F^0_{5/2}-(^1D)\,5s\,^2D_{3/2}$	непр.
	0,465016	0,465016±10	Kr II	$(^3P)\,5p\,^4P^0_{1/2}-(^3P)\,5s\,^4P_{1/2}$	—
	0,468041	0,468045±06	Kr II	$(^3P)\,5p\,^4S^0_{3/2}-(^3P)\,5s\,^4P_{1/2}$	непр.
	0,469444	0,469500±100	Kr II	$(^3P)\,6s\,^4P_{5/2}-(^3P)\,5p\,^4D^0_{7/2}$	послесв.
	0,471049	0,471030±60	Kr III	$(^2D^0)\,5p\,^3F_4-(^2D^0)\,4d\,^3D^0_3$	
	0,475448	0,475450±30	Kr III	$(^2D^0)\,6p\,^3F_3-(^2D^0)\,5d\,^3D^0_3$	—
	*0,476243	0,476244±06	Kr II	$(^3P)\,5p\,^2D^0_{3/2}-(^3P)\,5s\,^2P_{1/2}$	непр.
	0,476573	0,476571±10	Kr II	$(^3P)\,6p\,^2D^0_{3/2}-(^3P)\,5s\,^2P_{1/2}$	»
	0,479633	0,479630±60	Kr II	$(^3P)\,6s\,^2P_{1/2}-(^3P)\,5p\,^2S^0_{1/2}$	—
	0,482517	0,482518±06	Kr II	$(^3P)\,5p\,^4S^0_{3/2}-(^3P)\,5s\,^4P_{1/2}$	непр.
	*0,484659	0,484666±06	Kr II	$(^3P)\,6p\,^2P^0_{1/2}-(^3P)\,5s\,^2P_{1/2}$	»
	0,501635	0,501640±10	Kr III	$(^2D^0)\,6p\,^3D_2-(^2D^0)\,4d\,^3F^0_3$	»
	0,502230	0,502200±100	Kr II	$(^3P)\,5p\,^4D^0_{5/2}-(^3P)\,5s\,^4P_{3/2}$	»
	0,503747	0,503760±60	Kr II	—	—
	0,512571	0,512000±100	Kr II	$(^3P)\,6s\,^2P_{3/2}-(^3P)\,6p\,^2D^0_{5/2}$	послесв.
	*0,520931	0,520932±04	Kr II	$(^3P)\,5p\,^4P^0_{5/2}-(^3P)\,5s\,^4P_{3/2}$	непр.
	0,521592	0,521620±40	Kr II	$(^3P)\,5p\,^4D^0_{7/2}-(^3P)\,5s\,^4P_{3/2}$	—
	*0,530946	0,530948±04	Kr II	$(^3P)\,5p\,^4D^0_{3/2}-(^3P)\,5s\,^4P_{3/2}$	непр.
	0,550143	0,550150±50	Kr III	$(^2D^0)\,6p\,^3F_3-(^2P^0)\,4d\,^3D^0_2$	—
	0,559732	0,559770±100	Kr III	$(^2D^0)\,5p\,^3P_2-(^2P^0)\,5s\,^3P^0_2$	—
	*0,568168	0,568162±04	Kr II	$(^3P)\,5p\,^2D^0_{5/2}-(^3P)\,5s\,^2P_{3/2}$	непр.
	0,575296	0,575340±50	Kr II	$(^3P)\,6p\,^4D^0_{1/2}-(^3P)\,5s\,^2P_{1/2}$	»
	0,580503	0,580530±60	Kr III или Kr II	$(^2D^0)\,5p\,^3P_1-(^2P^0)\,5s\,^3P^0_1$ или $(^3P)\,5d\,^4F_{5/2}-(^3P)\,5p\,^4D^0_{3/2}$	—
	0,608716	0,608760±80	Kr III	$(^2D^0)\,5p\,^3P_1-(^2P^0)\,4d\,^3D^0_1$	—
	0,6072	0,607200±100	Kr	—	—
	0,616880	0,616880±50	Kr II	$(^1D)\,5p\,^2F^0_{5/2}-(^3P)\,5d\,^2D_{3/2}$	непр.
	0,631062	0,631080±80	Kr III	$(^2D^0)\,5p\,^3P_2-(^2P^0)\,4d\,^3D^0_1$	—
	0,631276	0,631260±80	Kr	—	непр.
	0,641061	0,641700±100	Kr II	$(^1D)\,5p\,^4P^0_{3/2}-(^3P)\,4d\,^2P_{3/2}$	—
	*0,647089	0,647100±50	Kr II	$(^3P)\,6p\,^4P^0_{5/2}-(^3P)\,6s\,^4P_{3/2}$	непр.
	0,657012	0,657000±50	Kr II	$(^1D)\,5p\,^2D^0_{3/2}-(^3P)\,5d\,^2F_{5/2}$	»
	0,660293	0,660290±80	Kr III	$(^2D^0)\,5p\,^3P_2-(^2P^0)\,4d\,^3F^0_3$	»
	*0,676442	0,676457±10	Kr II	$(^3P)\,5p\,^2P^0_{1/2}-(^3P)\,5s\,^2P_{1/2}$	»
	0,687084	0,687096±10	Kr II	$(^1D)\,5p\,^2F^0_{5/2}-(^3P)\,4d\,^2P_{3/2}$	»
	0,743572	0,743560	Kr II	$(^1D)\,4d\,^2D_{3/2}-(^3P)\,5p\,^4D^0_{5/2}$	·
	0,752546	0,752550±10	Kr II	$(^3P)\,6p\,^2D^0_{3/2}-(^3P)\,6s\,^2P_{1/2}$	непр.
	0,793145	0,793140	Kr II	$(^1D)\,5p\,^2F^0_{7/2}-(^3P)\,6d\,^2F_{5/2}$	»
	*0,794322	0,794300±60	Kr II	$(^3P)\,5p\,^2P^0_{3/2}-(^3P)\,4d\,^2D_{3/2}$	»
	0,828037	0,828030±10	Kr II	$(^1D)\,5p\,^2F^0_{5/2}-(^3P)\,6d\,^2F_{5/2}$	»
	0,847331	0,847300	Kr II	$(^1D)\,4d\,^2D_{3/2}-(^3P)\,5p\,^4D^0_{5/2}$	—

Группа, элемент	Длина волны, нм	Измеренное значение, нм	Ион	Уровни нормальный—возбужденный	Возбуждение
6	0,858778	0,858800±300	Kr III?	—	—
Криптон (рис. 33.28 и рис. 33.29)	0,869011	0,869010	Kr II	$(^3P^1)\,5p\,^2P^0_{1/2}-(^1D)\,1s\,^2D_{3/2}$	непр.
	0,897859	0,897840	Kr II	$(^1D)\,4d\,^2D_{5/2}-(^3P^1)\,5p\,^4D^0_{7/2}$	—
	1,065950	1,065900	Kr II	$(^1D)\,4d\,^2D_{3/2}-(^3P^1)\,5p\,^2P^0_{1/2}$	—
	1,320900	1,320500	Kr II	$(^1D)\,4d\,^2D_{5/2}-(^3P^1)\,5p\,^2D^0_{3/2}$	—
Ксенон (рис. 33.30 и рис. 33.31)	0,247739	0,247739±03	Xe	—	—
	0,269184	0,269184±03	Xe	—	—
	0,296385	0,296370±50	Xe III	$(^3P^0)\,6p\,3S_1-(^3P^0)\,6s\,^3P^0_0$	—
	0,307976	0,307976±10	Xe	—	—
	0,324684	0,324684±06	Xe III	$(^3P^0)\,6p\,^4D_3-(^3D^0)\,5d\,^3D^0_3$	—
	0,330964	0,330592±05	Xe IV?	—	—
	*0,333090	0,333090±03	Xe IV	—	непр.
	0,334960	0,334960±03	Xe	—	—
	*0,345424	0,345423±06	Xe III	$(^3D^0)\,6p\,^1D_1-(^3D^0)\,6s\,^1D^0_2$	непр.
	0,348331	0,348331±03	Xe	—	—
	0,354233	0,354231±05	Xe III	$(^3D^0)\,6p\,^3P_2-(^3D^0)\,6s\,^3D^0_3$	—
	0,359600	0,359600±100	Xe III	—	непр.
	0,364551	0,364551±02	Xe	—	—
	0,366920	0,366920±03	Xe	—	непр.
	0,374571	0,374573±06	Xe III	$(^3D^0)\,6p\,^1D_2-(^3D^0)\,5d\,^1D^0_2$	»
	0,375994	0,375994±02	Xe	—	—
	*0,378097	0,378099±06	Xe III	$(^4S^0)\,6p\,^3P_2-(^4S^0)\,6s\,^3S^0_1$	непр.
	0,386329	0,386329±03	Xe	—	—
	0,3841	0,384100±100	Xe III или Xe III	$(^3D^0)\,6p\,^4F_5-(^3D^0)\,6s\,^4D^0_2$; $(^3D^0)\,6p\,^3F_4-(^3D^0)\,6d\,^3D^0_3$	непр.
	0,397301	0,397301±03	Xe	—	—
	0,3993	0,399000±100	Xe III или Xe III	$(^3D^0)\,6p\,^3P_1-(^3D^0)\,6s\,^1D^0_2$; $[(^4S^0)\,6p\,^5P_2-(^4S^0)\,6d\,^3D^0_1]$	непр.
	0,405035	0,404990±20	Xe III	$(^4S^0)\,6p\,^3P_1-(^4S^0)\,6s\,^3S^0_1$	—
	*0,406041	0,406048±06	Xe III	$(^3P^0)\,6p\,3S_1-(^3P^0)\,5d\,2S^0_1$	непр.
	0,414572	0,414530±60	Xe III	$(^3D^0)\,6p\,^3D_2-(^3D^0)\,6d\,^3D^0_1$	»
	*0,421401	0,421405±06	Xe III	$(^3D^0)\,6p\,^3F_3-(^3D^0)\,6d\,^3D^0_4$	»
	*0,424024	0,424006±10	Xe III	$(^3D^0)\,6p\,^3D_2-(^3P^0)\,5d\,1F^0_3$	»
	*0,427259	0,427260±06	Xe III	$(^3D^0)\,6p\,^3F_4-(^3D^0)\,5d\,^3D^0_3$	»
	0,428588	0,428592±06	Xe III	$(^3D^0)\,6p\,^3D_3-(^3D^0)\,6s\,^3D^0_2$	—
	0,429639	0,429633±05	Xe II	$(^2P)\,7s\,^4P_{5/2}-(^2P)\,6p\,^4P^0_{3/2}$	—
	0,430575	0,430575±02	Xe IV	$(^2D^0)\,6p\,^3D_3-(^2D^0)\,5d\,^3D^0_2$	—
	0,441308	0,441300±60	Xe	—	—
	0,443416	0,443422±10	Xe III	$(^3D^0)\,6p\,^3F_4-(^3D^0)\,6d\,^3D^0_3$	непр.
	0,450345	0,450350±60	Xe III	$(^3P^0)\,6p\,2S_2-(^3P^0)\,5d\,2P^0_2$	—

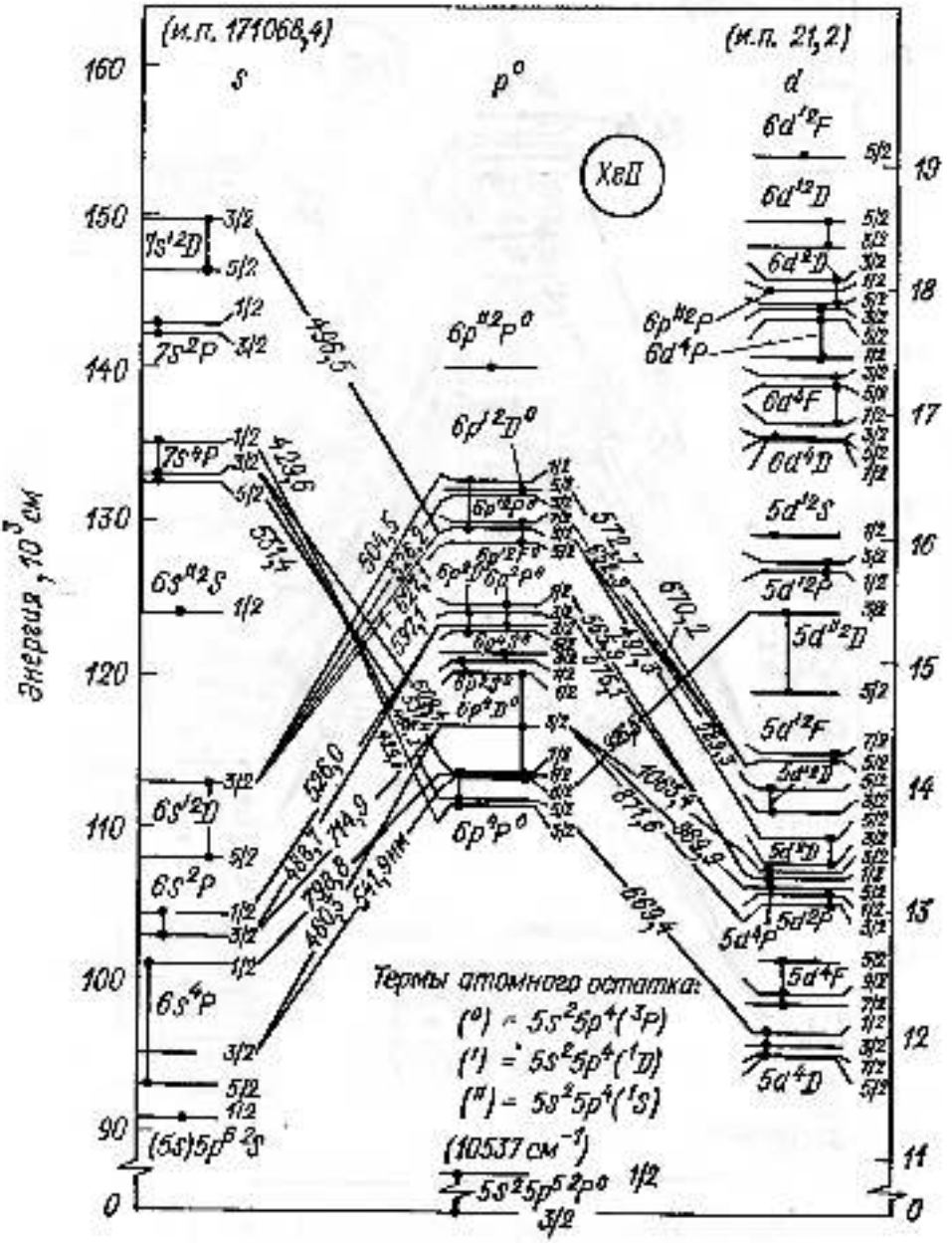


Рис. 33.30. Схема лазерных переходов в Xe II [3].

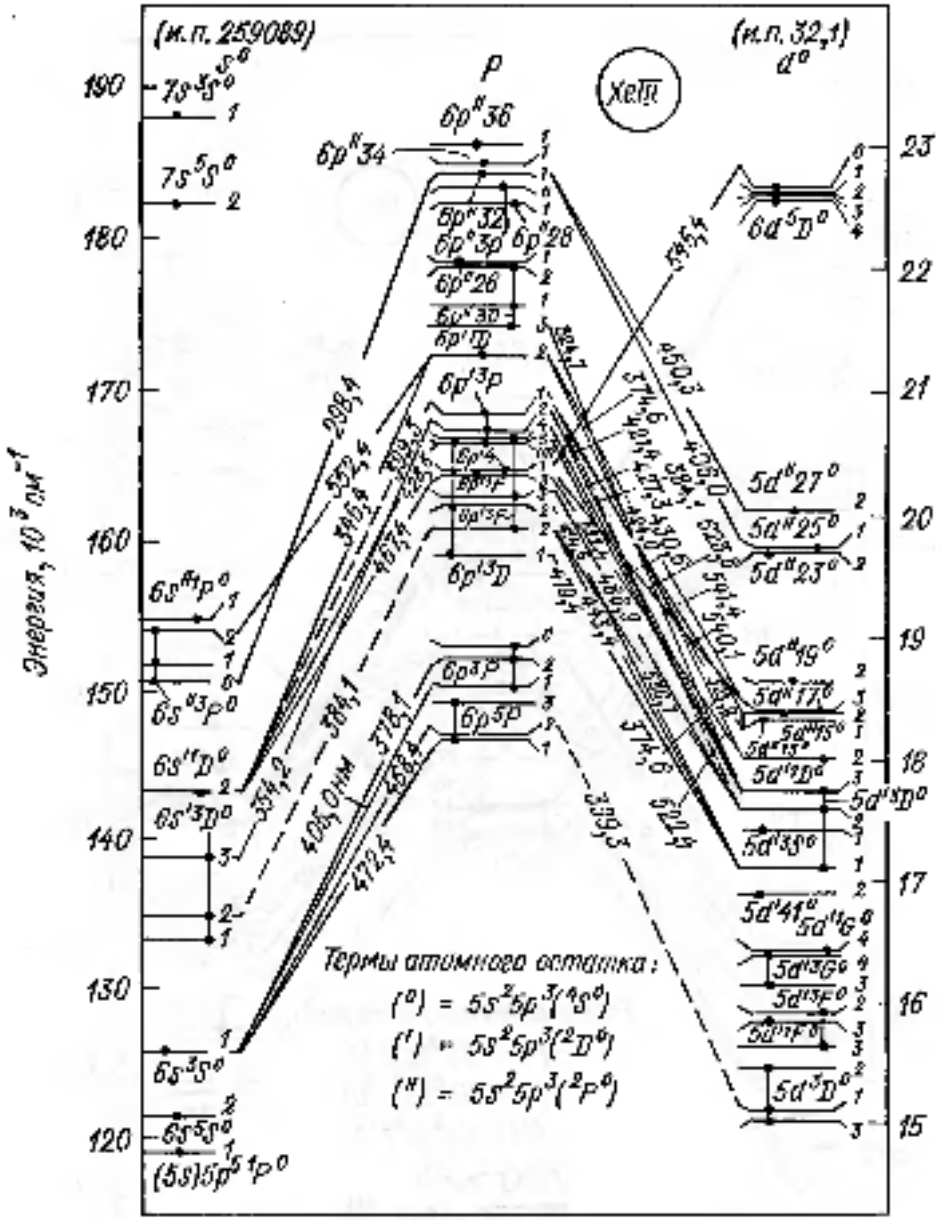


Рис. 33.31. Схема лазерных переходов в Xe III [3].

Группа, элемент	Длина волны, нм	Наилучшее значение, нм	Ион	Уровни нижний — верхний	Возбуждение
0 Ксенон (рис. 33-30 и рис. 33.31)	0,455874	0,455874±06	Xe IV	—	—
	*0,460303	0,460302±04	Xe II	$(^3P)\,6p\,^4D^0_{5/2} - (^3P)\,6s\,^4P_{3/2}$	непр.
	0,467368	0,467373±06	Xe III	$(^2D^0)\,6p\,^1F^0_3 - (^2D^0)\,6s\,^1D^0_2$	»
	0,468354	0,468357±06	Xe III	$(^4S^0)\,6p\,^4P_{5/2} - (^4S^0)\,6s\,^3S^0_1$	»
	0,472357	0,472310±60	Xe III	$(^4S^0)\,6p\,^5P_3 - (^4S^0)\,6s\,^3S^0_1$	—
	0,474694	0,474694±03	Xe III?	—	непр.
	0,479448	0,479450±60	Xe III	$(^2D^0)\,6p\,^3D_3 - (^2D^0)\,5d\,^4D^0_1$	—
	0,486249	0,486300±100	Xe II	$(^3P)\,7s\,^4P_{5/2} - (^3P)\,6p\,^4P^0_{3/2}$	непр.
	0,486946	0,486945±05	Xe III	$(^2D^0)\,6p\,^3F_3 - (^2D^0)\,5d\,^3D^0_2$	»
	0,488730	0,488700±100	Xe II	$[(^3P)\,6p\,^4P^0_{5/2} - (^3P)\,6s\,^4P_{3/2}]$	»
	*0,495416	0,495416±05	Xe IV	—	»
	0,496508	0,496500±05	Xe II	$(^1D)\,7s\,^2D_{3/2} - (^1D)\,6p\,^2P^0_{3/2}$	»
	0,497270	0,497271±05	Xe II	$(^1D)\,6p\,^2P^0_{3/2} - (^3P)\,5d\,^2D_{5/2}$	—
	*0,500750	0,500750±05	Xe IV	—	непр.
	0,504492	5,504485±06	Xe II	$(^1D)\,6p\,^2P^0_{3/2} - (^1D)\,6s\,^2D_{3/2}$	»
	0,515704	0,515704±06	Xe IV V?	—	—
	*0,515908	0,515908±05	Xe IV	—	непр.
	0,522364	0,522340±60	Xe III	$(^2D^0)\,6p\,^1F_3 - (^2D^0)\,5d\,^1D^0_2$	—
	*0,523895	0,523889±06	Xe III	$(^2D^0)\,6p\,^3P_2 - (^2D^0)\,5d\,^1S^0_0$	непр.
	0,525650	0,525650±60	Xe	—	—
	*0,526017	0,526017±05	Xe IV	—	непр.
	0,526043	0,526043±05	Xe II	$(^3P)\,6p\,^2P^0_{3/2} - (^3P)\,6s\,^2P_{1/2}$	»
	*0,526195	0,526156±100	Xe II	$(^1D)\,6p\,^2D^0_{5/2} - (^1D)\,6s\,^2D_{3/2}$	»
	0,531389	0,531400±100	Xe II	$(^3P)\,7s\,^4P_{5/2} - (^3P)\,6p\,^4D^0_{3/2}$	послесв.
	0,534334	0,534334±05	Xe IV, V?	—	
	*0,535250	0,535250±05	Xe IV	—	непр.
	0,536706	0,536700±60	Xe III	$(^2D^0)\,6p\,^3F_2 - (^2D^0)\,5d\,^3D^0_3$	—
	*0,539460	0,539460±05	Xe IV	—	непр.
	0,540100	0,540090±30	Xe III	$(^2D^0)\,6p\,^3P_2 - (^2D^0)\,5d\,^1S^0_0$	—
	0,541353	0,541350±60	Xe III	$(^2D^0)\,6p\,^3P_2 - (^2D^0)\,5d\,^1D^0_2$	—
	*0,541915	0,541916±06	Xe II	$(^3P)\,6p\,^4D^0_{5/2} - (^3P)\,6s\,^4P_{3/2}$	непр.
	0,546433	0,546460±60	Xe III	$(^4S^0)\,6d\,^5D^0_0 - (^2D^0)\,6p\,4_1$	—
	0,549931	0,549931±04	Xe IV, V?	—	—
	0,552437	0,552456±50	Xe III	$(^2D^0)\,6p\,^1D_2 - (^2P^0)\,6s\,^1P^0_1$	непр.
	0,559235	0,559235±05	Xe IV, V?	—	—
	0,565937	0,565900±100	Xe II	$(^3P)\,6p\,^2P^0_{3/2} - (^3P)\,5d\,^4P_{1/2}$	непр.
	0,572690	0,572700±100	Xe II	$[(^1D)\,6p\,^2D^0_{3/2} - (^1D)\,5d\,^2F_{5/2}]$	»
	0,575102	0,575100±100	Xe II	$(^3P)\,6p\,^2D^0_{3/2} - (^3P)\,6d\,^4P_{1/2}$	»
	0,589328	0,589330±05	Xe II	$(^1D)\,6p\,^2P^0_{3/2} - (^1D)\,6d\,^2D_{5/2}$	—
	*0,596567	0,596567±05	Xe IV	—	
	*0,597111	0,597112±06	Xe II	$(^1D)\,6p\,^2P^0_{3/2} - (^1D)\,6s\,^2D_{3/2}$	непр.
	0,609861	0,609400±100	Xe II	$(^3P)\,7s\,^4P_{5/2} - (^3P)\,6p\,^4D^0_{3/2}$	послесв.
	0,617049	0,617619±03	Xe	—	непр.

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренное значение, нм	Ион	Уровни: верхний—нижний	Вероятность
0 Ксенон (рис. 33.30 и рис. 33.31)	0,623925	0,624190 ± 60	Xe III	$(^3D^0)\,6p\,^3F_3 - (^3P^0)\,5d\,^3F_3^0$	непр.
	*0,627061	0,627090 ± 10	Xe II	$(^1D)\,6p\,^2F^0_{7/2} - (^1D)\,6s\,^2D_{5/2}$	»
	0,628611	0,628600 ± 60	Xe IV, V?	—	—
	0,634318	0,634318 ± 30	Xe IV, V?	—	—
	0,652836	0,652850 ± 50	Xe II	$(^1D)\,6p\,^2F^0_{7/2} - (^1D)\,5d\,^2F_{5/2}$	непр.
	0,660431	0,66045	Xe II	$(^3P)\,6p\,^4P^0_{5/2} - (^3P)\,5d\,^4D_{1/2}$	»
	0,669950	0,669950 ± 30	Xe IV, V?	—	—
	0,670225	0,670200 ± 100	Xe II	$(^1D)\,6p\,^2P^0_{3/2} - (^1D)\,5d\,^2F_{5/2}$	непр.
	0,709234	0,70929	Xe II	$37^0_{5/2} - (^3P)\,6d\,^4D_{3/2}$	—
	0,711903	0,711891 ± 60	Xe II	$(^3P)\,6p\,^4D^0_{5/2} - (^3P)\,6s\,^4P_{3/2}$	непр.
	*0,782763	0,782800 ± 300	Xe II	$?\,35^0_{5/2} - 16_{5/2}$	—
	*0,798800	0,798900 ± 300	Xe II	$(^3P)\,6p\,^4P^0_{3/2} - (^3P)\,6s\,^4P_{1/2}$	—
	0,833271	0,833000 ± 300	Xe II	$?\,27^0_{3/2} - (^3P)\,6d\,^4D_{1/2}$	—
	0,844049	0,844300 ± 300	Xe II	$?\,27^0_{5/2} - (^3P)\,6d\,^4D_{3/2}$	—
	0,856068	0,856086 ± 03	Xe	—	—
	0,858251	0,858200 ± 300	Xe II	$?\,31^0_{5/2} - 10_{5/2}$	—
	*0,871017	0,871400 ± 300	Xe II	$(^3P)\,6p\,^4D^0_{1/2} - (^3P)\,5d\,^4P_{3/2}$	—
	*0,906930	0,906300 ± 400	Xe II	$?\,27^0_{1/2} - 16_{3/2}$	—
	0,926539	0,926500 ± 400	Xe II	$?\,(^1S)\,5d\,^2D_{3/2} - (^3P)\,6p\,^4D^0_{3/2}$	—
	0,928851	0,928700 ± 400	Xe II	$?\,13^0_{3/2} - (^1D)\,5d\,^2S_{1/2}$	—
	*0,969859	0,969700 ± 200	Xe II	$(^3P)\,6p\,^4D^0_{1/2} - (^3P)\,5d\,^4P_{3/2}$	—
	1,063365	1,063400 ± 600	Xe II	$(^3P)\,6p\,^4D^0_{1/2} - (^3P)\,6d\,^4P_{3/2}$	—
	*1,0950	1,095000 ± 600	Xe		—

33.3. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

В молекулярных газах в общем случае лазерные переходы осуществляются между различными электронно-колебательно-вращательными уровнями молекул. Это позволяет получать генерацию на значительно большем числе линий, чем в случаях нейтральных и ионизованных атомных газов.

Для накачки молекулярных газовых лазеров используются самые различные методы: электрический разряд, оптическая, химическая и другие виды накачки. Энергия возбужденная лазерная молекула сама создается в процессе, сопровождающем тот или иной вид накачки. Основные материалы, служащие в качестве исходных для создания лазерного эффекта в различных молекулярных системах, перечислены в табл. 33.3. Список соответствующих лазерных переходов для двухатомных, трехатомных и многоатомных молекул приведен в табл. 33.4—33.6.

Для обозначения уровней молекул используется стандартная система обозначений молекулярной спектроскопии. В таблицах предполагается, если специально не оговорено, $E_{эл} = 0$.

Таблица 33.3

Вещества молекулярных газовых лазеров [5]

Вещество	Таблица (рисунок)	Лазерный переход в молекуле	Вещество	Таблица (рисунок)	Лазерный переход в молекуле
BBr_3	33.4(3б)	HBr	D_2	33.4(6)	D_2, HD
BCl_3	33.4(4б)	HCl		33.4(3в)	DBr
BF_3	33.4(5б)	HF		33.4(4в)	DCl
Br_2CN	33.5(3б)	DCN		33.4(5в)	DF
Br_2	33.4(3а)	HBr		33.5(3в)	DCN
$CBrF_3$	33.4(5а,б)	HF	D_2O	33.5(4в)	D_2O
	33.4(5в)	DF	F_2	33.4(6а)	HF
$CClF_3$	33.4(4б)	HCl	HCN	33.5(3а)	HCN
	33.4(5а,б)	HF		33.5(3в)	$HC^{15}N$
	33.4(5в)	DF	HI	33.4(4а)	HCl
CCl_2F_2	33.4(5а,б)	HF	H_2	33.4(3)	HBr
	33.4(5в)	DF		33.4(4а,б)	HCl
CCl_3F	33.4(5б)	HF		33.4(5а,б)	HF
CD_4	33.5(3б)	DCN		33.4(6в—п)	H_2
CF_4	33.4(5а)	HF	$H_2C{=}CHCl$	33.6(4)	$H_2C{=}CHCl$
	33.4(5в)	DF	H_2O	33.4(3б)	HBr
CH_3Br	33.4(4в)	HCl		33.4(4б)	HCl
CH_3CN	33.4(3а)	HCN		33.4(5б)	HF
CH_3Cl	33.4(4п)	HCl		33.5(4в)	H_2O
	33.4(5а)	HF		33.5(4б)	$H_2{}^{18}O$
CH_3F	33.6(1)	CH_3F	H_2S	33.5(5)	H_2S
CH_4	33.4(5в)	HF	HCN	33.5(3а)	HCN
	33.4(3а)	HCN	ND_3	33.5(3б)	DCN
$(CH_3)_2NH$	33.5(3а)	HCN	NH_3	33.5(3)	NH_3
CH_3OH	33.6(2)	CH_3OH		33.5(3в)	HCN
CN	33.4(1)	CN	NOCl	33.4(7)	NO
C_2N_2	33.4(1)	CN	N_2	33.4(8а—д)	N_2
CO	33.4(2а,б)	CO		33.4(5в)	HF
CO_2	33.5(1а—з)	CO_2	N_2O	33.5(6а,б)	N_2O
CS_2	33.4(2а)	CO	O_2	33.4(2в)	CO
	33.5(2)	CS_2	SO_2	33.5(8)	SO_2
Cl_2	33.4(4а)	HCl	SF_6	33.4(5в)	HF
	33.4(4б)	HCl	UF_6	33.4(6а)	HF
	33.4(4п)	DCl		33.4(6в)	DF

Таблица 33.4

Лазерные переходы в двухатомных молекулярных газах [5]

$\lambda_{вак}$, мкм	$\nu_{вак}$, см$^{-1}$	Переход	Относительная интенсивность
(1) CN-лазер, переходы в $X^2\Sigma$			
Полосы 4—3			
5,1838	1929,06	P (9)	0,54
5,1946	1925,09	P (10)	0,42
5,2055	1921,06	P (11)	0,04
(2а) CO-лазер (рис. 33.32), переходы между $B^1\Sigma - A^1\Pi$			
Полоса 0—3			
0,55921	17 882,2	Q (11)	0,3
0,55949	17 873,3	Q (10)	0,5
0,55975	17 864,9	Q (9)	1,0
0,55998	17 857,6	Q (8) или R (13)	1,0
0,56019	17 850,9	Q (7)	1,0
0,56040	17 844,3	Q (6)	0,5
0,56053	17 840,1	Q (5)	0,02

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход	Относительная интенсивность
	Полоса 0—4		
0,60646	16 489,2	Q (9)	0,5
0,60674	16 481,6	Q (8)	0,8
0,60699	16 474,8	Q (7)	1,0
0,60722	16 468,6	Q (6)	0,6
0,60742	16 463,1	Q (5)	0,3
0,60759	16 458,6	Q (4)	0,03
	Полоса 0—5		
0,60973	15 157,7	Q (10)	0,05
0,66013	15 148,5	Q (9)	0,3
0,60049	15 140,2	Q (8) или P (13)	0,7
0,66082	15 132,7	Q (7)	1,0
0,66109	15 126,5	Q (6)	0,4
0,66133	15 121,0	Q (5)	0,2
0,66153	15 116,4	Q (4)	0,02

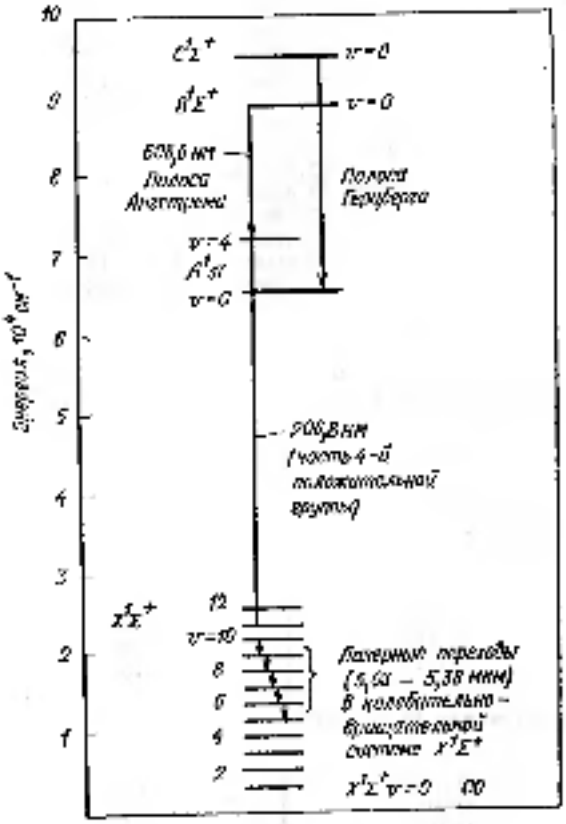


Рис. 33.32. Схема части лазерных переходов на молекулах CO, показывающая электронные переходы в полосах Ангстрема и колебательно-вращательные переходы в основном состоянии молекулы CO $X^1\Sigma^+$ [5].

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
(26) CO-лазер, переходы в электронном состоянии $X^1\Sigma^+$		
	Полоса 5—4	
5,09691	1965,83	P (18)
5,09606	1961,53	P (19)
5,10937	1957,10	P (20)
5,12079	1952,82	P (21)
5,13237	1948,42	P (22)
5,14405	1943,99	P (23)
5,15597	1939,60	P (24)
5,16794	1935,01	P (25)
5,18009	1930,47	P (26)
5,19236	1925,91	P (27)
	Полоса 6—5	
5,03755	1986,09	P (7)
5,04750	1981,16	P (8)
5,05755	1977,24	P (9)
5,06773	1973,27	P (10)
5,07807	1969,25	P (11)
5,08845	1965,23	P (12)
5,09905	1961,15	P (13)
5,10985	1957,00	P (14)
5,12030	1953,01	P (15)
5,13157	1948,72	P (16)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
5,14266	1944,01	P (17)
5,15390	1940,28	P (18)
5,16527	1936,00	P (19)
5,17691	1931,69	P (20)
5,18846	1927,35	P (21)
5,20026	1922,98	P (22)
5,21218	1918,58	P (23)
5,22422	1914,16	P (24)
5,23640	1909,66	P (25)
5,24882	1905,19	P (26)
5,26137	1900,66	P (27)
5,27396	1896,11	P (28)
Полоса 7—6		
5,10410	1960,21	P (7)
5,11416	1955,35	P (8)
5,12445	1951,48	P (9)
5,13486	1947,46	P (10)
5,14530	1943,52	P (11)
5,15590	1939,51	P (12)
5,16666	1935,49	P (13)
5,17755	1931,38	P (14)
5,18865	1927,26	P (15)
5,19980	1923,15	P (16)
5,21110	1918,98	P (17)
5,22256	1914,77	P (18)
5,23420	1910,51	P (19)
5,24590	1906,25	P (20)
5,25776	1901,95	P (21)
5,26981	1897,60	P (22)
5,28189	1893,26	P (23)
5,29423	1888,85	P (24)
5,30674	1884,40	P (25)
5,31924	1879,97	P (26)
5,33204	1875,45	P (27)
5,34494	1870,93	P (28)
Полоса 8—7		
5,17220	1933,41	P (7)
5,18250	1929,57	P (8)
5,19290	1925,71	P (9)
5,20345	1921,80	P (10)
5,21410	1917,88	P (11)
5,22496	1913,88	P (12)
5,23600	1909,86	P (13)
5,24710	1905,81	P (14)
5,25835	1901,74	P (15)
5,26976	1897,66	P (16)
5,28116	1893,52	P (17)
5,29264	1889,34	P (18)
5,30467	1885,13	P (19)
5,31663	1880,90	P (20)
5,32871	1876,63	P (21)
5,34095	1872,33	P (22)
5,35334	1867,99	P (23)
5,36585	1863,64	P (24)
5,37850	1859,22	P (25)
5,39141	1854,80	P (26)
5,40442	1850,34	P (27)
5,41751	1845,87	P (28)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
Полоса 9—8		
5,24195	1907,69	P (7)
5,25250	1903,85	P (8)
5,26310	1900,02	P (9)
5,27389	1896,17	P (10)
5,28465	1892,27	P (11)
5,29570	1888,32	P (12)
5,30695	1884,32	P (13)
5,31820	1880,33	P (14)
5,32964	1876,30	P (15)
5,34127	1872,21	P (16)
5,35298	1868,12	P (17)
5,36485	1863,98	P (18)
5,37692	1859,80	P (19)
5,38906	1855,61	P (20)
5,40139	1851,38	P (21)
5,41385	1847,11	P (22)
5,42648	1842,82	P (23)
5,43926	1838,49	P (24)
5,45225	1834,11	P (25)
5,46533	1829,72	P (26)
5,47852	1825,31	P (27)
5,49191	1820,86	P (28)
Полоса 10—9		
5,32415	1878,23	P (8)
5,33490	1874,45	P (9)
5,34580	1870,59	P (10)
5,35685	1866,73	P (11)
5,36820	1862,82	P (12)
5,37950	1858,91	P (13)
5,39110	1854,91	P (14)
5,40274	1850,91	P (15)
5,41457	1846,87	P (16)
5,42651	1842,80	P (17)
5,43867	1838,57	P (18)
5,45128	1834,40	P (20)
5,46362	1830,21	P (21)
5,47650	1825,99	P (22)
5,50136	1817,73	P (23)
5,51442	1813,43	P (24)
5,52762	1809,10	P (25)
5,54091	1804,76	P (26)
5,55436	1800,39	P (27)
Полоса 11—10		
5,4080	1849,11	P (9)
5,4196	1845,15	P (10)
5,4320	1841,05	P (11)
5,4425	1837,40	P (12)
5,45402	1833,51	P (13)
5,46571	1829,59	P (14)
5,47763	1825,51	P (15)
5,48968	1821,60	P (16)
5,50189	1817,56	P (17)
5,51421	1813,50	P (18)
5,52667	1809,41	P (19)
5,53927	1805,29	P (20)
5,55207	1801,12	P (21)
5,56503	1796,94	P (22)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
5,59147	1788,44	P (24)
5,60492	1784,14	P (25)
	Полоса 12—11	
5,4842	1823,41	P (8)
5,4946	1819,96	P (10)
5,5072	1815,81	P (11)
5,5187	1812,02	P (12)
5,5299	1808,35	P (13)
5,5424	1804,28	P (14)
5,57904	1792,42	P (17)
5,59159	1788,40	P (18)
5,60436	1784,33	P (19)
5,61725	1780,23	P (20)
5,64350	1771,95	P (22)
5,65687	1767,76	P (23)
5,67044	1763,53	P (24)
5,68414	1759,29	P (25)
	Полоса 13—12	
	1786,64	P (12)
5,5971	1782,96	P (13)
5,6087	1779,24	P (15)
5,63304	1767,30	P (17)
5,65816	1763,36	P (18)
5,67096	1759,34	P (19)
5,68396	1755,27	P (20)
5,69712	1751,18	P (21)
5,71042	1742,91	P (23)
5,73754	1738,70	P (24)
5,75142		
	Полоса 14—13	
5,6546	1769,18	P (10)
5,6654	1765,10	P (11)
5,6780	1761,18	P (12)
5,71361	1750,21	P (15)
5,72642	1746,29	P (16)
5,73931	1742,37	P (17)
5,75245	1738,40	P (18)
5,77911	1730,37	P (20)
5,79264	1726,33	P (21)
5,80636	1722,25	P (22)
5,82031	1718,12	P (23)
5,83441	1713,97	P (24)
5,84874	1709,77	P (25)
	Полоса 15—14	
5,78046	1729,07	P (14)
5,79633	1725,23	P (15)
5,80927	1721,39	P (16)
5,83581	1713,56	P (18)
5,84935	1709,69	P (19)
5,86300	1705,61	P (20)
5,87689	1701,58	P (21)
5,89096	1697,54	P (22)
5,90507	1693,46	P (23)
5,91951	1689,33	P (24)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
	Полоса 16—15	
5,89450	1696,50	P (16)
5,90789	1692,65	P (17)
5,92156	1688,74	P (18)
5,94925	1680,69	P (20)
5,96338	1676,90	P (21)
5,97766	1672,65	P (22)
	Полоса 17—16	
5,99177	1671,75	P (16)
6,00563	1667,91	P (17)
6,00939	1664,06	P (18)
6,02346	1660,17	P (19)
6,03774	1656,25	P (20)
	Полоса 18—17	
6,05755	1650,63	P (15)
6,07145	1647,05	P (16)
6,0856	1643,22	P (17)
6,09961	1639,45	P (18)
6,12845	1631,73	P (20)
	Полоса 19—18	
6,14904	1626,27	P (15)
6,16299	1622,62	P (16)
6,17712	1618,86	P (17)
6,1994	1614,86	P (18)
6,2068	1611,14	P (19)
	Полоса 20—19	
6,24320	1601,74	P (15)
6,25712	1598,18	P (16)
6,27226	1594,32	P (17)
6,2870	1590,58	P (18)
	Полоса 21—20	
6,3260	1580,78	P (14)
6,33646	1577,45	P (15)
6,3552	1573,51	P (16)
6,38476	1566,23	P (17)
	Полоса 22—21	
6,4252	1556,37	P (14)
6,43966	1552,97	P (15)
6,4486	1549,22	P (16)
6,4704	1545,50	P (17)
	Полоса 23—22	
6,5120	1535,63	P (13)
6,5268	1532,14	P (14)
6,5424	1528,49	P (15)
6,5584	1524,76	P (16)
	Полоса 24—23	
6,6476	1504,30	P (13)
6,6632	1500,78	P (14)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход $H^{79}Br$ $H^{81}Br$	
(3л) HBr-лазер			
Полоса 1—0			
4,0070	2489,40	P (4)	—
4,0176	2480,05	—	P (4)
4,0190	2470,97	P (5)	—
4,0475	2470,63	—	P (5)
4,0783	2452,03	P (6)	—
4,0786	2451,68	—	P (6)
4,1107	2432,70	P (7)	—
4,1112	2432,36	—	P (7)
4,1442	2412,99	P (8)	—
4,1446	2412,68	—	P (8)
4,1796	2392,46	—	P (9)
Полоса 2—1			
4,1673	2400,78	P (4)	—
4,1678	2400,47	—	P (4)
4,1970	2382,66	P (5)	—
4,1975	2382,36	—	P (5)
4,2265	2364,36	P (6)	—
4,2633	2345,38	P (7)	—
4,2639	2345,26	—	P (7)
4,2999	2326,23	P (8)	—
4,2994	2325,92	—	P (8)
4,3364	2306,60	P (9)	—
4,3369	2306,30	—	P (9)
Полоса 3—2			
4,3950	2312,15	P (4)	—
4,3955	2311,87	—	P (4)
4,3579	2294,68	P (5)	—
4,3585	2294,39	—	P (5)
4,3925	2276,61	P (6)	—
4,3931	2276,32	—	P (6)
4,4261	2258,29	P (7)	—
4,4267	2258,00	—	P (7)
4,4652	2239,02	P (8)	—
4,4658	2238,26	—	P (8)
4,5021	2220,20	P (9)	—
4,5047	2219,92	—	P (9)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход $D^{79}Br$ $D^{81}Br$	
Полоса 4—3			
4,5330	2206,07	P (5)	—
4,5335	2205,81	—	P (5)
4,5691	2188,61	P (6)	—
4,5696	2188,35	—	P (6)
4,6070	2170,61	P (7)	—
4,6076	2170,35	—	P (7)
4,6463	2152,27	P (8)	—
4,6467	2152,04	—	P (8)
(3б) Чисто вращательные переходы			
$v=0$			
19,399	516,49		R (33)
20,360	491,16	R (31) или	R (31)
20,896	478,66	R (30)	
20,949	477,35		R (30)
21,501	465,09	R (29) или	R (29)
22,136	451,75		R (28)
30,948	323,12	R (19) или	R (19)
32,469	307,99	R (18) или	R (18)
$v=1$			
19,988	500,30	R (33) или	R (33)
21,546	464,12	R (30)	
30,445	328,46	R (20) или	R (20)
31,849	313,98	R (19) или	R (19)
33,406	299,32	R (18) или	R (18)
$v=2$			
22,296	440,92	R (30)	
22,855	437,54	R (29) или	R (29)
31,366	318,80	R (20) или	R (20)
32,799	304,89	R (19)	
40,596	246,76	R (15) или	R (15)
$v=3$			
29,786	335,73		R (22)
23,436	426,69		

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход $D^{79}Br$ $D^{81}Br$	
(3в) DBr-лазер			
Полоса 2—1			
5,8049	1722,67	P (8)	—
Полоса 3—2			
5,8070	1706,91	P (5)	—
5,8026	1706,43	—	P (5)
5,8088	1696,98	P (6)	—
5,8944	1696,52	—	P (6)
5,9240	1687,95	P (7)	—
5,9261	1687,45	—	P (7)
5,9573	1678,60	P (8)	—
5,9590	1678,13	—	P (8)
Полоса 4—3			
6,0209	1660,88	P (5)	—
6,0225	1660,45	—	P (5)
6,0529	1652,10	P (6)	—
6,0544	1651,69	—	P (6)
6,0856	1643,16	P (7)	—
6,0873	1642,70	—	P (7)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход $D^{79}Br$ $D^{79}Br$	
6,1200	1634,00	P (8)	—
6,1216	1633,57	—	P (8)
6,1546	1624,60	P (9)	—
6,1562	1624,39	—	P (9)
6,1903	1615,42	P (10)	—
6,1918	1615,03	—	P (10)
6,2272	1605,85	P (11)	—
6,2289	1605,43	—	P (11)

Полоса 5 – 4

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход $D^{79}Br$ $D^{79}Br$	
6,2237	1608,75	—	P (6)
6,2566	1598,32	P (7)	—
6,2581	1597,93	—	P (7)
6,2916	1589,41	P (8)	—
6,2932	1589,01	—	P (8)
6,3279	1580,31	P (9)	—
6,3294	1579,92	—	P (9)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход $D^{35}Cl$ $H^{35}Cl$	
(4а) HCl-лазер			
Полоса 2—1			
3,7071	2697,52	P (4)	—
3,7363	2675,01	P (5)	—
3,7408	2673,23	—	P (5)
3,7710	2651,82	P (6)	—
3,7756	2650,08	—	P (6)
3,8050	2628,13	P (7)	—
3,8074	2626,45	—	P (7)
3,8401	2604,09	P (8)	—
3,8425	2602,48	—	P (8)
3,8768	2579,42	P (9)	—
3,9149	2554,34	P (10)	—
Полоса 3 – 2			
3,8549	2593,79	P (4)	—
3,8840	2574,70	P (5)	—
3,9181	2552,26	P (6)	—
3,9205	2550,70	—	P (6)
3,9536	2529,31	P (7)	—
3,9560	2527,79	—	P (7)
3,9900	2505,68	P (8)	—
4,0295	2481,09	P (9)	—
(4б) Чисто вращательные переходы			
$v = 0$			
13,6720	720,921	R (40)	—
14,0094	709,279	R (39)	—
14,3434	697,232	R (38)	—
16,2125	616,809	R (32)	—
16,6085	602,114	R (31)	—
16,664	600,10	—	R (31)
17,0340	587,070	R (30)	—
17,4923	571,686	R (29)	—
17,9874	555,969	R (28)	—
17,997	555,66	—	R (28)
18,522	539,928	R (27)	—

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход $H^{35}Cl$ $H^{35}Cl$	
19,122	522,96	—	R (26)
20,4106	489,049	R (24)	—
21,1566	472,701	R (23)	—
21,9706	456,175	R (22)	—
22,8637	437,380	R (21)	—
23,8485	419,326	R (20)	—
24,9367	401,023	R (19)	—
26,1462	382,483	R (18)	—
27,508	363,53	R (17)	—
$v = 1$			
16,765	596,48	—	R (32)
17,126	583,94	R (31)	—
17,575	568,99	R (30)	—
18,036	554,46	R (29)	—
18,555	538,94	R (28)	—
18,093	537,84	—	R (28)
19,145	522,37	—	R (27)
19,7002	507,628	R (26)	—
20,3456	491,526	R (25)	—
21,0470	475,130	R (24)	—
21,8127	458,449	R (23)	—
22,6614	441,401	R (22)	—
23,6705	424,268	R (21)	—
24,6177	406,215	—	R (20)
24,5433	406,789	R (20)	—
25,7040	389,065	R (19)	
$v = 2$			
19,187	521,29	R (26)	—
20,9991	476,215	R (25)	—
24,3178	411,239	R (21)	—
$v = 3$			
19,783	506,48	R (26)?	
19,821	504,52		

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход $D^{35}Cl$ $D^{35}Cl$	
(4а) DCl-лазер			
Полоса 2—1			
5,0445	1982,36	P (5)	—
5,0614	1976,65	—	P (5)
5,0743	1970,72	P (6)	—
5,0811	1968,08	—	P (6)
5,1049	1958,90	P (7)	—
5,1118	1956,25	—	P (7)
5,1363	1946,94	P (8)	—

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход D^2Cl	D^2Cl
5,1431	1944,35	—	P (8)
5,1688	1934,67	P (9)	—
	Полоса 3—2		
5,1511	1941,35	P (4)	—
5,1811	1930,10	P (5)	—
5,1979	1927,56	—	P (5)
5,2118	1918,73	P (6)	—
5,2166	1916,24	—	P (6)
5,2436	1907,13	P (7)	—
5,2508	1904,67	—	P (7)
5,2760	1895,37	P (8)	—
5,2829	1892,91	—	P (8)
5,3097	1883,35	P (9)	—
5,3443	1871,15	P (10)	—
5,3759	1858,77	P (11)	—

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход D^2Cl	D^2Cl
	Полоса 4—3		
5,3244	1878,13	P (5)	—
5,3562	1867,01	P (6)	—
5,3629	1864,65	—	P (6)
5,3889	1855,66	P (7)	—
5,3906	1853,36	—	P (7)
5,4295	1841,79	—	P (8)
5,4577	1832,27	P (9)	—
5,4935	1820,34	P (10)	—
5,5304	1808,20	P (11)	—
	Полоса 5—4		
5,5084	1815,28	P (6)	—
5,5423	1804,31	P (7)	—
5,5776	1792,89	P (8)	—
5,6137	1781,36	P (9)	—

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
	(5а) HF-лазер	
	Полоса 1—0	
2,640	3788	P (4)
2,673	3741	P (5)
2,7075	3693,50	P (6)
2,7441	3644,16	P (7)
2,7826	3593,20	P (8)
2,8231	3542,20	P (9)
2,8657	3489,60	P (10)
2,9103	3436,12	P (11)
2,9573	3381,50	P (12)
3,0064	3326,21	P (13)
3,0582	3269,90	P (14)
3,1126	3212,80	P (15)
	Полоса 2—1	
2,6902	3708,86	P (2)
2,7275	3666,38	P (3)
2,7604	3622,71	P (4)
2,7958	3577,47	P (5)
2,8318	3531,31	P (6)
2,8706	3483,63	P (7)
2,9111	3435,17	P (8)
2,9539	3385,34	P (9)
2,9989	3334,06	P (10)
3,0461	3282,66	P (11)
3,0958	3230,18	P (12)
3,1480	3176,60	P (13)
3,2029	3122,14	P (14)
3,2603	3067,22	P (15)
	Полоса 3—2	
2,8213	3544,03	P (2)
2,8540	3503,80	P (3)
2,8889	3461,34	P (4)
2,9256	3418,16	P (5)
2,9643	3373,46	P (6)
3,0061	3327,73	P (7)
3,0482	3280,64	P (8)
	(5б) Чисто вращательные переходы	
	$v = 0$	
10,1978	980,60	R (27)
10,4578	956,29	R (26)
10,7430	930,76	R (25)
11,0573	904,38	R (24)
11,4063	876,94	R (23)
11,7854	848,50	R (22)
12,2092	819,12	R (21)
12,6781	788,76	R (20)
13,2009	757,52	R (19)
13,7841	725,47	R (18)
14,4406	692,49	R (17)
16,0915	624,16	R (15)
16,975	589,10	R (14)
18,085	552,94	R (13)
	$v = 1$	
12,2619	815,53	R (22)
12,7006	787,37	R (21)
13,1677	758,28	R (20)
13,7277	728,45	R (19)
15,0168	665,94	R (17)
16,655	600,42	R (16)
17,645	566,73	R (15)
18,8010	531,89	R (13)
20,1357	496,68	R (12)
21,6886	460,86	R (11)
	$v = 2$	
10,3819	946,01	R (29)
10,8117	924,93	R (28)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
13,2211	756,37	R (21)
14,2891	699,88	R (19)
16,444	608,12	R (16)
17,307	577,13	R (15)
20,9609	477,57	R (12)
	$v = 3$	
11,5408	866,49	R (27)
17,096	584,97	R (16)
19,1129	523,21	R (14)
20,3513	491,37	R (13)
21,7885	458,96	R (12)

(6я) DF-лазер

Полосы 1—0

3,9295	2611,10	P (12)
3,9672	2527,06	P (15)
4,0032	2498,02	P (16)

Полосы 2—1

3,6363	2750,05	P (3)
3,6665	2727,38	P (4)
3,6981	2709,98	P (5)
3,7310	2680,28	P (6)
3,7651	2656,97	P (7)
3,8007	2631,09	P (8)
3,8375	2605,87	P (9)
3,8757	2580,16	P (10)
3,9155	2553,97	P (11)
3,9565	2527,47	P (12)
3,9995	2500,32	P (13)
4,1309	2417,97	P (16)
4,1862	2388,79	P (17)

Полосы 3—2

3,7563	2602,17	P (3)
3,7876	2640,41	P (4)
3,8200	2617,41	P (5)
3,8547	2594,23	P (6)
3,8903	2570,51	P (7)
3,9272	2546,37	P (8)
3,9654	2521,81	P (9)
4,0054	2496,61	P (10)
4,0461	2471,34	P (11)
4,0895	2445,29	P (12)
4,1738	2397,46	P (14)

Полосы 4—3

3,9487	2532,50	P (5)
3,9843	2509,86	P (6)
4,0212	2486,83	P (7)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
(6я) Лазеры на H_2, HD и D_2		
H_2, переходы в системе $2s\sigma^1\Sigma_g^+ - 2p\sigma^1\Sigma_u^+$		
0,835190	11973,32	(2—1) P (2)
0,887866	11262,93	(1—0) P (4)
0,890128	11234,34	(1—0) P (2)
1,110320	8056,40	(0—0) P (4)
1,122507	8909,63	(0—0) P (2)
1,30613	7656,2	(0—1) P (4)
1,31658	7595,4	(0—1) P (2)
HD, переходы в системе $2s\sigma^1\Sigma_g^+ - 2p\sigma^1\Sigma_u^+$		
Полосы 1—0		
0,9163	10914	
D_2, переходы в системе $2s\sigma^1\Sigma_g^+ - 2p\sigma^1\Sigma_u^+$		
0,827980	12077,58	(2—0) P (3)
0,953261	10490,31	(1—0) P (3)
(6б) Лазеры на H_2, параводороде, HD и D_2		
H_2, переходы в системе $B^1\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_g^+$		
0,152925	65649,0	(2—8) P (3)
0,156725	63806,1	(8—14) P (3)
0,157199	63613,8	(2—9) P (1)
0,157730	63395,9	(2—9) P (3)
0,157919	63323,8	(7—13) P (1)
0,157998	63291,96	(7—13) P (2)
0,158074	63261,4	(7—13) P (3)
0,159131	62841,2	(3—10) P (1)
0,159340	62758,9	(3—10) P (2)
0,159606	62654,2	(3—10) P (3)
0,160448	62325,3	(4—11) P (1)
0,160623	62257,4	(4—11) P (2)
0,160760	62208,3	(6—13) P (1)
0,160889	62173,8	(4—11) P (3)
0,160902	62149,4	(6—13) P (3)
0,161033	62099,2	(5—12) P (1)
0,161165	62048,1	(5—12) P (2)
0,161316	61989,2	(5—12) P (3)
Параводород, переходы в системе $B^1\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_g^+$		
0,151964	65792,0	(2—8) P (2)
0,156752	63794,8	(8—14) P (2)
0,157434	63516,8	(2—9) P (2)
0,157771	63383,0	(7—13) R (0)
0,157996	63292,0	(7—13) P (2)
0,158110	63247,0	(2—9) P (4)
0,158140	63235,3	(7—13) P (4)
0,158899	62933,0	(3—10) R (0)
0,159340	62758,9	(3—10) P (2)
0,159925	62531,4	(3—10) P (4)
0,160236	62406,0	(4—11) R (0)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
0,160594	62269,0	(6—13) R (0)
0,160623	62257,4	(4—11) P (2)
0,160629	62177,7	(6—13) P (2)
0,160961	62126,7	(6—13) P (4)
0,161033	62099,2	(6—12) P (1)
0,161091	62076,7	(4—11) P (4)
0,161165	62048,1	(5—12) P (2)
0,161318	61989,2	(5—12) P (3)
0,161485	61926,1	(5—12) P (4)

HD, переходы в системе $B^1\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_g^+$

0,157742	63396	(9—16) P (2), P (3)
0,159524	62686	(4—12) P (2)
0,159713	62612	(4—12) P (3)
0,160365	62358	(5—13) P (1)
0,160496	62307	(5—13) P (2)
0,160569	62278	(7—15) P (1)
0,160630	62254	(7—15) P (2)
0,160646	62248	(5—13) P (3)
0,160692	62231	(7—15) P (3)
0,160747	62209	(7—15) P (4)
0,160794	62191	(6—14) P (1)
0,160827	62179	(5—13) P (4)
0,160893	62153	(6—14) P (2)
0,161005	62110	(6—14) P (3)
0,161131	62061	(6—14) P (4)

D_2, переходы в системе $B^1\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_g^+$

0,158675	63021	(10—19) P (2)
0,158894	62914	(10—19) P (3)
0,158714	63004	(10—19) P (4)
0,159130	62841	(9—18) P (2)
0,159257	62792	(9—18) P (4)
0,160086	62466	(5—15) P (2)
0,160354	62360	(5—15) P (4)
0,160848	62170	(6—16) P (2)
0,161080	62080	(6—16) P (4)
0,161198	62035	(8—18) P (2)
0,161236	62020	(7—17) P (2)
0,161251	62014	(8—18) P (3)
0,161320	61990	(6—16) P (4)
0,161412	61951	(7—17) P (4)

(6a) H_2-лазер, переходы в системе $(B^1\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_g^+)$

0,159074	62882	(7—13) P (3)
0,159606	62664	(3—10) P (3)
0,160044	62493	—
0,160148	62326	(4—11) P (1)
0,160750	62205	(6—13) P (1)
0,160899	62174	(4—11) P (3)
0,160902	62150	(6—13) P (3)
0,161033	62099	(5—12) P (1)
0,161165	62045	(5—12) P (2)
0,161318	61989	(5—12) P (3)

(7) NO-лазер, переходы в основных электронных состояниях $^2\Pi_{1/2}$ и $^2\Pi_{3/2}$

Полоса 6—5

5,8162	1710,52	$^2\pi_{3/2}$ P (7)
5,8549	1707,98	$^2\pi_{3/2}$ P (8)
5,8584	1706,95	$^2\pi_{3/2}$ P (8)
5,8706	1703,41	$^2\pi_{3/2}$ P (9)
5,8789	1700,99	$^2\pi_{1/2}$ P (10)
5,9096	1693,88	$^2\pi_{1/2}$ P (12)
5,9083	1692,53	$^2\pi_{1/2}$ P (12)
5,9660	1679,3	$^2\pi_{1/2}$ P (16)

Полоса 7—6

5,9423	1682,84	$^2\pi_{3/2}$ P (7)
5,9546	1679,37	$^2\pi_{3/2}$ P (8)
5,9632	1676,96	$^2\pi_{1/2}$ P (9)
5,9673	1675,81	$^2\pi_{3/2}$ P (9)
5,9756	1673,46	$^2\pi_{1/2}$ P (10)
5,9799	1672,27	$^2\pi_{3/2}$ P (10)
5,9892	1669,96	$^2\pi_{1/2}$ P (11)
5,9931	1669,69	$^2\pi_{3/2}$ P (11)
6,0010	1666,39	$^2\pi_{1/2}$ P (12)
6,0051	1665,18	$^2\pi_{3/2}$ P (12)
6,0192	1661,36	$^2\pi_{3/2}$ P (13)
6,0267	1659,29	$^2\pi_{3/2}$ P (14)
6,0324	1657,71	$^2\pi_{3/2}$ P (14)
6,0402	1655,58	$^2\pi_{1/2}$ P (15)

Полоса 8—7

6,0386	1656,0	$^2\pi_{1/2}$ P (7)
6,0419	1655,12	$^2\pi_{3/2}$ P (7)
6,0543	1651,72	$^2\pi_{3/2}$ P (8)
6,0628	1649,40	$^2\pi_{3/2}$ P (9)
6,0673	1648,19	$^2\pi_{1/2}$ P (9)
6,0801	1644,71	$^2\pi_{1/2}$ P (10)
6,0884	1642,47	$^2\pi_{1/2}$ P (11)
6,0934	1641,13	$^2\pi_{3/2}$ P (11)
6,1015	1638,95	$^2\pi_{3/2}$ P (12)
6,1204	1633,87	$^2\pi_{3/2}$ P (13)
6,1417	1628,22	$^2\pi_{1/2}$ P (15)
6,1540	1624,8	$^2\pi_{1/2}$ P (16)
6,1973	1613,6	$^2\pi_{1/2}$ P (19)

Полоса 9—8

6,1538	1625,02	$^2\pi_{3/2}$ P (8)
6,1576	1624,00	$^2\pi_{3/2}$ P (8)
6,1663	1621,72	$^2\pi_{3/2}$ P (9)
6,1792	1618,34	$^2\pi_{1/2}$ P (10)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
6,1838	1617,12	$^2\pi_{1/2}P$ (10)
6,1921	1614,95	$^2\pi_{1/2}P$ (11)
6,1972	1613,63	$^2\pi_{3/2}P$ (11)
6,2055	1611,48	$^2\pi_{1/2}P$ (12)
6,2110	1610,06	$^2\pi_{3/2}P$ (12)
6,2191	1607,94	$^2\pi_{1/2}P$ (13)
6,2249	1606,46	$^2\pi_{3/2}P$ (13)
	Полоса 10—9	
6,2381	1603,06	$^2\pi_{1/2}P$ (6)
6,2511	1599,71	$^2\pi_{3/2}P$ (7)
6,2602	1597,39	$^2\pi_{1/2}P$ (8)
6,2645	1596,30	$^2\pi_{3/2}P$ (8)
6,2778	1592,91	$^2\pi_{3/2}P$ (9)
6,2865	1590,71	$^2\pi_{1/2}P$ (10)
6,2913	1589,50	$^2\pi_{3/2}P$ (10)
6,2998	1587,36	$^2\pi_{3/2}P$ (11)
6,3051	1586,02	$^2\pi_{1/2}P$ (11)
6,3138	1583,86	$^2\pi_{1/2}P$ (12)
6,3191	1582,60	$^2\pi_{3/2}P$ (12)
6,3274	1580,43	$^2\pi_{1/2}P$ (13)
6,3336	1578,89	$^2\pi_{3/2}P$ (13)
	Полоса 11—10	
6,3764	1568,20	$^2\pi_{3/2}P$ (8)
6,3894	1565,09	$^2\pi_{3/2}P$ (9)
6,3980	1562,99	$^2\pi_{1/2}P$ (10)
6,4061	1561,74	$^2\pi_{3/2}P$ (10)
6,4202	1558,14	$^2\pi_{1/2}P$ (12)
6,4321	1554,71	$^2\pi_{3/2}P$ (12)

(8а) N_2-лазер, переходы во второй положительной системе $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$

	Полоса 0—0	
0,337141	29 681,22	—
0,337178	29 657,92	—
0,337211	29 655,03	—
0,337240	29 652,46	—
	Полоса 0—1	
0,357001	27 969,42	—
0,357713	27 955,34	—

(6б) Переходы в первой положительной системе $(B^3\Pi_g \to A^3\Sigma_u^+)$*

	Полоса 4—2	
0,748460	13 360,41	Q_1 (11)
0,748948	13 352,07	Q_1 (9)
0,749169	13 347,75	$^PQ_{23}$ (7)
0,749377	13 344,42	Q_1 (7)
0,749775	13 337,34	Q_1 (5)
0,750363	13 326,88	P_1 (11)
	Полоса 3—1	
0,757434	13 202,47	—
0,758313	13 187,16	Q_2 (13)
0,758632	13 181,62	Q_1 (11)
0,758855	13 177,76	Q_2 (9)
0,759190	13 171,76	—
0,759524	13 166,14	Q_1 (15)
0,760079	13 156,52	Q_1 (13)
0,760508	13 147,37	Q_1 (11)
0,761091	13 139,03	Q_1 (9)
0,761195	13 137,24	$^PQ_{23}$ (5)
0,761535	13 131,37	Q_1 (7)
0,761946	13 124,29	Q_1 (5)
0,762506	13 114,65	$^PQ_{12}$ (11)
0,762631	13 112,50	$^PQ_{12}$ (9)
0,762721	13 110,96	$^PQ_{12}$ (7)
	Полоса 2—0	
0,771418	12 963,14	Q_2 (9)
0,774002	12 909,86	Q_1 (5)
0,775483	12 891,87	$^PR_{12}$ (1)
	Полоса 2—1	
0,855569	11 553,10	R_2 (7)
0,865730	11 550,95	Q_2 (15)
0,866327	11 542,58	Q_2 (13)
0,866404	11 540,76	Q_2 (15)
0,866583	11 539,57	Q_1 (12)
0,866810	11 536,55	Q_2 (11)
0,867000	11 534,0	Q_1 (10)
0,867161	11 531,88	Q_2 (9)
0,867197	11 531,41	Q_2 (13)
0,867371	11 529,09	Q_2 (7)
0,867793	11 523,48	Q_2 (11)
0,868520	11 513,84	R_1 (7)
0,868613	11 512,61	Q_2 (13)
0,869001	11 507,46	Q_1 (12)
0,869375	11 502,52	Q_1 (11)
0,869729	11 497,84	Q_1 (10)
0,870067	11 493,37	Q_1 (9)
0,870087	11 490,20	$^PQ_{21}$ (5)
0,870368	11 489,13	Q_1 (8)
0,870294	11 487,73	$^PQ_{21}$ (7)
0,870370	11 486,73	$^PQ_{23}$ (11)
0,870696	11 485,06	Q_1 (7)

* Переходы обозначены по K_a и не по J. Верхние знаки Q, P, R обозначают соответственно $\Delta K = -2, -1, +1$. В остальных случаях $\Delta K = 0$. Нижние цифры указывают уровни.

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
0,870966	11 481,24	Q_1 (6)
0,871267	11 477,54	Q_1 (5)
0,871533	11 474,03	Q_1 (4)
0,871690	11 471,97	P_1 (13)
0,871792	11 470,63	Q_1 (3)
0,871884	11 469,41	$^PQ_{21}$ (11)
0,871977	11 468,19	P_1 (11)
0,872106	11 466,50	$^PQ_{12}$ (9)
0,872193	11 465,35	P_1 (9)
0,872286	11 464,40	$^PQ_{12}$ (7)
0,872574	11 462,97	$^PQ_{12}$ (5)
0,872460	11 461,84	$^PQ_{12}$ (3)
	Полоса 1—0	
0,883020	11 317,08	—
0,884372	11 307,46	Q_2 (15)
0,884662	11 303,75	—
0,885001	11 299,42	Q_2 (13)
0,885163	11 297,36	Q_2 (15)
0,885269	11 296,00	Q_2 (12)
0,885504	11 293,01	Q_2 (11)
0,885704	11 290,46	Q_2 (10)
0,885872	11 288,31	Q_2 (9)
0,885893	11 288,04	Q_2 (13)
0,885998	11 286,71	Q_2 (8)
0,886090	11 285,53	Q_2 (7)
0,886006	11 285,50	Q_2 (5), R_1 (9)
0,886397	11 281,65	$^RQ_{21}$ (5)
0,886500	11 280,32	Q_1 (15)
0,886522	11 280,04	Q_2 (11)
0,886641	11 274,71	Q_1 (14)
0,887043	11 273,41	Q_2 (9)
0,887300	11 269,32	Q_1 (13)
0,887775	11 261,12	Q_1 (12)
0,888109	11 259,21	Q_1 (11)
0,888532	11 254,52	Q_1 (10)
0,888684	11 250,06	Q_1 (9)
0,889150	11 246,69	$^PQ_{23}$ (5)
0,889219	11 245,82	Q_1 (8)
0,889538	11 244,06	$^PQ_{23}$ (7)
0,889460	11 242,78	$^PQ_{23}$ (9)
0,889539	11 241,76	Q_1 (7)
0,889646	11 237,90	Q_1 (6)
0,890137	11 234,23	Q_1 (5)
0,890420	11 230,66	Q_1 (4)
0,890617	11 228,17	P_1 (13)
0,890686	11 227,28	Q_1 (3)
0,890811	11 225,72	$^PQ_{21}$ (11)
0,890911	11 224,47	P_1 (11)
0,891036	11 222,87	$^PQ_{12}$ (9)
0,891135	11 221,65	P_1 (9)
0,891199	11 220,84	$^PQ_{12}$ (7)
0,891306	11 219,47	$^PQ_{12}$ (5), P_1 (7)
0,891373	11 218,66	$^PQ_{12}$ (3)
	Полоса 0—0	
1,043874	9579,70	Q_1 (15)
1,044548	9573,52	Q_1 (14)
1,045189	9567,68	Q_1 (13)
1,045806	9562,00	Q_1 (12)
1,046404	9556,54	Q_1 (11)
1,046956	9551,55	Q_1 (10)
1,047482	9546,70	Q_1 (9)
1,047979	9542,18	Q_1 (8)
1,048249	9539,72	$^PQ_{21}$ (7)
1,048464	9537,79	Q_1 (7)
1,048922	9533,60	Q_1 (6)
1,049348	9529,73	Q_1 (5)
1,049786	9527,93	Q_1 (4)
1,050161	9522,35	Q_1 (3)
1,050519	9519,10	$^PQ_{12}$ (9)
1,050900	9516,56	$^PQ_{12}$ (7)
1,051005	9514,70	$^PQ_{12}$ (5)
1,051118	9513,68	$^PQ_{12}$ (3)
1,052548	9500,75	$^QQ_{12}$ (3)
1,052511	9497,46	$^QP_{12}$ (5)
1,053382	9493,23	$^QP_{12}$ (7)
1,053700	9489,83	$^QP_{12}$ (9)
	Полоса 0—1	
1,230698	8126,13	Q_1 (11)
1,231430	8120,64	Q_1 (10)
1,232219	8115,44	Q_1 (9)
1,232962	8110,55	Q_1 (8)
1,233671	8105,89	Q_1 (7)
1,234382	8101,55	Q_1 (6)
1,234969	8097,37	Q_1 (5)

(8n) Переходы в системе $a^1\Pi_g$ — $a'^1\Sigma_u^-$

	Полоса 2—1	
3,29403	3036,24	Q (14)
3,30140	3028,96	Q (12)
3,30734	3023,56	Q (10)
3,30880	3021,25	Q (9)
3,31221	3019,13	Q (8)
3,31476	3017,27	Q (7)
3,31607	3015,62	Q (6)
3,31760	3014,23	Q (5)
3,31889	3013,03	Q (4)
3,32009	3011,43	Q (2)
	Полоса 1—0	
3,40184	2897,01	Q (12)
3,45832	2891,56	Q (10)
3,46114	2889,22	Q (9)
3,46368	2887,10	Q (8)
3,46596	2885,20	Q (7)
3,46796	2883,55	Q (6)
3,46967	2882,12	Q (5)
3,47100	2880,94	Q (4)
	Полоса 0—0	
8,1463	1227,25	Q (10)
8,1827	1222,09	Q (8)
8,2102	1217,99	Q (6)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
(8г) Переходы в системе $w^1\Delta_u - a^1\Pi_g$		
Полосы 0—0		
3,09349	2789,707	R (4)
3,62614	2757,752	R (3)
3,02910	2755,505	R (2)
3,64913	2744,891	Q (4)
3,66472	2743,697	Q (5)
3,64602	2742,259	Q (6)
3,66683	2740,605	Q (7)
3,65138	2739,693	Q (8)
3,65424	2736,550	Q (9)
3,66746	2734,148	Q (10)
3,66095	2731,530	Q (11)
3,66483	2728,637	Q (12)
3,66829	2725,549	Q (13)
3,67352	2722,186	Q (14)
3,67634	2718,616	Q (15)

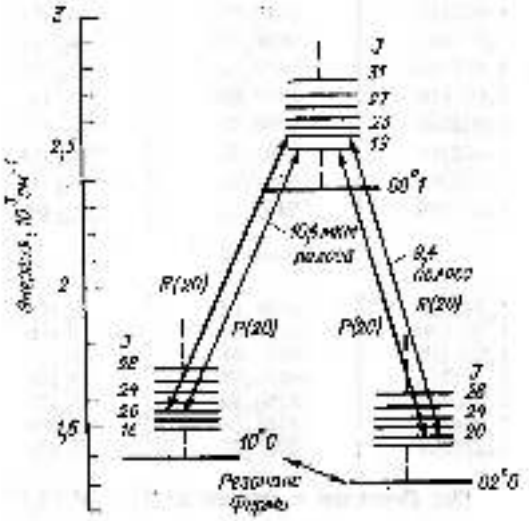


Рис. 33.33. Схема лазерных переходов для полос $(00^01) - (10^00)$ и $(00^01) - (02^00)$ молекулы CO_2 (включая вращательные уровни энергии) [5].

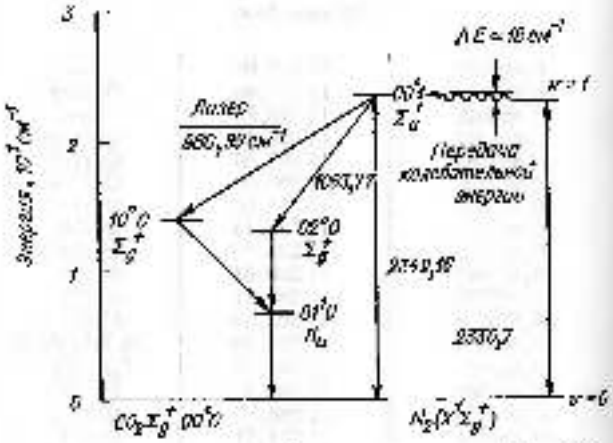


Рис. 33.34. Схема уровней энергии молекул N_2 и CO_2 по отношению к основным состояниям N_2 $(X^1\Sigma_g^+,\ v = 0)$ и CO_2 (00^00). Молекулы CO_2 селективно возбуждаются в состояние (00^01) при передаче колебательной энергии от молекул N_2^* $(v = 1)$ [5].

Лазерные переходы в трехатомных молекулярных газах [4] Таблица 33.5

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход	$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
CO_2-лазер (рис. 33.33 и 33.34)			**(1б) *Полосы $(00^01) - (02^00)$, R-ветви***		
(1а) *Полосы $(10^02) - (10^01)$*					
4,3903	2314,66	R (17)	9,120966	1096,6063	R (52)
4,3249	2312,18	R (15)	9,134184	1094,7885	R (50)
4,3276	2310,73	R (11)	9,141719	1093,8902	R (48)
4,3049	2296,25	P (7)	9,149471	1092,9603	R (46)
4,3580	2294,69	P (9)	9,157446	1092,0076	R (44)
4,3612	2292,94	P (11)	9,165645	1091,0307	R (42)
4,3624	2291,25	P (13)	9,174070	1090,0287	R (40)
4,3677	2289,51	P (15)	9,182725	1089,0004	R (38)
4,3711	2287,76	P (17)	9,191612	1087,9455	R (36)
4,3745	2286,00	P (19)	9,200733	1086,8609	R (34)
4,3779	2284,20	P (21)	9,210092	1085,7655	R (32)
4,3814	2282,39	P (23)	9,219690	1084,6352	R (30)
4,3848	2280,53	P (25)	9,229530	1083,4786	R (28)
			9,239615	1082,2962	R (26)
			9,249946	1081,0874	R (24)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
9,260526	1079,8522	R (22)
9,271356	1078,5906	R (20)
9,282444	1077,3025	R (18)
9,293786	1075,9878	R (16)
9,305386	1074,6465	R (14)
9,317246	1073,2785	R (12)
9,329371	1071,8837	R (10)
9,341758	1070,4623	R (8)
9,354414	1069,0141	R (6)
9,367330	1067,5391	R (4)

(1в) *Полоса* (00^01) — (02^00), P-*ветвь*

9,429986	1060,5706	P (4)
9,443328	1058,9487	P (6)
9,456852	1057,3062	P (8)
9,470570	1055,6251	P (10)
9,484355	1053,9235	P (12)
9,503997	1052,1956	P (14)
9,519808	1050,4413	P (16)
9,535972	1048,6606	P (18)
9,552428	1046,8542	P (20)
9,569179	1046,0217	P (22)
9,586227	1043,1633	P (24)
9,603573	1041,2791	P (26)
9,621219	1039,3695	P (28)
9,639166	1037,4341	P (30)
9,657416	1035,4730	P (32)
9,675971	1033,4861	P (34)
9,694831	1031,4775	P (36)
9,713998	1029,4423	P (38)
9,733471	1027,3824	P (40)
9,753259	1025,2983	P (42)
9,773356	1023,1900	P (44)
9,793764	1021,0578	P (46)
9,814487	1018,9020	P (48)
9,835523	1016,7227	P (50)
9,856876	1014,5202	P (52)
9,878544	1012,2949	P (54)
9,900531	1010,0469	P (56)
9,922835	1007,7765	P (58)
9,945458	1005,4841	P (60)

(1г) *Полоса* (00^01) — (02^00), R-*ветвь*

10,057896	994,2438	R (54)
10,068650	993,3792	R (52)
10,075696	992,4870	R (50)
10,085041	991,5676	R (48)
10,094670	990,6211	R (46)
10,104605	989,6478	R (44)
10,114837	988,6477	R (42)
10,125340	987,6211	R (40)
10,136146	986,5682	R (38)
10,147246	985,4891	R (36)
10,158637	984,3840	R (34)
10,170323	983,2530	R (32)
10,182301	982,0962	R (30)
10,194574	980,9139	R (28)
10,207142	979,7061	R (26)
10,220006	978,4730	R (24)
10,233167	977,2146	R (22)
10,246625	975,9311	R (20)
10,260381	974,6226	R (18)
10,274439	973,2892	R (16)
10,288797	971,9309	R (14)
10,303458	970,5479	R (12)
10,318424	969,1402	R (10)
10,333696	967,7079	R (8)
10,349277	966,2510	R (6)
10,365168	964,7697	R (4)

(1д) *Полоса* (00^01) — (10^00), P-*ветвь*

10,440579	957,6012	P (4)
10,458220	956,1857	P (6)
10,476187	954,5456	P (8)
10,494484	952,8810	P (10)
10,513114	951,1930	P (12)
10,532080	949,4800	P (14)
10,551387	947,7427	P (16)
10,571037	945,9810	P (18)
10,591035	944,1948	P (20)
10,611395	942,3841	P (22)
10,632090	940,5486	P (24)
10,653156	938,6890	P (26)
10,674586	936,8045	P (28)
10,696386	934,8962	P (30)
10,718560	932,9641	P (32)
10,741113	931,0022	P (34)
10,764059	929,0182	P (36)
10,787380	927,0091	P (38)
10,811106	924,9749	P (40)
10,835231	922,9153	P (42)
10,859765	920,8302	P (44)
10,884713	918,7197	P (46)
10,910082	916,5834	P (48)
10,935879	914,4212	P (50)
10,962110	912,2331	P (52)
10,988789	910,0188	P (54)
11,015906	907,7783	P (56)

(1е) *Полоса* (01^11) — (11^10)

10,9730	911,35	P (19)
10,9956	910,28	P (20)
10,9944	909,55	P (21)
11,0078	908,46	P (22)
11,0164	907,74	P (23)
11,0300	906,62	P (24)
11,0385	905,92	P (25)
11,0529	904,74	P (26)
11,0610	904,08	P (27)
11,0762	902,84	P (28)
11,0840	902,20	P (29)
11,0999	900,91	P (30)
11,1073	900,31	P (31)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
11,1235	898,97	P (32)
11,1309	898,40	P (33)
11,1483	897,00	P (34)

(1г) Полоса $(01^01)-(0540)$

10,9735	911,29	P (19)
10,9901	909,50	P (21)
11,0065	907,73	P (23)
11,0300	906,02	P (24)
11,0385	905,99	P (25)
11,0545	904,69	P (26)
11,0610	904,08	P (27)
11,0765	902,85	P (28)
11,0850	902,12	P (29)
11,1000	900,90	P (30)
11,1070	900,33	P (31)
11,1235	899,00	P (32)
11,1315	898,35	P (33)
11,1485	896,96	P (34)
11,1555	896,42	P (35)
11,1735	894,97	P (36)
11,1791	894,53	P (37)
11,1980	893,02	P (38)
11,2035	892,58	P (39)
11,2225	890,99	P (40)
11,2295	890,51	P (41)
11,2495	888,93	P (42)
11,2545	888,53	P (43)
11,2770	886,76	P (44)
11,2804	886,49	P (45)

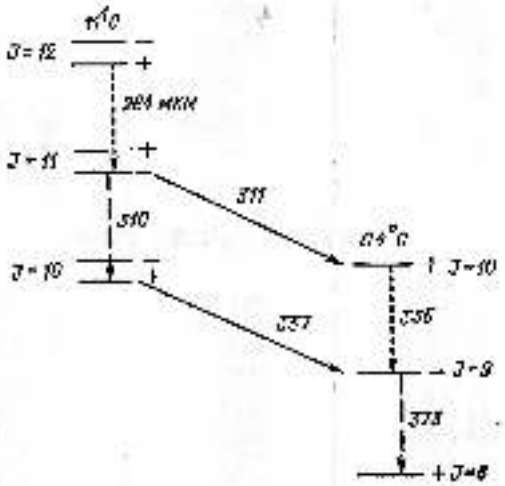


Рис. 33.35. Часть энергетических уровней молекулы HCN и соответствующие лазерные переходы в дальней инфракрасной области спектра [5].

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
(1а) $C^{13}O_2$-лазер		
Полоса $(00^01)-(10^00)$		
9,341	1070,6	P (18)
9,355	1069,0	P (20)
9,369	1067,4	P (22)
9,383	1065,8	P (24)
9,397	1064,2	P (26)
(2) CS_2-лазер		
Полоса $(02^01)-(12^00)$		
11,4823	870,90	P (28)
11,4895	870,38	P (30)
11,5002	869,85	P (32)
11,5081	869,39	P (34)
11,5159	868,82	P (36)
11,5166	868,31	P (38)
11,5237	867,80	P (40)
11,5307	867,27	P (42)
11,5376	866,73	P (44)
11,5446	866,20	P (46)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход: колебательный	Переход: вращательный
(3а) HCN-лазер (рис. 33.35)			
12,85	778,2	—	—
71,899	139,094	—	—
73,101	136,796	—	—
76,093	131,418	—	—
77,001	129,868	—	—
81,564	122,618	—	—
96,401	103,733	—	—
98,693	101,325	—	—
101,257	98,759	—	—
112,066	89,235	—	—
116,132	86,109	—	—
126,164	79,252	$(12^00)-(03^00)$	R (26)
128,629	77,743	$(12^00)-(05^10)$	R (25)
130,898	76,430	$(12^00)-(03^00)$	R (23)
134,932	74,111	$(12^00)-(05^10)$	R (24)
201,059	49,757	—	—
241,001	47,393	—	—
222,949	44,853	—	—
284	35,2	$(11^10)-(11^00)$	R (11)
309,7140	32,28785	$(11^10)-(11^00)$	R (10)
310,8870	32,16003	$(11^10)-(04^00)$	R (10)
336,1931	29,6344	$(04^00)-(01^00)$	R (9)
336,5578	29,71268	$(11^10)-(04^00)$	R (9)
379,5283	26,34380	$(04^00)-(01^00)$	R (8)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход: колебательный	Переход: вращательный
538,2	18,580	—	—
545,4	18,335	—	—
676	14,79	—	—
773,5	12,928	—	—
(3б) DCN-лазер			
181,769	55,009	(22°0)—(22°0)	R (22)
189,9490	52,6467	(22°0)—(09¹°0)	R (21)
190,0080	52,6294	(22°0)—(22°0)	R (21)
194,7027	51,3664	(22°0)—(09¹°0)	R (20)
194,7644	51,3441	(00°0)—(09¹°0)	R (20)
204,3872	48,9267	(09¹°0)—(09¹°0)	R (19)
(3в) HCN-лазер			
110,240	90,711	—	—
113,311	88,253	—	—
138,768	72,063	—	—
165,150	60,551	—	—
(4л) D_2O-лазер (рис. 33.36—33.38)			
2,279	4387,60	—	—
4,77	2096,0	—	—
7,458	1340,70	(020)—(010)	4_{44}—5_{50}
7,596	1316,38	(020)—(010)	5_{50}—6_{41}
7,709	1297,19	(020)—(010)	6_{61}—7_{60}
11,88	846,3	—	—
11,96	836,1	—	—
16,989	590,80	(010)—(010)	$13_{11,2}$—$12_{10,3}$
23,13	432,3	(020)—(020)	9_{43}—8_{54}
23,395	427,99	(100)—(020)	9_{45}—8_{54}
24,966	400,54	(100)—(020)	8_{54}—7_{55}
26,660	375,09	(100)—(020)	7_{43}—6_{52}
27,9707	357,516	(001)—(020)	6_{33}—5_{50}
28,054	356,46	(020)—(020)	6_{52}—5_{50}
28,270	353,73	(100)—(020)	8_{64}—7_{43}
28,356	352,66	(020)—(020)	8_{62}—7_{52}
28,451	351,48	(100)—(020)	6_{62}—5_{51}
32,924	303,73	(020)—(020)	5_{60}—4_{61}
33,029	302,76	(100)—(020)	5_{54}—4_{51}
34,60	289,02	—	—
35,017	285,58	(100)—(100)	7_{55}—6_{52}
35,833	279,07	(100)—(020)	$12_{1,12}$—11_{63}
36,606	273,18	(010)—(010)	$13_{11,2}$—$13_{10,3}$
37,848	264,21	(100)—(020)	$12_{0,12}$—$11_{1,0}$
38,096	262,56	—	—
39,695	251,92	(001)—(020)	7_{63}—6_{61}
40,45	247,2	(100)—(020)	$13_{1,13}$—$12_{2,10}$
40,688	246,08	(020)—(020)	4_{41}—3_{50}
42,51	235,24	—	—
46,517	219,70	—	—
45,91	217,82	—	—
47,244	211,67	(020)—(020)	9_{65}—9_{64}
47,39	211,01	—	—
47,408	210,67	(001)—(020)	6_{35}—6_{33}
47,667	209,70	(020)—(020)	6_{62}—6_{53}
48,19	207,5	(100)—(020)	9_{45}—9_{44}
48,676	205,44	—	—
49,00	203,83	(100)—(020)	7_{42}—7_{43}
53,910	185,49	—	—
54,853	182,31	—	—
55,000	181,82	(020)—(020)	6_{43}—5_{42}
55,088	181,53	(020)—(020)	5_{50}—6_{41}
57,020	173,43	(100)—(020)	9_{55}—8_{54}
57,799	173,01	(020)—(020)	9_{54}—9_{45}
66,890	149,52	—	—
66,903	149,45	—	—
67,169	148,88	(020)—(020) или (100)—(020)	4_{41}—4_{50} 6_{53}—5_{50}
68,344	146,32	(020)—(020)	5_{42}—5_{32}
72,856	137,26	(100)—(020)	8_{57}—8_{46}
73,401	136,24	(100)—(100)	6_{57}—6_{56}
78,443	127,481	(100)—(020)	8_{56}—8_{55}
79,067	126,44	(020)—(020)	8_{44}—8_{50}
85,564	116,87	(100)—(020)	7_{07}—7_{01}
86,478	115,64	(100)—(100)	9_{54}—8_{45}
87,323	114,52	—	—
87,409	114,32	(100)—(020)	8_{63}—8_{62}
89,772	111,39	(100)—(020)	9_{63}—9_{60}
89,947	111,18	—	—
90,665	110,42	—	—
115,32	86,72	(020)—(020)	5_{50}—5_{36}
118,591	84,323	(001)—(020)	6_{42}—6_{31}
120,08	83,28	(001)—(001)	6_{62}—6_{53}
220,230	45,407	(100)—(020)	5_{27}—5_{30}
(4б) $H_2{}^{18}O$-лазер			
25,102	397,42	(100)—(020)	8_{45}—7_{02}
28,595	376,01	(100)—(020)	7_{45}—6_{01}
29,205	353,22	(100)—(020)	6_{63}—5_{50}
31,308	300,23	(020)—(020)	5_{10}—4_{31}
35,383	262,62	(100)—(020)	$12_{1,12}$—11_{63}
48,366	206,76	(100)—(020)	6_{57}—6_{56}
48,604	205,74	(020)—(020)	6_{01}—6_{02}
48,705	205,07	(100)—(020)	7_{64}—7_{63}
49,430	202,31	(100)—(020)	8_{45}—8_{54}
56,129	178,16	(020)—(020)	5_{10}—5_{34}
(4л) D_2O-лазер			
26,36	279,96	—	—
33,896	295,02	(100)—(020)	13_{64}—12_{66}
35,051	285,16	(100)—(020)	12_{66}—11_{60}
36,096	277,04	(100)—(020)	11_{66}—$10_{6,}$
36,324	275,30	(100)—(020)	11_{67}—10_{66}
36,526	273,78	(020)—(020)	11_{16}—10_{04}
37,788	264,63	(100)—(020)	10_{35}—9_{04}
37,960	264,13	(100)—(020)	10_{30}—9_{03}
39,53	252,97	(100)—(020)	9_{62}—8_{54}
40,904	243,94	(020)—(020)	10_{02}—9_{33}
41,79	239,26	(100)—(020)	12_{64}—11_{26}
48,60	204,92	—	—
50,71	197,20	—	—
54,73	182,72	—	—
56,830	175,96	(100)—(020)	$16_{0,16}$—$15_{3,13}$
61,189	163,45	—	—
71,944	138,99	(100)—(020)	11_{67}—11_{66}

Рис. 33.36. Схема энергетических уровней молекулы $H_2{}^{18}O$ [5]. (Показана большая часть наблюдавшихся лазерных переходов (длины волн указаны в $см^{-1}$). Уровни идентифицированы по квантовым числам K_{0+} K_{1-}. Уровни классов симметрии $++$ и $+-$ изображены сплошными, а классов $-+$ и $--$ прерывистыми линиями. Лазерные переходы с сомнительной идентификацией помечены знаком (?), переходы, для которых возможны две идентификации, — знаком (*).)

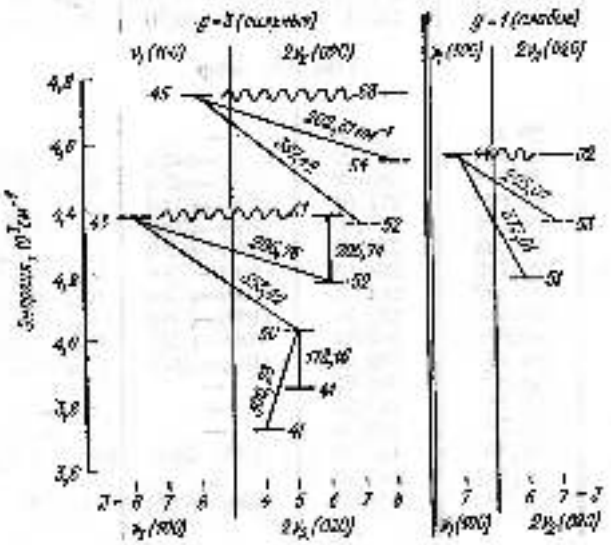


Рис. 33.37. Схема энергетических уровней молекулы $H_2{}^{18}O$ и соответствующие лазерные переходы [5]. Обозначения см. на рис. 33.36.

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход: колебательный	Переход: вращательный	$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход: колебательный	Переход: вращательный
72,427	138,07	(020)—(020)	$10_{7,4}-10_{8,5}$ или $10_{18}-10_{14}$	99,00	101,01	—	—
				103,33	96,78	—	—
				107,731	92,823	(100)—(020)	$11_{70}-11_{70}$
72,757	137,44	(020)—(020)	$11_{28}-11_{68}$	107,91	92,67	(100)—(100)	$13_{68}-13_{69}$
73,341	136,35	(100)—(020)	$12_{68}-12_{67}$	108,88	91,84	(100)—(020)	$11_{66}-11_{71}$
74,526	134,18	(100)—(020)	$13_{69}-13_{68}$	110,49	90,51	(100)—(020)	$12_{66}-12_{75}$
76,305	131,06	—	—	111,74	89,49	(100)—(020)	$13_{64}-13_{77}$
78,16	127,91	—	—	170,08	58,80	(020)—(020)	$11_{47}-11_{58}$
83,730	119,43	(020)—(020)	$10_{64}-10_{65}$	171,67	58,25	(100)—(020)	$11_{0,11}-11_{68}$
84,111	118,89	(020)—(020)	$11_{46}-11_{57}$	218,5	45,77	—	—
84,294	118,65	(100)—(020)	$12_{1,12}-11_{47}$				

(5) H_2S-лазер

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Относительная интенсивность
33,49	298,7	0,6
33,65	297,2	480
49,63	201,6	1
52,44	190,8	60
56,86	175,9	60
60,31	165,8	200
61,52	162,6	1000
73,54	136,0	0,2
80,52	124,2	220
83,45	119,8	1000
92,03	108,7	0,1
96,41	103,7	3
103,3	96,8	125
108,6	91,9	7
116,8	85,6	4
126,2	79,2	2
129,1	77,4	4
130,9	76,4	1
135,5	73,8	2
140,6	71,1	10
152,4	65,6	560
162,9	61,8	20
225,4	44,4	1000

(6а) N_2O-лазер (рис. 39.39)

Полосы $(00^01)-(10^00)$. R-ветвь

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
10,3456	966,69	R (35)
10,3532	965,88	R (34)
10,3609	965,16	R (33)
10,3687	964,44	R (32)
10,3765	963,72	R (31)
10,3843	962,99	R (30)
10,3922	962,26	R (29)
10,4004	961,53	R (28)
10,4081	960,79	R (27)
10,4161	960,05	R (26)
10,4242	959,31	R (25)
10,4323	958,56	R (24)
10,4405	957,81	R (23)
10,4487	957,06	R (22)
10,4570	956,30	R (21)
10,4653	955,54	R (20)
10,4737	954,77	R (19)
10,4821	954,01	R (18)
10,4906	953,24	R (17)
10,4991	952,46	R (16)
10,5077	951,69	R (15)
10,5163	950,91	R (14)
10,5250	950,12	R (13)
10,5337	949,33	R (12)
10,5425	948,54	R (11)
10,5513	947,75	R (10)
10,5602	946,95	R (9)
10,5692	946,15	R (8)
10,5781	945,35	R (7)
10,5872	944,54	R (6)
10,5963	943,73	R (5)
10,6054	942,91	R (4)
10,6146	942,09	R (3)
10,6239	941,27	R (2)
10,6332	940,45	R (1)
10,6426	939,62	R (0)

(6б) *Полосы $(00^01)-(10^00)$. P-ветвь*

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
10,6844	937,96	P (1)
10,6910	937,11	P (2)
10,6806	936,29	P (3)
10,6903	935,43	P (4)
10,6999	934,58	P (5)
10,7097	933,73	P (6)
10,7195	932,88	P (7)
10,7294	932,02	P (8)
10,7393	931,16	P (9)
10,7493	930,29	P (10)
10,7593	929,43	P (11)
10,7694	928,56	P (12)
10,7796	927,68	P (13)
10,7898	926,80	P (14)
10,8000	925,92	P (15)
10,8104	925,03	P (16)
10,8208	924,15	P (17)
10,8312	923,25	P (18)
10,8418	922,36	P (19)
10,8523	921,46	P (20)

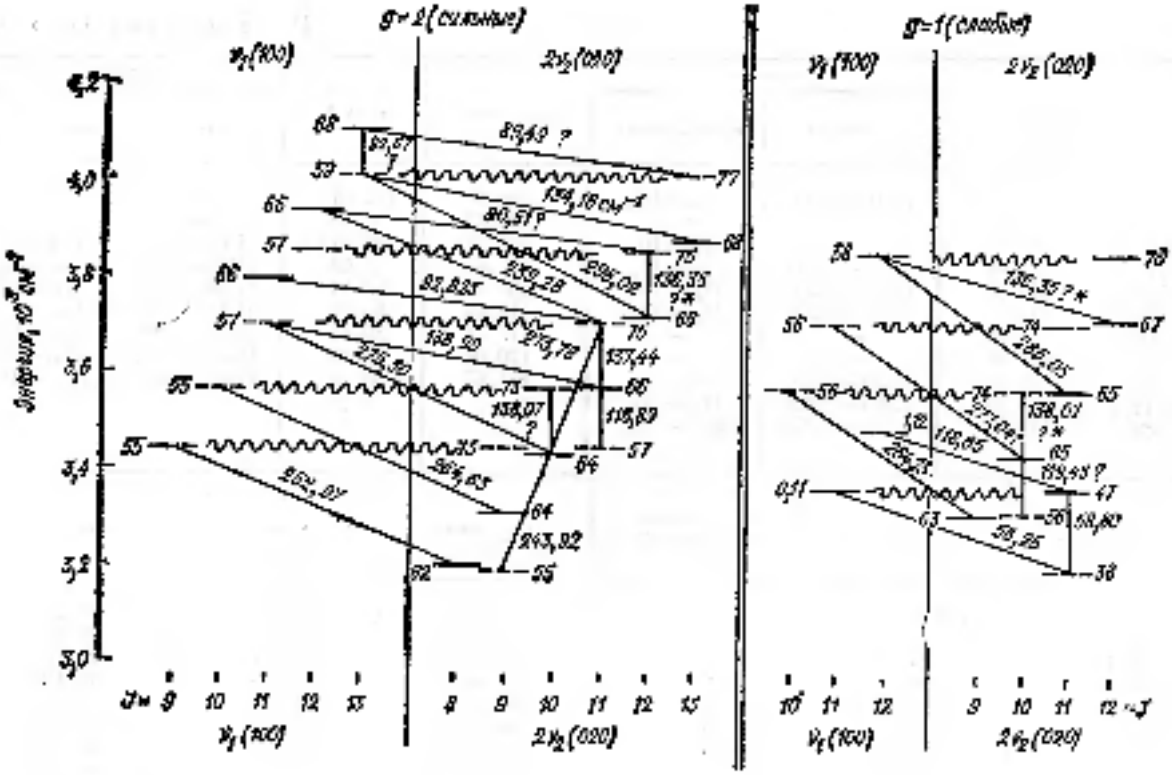


Рис. 33.38. Схема энергетических уровней молекулы $D_2{}^{18}O$ и соответствующие лазерные переходы [5]. Обозначения см. на рис. 33.36.

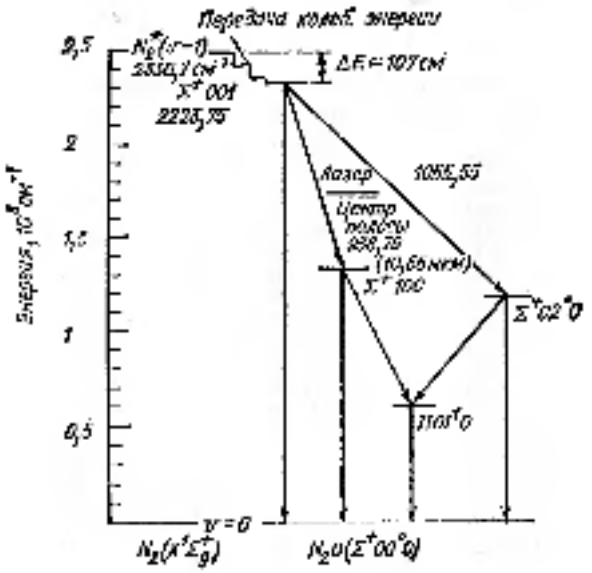


Рис. 33.39. Схема энергетических уровней молекул N_2 и N_2O [5]. Показан процесс передачи колебательной энергии от N_2 к N_2O с последующим лазерным переходом в полосе $(00^01) \rightarrow (10^00)$ N_2O. $(X^1\Sigma_g^+, v = 0)$ и $(\Sigma^1 00^00)$ — основные состояния соответственно N_2 и N_2O.

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
10,8629	920,56	P (21)
10,8735	919,65	P (22)
10,8844	918,75	P (23)
10,8952	917,83	P (24)
10,9061	916,92	P (25)
10,9170	916,00	P (26)
10,9283	915,08	P (27)
10,9390	914,16	P (28)
10,9501	913,23	P (29)
10,9613	912,29	P (30)
10,9726	911,36	P (31)
10,9839	910,42	P (32)
10,9953	909,48	P (33)
11,0067	908,53	P (34)
11,0182	907,58	P (35)
11,0298	906,63	P (36)
11,0415	905,68	P (37)
(7а) OCS-лазер *Полоса* $(05^01) - (16^00)$		
8,2368	1213,76	R (26)
8,2416	1213,35	R (25)
8,2439	1213,02	R (24)
8,2518	1211,86	R (21)
8,2543	1211,46	R (20)
8,2571	1211,08	R (19)
8,2595	1210,73	R (18)
8,2621	1210,32	R (17)
8,2645	1209,99	R (16)
8,2673	1209,59	R (15)
8,3025	1196,82	P (18)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
8,3654	1195,40	P (19)
8,3685	1194,98	P (20)
8,3716	1194,52	P (21)
8,3746	1194,09	P (22)
8,3779	1193,62	P (23)
8,3809	1193,19	P (24)
8,3839	1192,76	P (25)
8,3870	1192,32	P (26)
8,3900	1191,89	P (27)
8,3930	1191,46	P (28)
8,3962	1191,02	P (29)
8,3990	1190,49	P (30)
8,4024	1190,14	P (31)
8,4056	1189,70	P (32)
8,4085	1189,27	P (33)
8,4117	1188,82	P (34)
8,4146	1188,40	P (35)
8,4178	1187,95	P (36)
8,4213	1187,46	P (37)
8,4243	1187,04	P (38)
(7б) Разные переходы		
123	81,3	?
132	75,8	?
(8) SO_2-лазер		
140,85	70,99	?
151,16	66,16	?
192,67	51,90	?
216,27	46,45	?

Таблица 33.6

Лазерные переходы в некоторых многоатомных молекулярных газах [5]

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
(1) CH_3F-лазер, чисто вращательные переходы		
		$v = 0$
451,921	22,1276	R (12), $K = 2$
454,903	22,1286	R (12), $K = 1$
		$v = 1$
496,165	20,1570	R (10), $K = 2$
496,072	20,1584	R (10), $K = 1$
541,147	18,4793	R (11), $K = 2$
541,113	18,4804	R (11), $K = 1$
(2) CH_3OH-лазер, чисто вращательные переходы		
70,6	141,6	—
118,8	84,18	—
164,3	60,86	—
170,6	58,62	—
185,5	53,91	—
190,8	52,41	—
193,2	51,76	—
198,8	50,30	—
202,4	49,41	—

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
223,5	44,74	—
237,6	42,09	—
253,0	39,53	—
254,1	39,35	—
263,7	37,92	—
264,6	37,79	—
278,8	35,87	—
292,2	34,22	—
299,5	33,39	—
369,1	27,09	—
392,3	25,49	—
417,8	23,93	—
570,5	17,53	—
699,5	14,30	—
(3) NH_3-лазер *Полоса* $(03^00) - (02^00)$		
14,78	676,6	—
15,04	664,9	—
15,08	663,1	—
15,44	648,9	—
15,47	646,4	—

λ_{max}, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход	λ_{max}, мкм	ν, см$^{-1}$	Переход
18,21	549,1	—	34,47	317,7	—
21,471	465,74	P (2) 1_0	31,951	312,97	—
22,542	443,01	P (3) 2_2	32,13	311,2	—
22,563	443,20	P (3) 2_1			
22,71	440,8		(4) $H_2C{=}CHCl$-лазер, чисто вращательные переходы		
23,676	422,38	P (4) 3_3 или 3_2			
23,66	419,11				
24,918	401,32	P (5) 4_1	386,0	25,91	—
25,12	398,09		507,7	19,70	—
26,282	380,49	P (6) 5_4 5_3	634,4	15,76	—
30,69	325,6	—			

33.4. ЛАЗЕРЫ НА ПРИМЕСНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Лазеры на примесных кристаллах представляют собой системы, в которых в качестве активного вещества используются кристаллические материалы. Генерация и усиление осуществляются в этих системах в результате переходов возбужденных ионов-активаторов, внесенных в решетку кристалла, в устойчивое состояние. Возбуждение (накачка) ионов элемента-активатора происходит оптически, чаще всего с помощью импульсных или непрерывно действующих газоразрядных ламп.

Энергетические уровни ионов, введенных в кристаллическую решетку в качестве активаторов, значительно отличаются от уровней энергии свободных ионов. Под действием поля кристаллической решетки происходит расщепление, смещение и уширение уровней ионов. На рис. 33.40 показаны энергетические уровни двухвалентных ионов редкоземельных элементов, актиноидов и элементов группы железа, а на рис. 33.42 и 33.43 уровни трехвалентных ионов редкоземельных элементов. Наи-

Кристаллические вещества

Вещество	Симметрия	Пространственная группа, структура		Симметрия расположения кристаллического поля	Постоянные решетки, Å	E_g, эВ/см^3
Оксиды						
Al_2O_3	Ромбоэдрическая	$D_{3d}^6 - R\bar{3}c$,	корунд	C_{3v} (Al^{3+})	$a_0 = 4,759$ $c_0 = 12,989$	3,887
Tr_2O_3	Кубическая	$T_h^7 - Ia3$,	сесквиоксид	C_2 (Er^{3+}) C_{3i} (Er^{3+})	10,547	8,64
Gd_2O_3	Моноклинная	$C_{2h}^3 - C2/m$		C_s (Gd^{3+})	$a_0 = 14,061$ $b_0 = 3,566$ $c_0 = 8,700$	7,407
La_2O_3	Гексагональная	$D_{3d}^1 - C\bar{3}m$		C_{3v} (La^{3+})	$a_0 = 3,937$ $c_0 = 6,130$	6,51
Y_2O_3	Кубическая	$T_h^7 - Ia3$,	сесквиоксид	C_2 (Y^{3+}) C_{3i} (Y^{3+})	10,601	5,06
La_2O_2S	Гексагональная	$D_{3d}^1 - P\bar{3}m$		C_{3v} (La^{3+})	$a_0 = 4,051$ $c_0 = 6,943$	5,73
$Gd_3Ga_5O_{12}$	Кубическая	$O_h^{10} - Ia3d$,	гранат	D_2 (Gd^{3+}) C_{3i} (Ga^{3+})	12,376	—
$Y_3Al_5O_{12}$ (YAG)	»	$O_h^{10} - Ia3d$,	»	D_2 (Y^{3+}) C_{3i} (Al^{3+})	12,01	4,55
$Y_3Ga_5O_{12}$	»	$O_h^{10} - Ia3d$,	»	D_2 (Y^{3+}) C_{3i} (Gd^{3+})	12,277	—
$YAlO_3$	Орторомбическая	$D_{2h}^{16} - Pbnm$,	искаженный перовскит	C_{4h} (Y^{3+}) C_s (Al^{3+})	$a_0 = 5,179$ $b_0 = 5,320$ $c_0 = 7,370$	5,35
Фториды						
BaF_2	Кубическая	$O_h^5 - Fm3m$,	флюорит	—	6,19	4,89
CaF_2	»	$O_h^5 - Fm3m$,	»	O_h (Ca^{2+}) C_{4v} ($Ca^{2+} + F^-$) C_{3v} ($Ca^{2+} + O^{2-}$)	5,464	3,179
SrF_2	»	$O_h^5 - Fm3m$,	»	—	5,76	4,24
MgF_2	Тетрагональная	$D_{4h}^{14} - P4_2/mnm$,	рутил	D_{2h} (Mg^{2+})	$a_0 = 4,621$ $c_0 = 3,053$	3,177

большее воздействие испытывают уровни, соответствующие переходам электронов ионов, так как внутренние электроны атома экранируются внешними оболочками.

Как правило, кристаллы до введения в них ионов-активаторов являются совершенно бесцветными и оптически прозрачными. Введение в них ионов активатора приводит к появлению областей селективного поглощения и спектраной люминесценции (центры окраски). Основные характеристики кристаллических материалов, используемых в качестве матриц для различных ионов-активаторов приведены в табл. 33.7.

Один и те же ионы-активаторы в зависимости от типа кристалла, в который они введены, образуют различные лазерные системы, характеризующиеся и различными генерационными параметрами. Большое влияние при этом оказывает температура активной среды, в зависимости от которой меняются релаксационные параметры и спектр соединений ионов элемента-активатора в кристалле. Одним из возможных методов варьирования свойств лазерных кристаллов является концентрация ионов-активаторов.

Отличные лазерные системы на кристаллах, активированных различными ионами, режимы их работы, величины накачки и другие параметры приведены в табл. 33.8.

В ряде случаев кроме ионов-активаторов в кристаллы вводятся также другие ионы, роль которых в системе сводится к поглощению энергии накачки и передаче ее лазерному иону. Тем самым повышается эффективность лазера. Этот метод повышения эффективности преобразования энергии накачки в лазерное излучение носит название метода сенсибилизирующей добавки. Механизм сенсибилизации поясняет на рис. 33.44. Ионы-сенсибилизаторы для различных кристаллов и лазерных ионов перечислены в табл. 33.9.

В таблицах данного раздела приняты обозначения:

ρ — плотность, $г/см^3$;
$T_{пл}$ — температура плавления, °С;
H — твердость по Кнупу, $кг \cdot мм^{-2}$; значение твердости (по Моосу) помечено звездочкой (*);
k — коэффициент теплопроводности, $вт/(см \cdot град)$;
α — коэффициент теплового расширения, $10^{-6} \cdot град^{-1}$;
n — показатель преломления;
λ — длина волны лазерного излучения, *мкм*;
E_k — энергия нижнего лазерного уровня, $см^{-1}$;
C — массовая концентрация ионов активатора, %;
τ_p — время жизни верхнего лазерного уровня, *мсек*;
$\delta\nu_p$ — ширина линии люминесценции, $см^{-1}$;
T — рабочая температура, °К.

Режим работы: имп. — импульсный; непр. — непрерывный.

Накачки: Xe — ксеноновая, W — вольфрамовая, Hg — ртутная или Kr — криптоновая дуги.

Примечание. Характеристики кристаллов для лазеров могут слегка варьироваться в зависимости от приготовления и от образца к образцу.

для лазеров [6]

Таблица 33.7

$T_{пл}$, °С	H, кг/мм²	k, вт/(см·град)	α, 10^{-6} град$^{-1}$	Область прозрачности, мкм	n	Метод роста
2040	2100	0,35 ∥ c-оси 0,33 ⊥ c-оси	5,31 ∥ c-оси 4,79 ⊥ c-оси	0,14—6,5	1,763 (n_a) 1,755 (n_b)	Чохральского — Верейля
2560	—	—	—	—	—	»
2250	—	—	9,05	—	2,1	»
2307	—	—	—	—	—	»
2410	—	0,27	7	0,23—8	1,91	»
2070	780	0,06	6 ∥ c-оси 3 ⊥ c-оси	0,35—8	2,2	Бриджмена—Стокбергера
~1825	—	0,09	—	—	—	Чохральского
1970	1380	0,13	6,9	0,3—5,5	1,825	»
—	—	0,09			1,93	»
1875	1325	0,11	9,5 ∥ a-оси 4,8 ∥ b-оси 10,8 ∥ c-оси	0,3—5,8	1,97 (n_a) 1,96 (n_b) 1,94 (n_c)	»
1280	82	—	16,4	0,23—12	1,473	Бриджмена—Стокбергера
1360	153	0,097	19,5	0,13—12	1,433	»
1400	1 (*)	—	—	—	1,438	—
1255	—	0,031	8,8 ∥ c-оси 13,1 ⊥ c-оси	до 6	1,38	Зонная плавка

Вещество	Симметрия	Пространственная группа, структура		Симметрия ретикулярного замещающего иона	Постоянные решетки, Å	$E_{\text{эл}}$, эв*
MnF_2	Тетрагональная	D_{4h}^{14} — $P4/mnm$,	»	D_{3h} (Mn^{4+})	$a_0 = 4,715$ $c_0 = 3,131$	—
ZnF_2	»	D_{4h}^{14} — $P4/mcm$,	»	D_{3h} (Zn^{2+})	$a_0 = 4,709$ $c_0 = 3,134$	4,66
CoF_2	»	D_{4h}^{9} — $C6/mcm$,	тэнгнит	C_3 (Co^{2+})	$a_0 = 4,116$ $c_0 = 7,268$	6,16
InF_3	Орторомбическая	$Pnma$		C_s (In^{3+})	—	—
LaF_3	Гексагональная	D_{3h}^{3} — $C6/mcm$,	тэнгнит	C_3 (La^{3+})	$a_0 = 4,148$ $c_0 = 7,354$	5,94
$LiYF_4$ (YLF)	Тетрагональная	C_{4h}^{6} — $I4_1/a$,	шеелит	— S_4 (Y^{3+})	$a_0 = 5,26$ $c_0 = 10,94$	—
Вольфраматы						
$CaWO_4$	»	C_{4h}^{6} — $I4_1/a$,	»	S_4 (Ca^{2+})	$a_0 = 5,242$ $c_0 = 11,372$	6,120
$SrWO_4$	»	C_{4h}^{6} — $I4_1/a$,	»	S_4 (Sr^{2+})	$a_0 = 5,40$ $c_0 = 11,93$	6,18
$NaGd(WO_4)_2$	»	C_{4h}^{6} — $I4_1/a$,	»	S_4 (Gd^{3+})	—	—
$NaLa(WO_4)_2$	»	C_{4h}^{6} — $I4_1/a$,	»	S_4 (La^{3+})	$a_0 = 5,307$ $c_0 = 11,743$	—
Молибдаты						
$CaMoO_4$	»	C_{4h}^{6} — $I4_1/a$,	»	S_4 (Ca^{2+})	$a_0 = 5,226$ $c_0 = 11,43$	4,260
$LaNa(MoO_4)_2$	Тетрагональная	C_{4h}^{6} — $I4_1/a$,	шеелит	S_4 (La^{3+})	$a_0 = 5,328$ $c_0 = 11,699$	4,79
$PbMoO_4$	»	C_{4h}^{6} — $I4_1/a$,	»	(Pb^{2+})	$a_0 = 5,435$ $c_0 = 12,110$	6,816
$SrMoO_4$	»	C_{4h}^{6} — $I4_1/a$,	»	S_4 (Sr^{2+})	$a_0 = 5,39$ $c_0 = 11,97$	4,15
$Gd_2(MoO_4)_3$	Орторомбическая	$Pbca2$,	—	(Gd^{3+})	$a_0 = 10,3859$ $b_0 = 10,4186$ $c_0 = 10,7004$	—
$KY(MoO_4)_2$	»	D_{2h}^{14} — $Pbna$,	—	S_4 (Y^{3+})	$a_0 = 5,07$ $b_0 = 18,23$ $c_0 = 7,45$	—
Ниобаты						
$Ca(NbO_3)_2$	»	D_{2h}^{14} — $Pbcn$,	ферскит	C_2 (Ca^{2+})	—	4,72
$LiNbO_3$	Ромбоэдрическая	C_{3v}^{6} — $R3c$,	пироксенит	—	$a_0 = 5,47$ $b_0 = 5,142$ $c_0 = 13,816$	4,628
$LaNbO_4$	Моноклинная	C_{2},	фергюсонит	(La^{3+})	$a_0 = 5,60$ $b_0 = 11,54$ $c_0 = 5,20$	—
Ванадаты						
$Ca_3(VO_4)_2$	»	C_{2h}^{6} — $C2/c$,	—	(Ca^{2+})	$a_0 = 8,35$ $b_0 = 10,77$ $c_0 = 7,00$	3,85
YVO_4	Тетрагональная	D_{4h}^{19} — $I4/2mcd$,	циркон	D_{2d} (Y^{3+})	$a_0 = 7,133$ $c_0 = 6,291$	4,23
Фосфаты, силикаты, германаты						
$Ca_5(PO_4)_3F$, (FAP)	Гексагональная	C_{6h}^{2} — $P6_3/m$,	апатит	C_{1h} (Ca^{2+}—I) C_s (Ca^{2+}—II)	$a_0 = 9,368$ $c_0 = 6,884$	3,189
$CaY_4(SiO_4)_3O$, (SOAP)	»	C_{6h}^{2} — $P6_3/m$,	»	—	—	—
$Ba_2MgGe_2O_7$, (BMAG)	Тетрагональная	D_{2d}^{3} — $P\bar{4}2_1m$,	акерманит	(Ba^{2+})	$a_0 = 7,84$ $c_0 = 5,01$	—

$T_{пл}$, °C	N, кг/мм²	λ, вт/(см·град)	α, 10^{-6} град$^{-1}$	Область прозрачности, мкм	n	Метод роста
980	—	—	—	—	—	Зонная плавка
872	—	—	—	—	—	»
1325—1425	4,5 (М)	—	—	0,3—9,5	1,62	Бриджмена — Стокбергера
1100	743	—	—	—	1,58	Чохральского
1490	4,5 (М)	0,051	—	—	1,6	»
—	—	—	9,1 ∥ c-оси 8,5 ⊥ c-оси	—	1,634 (n_a) 1,631 (n_c)	»
1570	4,5 (М)	0,33 ⊥ c-оси	11,2 ∥ c-оси 18,7 ∥ c-оси	0,3—3,0	1,92	»
1566	—	—	—	—	—	»
1400	—	—	—	—	—	»
—	—	—	—	—	—	»
1430	4,3 (М)	0,04	25,5 ⊥ c-оси 19,4 ∥ a-оси	—	1,97	»
—	4,5 (М)	0,022	—	—	—	»
1070	—	—	—	—	—	»
1490	—	0,040 ∥ a-оси 0,041 ⊥ c-оси	—	—	1,94	»
—	—	—	—	—	—	»
—	—	—	—	0,33—6,6	—	»
1500	5,5 (М)	—	—	0,3—6,6	2,07 (α) 2,10 (β) 2,18 (γ)	»
1253	5 (М)	0,056	—	0,37—5	2,286 (n_o) 2,200 (n_e)	»
1650	—	—	—	0,3—6	2,187 (n_g) 2,094 (n_m) 2,077 (n_p)	»
1470	4,3 (М)	0,014	56 ⊥ c-оси 35 ∥ a-оси	—	1,80	»
1750—1900	5,5 (М)	0,052 ∥ c-ось 0,054 ⊥ c-оси	7,3 ⊥ c-оси	0,46—4,8	1,66 (n_o) 1,88 (n_e)	Бриджмена — Стокбергера
1705	540	0,021 [0001] 0,019 [$10\bar{1}0$]	10 [0001] 9,4 [$10\bar{1}0$]	—	1,63	Чохральского
>2000	—	—	—	—	1,8	»
—	—	—	—	—	—	—

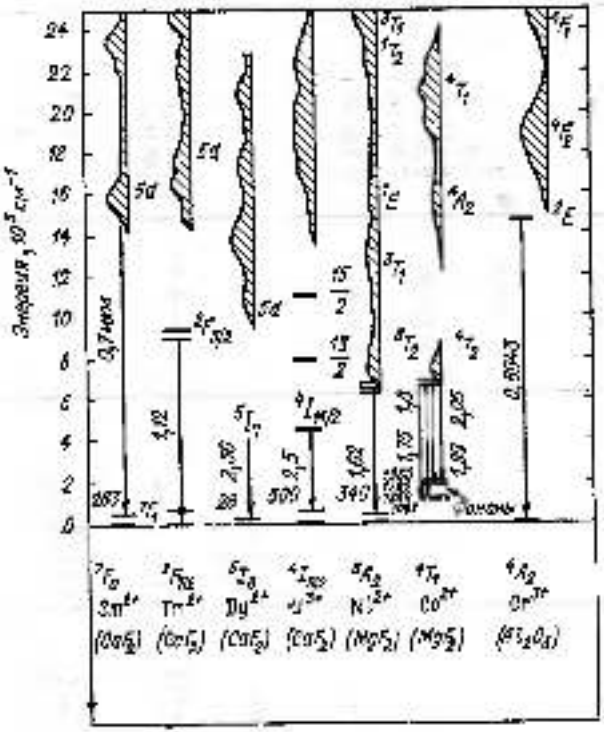


Рис. 33.40. Схемы энергетических уровней ионов двухвалентных редкоземельных элементов, ионов актиноидов и ионов группы железа в матрицах некоторых кристаллов [6].

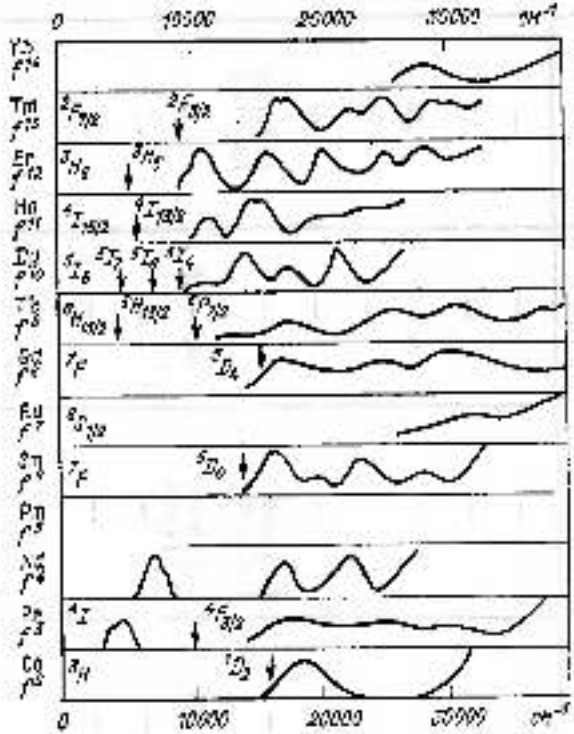


Рис. 33.41. Спектры поглощения ионов двухвалентных редкоземельных элементов в кристалле CaF_2 [6]. Положение переходов $f \to f$ указано стрелкой.

Таблица 33.8

Твердотельные лазерные системы на кристаллах [6]

Ион	Кристалл	Электронный переход	λ, мкм	ν_f, см⁻¹	C, %	τ_f, мкс	σ_f, см⁻²	Режим работы	T, °K	Накачка
Группа железа										
Хром										
Cr^{3+}, $3d^3$	Al_2O_3	$^2E(\overline{E}) \to {}^4A_2$	0,6943(R_1)	0	0,05	5	~10	имп.	300	Xe
								непр.	300	Hg
			0,6934	0	0,05	4,3	—	имп.	77	Xe
								непр.	77	Hg
		$^2E(2\overline{A}) \to {}^4A_2$	0,6929(R_2)	0	0,05	—	—	имп.	290	Xe
($^{52}Cr^{3+}$)		$^2E(\overline{E}) \to {}^4A_2$	0,6934089	0	0,05	—	—	»	≈70	Xe
($^{53}Cr^{3+}$)			0,6934255	—	0,05	—	—	»	≈70	Xe
($^{54}Cr^{3+}$)			0,6934389	—	—	—	—	»	≈70	Xe
			0,7009(N^2)	~100	0,8—0,7	1,1	~2	»	77	Xe
		(Cr^{3+} · Cr^{3+})	0,7041(N_1)			1,3	~2	»	77	Xe
Ванадий	MgF_2	$^4T_2 \to {}^4A_2$	1,1213	1050	—	2,3	—	»	77	Xe
V^{3+}, $3d^2$										
Кобальт	$KMgF_3$	$^4T_2 \to {}^4T_1$	1,821	1490	—	3,1	—	имп.	77	Xe
Co^{2+}, $3d^7$	MgF_2	$^4T_2 \to {}^4T_1$	1,750	1087	1	1,3	—	»	77	Xe
			1,8035	1260	—	—	—	»	77	Xe
			1,89	1760	—	—	—	»	77	Xe
			2,05	1990	—	—	—	»	77	Xe
	ZnF_2	$^4T_2 \to {}^4T_1$	2,165	1895	1	0,4	—	»	77	Xe
Никель	MgF_2	$^3T_2 \to {}^3A_2$	1,623	340	1,5	11,5	—	»	77	Xe
Ni^{2+}, $3d^8$			1,636	350	—	—	—	»	77 · 82	Xe
			1,674 · 1,676	526—530	—	—	—	»	82—100	Xe
								непр.	85	W
								имп.	100—192	Xe
			1,731—1,760	723 · 805	—	—	—	непр.	85	W
			1,785—1,797	898—937	—	—	—	имп.	198—240	Xe
	MgO	$^3T_2 \to {}^3A_2$	1,3444	598	—	—	—	»	77	Xe
	MnF_2	$^3T_2 \to {}^3A_2$	1,915	680	—	11,1	—	»	77	Xe
			1,865	560	—	11,3	—	»	20	Xe
			1,922	600	—	11,1	—	»	77	Xe
			1,929	620	—	—	—	»	65	Xe
								непр.	65	W
			1,939	650	—	—	—	имп.	65	Xe
								непр.	65	W
Двухвалентные ионы редкоземельных элементов										
Самарий	CaF_2	$5d \to {}^7F_1$	0,7035	263	~0,01	0,002	1,6	имп.	20	Xe
Sm^{2+}, $4f^6$			0,708	—	—	—	—	»	65 · 90	Излучение
			0,720	—	—	—	—	»	>65	рубинового
			0,729	—	—	—	—	»	>65	лазера
	SrF_2	$^5D_0 \to {}^7F_0$	0,6960	~270	0,1	13	~1	»	4,2	Xe
Диспрозий	CaF_2	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,36	90	0,05	12	—	»	77	Hg
Dy^{2+}, $4f^{10}$				90	0,02	—	—	непр.	77	Xe
				28,8	—	—	—	»	4,2	W
				—	0,05	10	—	»	27	Излучение Солнца

Продолжение табл. 33.8

Ион	Кристалл	Лазерный переход	λ, мкм	E_L, см$^{-1}$	C, %	τ_F, мсек	$\delta\nu_F$, см$^{-1}$	Режим работы	T, °K	Накачка
Dy^{2+}, $4f^{10}$	Поликристалл		2,35667(4,2°K)	20,0	0,01—0,2	50—15	0,25 (77°K)	непр.	4,2—77	W
								имп.	77	Xe
								»	4	Xe
	SrF_2	$^5I_8 \to {}^5I_7$	2,3659	—	0,03	50	0,5—0,6	»	77	Xe
Тулий Tm^{2+}, $4f^{13}$	CaF_2	$^2F_{5/2} \to {}^2F_{7/2}$	1,116	556	0,05	4	0,03	»	4,2	Xe
								непр.	27	Hg
								»	4,2	Hg
Трехвалентные ионы редкоземельных элементов										
Празеодим Pr^{3+}, $4f^2$	$Ca(NbO_3)_2$	$^3G_4 \to {}^3H_4$	1,04	—	—	—	—	имп.	77	Xe
	$CaWO_4$	$^1D_2 \to {}^3F_4$	1,0108	377	0,5	0,05	~10	»	20—90	Xe
	LaF_3	$^3P_0 \to {}^3H_5$	0,5965	~4200	1,0	—	~3	»	77	Xe
	$SrMoO_4$	$^3G_4 \to {}^3H_5$	1,04	—	—	—	—	—	—	—
Неодим Nd^{3+}, $4f^3$	$Ba_{0,75}Ca_{0,25}Nb_2O_6$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,062	~2000	—	—	—	имп.	295	Xe
	BaF_2	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,060	~2000	—	—	—	»	77	Xe
	BaF_2-LaF_3	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0640	~2000	0,5—1,0	—	—	»	300	Xe
	$Ba_2MgGe_2O_7$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	0,0644	~2000	2,0	0,45	~10	»	300	Xe
	$Bi_4Ge_3O_{12}$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0640	~2000	—	—	—	»	295	Xe
			1,0638	—	—	—	—	»	77	Xe
	CaF_2	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0457	~2000	—	—	—	»	77	Xe
	CaF_2(I)	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0404	~2000	0,41	1,5	—	»	300	Xe
			1,0457	—	0,62	—	—	»	50	Xe
			1,0467	—	—	—	—	»	50	Xe
			1,0448	—	—	—	—	»	50	Xe
			1,0508	—	—	—	—	»	50	Xe
			1,0550	—	—	—	—	»	50	Xe
			1,0481	—	—	—	—	»	50	Xe
		$^4F_{3/2} \to {}^4I_{13/2}$	1,0448	~2000	1	—	—	»	120	Xe
			1,0661	—	—	—	—	»	120	Xe
	CaF_2(II)	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0665	~2000	0,2—0,5	1,25	25	»	300	Xe
	CaF_2-CeF_3	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0667	~2000	1,0	0,46	~3	»	300	Xe
	CaF_2-CeO_2	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	≈1,0665	~2000	1,0	~1,2	~25	»	300	Xe
	CaF_2-SrF_2	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0669	~2000	0,5	1,4	~20	»	300	Xe
	CaF_2-SrF_2-BaF_2-V-YF_3-LaF_3	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0665	~2000	1	0,4	—	»	300	Xe
	CaF_2-YF_3	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0461	~2000	0,5	~1,0	—	»	300	Xe
			1,0545	—	—	—	—	»	300	Xe
			1,0532	—	—	—	—	»	300	Xe
	$CaMoO_4$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,067	~2000	—	0,16	—	»	77	Xe
			1,0575	—	—	—	—	»	295	Xe
	$Ca(NbO_3)_2$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,06	~2000	0,5	0,12	~2	»	77	Xe

Ионы	Кристалл	Лазерный переход	λ, мкм	E_p, см$^{-1}$	C, %	ν_F, мкм	$\Delta\nu_F$, см$^{-1}$	Режим работы	T, °K	Накачка
			1,0615	1969	2,0	0,125	~7,5	непр.	300	Xe
			1,0512	1952	—	—	~4,5	»	77	Xe
	$Ca_5(PO_4)_3F$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0529	1904	1,1	0,24	~5,3	имп.	300	Xe
								непр.	300	W
	$Ca_5(VO_4)_2$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,067	~2000	2,0	0,15	160	имп.	300	Xe
	$CaWO_4$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0584	2016	3,0	0,172	—	»	300	Xe
								непр.	300	Xe
			1,065	2016	0,12	0,13	5,3	имп.	77	Xe
								непр.	85	Hg
			1,0652	—	—	—	15	имп.	296	Xe
			1,0633	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,066	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,0576	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,0582	—	—	—	—	непр.	296	Hg
		$^4F_{7/2} \to {}^4I_{9/2}$	0,9145	471	—	—	—	имп.	77	Xe
		$^4F_{3/2} \to {}^4I_{13/2}$	1,3372	3928	—	—	—	»	77	Xe
			1,365	3971	—	—	—	»	77	Xe
			1,387	4156	—	—	—	»	77	Xe
			1,3382	4004	—	—	—	»	296	Xe
	CdF_2–YF_3	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0651	~2000	~2	0,31	270	»	300	Xe
	CeF_3	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0538	2222	0,1	0,226	~9	»	90	Xe
			1,0539	—	4—5	0,27	33	»	300	Xe
			1,0410	—	—	—	20	»	77	Xe
			1,0404	—	—	—	24	»	300	Xe
								»	77	Xe
	$Gd_3Ga_5O_{12}$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0623	~2000	3,0	0,2	8,0	»	300	Xe
	$Gd_2(MoO_4)_3$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	~1,06	~2000	3	—	—	»	135	Xe
								»	296	Xe
	Gd_2O_3	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0789	~2000	—	0,12	20—30	»	300	Xe
			1,0741	—	—	—	—	»	300	Xe
			1,0789	—	—	—	8	»	77	Xe
			1,0776					»	77	Xe
	$KY(MoO_4)_2$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0669	1983	2,5	0,13	12	»	300	Xe
	LnF_3	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0407	1983	1,0	0,67	~2,3	»	300	Xe
			1,0633	2189	—	—	~6	»	300	Xe
			1,0400	1979	—	—	~1	»	77	Xe
		$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0407	—	2,0	0,3	—	»	300	Xe
								непр.	300	Xe
			1,0633	—	—	—	—	непр.	400—600	Xe
	LnF_3–SrF_2	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0466	~2000	2	0,20	~9	имп.	300	Xe
			1,0636	—	—	—	~6	»	300	Xe
	$LaNa(MoO_4)_2$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0567	1953	1—2	0,16	—	»	300	Xe
			1,0653	1989	5—10	~0,1	5	»	300	Xe
			1,0595	—	1	0,19	—	»	300	Xe
	$LaNbO_4$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0624	~2000	1	0,12	9	»	300	Xe
	La_2O_3	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,079	~2000	1,0	0,125	11	»	77	Xe
	La_2O_2S	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,075	1909	1,0	0,090	—	»	300	Xe

Ион	Кристалл	Лазерный переход	λ, мкм	E_p, см$^{-1}$	C, %	τ, мсек	$\Delta\nu_{1/2}$, см$^{-1}$	Режим работы	T, °K	Накачка
Неодим Nd^{3+}, $4f^3$	$LiNbO_3$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0842	2033	—	65	—	имп.	290	Xe
			1,0846	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,0840	—	—	—	17	»	300	Xe
	$LiYF_4$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0530	2342	2,2	0,42	12,5	»	300	Xe
			1,0471	2342	—	—	—	»	300	Xe
	α-$NaCaLaF_6$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0653	—	1,0	0,44	—	»	300	Xe
	α-$NaCaYF_6$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0539	—	0,5	0,36	—	»	300	Xe
			1,0531	—	—	—	—	»	300	Xe
	$5NaF \cdot 9YF_3$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0506	~2000	~1	0,96		»	300	Xe
			1,0595	—	—	—	—	»	300	Xe
	$Na_{0,5}Gd_{0,5}WO_4$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,06	~2000	2	0,18		»	77	Xe
	$PbMoO_4$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0586	~2000	—	0,13—0,14	—	»	295	Xe
	SeF_6	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,057	2000	—	1,1—1,2	—	»	295	Xe
			1,0437	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,044	—	0,2	1,6	—	»	77	Xe
	SrF_2-YF_3(10%)	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0567	—	2,0	0,36	~21	имп.	300	Xe
	$SrMoO_4$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0543	~2000	—	—	15	»	295	Xe
			1,0576	—	—	—	—	»	295	Xe
			1,0540	—	—	—	3	»	77	Xe
			1,0552	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,059		—	—	—	»	77	Xe
			1,0527	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,0511	—	—	—	—	»	77	Xe
	$YAlO_3$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0795	2157	5	0,006	12	»	300	Xe
								непр.	300	—
			1,0725	2097	1,5	~0,10	—	имп.	300	Xe
	(0,3%Cr^{3+})		1,0645	2023	0,9	0,16	—	»	295	Xe
								непр.	295	Kr
	$Y_3Al_5O_{12}$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0612	2001	3,0	~0,2	1,0—1,5	имп.	77	Xe
			1,0642	2110	—	—	6,5	»	300	Xe
								непр.	300	Hg
		$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0519	—		—		»	300	W
			1,0513		—	—	—	»	300	W
			1,0640	—	—	—		»	300	W
			1,0736		—	—	—	»	300	W
			1,1119	—	—	—		»	300	W
			1,1158	—	—	—	—	»	300	W
			1,1225	—	—	—	—	»	300	W
		$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,319	~4000	—	—	—	»	300	W
			1,318	—	—	0,29		имп.	300	Xe
			1,336	—	—	—	—	»	300	Xe
			1,358	—	—	—	—	»	300	Xe
		$^4F_{3/2} \to {}^4I_{9/2}$	0,946	846	1,0	—	—	»	290—295	Xe
	(1,0% Cr^{3+}	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0641	2110	1,3	—	—	»	300	Xe
								непр.	300	Hg
								»	300	W

Ион	Кристалл	Лазерный переход	λ, мкм	E_p, см$^{-1}$	C, %	τ_p, мсек	τ_{φ}, см$^{-1}$	Режим работы	T, °K	Накачка
			1,0512	9001		0,24—3,5		непр.	77	Hg
								»	77	W
	$Y_3Ga_5O_{12}$	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,0633	~2000	3,0	0,2	6,5	имп.	300	Xe
	Y_2O_3	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,073	~2000	1,0	0,26	3,0	»	77	Xe
			1,078	—		—	—	»	77	Xe
	YVO_4	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,069	~2000	0,1	0,033	—	»	~90	Xe
			1,0641	1904	~2	~0,09	—	»	300	Xe
			1,0664	1965	—	—	—	»	300	Xe
Европий Eu^{3+}, $4f^6$	Y_2O_3	$^5D_0 \to {}^7F_2$	0,6113	869	5,0	0,87	—	»	220	Xe
	YVO_4	$^5D_0 \to {}^7F_2$	0,6153	~1000	—	—	—	»	90	Xe
Гольмий Ho^{3+}, $4f^{10}$	CaF_2	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,092	~ 230	—	—	—	»	77	Xe
		$^5S_2 \to {}^5I_8$	0,55122	270	0,4—0,8	0,7	~6	»	77	Xe
	3% ErF_3, 3% YbF_3, 3% TmF_3	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,1	—	1	6	..	имп.	77	Xe
								непр.	77	Xe
	CaF_2—ErF_3	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,0600	~250	0,5	—	—	имп.	77	Xe
	CaF_2—YF_3	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,0318	~80	3	—	~90	»	50	Xe
								»	77	Xe
	(+ Er^{3+}, Tm^{3+}, Yb^{3+})	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,05	—	0,5	—	—	»	100	Xe
			2,06	—	—	—	—	»	298	Xe
	$CaWO_4$	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,0740	~250	0,5	1,3	—	»	77	Xe
								»	20	Xe
			2,0707	—	—	—	—	»	77	Xe
			2,0656	—	—	—	—	»	77	Xe
	$Ca(NbO_3)_2$	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,047	—	0,5	2,2	—	»	77	Xe
	$Ca_5(PO_4)_3F$ (+ Cr^{3+})	$^5I_7 \to {}^5I_8$	≈2,075	—	—		..	»	77	Xe
	$CaWO_4$	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,046	290	0,5	—	—	имп.	77	Xe
	$CaY_2(SiO_4)_3O$ (22,5% Er^{3+}, 0,10% Tm^{3+})	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,039	—	—	—	—	»	77	Xe
			—	—	2,5	—	—	»	77	Xe
	Er_2O_3	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,121	—	—	—	—	»	77	Xe
								»	143	Xe
								непр.	77	W
	$Er_{1,5}Y_{1,5}Al_5O_{12}$	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,0979	462	—	—	—	имп.	77	Xe
								непр.	77	Hg
								»	77	W
			2,0917	—	—	—	—	имп.	77	Xe
			~2,123	—	—	—		»	77	Xe
	HoF_3	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,050	377	100	2,6	1,3	»	77	Xe
	$LiNbO_3$	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,0786	310	—	—		»	77	Xe
	$LiYF_4$ (5% Er^{3+})	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,066		2,0	20	—	»	77	Xe
	α-$NaCaPrF_6$	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,0345	~120	~1	—	~120	»	150	Xe
			2,0312	—	—	—	~100	»	77	Xe
			2,0377	—	—	—	—	»	77	Xe
	$Y_3Al_5O_{12}$	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,0914	—	—	~4	—	»	77	Xe

Продолжение табл. 33.8

Ион	Кристалл	Лазерный переход	λ, мкм	ν_F, см$^{-1}$	C, %	τ_F, мсек	$\Delta\nu_F$, см$^{-1}$	Режим рубина	T, °K	Примеч.
Гольмий HoF^{3+}, $4f^{10}$			2,0975	402	—	—	—	имп.	77	Xe
			2,1228	518	—	—	—	»	77	Xe
	(0,5% Cr^{3+})		2,0975	402	—	—	—	»	77	Xe
								непр.	85	W
			2,1223	518	—	—	—	имп.	77	Xe
								непр.	85	Hg
								»	85	W
	(50% Er^{3+} 6,7% Tm^{3+})	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,0982	462	5	—	—	имп.	77	Xe
			2,1227	518	—	—	—	»	77	Xe
								непр.	85	W
			2,1228	532	—	—	—	имп.	295	Xe
			2,13	532	5	3,0	—	»	295	Xe
								»	77	Xe
								непр.	77	W
	$YAlO_3$ (50% Er^{3+} 6,7% Tm^{3+})	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,119	474	1,67	4,8	9,8 17	имп.	77	Xe
								»	300	Xe
	$Y_3Fe_5O_{12}$ (5% Er^{3+} 5% Tm^{3+})	$^5I_7 \to {}^5I_8$	2,088	—	2	—	—	»	77	Xe
			2,0906	—	—	—	—	»	77	Xe
Эрбий Er^{3+}, $4f^{11}$	CaF_2	$^4I_{13/2} \to {}^4I_{15/2}$	1,617	~400	0,1	20	—	»	77	Xe
		$^4I_{13/2} \to {}^4I_{15/2}$	1,5298	~30	0,06	0,8—1,3	—	»	4	Xe
			1,5308	—	—	—	—	»	4	Xe
		$^4S_{3/2} \to {}^4I_{13/2}$	0,8456	~6200	4—8	~1	~10	»	77	Xe
			0,8548	—	—	—	—	»	77	Xe
		$^4S_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	1,26	~10 000	0,1	0,3	—	»	77	Xe
		$^4S_{3/2} \to {}^4I_{9/2}$	1,696	12 413	0,1	0,3	—	»	77	Xe
			1,715	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,720	—	—	—	—	»	77	Xe
	CaF_2-ErF_3-TmF_3	$^4I_{13/2} \to {}^4I_{15/2}$	2,69	~6200	12,5	4,5	—	»	298	Xe
	CaF_2-YF_3	$^4I_{13/2} \to {}^4I_{15/2}$	1,5146	~180	5	—	~16	»	77	Xe
			1,5556	~260	—	—	~20	»	77	Xe
	$Ca(NbO_3)_2$	$^4I_{13/2} \to {}^4I_{15/2}$	1,61	~400	—	—	—	»	77	Xe
	$CaWO_4$	$^4I_{13/2} \to {}^4I_{15/2}$	1,612	375	1,0	—	~10	»	77	Xe
	LnF_3	$^4I_{13/2} \to {}^4I_{15/2}$	1,6113	400	0,05	—	—	»	77	Xe
	$YAlO_3$	$^4I_{13/2} \to {}^4I_{15/2}$	1,663	12 400	0,5	0,12	—	»	295	Xe
	$Y_3Al_5O_{12}$	$^4S_{3/2} \to {}^4I_{9/2}$	1,6602	525	—	—	—	»	77	Xe
		$^4I_{13/2} \to {}^4I_{15/2}$	1,6452	525	—	—	—	»	77	Xe
	(5% Yb^{3+})		1,6459	459	1,0	9,1	~20	»	295	Xe
Тулий Tm^{3+}, $4f^{12}$	CaF_2-ErF_3 (12,5%)	$^3H_5 \to {}^3H_6$	1,850	~300	0,5	2,9	—	»	100	Xe
	CaF_2-ErF_3	$^3H_4 \to {}^3H_6$	1,891	~350	0,5	—	—	»	77	Xe
		$^3H_4 \to {}^3H_6$	1,9	—	1,0	6	—	»	77	Xe

Ион	Кристалл	Лазерный переход	λ, мкм	E_i, см$^{-1}$	C, %	τ_F, мсек	$\varkappa_F$, см$^{-1}$	Режим работы	T, °K	Накачка
								непр.	77	Xe
	$CaMoO_4$	$^3H_4 \to {}^3H_6$	1,9115	~325	0,5	≥0,9	~10	имп.	77	Xe
	(0,75% Er^{3+})		1,9060	—	—	—	—	»	77	Xe
	$Ca(NbO_3)_2$	$^3H_4 \to {}^3H_6$	1,91	—	—	—	—	»	77	Xe
	$CaWO_4$	$^3H_4 \to {}^3H_6$	1,911	~325	—	—	~10	»	77	Xe
			1,916	—	—	—	—	»	77	Xe
	Er_2O_3	$^3H_4 \to {}^3H_6$	1,904	~300	0,5	2,9	—	»	77	Xe
								непр.	~80	W
	$Er_{1,5}Y_{1,5}Al_5O_{12}$	$^3H_4 \to {}^3H_6$	1,880	228	·	15	—	имп.	77	Xe
			1,884	240	—	»	—	»	77	Xe
			2,014	582	—	—	—	непр.	85	W
	$LiNbO_3$	$^3H_4 \to {}^3H_6$	1,8532	271	—	—	—	имп.	77	Xe
	α-$NaCaErF_6$	$^3H_4 \to {}^3H_6$	1,8580	~470	~1,0	—	~70	»	77	Xe
							75	»	150	Xe
			1,8885	~540	—	—	~50	»	77	Xe
	SrF_2	$^3H_4 \to {}^3H_6$	1,972	—	—	10	—	»	77	Xe
	$Y_3Al_5O_{12}$	$^3H_4 \to {}^3H_6$	1,8834	240	—	15	—	»	77	Xe
			2,0132	582	—	—	—	»	77	Xe
								непр.	85	W
	(0,5% Cr^{3+})		2,0132	582	—	—	—	имп.	77	Xe
								непр.	85	Hg
								»	86	W
			2,019	600	—	—	—	имп.	295	Xe
Иттербий Yb^{3+}, $4f^{13}$	CaF_2	$^2F_{5/2} \to {}^2F_{7/2}$	1,0335	—	5—10	—	—	»	~120	Xe
	(1—2% Nd^{3+})									
	$Y_3Al_5O_{12}$	$^2F_{5/2} \to {}^2F_{7/2}$	1,0296	623	—	~1	~10	»	77	Xe
Актиноиды										
Уран U^{3+}, $5f^3$	BaF_2	$^4I_{11/2} \to {}^4I_{9/2}$	2,566	107	—	0,15	—	»	20	Xe
	CaF_2	$^4I_{11/2} \to {}^4I_{9/2}$	2,613	609	—	~0,016	—	»	300	Xe
						0,095	—	»	60	Xe
						0,135	—	»	20—77	Xe
								непр.	77	Hg
			2,57	609	—	—	—	имп.	300	Xe
			2,61	470	—	—	~30	»	77	Xe
			2,44	396	—	—	—	»	77	Xe
			2,24	0	—	—	—	»	77	Xe
	SrF_2	$^4I_{11/2} \to {}^4I_{9/2}$	2,407	324	0,1	0,06	—	»	50	Xe
						0,08	—	»	77	Xe
						0,11	—	»	20	Xe

Рис. 33.42. Схема наблюдаемых уровней энергии трехвалентных ионов редкоземельных элементов [6]. Ширина уровней показывает полное расщепление между штарковскими компонентами в безводных трихлоридах. Полукружки под уровнями означают, что наблюдается люминесценция, обусловленная переходами с данного уровня.

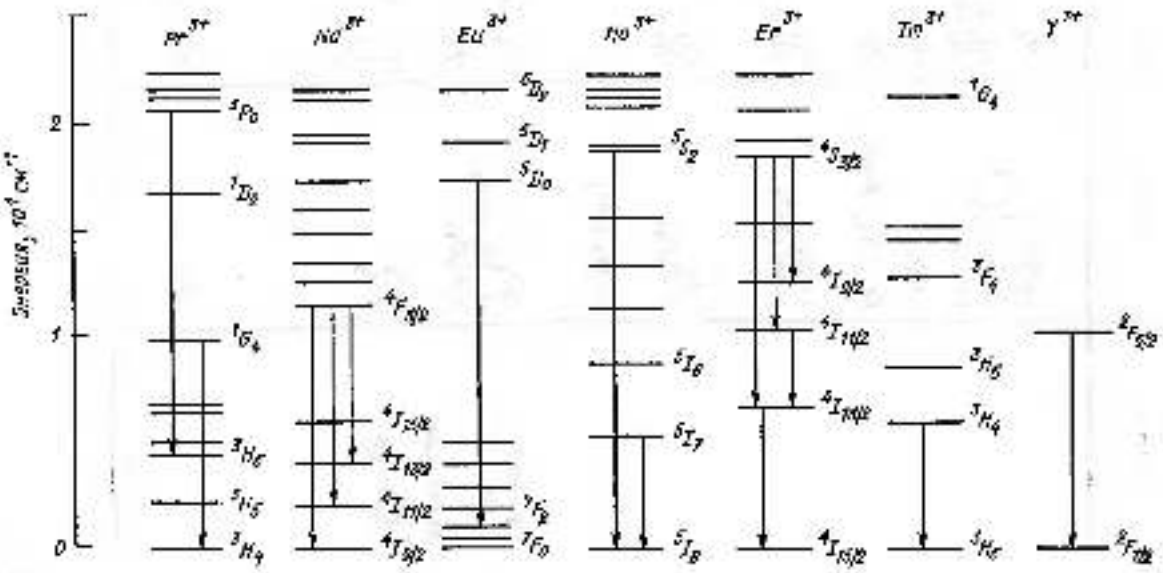


Рис. 33.43. Подробная схема уровней энергии и лазерных переходов (указаны стрелкой) трехвалентных ионов редкоземельных элементов [6].

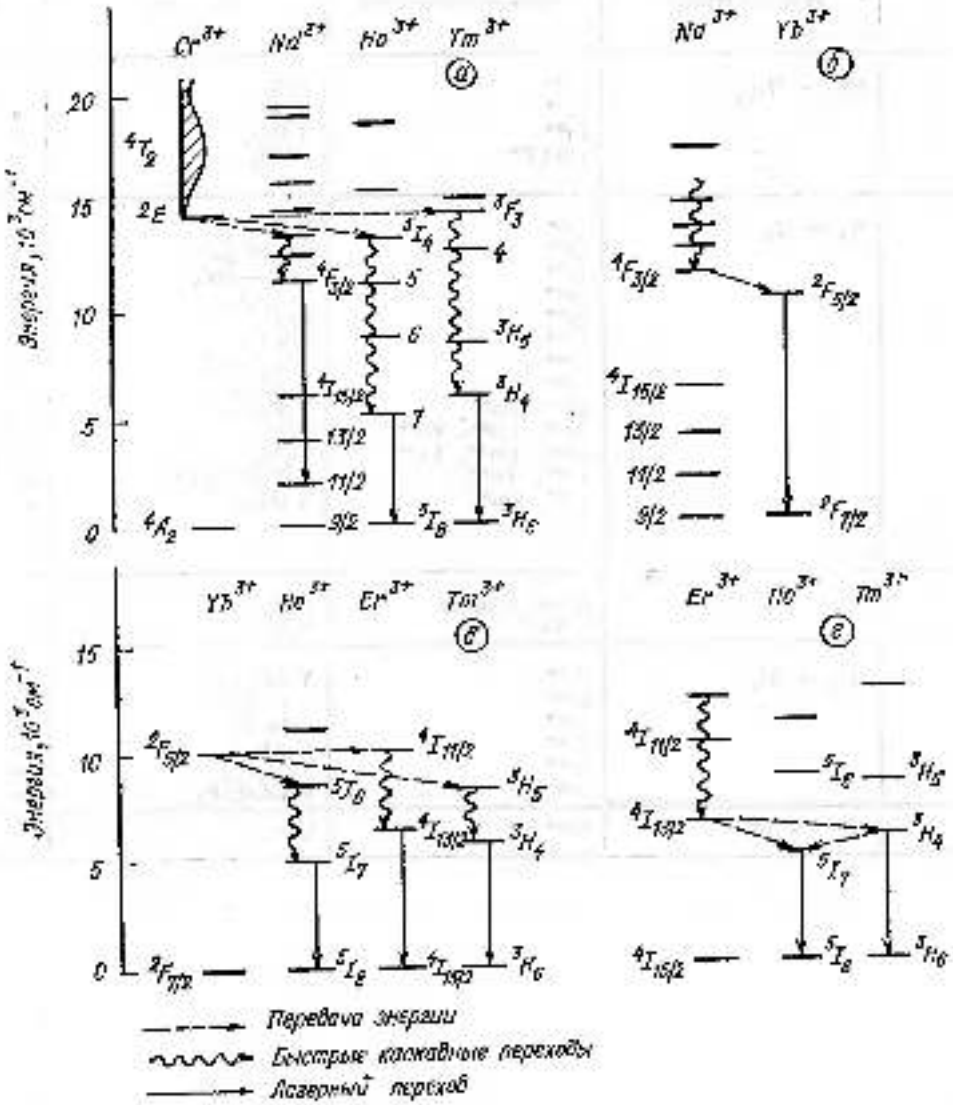


Рис. 33.44. Энергетическая схема процесса сенсибилизации и соответствующие лазерные переходы в кристаллах [6]. Сенсибилизация ионами: *а* — Cr^{3+} кристаллов с ионами Nd^{3+}, Ho^{3+}, Tm^{3+}; *б* — Nd^{3+} кристаллов с ионами Yb^{3+}; *в* — Yb^{3+} кристаллов с ионами Ho^{3+}, Er^{3+}, Tm^{3+}; *г* — Er^{3+} кристаллов с ионами Ho^{3+} и Tm^{3+}.

Кристаллические лазерные системы с сенсибилизацией [6]

Лазерный ион	Лазерный переход	Ионы-сенсибилизаторы	Кристалл	Рис. 33.48
Nd^{3+}	$^4F_{3/2} \to {}^4I_{11/2}$	Ce^{3+} Cr^{3+} Cr^{3+} $(VO_4)^{3-}$	CaF_2 $Y_3Al_5O_{12}$ $YAlO_3$ YVO_4	 а а
Ho^{3+}	$^5I_7 \to {}^5I_8$	Cr^{3+} Cr^{3+} Er^{3+} Tm^{3+} Er^{3+} Er^{3+} Er^{3+} Er^{3+} Er^{3+}, Tm^{3+} Er^{3+}, Tm^{3+}, Yb^{3+} Er^{3+}, Tm^{3+}, Yb^{3+} Er^{3+}, Tm^{3+} Er^{3+}, Tm^{3+}	$Y_3Al_5O_{12}$ $Ca_5(PO_4)_3F$ $CaF_2—ErF_3$ $CaMoO_4$ Er_2O_3 $LiYF_4$ α-$NaCaErF_6$ $Y_3Al_5O_{12}$ $Y_3Fe_5O_{12}$ CaF_2 $Y_3Al_5O_{12}$ $CaY_4(SiO_4)_3O$ $YAlO_3$	а а г г г г г г г г, г а, г г г
Er^{3+}	$^4I_{13/2} \to {}^4I_{15/2}$	Центр окраски Yb^{3+}	CaF_2 $Y_3Al_5O_{12}$	г
Tm^{3+}	$^3H_4 \to {}^3H_6$	Cr^{3+} Er^{3+} Er^{3+} Er^{3+} Er^{3+} Er^{3+}	$Y_3Al_5O_{12}$ $CaF_2:ErF_3$ $CaMoO_4$ Er_2O_3 $Y_3Al_5O_{12}$ α-$NaCaErF_6$	а г г г г г
Yb^{3+}	$^2F_{5/2} \to {}^2F_{7/2}$	Nd^{3+}	CaF_2	б

33.5. ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ СТЕКОЛ

Активными элементами в лазерах на основе стекол служат стекла, легированные ионами редкоземельных элементов. При переходах в этих ионах с возбужденных на устойчивые уровни осуществляются генерация и усиление излучения. Стекло как основа активного вещества лазера является некристаллической матрицей, поскольку оно не обладает кристаллической структурой дальнего порядка. Ионы элементов-активаторов входят в стекло не как ионы, изоморфно замещающие катионы решетки, а как компоненты стекла.

В качестве активных веществ лазеров используются следующие типы стекол: кремнеземные (состав SiO_2-B_2O_3-BaO), боросиликатные (B_2O_3-BaO), боратные (B_2O_3) ванадиборатные (B_2O_3-La_2O_3), ванадиборсеребратные (BaO-B_2O_3-La_2O_3), фторбериллатные [BeF_2-AlF_3(Al_2F_6)-CaF-$MeF(MeF_2)$, где Me означает Mg, Sr, Ba, Zn, Cd, Pb], свинцовые (PbO-TiO_2 и PbO-GeO_2), фосфатные.

В качестве ионов-активаторов используют трехвалентные ионы Nd, Tb, Yb, Ho и Er. Для повышения эффективности преобразования энергии накачки в лазерное излучение как же, как и в случае кристаллических материалов, используют сенсибилизирующие добавки (табл. 33.10).

Подавляющее большинство лазеров на стеклах, активированных ионами редкоземельных элементов, работает только в импульсном режиме. Для накачки используются импульсные ксеноновые галогенидные лампы.

Таблица 33.10

Сенсибилизаторы в стекле [7]

Активатор	Сенсибилизатор	Тип стекла (мольн. содержание, %)
Nd^{3+}	Ce^{3+} MnO^{2+}, Ce^{3+} UO_2^{2+}	Li-Mg-алюмосиликатное (SiO_2 — 56,7; Li_2O — 7,4; MgO — 29,6; Al_2O_3 — 5,7) Кальцийсульфатное Баритовый крон (SiO_2 — 75,1; K_2O — 12,2; BaO — 12,5; Sb_2O_3 — 0,2)
Tb^{3+}	Dy^{3+} Gd^{3+} Ce^{3+}, Ce^{3+}	Боросиликатное Кальциеборатное (BrO_3 — 70,0; Li_2O — 10,0; CaO — 20,0) Кальциесульфатное
Ho^{3+}	Yb^{3+}	Li-Mg-алюмосиликатное (SiO_2 — 56,7; Li_2O — 7,4; MgO — 29,6; Al_2O_3 — 5,7)
Er^{3+}	Yb^{3+}	Na-K-Ba-силикатное (SiO_2 — 73,2; Na_2O — 12,0; K_2O — 12,8; BaO — 2,0)
Yb^{3+}	Nd^{3+} Ce^{3+} $Ce^{3+}+Nd^{3+}$ $UO_2^{2+}+Na^{3+}$	Кальциеборатное (BrO_3 — 70,0; Li_2O — 10,0; CaO — 20,0) Li-Mg-алюмосиликатное (SiO_2 — 56,7; Li_2O — 7,4; MgO — 29,6; Al_2O_3 — 5,7) То же Баритовый крон (SiO_2 — 75,1; K_2O — 12,2; BaO — 12,5; Sb_2O_3 — 0,2)

Таблица 33.11

Характеристики промышленных лазерных стекол некоторых зарубежных фирм

Все стекла содержат активный ион Nd^{3+}

Характеристики	Лазерные стекла фирм											
	American Optical				Owens-Illinois	Schott						Spiral
	KS-1034	VS-1835	VS-1037	VS-0835	BD-2	LG52	LG54	LG55	LG56	LG57	LG530	HS
Концентрация: по массе оксида, %	1,0	2,0	3,0	5,0	3,1	2	2	5	3	0,8	3,0	3,0
ионов, $10^{21}/см^3$	0,9	1,8	2,6	4,6	2,83	2,7	3,1	4,6	2,9	0,7	2,8	2,8
Время люминесценции, *мсек*	0,64	0,63	0,62	0,57	0,3	0,15	0,08	0,6	0,05	0,6	0,64	0,7
Длина волны генерации, *мкм*	1,06	1,06	1,06	1,06	1,0623	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,06	1,06
Ширина линии люминесценции, *нм*	—		—	40	26	36	37	22	22	21	22	—
Потери*, *%/см*	—	—	—	—	0,6	—	—	—	—	—	—	0,07
Показатель преломления: для 589,3 *нм*	1,5109	1,5135	1,5143	1,5196	—	1,6769	1,6913	1,5226	1,5199	1,5171	1,5199	1,517
для 1060 *нм*	1,501	1,5034	1,5025	1,5008	1,5559	—	—	1,51	1,5093	1,5068	1,5091	1,5067

Характеристика	Лазерные стекла фирм											
	American Optical				Owens-Illinois	Schott						Sovirel
	NS-2024	NS-1830	NS-1820	NS-1893*	ED-2	LG58	LG54	LG53	LG56	LG57	LG59	305
Поглощение**, %/см	0,2	0,2	0,2	0,2	-	0,51	0,51	0,73	0,51	0,73	0,1—1,2	0,23
Плотность, г/см³	2,54	2,56	2,59	2,63	2,547	3,77	4,34	2,62	2,69	2,59	2,60	2,5
Коэффициент теплопроводности, вт/(м·град): при 0°С	—	—	—	—	—	0,8	0,6	0,99	0,93	1,16	0,99	0,84
при 100°С	—	—	—	0,8	1,21	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	0,91	1,35	—	—	—	—	—	—	—
Удельная теплоемкость, кал/(г·град)	—	—	—	0,14	-		—	—	—	—	—	0,2
Коэффициент теплового расширения, 10^{-6}/(град·см)	10,8	10,2	11,11	10,3	10,3	7,2	8,6	9,1	9,3	9,6	9,7	9,6
Твердость по Кнупу, кг/мм²	432	441	488	490	544	671	677	450	475	391	365	404

* Измерено для длины волны генерации при наличии излучения накачки.
** Измерено для длины волны генерации без излучения накачки.

Таблица 33.12

Характеристики лазерных стекол с ионами неодима, изготавливаемых в СССР [9—11]

Характеристика	Тип стекла (основа)				
	КГСС-3 (силикатная)	ГЛС-1 (силикатная)	ГЛС-4 (силикатная)	ЛГС-54 (фосфатная)	ЛГС-55 (боросиликатная)
Массовая концентрация ионов Nd^{3+}, %	1,96	2,0	5,0	1—5	1—4
Плотность, г/см³	2,90	2,66	2,66	2,8	2,7
Показатель преломления*	1,534	1,522	1,515	1,57	1,54
Средняя дисперсия, 10^6	—	913	907	1270	870
Время люминесценции, мкс	550	360	430	230—260	180—220
Ширина линии люминесценции, нм	—	21,4	20,8	21,0	22,0

Характеристика	Тип стекла (основа)				
	КГСС-8 (силикатное)	ГЛС-1 (силикатное)	ТЛС-4 (силикатное)	ЛГС-64 (фосфатное)	ЛГС-56 (боросфосфатное)
Потери* (без накачки), 10^{-3} $см^{-1}$	1—3	1—3	1—3	1—4	1—3
Термооптическая постоянная*, 10^{-7} $град^{-1}$	—17	38	34	—31	—2,5
Коэффициент линейного расширения, 10^{-7} $град^{-1}$	102	92	100	170	116
Температурный коэффициент показателя преломления*, 10^{-5} $град^{-1}$	—38	—13	—18,5	—	—
Оптический коэффициент напряжения**, $мкм \cdot см \cdot кг^{-1}$		2,4	2,5	—	—
Удельная теплоемкость, $ккал/(кг \cdot град)$	0,16	0,165	0,165	—	—
Коэффициент теплопроводности, $ккал/(м \cdot град)$	0,76	0,84	0,60	—	—
Модуль Юнга, $кг \cdot мм^{-2}$	6500	7500	7500	—	—
Коэффициент Пуассона	0,247	0,229	0,23	—	—

* Для длины волны генерации $\lambda = 1,05$ мкм.
** Для $\lambda = 0,546$ мкм.

33.6. ЛАЗЕРЫ НА ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Полупроводниковые лазеры используют в качестве активных элементов неорганические вещества (кристаллы), обладающие свойствами полупроводников. В отличие от лазеров на примесных кристаллах генерация излучения в полупроводниках происходит не на переходах между уровнями примесных ионов, а на переходах между зоной проводимости и валентной зоной или между зонами и уровнями, образуемыми примесями в запрещенной зоне самого полупроводника. Таким образом, активным веществом является сама кристаллическая матрица, а примеси служат источниками зарядов (электронов и дырок), рекомбинация которых приводит к возникновению фотонов.

Для создания инверсии в полупроводниках используют четыре типа возбуждения: инжекцию носителей заряда, облучение пучком быстрых электронов, оптическую накачку и ударную ионизацию (лавинный пробой).

Наибольшую эффективность имеют два первых типа накачки, которые и имеют наибольшее распространение. Существующие лазеры на полупроводниках, длины волн генерации и используемые виды возбуждения перечислены в табл. 33.13.

Для работы большинства полупроводниковых лазеров требуются низкие (от 1,7 до 77°К) температуры. При комнатных температурах генерация осуществлена пока только для лазеров на ZnO, CdS, $Al_{1-x}Ga_xAs$, $GaAs_{1-x}P$ и GaAs. Из них благодаря доступности кристаллов хорошего качества и необходимой чистоты наибольшее распространение имеет арсенид галлия. Основные физические свойства арсенида галлия приведены ниже.

Физические свойства арсенида галлия [7]

Молекулярная масса	144,63
Плотность при 25°С, г/см³	5,3161±0,0002
Структура	кубическая
Пространственная группа	$F\bar{4}3m$
Тип решетки	$B3$, сфалерит
Постоянная решетки, Å	5,6534±0,0002
Твердость:	
по Мосу	4,5
по Кнупу, кг/мм²	750±42
Температура плавления, °С	1238
Теплота плавления, ккал/моль	10,5±2,5
Температура Дебая (при 270 К), град	335
Коэффициент теплового расширения, град⁻¹:	
при −233°С	$-0,5\cdot10^{-6}$
при −218°С	0,0
при −196 ÷ +17°С	$3,64\cdot10^{-6}$
Диэлектрическая постоянная при 20°С и частоте 0,2—3 Мгц	12,53
Подвижность электронов при 15°С, см²/(в·сек)	$1,1\cdot10^{5}$
Подвижность дырок при 25°С, см²/(в·сек)	$4,5\cdot10^{3}$
Эффективная масса электрона	0,042—0,071
Собственное удельное сопротивление, ом·см	$3,7\cdot10^{8}$

Таблица 33-13

Длина волны генерации полупроводниковых лазеров [12]*

Вещество	λ, мкм	E, эв	Тип возбуждения: Инжекция носителей	Электронный пучок	Оптический	Плазма
ZnS	0,33	3,8		+	+	
ZnO	0,37	3,4		+		
$Zn_{1-x}Cd_xS$	0,32—0,49	2,5—3,82			+	
ZnSe	0,46	2,7		+		
CdS	0,49	2,5		+	+	
ZnTe	0,53	2,3		+		
GaSe	0,59	2,1		+		
$CdSe_{1-x}S_x$	0,49—0,68	2,5—1,8	—	+	+	
$CdSe_{0,93}S_{0,07}$	0,675	1,8			+	
CdSe	0,675	1,8		+	+	
$Al_{1-x}Ga_xAs$	0,63—0,90	2,0—1,4	+			
$GaAs_{1-x}P_x$	0,61—0,68	2,0—1,4	+	+		
CdTe	0,785	1,6		+		
GaAs	0,83—0,91	1,50—1,38	+	+	+	+
InP	0,91	1,36	+			+
$GaAs_{1-x}Sb_x$	0,95—1,5	1,4—0,83	(+)			
$CdSiP_2$	1,01	1,25				
$InAs_{1-x}P_x$	0,9—3,2	1,4—0,39	(+)			
$InAs_{0,51}P_{0,05}$	0,942	1,32	+			
$InAs_{0,51}P_{0,45}$	1,6	0,78	+			
GaSb	1,56	0,80	+	—		
$In_{1-x}Ga_xAs$	0,58—3,1	2,14—0,4	+			
$In_{0,66}Ga_{0,34}As$	1,77	0,70	+			
$In_{0,72}Ga_{0,28}As$	2,07	0,60	+			
GaP_2	2,1	0,58			+	
InAs	3,1	0,39	+	+	+	
$InAs_{1-x}Sb_x$	3,1—5,4	0,39—0,23	+			
$InAs_{0,98}Sb_{0,02}$	3,19	0,36	+			
$Cd_{1-x}Hg_xTe$	3—15	0,41—0,08		+	+	
$Cd_{0,32}Hg_{0,68}Te$	3,8	0,33			+	
Te	3,72	0,334		+		
PbS	4,3	0,28	+	+		
InSb	5,2	0,236	+	+	+	+
PbTe	6,5	0,19	+	+		
$PbS_{1-x}Se_x$	3,9÷8,5	0,32÷0,146	+	+		
PbSe	8,5	0,146	+	+		
PbSnTe	28	0,045	+			
PbSnSe	8—31,2	0,155—0,040	+			

* Крестиком помечены осуществленные, в крестиках в скобках — возможные, но еще не осуществленные типы возбуждения

33.7. ЖИДКОСТНЫЕ ЛАЗЕРЫ

Жидкостные лазеры используют в качестве активных элементов растворы, содержащие ионы редкоземельных элементов. Все эти лазеры работают только в импульсном режиме с оптической накачкой излучением ксеноновых газоразрядных ламп.

Лазеры на хелатах редкоземельных элементов

Хелаты составляют класс лазерных материалов, в которых активными элементами являются трехвалентные ионы редких земель (RE), связанные с органическими группами или лигандами. Различают два главных типа лазерных комплексов:

$$(RE)^{3+}\,[\text{лиганд}]_{-6}Q^{1};\quad (RE)^{3+}\,[\text{лиганд}]_{-8},$$

где Q^1 обозначает катион.

Наиболее часто в лазерах из хелатов редкоземельных элементов употребляют следующие лиганды, катионы и растворители.

Лиганды:

Бензоилацетон (B) $C_6H_5-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-CH_2-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-CH_3$

Бензоилтрифторацетон (BTF) $C_6H_5-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-CH_2-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-CF_3$

Дибензоилметан (DBM) $C_6H_5-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-CH_2-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-C_6H_5$

{ Пентафторпропионат (PFP) CF_3CF_2COO
{ о-Фенантролин (о-Ph) $C_{12}H_8N_2$

Тенонилтрифторацетон (TTF)

$$C_4H_3-S-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-CH_2-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-CF_3$$

Трифторацетилацетон (TFA) $CF_3-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-CH_2-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-CH_3$

Катионы: пиперидин; пиридин; натрий; аммиак и его производные; имидазол.

Растворители: смесь спиртов (этанол—метанол 3 : 1); смесь (спирт—диметилформамид (DMFA); ацетонитрил; диметилсульфоксид.

Во всех лазерах на хелатах лазерный эффект осуществляется на переходах между энергетическими уровнями ионов редкоземельных элементов, а поглощение энергии накачки происходит через полосы поглощения лиганда. На рис. 33.45 показано расположение уровней лазера на ионах европия наиболее хорошо исследованной системы.

Основные генерационные характеристики существующих лазеров на хелатах приведены в табл. 33.14. Хелаты имеют очень большие коэффициенты поглощения (~100 $см^{-1}$), поэтому лазерный эффект осуществляется только в тонких слоях вещества (~1 мм).

Таблица 33.14

Генерационные характеристики лазеров на хелатах редкоземельных элементов [13]

Ион	Лиганд	Растворитель	Концентрация ионов, (моль/л)	Длина волны лазерного излучения, нм	Рабочая температура, °C	Время флуоресценции, мкс	Ширина линии, $см^{-1}$	Электронный переход	Расходимость лазерного луча, 10^{-3} рад	Полосы поглощения, нм	Поглощение в максимуме полосы, ($л/(моль \cdot см)$)
Eu^{3+}	B_4	Смесь спиртов или DMFA	1—15	611,1 —613,1	от —100 до —130	0,8	20	$^5D_0-^7F_2$	9	280—380	6,8
Eu^{3+}	$[DBM]_4$	DMFA	9	612,0	—145	-	6	$^5D_0-^7F_2$	9	-	1—10
Eu^{3+}	$[TTF]_4$	Ацетонитрил	3	612,5	—35	—	24	$^5D_0-^7F_2$	9	—	1—10
Eu^{3+}	$[BTF]_4$	Ацетонитрил	6	611,9	130	0,8	34	$^5D_0-^7F_2$	9	—	1—10
Tb^{3+}	$[TFA]_3$	Ацетонитрил, п-диоксан	1,5	547,0	+30	—	—	$^5D_4-^7F_5$	-	—	-
Nd^{3+}	PFP o-Ph	Диметилсульфоксид	120	1057,4	-30	6,000	140	$^4F_{3/2}-^4I_{11/2}$	20	Nd^{3+}	—

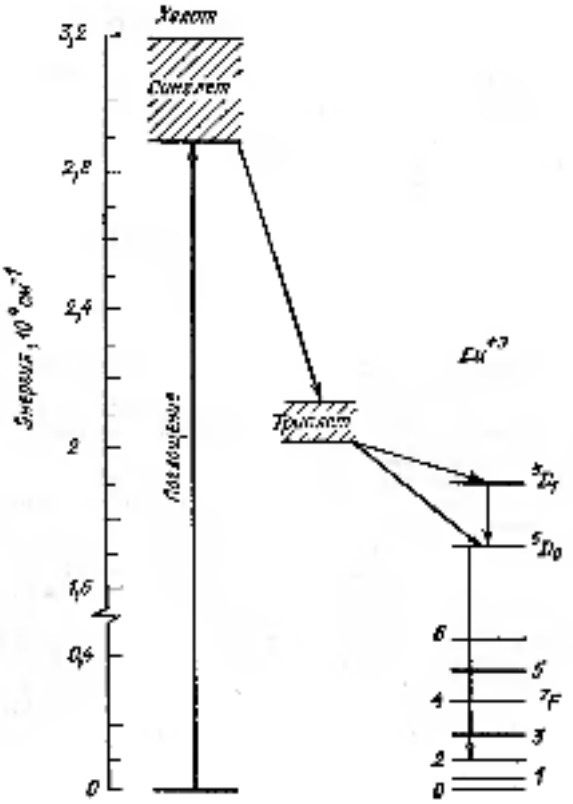


Рис. 33.45. Расположение энергетических уровней в лазере на хелате европия [13]. Поглощение энергии накачки осуществляется между основным и синглетным состояниями лиганда с последующим переходом в триплетное состояние с передачей возбуждения иону Eu^{3+}. Флуоресценция и лазерный эффект происходят при переходах между $^5D_0$- и $^7F_2$-уровнями иона европия.

Апротонные лазеры

Апротонные лазерные жидкие материалы состоят из растворов солей редкоземельных элементов в неорганических растворителях. Лазерный эффект был достигнут пока только для ионов неодима Nd^{3+} в селен- и фосфоронеохлоридах. Основные генерационные характеристики этих лазеров приведены в табл. 33.15. Типичные спектры поглощения ионов неодима показаны на рис. 33.46. Значения поглощения в максимумах полос поглощения неодима в зависимости от типа неорганического растворителя указаны в табл. 33.16. Общие характеристики апротонных лазеров на ионах неодима:

Температура раствора, °C . .	+30°C
Концентрация ионов, 10^{20} см$^{-3}$	0,5—3
Лазерный переход	$^4F_{3/2}$—$^4I_{11/2}$
Ширина линии люминесценции, см$^{-1}$	~120
Расщепление основного уровня, см$^{-1}$	~2000

Таблица 33.15

Материалы апротонных лазеров [12]

Растворитель (М)*	Длина волны лазерного перехода, нм	Время флуоресценции, мкс	Сечение излучения, 10^{-20} см^2
$SeOCl_2+SnCl_4$(0,5 М)	1056	0,280	8
	1330	–	0,7
$POCl_3+SnCl_4$(1,0 М)	1051	0,300	8
$POCl_3+ZrCl_4$(0,45 М)	1051	0,330	~6

* Состав растворителей: 1 г оксихлорида плюс 1 моль тетрахлорида.

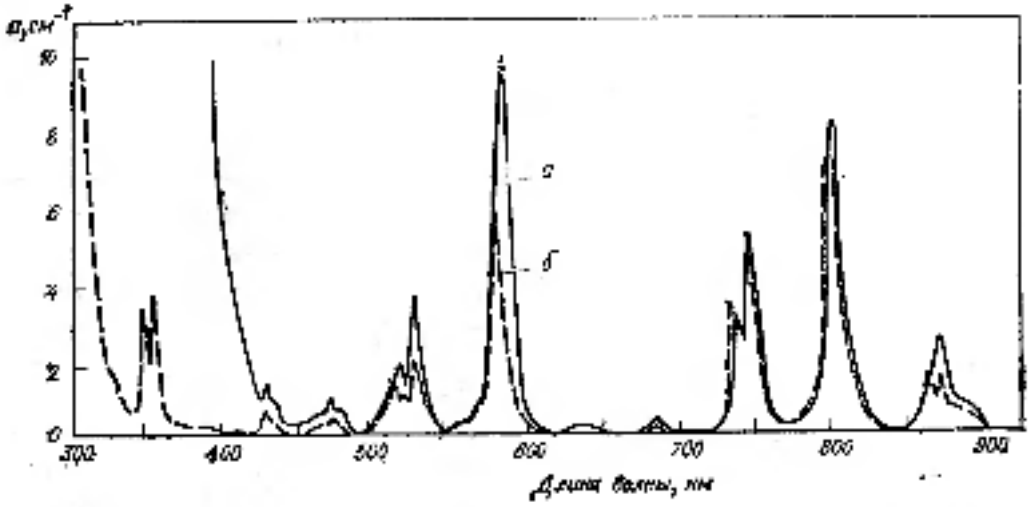


Рис. 33.46. Типичные спектры поглощения ионов Nd^{3+} в апротонных растворителях [13].

Таблица 33.16

Поглощение в максимумах полос поглощения ионов Nd^{3+} в различных неорганических растворителях [12]

Длина волны максимума полосы поглощения, нм	Поглощение в максимуме, $л/(моль \cdot см)$	
	$SeOCl_2 + SnCl_4$	$POCl_3 + SnCl_4$ или $POCl_3 + ZrCl_4$
350	—	11,7
520	11,7	6,7
580	33,3	2,0
750	16,7	16,7
800	26,7	26,7
870	10,0	5,0

33.8. ЛАЗЕРЫ НА ХИМИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЯХ

Среди различных химических красителей в настоящее время лазерный эффект получен для шести классов органических красителей: оксазольных, антраценовых, кумариновых, акридиновых, ксантеновых и полиметиновых. Большинство красителей этих классов имеют сходные спектральные характеристики:

1. Ширины основных полос поглощения и испускания обычно имеют порядок 1000 $см^{-1}$. Одна или несколько полос поглощения могут находиться в более коротковолновой области спектра по сравнению с основным поглощением.

2. Максимум флуоресценции находится в более длинноволновой области, чем главный максимум поглощения. Величина сдвига между спектрами и ширина спектров флуоресценции и поглощения могут быть такими, что коротковолновый край спектра флуоресценции существенно перекрывает длинноволновый край спектра поглощения.

3. Спектр флуоресценции обычно зеркально отображает спектр основной полосы поглощения.

4. Время флуоресценции обычно составляет $5 \cdot 10^{-9}$ сек.

5. Расположение, величина, структура полос поглощения и флуоресценции, а также время флуоресценции в значительной мере зависят от типа растворителя и концентрации раствора.

В связи с тем что время флуоресценции типичного красителя составляет $5 \cdot 10^{-9}$ сек, источник оптической накачки для лазеров на красителях должен обеспечивать высокие мощности накачки, чтобы превзойти потери на спонтанное излучение. Необходимую мощность накачки можно получить, используя разнообразные импульсные лампы или непрерывное излучение другого лазера. Второй способ дает значительно большую мощность накачки и более эффективен. Органические красители, для которых наблюдался лазерный эффект, перечислены в табл. 33.17 [14]. Здесь же приведены длины волн центра линии генерации, полученные как при накачке другим лазером, так и при накачке излучением импульсной газоразрядной лампы.

Лазеры на химических красителях [14]

Таблица 33.17

Органическое соединение	Растворитель	Длина волны генерации при лазерной (лампочной) накачке, нм	Органическое соединение	Растворитель	Длина волны генерации при лазерной (лампочной) накачке, нм
п-Терфенил	Циклогексан	341 (341)	POPOP, или *p*-бис-[2-(5-фенилоксазолил)] бензол	Этанол, толуол	421 (419)
2,5-Дифенил-1, 3, 4-оксадиазол	Диоксан	(348)	Диметил POPOP, или 1,4-бис-2-(4-метил-5-фенилоксазолил)бензол	Этанол, циклогексан	423 431
2,5-Ди-*п*-метоксифенил-3,4-оксадиазол	Этанол	359 372	Бис MSB, или *p*-бис-(*o*-метилстирил)бензол	Толуол, бензол	425
Изопропил-2-фенил-6 (4-бифенил)-1,3,4-оксадиазол	»	(369,8)	2′-Метокси-1,4-дистирилбензол	Толуол	425 (424)
2,5-Дифенилфуран	Диоксан	(371)	1,2-Ди-(α-нафтил)этилен	»	426
п-Квазифенил	DMF	(374)	2,2′-Диметокси-1,4-дистирилбензол	»	430
2,5-Дифенилоксазол	Диоксан	(381)	1-Стирил-4[α-фенил-(*п*-бифенилил)] бензол	»	432
Дифенилбутадиен	Толуол	388	9, 10-Дифенилантрацен	Циклогексан	432,5
4-Метилбеллиферон	»	395—574*	Акридон	Этанол	437 (435)
2-Бифенил-6-стирил-1,3,4-оксадиазол	Толуол	396,5	2,5-Бис-[5-трет-бутилбензоксазолил (2)] тиофен	Бензол	(437)
αNNO, или 2,5-ди(α-нафтил)-1,3,4-оксадиазол	»	391	3-Этиламинопирен-5,8,10-трисульфокислота	Вода	441
αNPO, или 2-фенил-5-α-нафтил-1,4-оксазол	»	399,5 (400)	7-Метиламино-4,6-диметилкумарин	Этанол	(443)
2-Гидрокси-4-метил-7-аминохинолин	Этанол	(413)	7-Этиламино-4,6-диметилкумарин	»	(446)
1,2-Ди-4-бифенилэтилен	Толуол	408	Кальцеин голубой	»	(449—490)
BBO, или 2,5-Дибифенилилоксазол	Бензол	406,5	9-Аминоакридин гидрохлорид	»	(458,5) (~460)
p, *p*′-Дифенилстилбен	»	406,5 (409)	4-Метилумбеллиферон, или 4-метил-7-гидроксикумарин	Вода (pH~9)	450
1, 4-Дистирилбензол	Толуол	415	7-Диэтиламино-4-метилкумарин	Этанол	450 (450)
1, 4-Ди[2-(5-фенилоксазолил)]бензол	»	417			
Бис-MSB, или *p*-бис (*o*-метилстирил)бензол	Этанол	419 (420)			
4, 4′-Диметил-1,4-дистирилбензол	Толуол	420 (419)			

* Зависит от pH-растворителя.

Органическое соединение	Растворитель	Длина волны генерации при лазерной (ламповой) накачке, нм
Эмкулин	Вода (pH~9)	(460)
7-Гидроксикумарин, или умбеллиферон	»	(~460)
Бензил-β-метилумбеллиферон	Этанол	(460)
2,4,6-Трифенилпирилиевый тетрафторборат	Метанол	465
2-Анилинонафталинсульфонат	Изоамиловый спирт	500
7-Метиламино-4,6-диметилкумарин	Этанол слабо кислый	(484)
	кислый	(487)
1,3-Дифенилизобензофуран	Этанол	(484—518)
Бриллиантовый сульфофлавин	»	(505—573)
Трипафлавин	»	505
Акрифлавин гидрохлорид	»	510 (517,5)
Флуоресцеин	Водный раствор щелочи	518
	Этанол	(529—546)
6-Карбоксифлуоресцеин	Вода, этанол	527 (545)
Na-Флуоресцеин	Этанол	540
Эозин	»	(545)
2,7-Дихлорофлуоресцеин	Этанол, полиметилметакрилат	555 (595)
Родамин 6 G		
Малобромофлуоресцеин	Глицерин	560
Уранин	Этанол	560
Цинк (орто)	»	565
Дибромофлуоресцеин	Глицерин	568
Родамин B	Этанол	577 (620)
Родамин C	Глицерин	570 (620)
Пиронин B	Ацетон, полиметилметакрилат	576
Акридин красный	Этанол	580 (615)
Родамин G	»	585
Родамин S	»	(586)
Пиронин G	Изоамиловый спирт	590 (600)
Лиметилен	Вода в серная кислота	600
Эозин	Этанол	600
Сафранин T	»	610
Кислотный красный	Вода	620
Фиолетовый красный	Изоамиловый спирт	620
Родамин 3B	»	620 (615)
3,3′-Диэтилоксакарбоцианиновый	Метанол	658
Крезол фиолетовый	Толуол	(646—709)
3,3′-Диэтил-2,2′-тиакарбоцианин иодид	Ацетон	711
3,3′-Диэтил-10-хлор-2,2′-(5,6,5′,6′-дибензо)-тиакарбоцианин иодид	»	714
3,3′-Диэтил-2,2′-(5,5′-дикетил)-тиаселенокарбоцианин иодид	Глицерин	717
3,3′-Диэтилоксатрикарбоцианин иодид	Этанол	728,5
3,3′-Диэтил-5,5′-диметокси-6,6′-бис (метилмеркапто)-10-метилтиакарбоцианин бромид	»	730

Органическое соединение	Растворитель	Длина волны генерации при лазерной (ламповой) накачке, нм
3,3′-Диэтил-2,2′-оксатрикарбоцианин иодид	Ацетон	741
1,1′-Диметил-11-бром-2,2′-хиноцианкарбоцианин иодид	Глицерин	745
1,1′-Диэтил-4,4′-хинокарбоцианин иодид или криптоцианин	»	746
1,1′-Диоксил-4,4′-хинокарбоцианин иодид	»	749
1,1′-Диэтил-2,2′-дикарбоцианин иодид	»	750
Голубой B	»	753
1,1′-Диэтил-4,6′-хинокарбоцианинбромид	»	754
Дицианин	»	756
Нафталин зеленый	»	756
Родулин голубой 6G	»	758
Фталоцианин магния	Хинолин	770
Бриллиантовый зеленый или малахитовый зеленый G	Изоамиловый спирт	760
1,1′-Диэтил-γ-циано-2,2′-дикарбоцианинтетрафторборат, или DTCDCI	Пиридин	760
Хлороалюминиевый фталоцианин	Диметилсульфоксид	764,5
3-Этил-3′-метилтиаселенотрикарбоцианин иодид	Этанол	770
3,3′-Диэтил-10-хлоро-2,2′-(4,5,4′,5′-дибензо)-тиадикарбоцианин иодид	Ацетон	774
3,3′-Диэтил-11-меркаптотрикарбоцианин иодид	Этанол	785,5
1,3,3,1′,3′,3′-Гексаметилиндотрикарбоцианин иодид	»	793,5
1,1′-Диэтил-γ-пиридил-2,2′-дикарбоцианинтетрафторборат	Метанол	797
1,1′-Диэтил-γ-нитро-4,4′-дикарбоцианинтетрафторборат, или DTNDCI	Пиридин	800
3,3′-Диэтилоксатрикарбоцианин иодид	Этанол	807,5
Виктория голубая	Глицерин	809
Виктория голубая R	»	814
1,1′-Диэтил-11-бром-2,2′-хиноцианкарбоцианин иодид	»	815
1,3,3,1′,3′,3′-Гексаметил-2,2′-индотрикарбоцианин иодид	Ацетон	819 (800)
3,3′-Диэтилтиатрикарбоцианин иодид, или DTTC	Диметилсульфоксид	822
Метиленовый зеленый	Серная кислота	823
1,3,3,1′,3′,3′-Гексаметил-4,5,4′,5′-дибензоиндотрикарбоцианин перхлорат	Этанол	824,5
3,3′-Диэтил-2,2′-селенатрикарбоцианин иодид	Ацетон	826
Метиленовый голубой	Серная кислота	829
1,1′-Диэтил-11-бром-4,4′-хиноцианкарбоцианин иодид	Метанол	830
3,3′-Диэтилтиатрикарбоцианин бромид	»	835

Органические соединения	Растворитель	Длина волны генерации при лазерной (ламповой) накачке, нм	Органические соединения	Растворитель	Длина волны генерации при лазерной (ламповой) накачке, нм
Метиленовый голубой	Серная кислота	833	3,3'-Диэтил-6,7,6',7'-дибензо 11-метилтиацикарбоцианин иодид	Этанол	856
3,3'-Диэтил-6,7,6',7'-дибензотиацикарбоцианин иодид	Этанол	835,5	3,3'-Диэтил-2,2'-4,5,4',5'-дибензо) тиацикарбоцианин иодид	Ацетон	860
Тионин	Серная кислота	848	Фталоцианин	Серная кислота	863
Тионин	»	8.0	1,1'-Диэтил-2-2'-хинотиакарбоцианин иодид	Ацетон	898
3,3'-Диэтил-2,2'-(5,6,5',6'-тетракетоиндотиа)-карбоцианин	Ацетон	858	1,1'-Диэтил-4,4'-хинотиакарбоцианин иодид	»	1000
			Аналоги пенькарбоцианина	Потребовался	1095—1175

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Willett C. S. Handbook of Lasers, Ed. by R. J. Pressley, Cleveland, Chemical Rubber Co., 1971, p. 188.
2. Moore C. E. Atomic Energy Levels, NBS-467, Washington, v. 1—3.
3. Bridges W. B., Chester A. N. Cm. [1], p. 242.
4. Silfvast W. T., Klein M. B. "Appl. Phys. Lett.", 1970, v. 17, p. 400.
5. Pollack M. A. Cm. [1], p. 208.
6. Weber M. J. Cm. [1], p. 371.
7. Рябцев Н. Г. Материалы квантовой электроники. М., «Сов. радио», 1972.
8. Woodcock R. F. Cm. [1], p. 360.
9. Бужинский Н. М. и др. «Докл. АН СССР», 1970, т. 190, с. 538.
10. Дианов Е. М. «Приборы и техника эксперимента», 1969, № 4, с. 160.
11. Аванов И. Г. и др. «Изв. АН СССР. Сер. неорг. материалы», 1974, т. 50, № 5, с. 921.
12. Prokove J. I. Cm. [1], p. 365.
13. Lempicki I. Cm. [1], p. 350.
14. Deutsch T. F. Cm. [1], p. 350.

ГЛАВА 34

ЭЛЕКТРО-, МАГНИТО- И ПЬЕЗООПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

34.1. ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ (ЭФФЕКТ ПОККЕЛЬСА)

Линейный электрооптический эффект (эффект Поккельса) заключается в изменении преломляющих свойств кристаллов под действием внешнего постоянного или переменного электрического поля (частота переменного электрического поля значительно меньше оптических частот).

Связь между изменениями поляризационных констант вещества $\Delta B_{ij} = \Delta(1/\varepsilon)_{ij}$ (где ε — диэлектрическая проницаемость) в приложенном электрическом поле E_k дается электрооптическими коэффициентами r_{ijk}:

$$\Delta B_{ij} = r_{ijk} E_k,$$

где $i, j, k = 1, 2, 3$. Коэффициенты r_{ijk} образуют полярный тензор третьего ранга, называемый тензором линейного электрооптического эффекта. В сокращенной записи

$$\Delta B_i = r_{il} E_k$$

$l = (kj)$; в зависимости от индекса l пробегает значения от 1 до 6: 1 = (11), 2 = (22), 3 = (33), 4 = (23), 5 = (13), 6 = (12).

Ниже приведены тензоры электрооптических коэффициентов по Нейманам [1] в зависимости от типа точечной симметрии кристаллов.

Триклинная $1 - C_1$:

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{pmatrix} \quad (18) \text{ элементов}$$

Моноклинная:

$$2 - C_2 \qquad m - C_s$$

$$\begin{pmatrix} 0 & r_{21} & 0 \\ 0 & r_{22} & 0 \\ 0 & r_{23} & 0 \\ r_{41} & 0 & r_{43} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{61} & 0 & r_{63} \end{pmatrix} (2 \parallel X_2) \quad (8) \qquad \begin{pmatrix} r_{11} & 0 & r_{13} \\ r_{21} & 0 & r_{23} \\ r_{31} & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{51} & 0 & r_{53} \\ 0 & r_{62} & 0 \end{pmatrix} (m \perp X_2) \quad (10)$$

Орторомбическая:

$222 - D_2$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{52} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{pmatrix} (3)$$

$mm2 - C_{2v}$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{23} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (5)$$

Тетрагональная:

$4 - C_4$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{31} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ r_{41} & r_{51} & 0 \\ r_{51} & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (4)$$

$\bar{4} - S_4$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & -r_{23} \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & -r_{51} & 0 \\ r_{51} & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{pmatrix} (4)$$

$422 - D_4$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (1)$$

$4mm - C_{4v}$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{31} \\ 0 & 0 & r_{31} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (3)$$

$\bar{4}2m - D_{2d}$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{pmatrix} (2 \parallel X_3)$$

Тригональная:

$3 - C_3$

$$\begin{pmatrix} r_{11} & -r_{22} & r_{31} \\ -r_{11} & r_{22} & r_{31} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ r_{41} & r_{51} & 0 \\ r_{51} & -r_{41} & 0 \\ -r_{22} & -r_{11} & 0 \end{pmatrix} (6)$$

$32 - D_3$

$$\begin{pmatrix} r_{11} & 0 & 0 \\ -r_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{41} & 0 \\ 0 & -r_{11} & 0 \end{pmatrix} (2)$$

$3m - C_{3v}$

$$\begin{pmatrix} 0 & -r_{22} & r_{31} \\ 0 & r_{22} & r_{31} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{41} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix} (4)$$

Гексагональная:

$6 - C_6$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{31} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ r_{41} & r_{51} & 0 \\ r_{51} & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (4)$$

$\bar{6} - C_{3h}$

$$\begin{pmatrix} r_{11} & -r_{22} & 0 \\ -r_{22} & r_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -r_{22} & -r_{11} & 0 \end{pmatrix} (2)$$

$622 - D_6$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (1)$$

$6mm - C_{6v}$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{31} \\ 0 & 0 & r_{31} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (3)$$

$\bar{6}m2 - D_{3h}$

$$\begin{pmatrix} 0 & -r_{22} & 0 \\ 0 & r_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix} (m \perp X_1) (1)$$

Кубическая:

$432 - O$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (0)$$

23 и $\bar{4}3m - T$ и T_d

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{41} \end{pmatrix} (1)$$

Значения электрооптических коэффициентов для различных типов кристаллов приведены в табл. 34.1—34.4. Если частоты электрического поля, при которых произведены измерения, намного выше или ниже частоты собственного акустического резонанса, то использованы соответственно обозначения (S) и r_{ijk}^{S} или (T) и r_{ijk}^{T}. Погрешность измеренных значений r_{ijk} составляет ~ 15%. В ферроэлектриках и других материалах, имеющих фазовый переход, наблюдается сильная зависимость электрооптического коэффициента от температуры, если последняя близка к критической температуре T_K. Зависимость r_{ijk} от длины волны света в области прозрачности вещества, как правило, мала.

Одной из важных характеристик электрооптических кристаллов является полуволновое напряжение $U_{\lambda/2}$, т. е. напряжение, соответствующее набегу разности фаз, равной π, между двумя световыми волнами с взаимно перпендикулярными поляризациями. Эта величина может быть найдена из соотношения

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{n_z^3 r_{33} - n_1^3 r_{13}} = \frac{\lambda}{n_z^3 r_c},$$

где $r_c = r_{33} - (n_1^3 / n_3^3) r_{13}$. В случае одноосных кристаллов ось z (или ось 3) — оптическая и свет распространяется в перпендикулярном к ней направлении.

Таблица 34.1

Электрооптические свойства кристаллов типа KDP и ADP [1]

Симметрия $\bar{4}2m$ при температурах выше критической T_K.

Вещество	T_K, °K	r_{63}, 10^{-12} м/в	r_{41}, 10^{-12} м/в	ε_1	ε_3
KH_2PO_4 (KDP)	123				
		(T) 9,37	+8,6	(T) 21	42
		(S) 8,15 $r_{63} < 0$	$r_{41} < 0$	(S) 21	44
KD_2PO_4 (DKDP)	222	(T) 26,4	6,8	(T) 60	
		(S) 24,0 0,93 r_{63}^T		(S) 48	58
KH_2AsO_4 (KDA)	97	(T) 10,9	12,5	(T) 21	54
				(S) 19	53
KD_2AsO_4 (DKDA)	162	(T) 18,2	—	—	—
RbH_2PO_4 (RDP)	147	(T) 15,5	—	—	—
		(S) 0,91 r_{63}^T			
RbH_2AsO_4 (RDA)	110	(T) 13,0	—	(T) 27	41
				(S) 24	39
RbD_2AsO_4 (DRDA)	178	(T) 21,4	—	—	—
CsH_2AsO_4 (CDA)	143	(T) 18,6	—	—	—
CsD_2AsO_4 (DCDA)		(T) 35,6	—	—	—
$NH_4H_2PO_4$ (ADP)	148*	(T) −6,6	23,1	(T) 15	66
		(S) 4,1	$r_{41} < 0$	(S) 14	59
$ND_4D_2PO_4$ (DADP)	242*	(T) 11,9	—	—	—
$NH_4H_2AsO_4$ (ADA)		(T) 9,2		—	—

* Антисегнетоэлектрический переход.

Таблица 34.2

Электрооптические свойства кристаллов типа ABO_3 [1]

Вещество (T_K, °K)	Симметрия	r_{ij}, 10^{-12} м/в	r_{ij}, 10^{-12} м/в	λ, мкм	ε_i
$LiNbO_3$ (1470)	3m	(T) $r_{33} = +32,2$	(T) $r_{42} = 6,8$	0,633	(T) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 78$
		(T) $r_{13} = +10$	(T) $r_{51} = 32$	0,630	(T) $\varepsilon_3 = 32$
		(T) $r_c = 18$			(S) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 43$
		(T) $r_c = 17$	(T) $r_{22} = 5,7$	1,15	(S) $\varepsilon_3 = 28$
		(T) $r_c = 16$	(T) $r_{22} = 3,1$	3,39	
		(S) $r_{33} = +30,8$	(S) $r_{22} = 3,4$	0,633	
		(S) $r_{13} = +8,6$	(S) $r_{51} = +28$	0,633	
		(S) $r_{33} = 28$	(S) $r_{22} = 3,1$	3,39	
		(S) $r_{13} = 6,5$	(S) $r_{51} = 23$		
$LiTaO_3$ (890)	3m	(T) $r_c = 22$		0,633	(T) $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 = 54$
		(S) $r_{31} = 30,3$	(S) $r_{51} = 20$	0,633	(T) $\varepsilon_3 = 46$
		(S) $r_{13} = 7$	(S) $r_{22} \approx 1$	0,633	(S) $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 = 41$
		(S) $r_{31} = 27$	(S) $r_{51} = 15$	3,39	(S) $\varepsilon_3 = 43$
		(S) $r_{13} = 4,5$	(S) $r_{22} = 0,3$	3,39	
$BaTiO_3$ (393)	4mm	(T) $r_c = 108$	(T) $r_{51} = 1040$	0,546	(T) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 3600$
		(S) $r_c = 23$	(S) $r_{51} = 820$	0,546	(T) $\varepsilon_3 = 135$
		(S) $r_c = 19$		0,633	(S) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 2300$
		(S) $r_{31} = 29$		0,633	(S) $\varepsilon_3 = 60$
		(S) $r_{13} = 8$		0,633	
$K_3Li_2Nb_5O_{15}$ (693)	4mm	(T) $r_{33} = 78$		0,633	(T) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 309$
		(T) $r_{13} = 8,9$		0,633	(T) $\varepsilon_3 = 100$

Вещество (T_K, °K)	Симметрия	r_{ik}, 10^{-10} м/в	r_{ik} 10^{-10} м/в	λ, мк	ε_i
$Sr_{0,75}Ba_{0,25}Nb_2O_6$ (~330)	4mm	(T) r_c = 1410 (T) r_{33} = 1340 (T) r_{13} = 67 (S) r_c = 1630	(T) r_{51} ∥ 42	0,633 0,633 0,633 0,633	ε_3 = 3400 (15 Мгц)
$Sr_{0,5}Ba_{0,5}Nb_2O_6$	4mm	(T) r_c = 218 (15 Мгц) r_c = 96		0,633 0,633	c_3 = 450 (15 Мгц)
$Sr_{0,25}Ba_{0,75}Nb_2O_6$ (~520)	4mm	(15 Мгц) r_c = 45		0,633	ε_3 = 116 (15 Мгц)
$KTa_xNb_{1-x}O_3$ (~330)	4mm	(T) r_c = 450	(T) r_{51} = + 50	0,633	
$PbTiO_3$ (765)	4mm	(S) r_{31} = 5,9 (S) r_{13} = 13,8		0,633 0,633	(S) ε_1 = 31
$KSr_2Nb_5O_{15}$ (433)	4mm или 4	(T) r_c = 130		0,633	(T) ε_k = 1000 (T) c_3 = 1200
$LiIO_3$ (сегнетоэлектр.)	6	(S) r_{33} = + 6,4 (S) r_{13} = + 4,1	(S) r_{41} = 1,4 (S) r_{51} = + 3,3	0,633 0,633	(T) c_3 = 594 (T) ε_1 = 65 (S) c_3 = 6,5 (S) ε_1 = 5
$Ba_2NaNb_5O_{15}$ (833)	mm2	(T) r_c = 34 (T) r_{33} = 48 (T) r_{13} = 15 (T) r_{23} = 13 (S) r_{33} = + 29 (S) r_{13} = 8 (S) r_{23} = 7	(T) r_{32} = 92 (T) r_{31} = 90 (S) r_{42} = 75 (S) r_{51} = 85	0,633 0,633 0,633 0,633 0,633 0,633 0,633	(T) ε_3 = 235 (T) ε_1 = 247 (T) c_3 = 51 (S) ε_3 = 222 (S) ε_1 = 227 (S) c_3 = 32

Таблица 34.3

Электрооптические свойства кристаллов типа AB [1]

Вещество	Симметрия	r_{ik}, 10^{-10} м/в	λ, мк	ε_i
CuCl	$\bar{4}3m$	(T) r_{41} = 3,6 (T) r_{41} = 3,2 (S) r_{41} = + 2,35 (S) r_{41} = + 2,20	0,633 10,6 0,633 3,39	(S) ε = 7,5
CuBr	$\bar{4}3m$	(T) r_{41} = 0,65	0,525	
ZnO	6mm	(S) r_{31} = + 2,6 (S) r_{13} = − 1,4 (S) r_{33} = + 1,9 (S) r_{42} = + 0,96	0,633 0,633 3,39 3,39	(S) ε_1 = ε_2 = 8,15 ≈ c_3
ZnS	$\bar{4}3m$	(T) r_{41} = 1,2 (T) r_{41} = 2,1 (S) r_{41} = 1,6 (S) r_{41} = 1,4	0,4 0,65 0,633 3,39	(T) ε = 16 (S) ε = 12,5 (T, S) ε = 8,3

Вещество	Симметрия	r_{ik}, 10^{-12} м/в	λ, мкм	ε_i
CdS	$6mm$	(T) $r_{41} = 4$ (T) $r_{51} = 3,7$ (T) $r_{61} = 5,6$ (S) $r_{31} = 2,4$ (S) $r_{41} = 1,1$	0,589 0,589 10,6 0,633 0,633	(T) $\varepsilon_2 = 10,33$ (T) $\varepsilon_1 = 9,35$ (S) $\varepsilon_1 = 9,02$ (S) $\varepsilon_2 = 9,53$
CdSe	$6mm$	(S) $r_{33} = 4,3$ (S) $r_{42} = 1,8$	3,39 3,39	(T) $\varepsilon_2 = 10,65$ (T) $\varepsilon_1 = 9,70$ (S) $\varepsilon_1 = 9,33$ (S) $\varepsilon_1 = 10,20$
CdTe	$\bar{4}3m$	(T) $r_{41} = 6,6$ (T) $r_{41} = 6,8$ (T) $r_{41} = 5,3$ (T) $r_{41} = 5,0$	3,39 10,6 23,35 27,35	(S) $\varepsilon = 9,4$
HgS	32	(S) $r_{11} = 3,1$ (S) $r_{41} = 1,4$ (S) $r_{31} = 4,2$ (S) $r_{41} = 2,4$	0,633 0,633 3,39 3,39	
ZnS	$6mm$	(S) $r_{33} = 1,6$ (S) $r_{33} = 1,7$ (S) $r_{13} = 0,9$	0,633 3,39 0,633	(T) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 8,7$ (S) $\varepsilon_1 = 8,7$
ZnSe	$\bar{4}3m$	(T) $r_{41} = 2,0$ (S) $r_{41} = 2,0$ (T) $r_{41} = 2,2$	0,546 0,633 10,6	(T) $\varepsilon = 9,1$ (S) $\varepsilon = 9,1$
ZnTe	$\bar{4}3m$	(T) $r_{41} = 4,45 \div 3,95$ (T) $r_{41} = 1,4$ (S) $r_{41} = 4,3$ (S) $r_{41} = 3,2$	0,60; 0,69 10,6 0,633 3,39	(T) $\varepsilon = 10,1$ (S) $\varepsilon = 10,1$
GaP	$\bar{4}3m$	(S) $r_{41} = -1,07 \div (-0,97)$	0,66; 3,39	(S) $\varepsilon = 12$ (S) $\varepsilon = 10$
GaAs	$\bar{4}3m$	(S) $r_{41} = 1,2$ (S) $r_{41} = -1,5$ (S + T) $r_{41} = 1,2 \div 1,6$ (T) $r_{41} = 1,0 \div 1,2$ (T) $r_{41} = 1,6$ (S) $r_{41} = 1,5$	0,9 1,08 3,39 1,0; 3,0 4,0; 12,0 10,6 10,6	(S) $\varepsilon = 13,2$ (S) $\varepsilon = 12,3$ (T) $\varepsilon = 12,5$

Таблица 34.4

Электрооптические свойства кристаллов различных типов [1]

Вещество	Сингония	r_{ijk}, 10^{-9} м/в	λ, мкм	n_i (λ, мкм)
$Bi_4(GeO_4)_3$	$\bar{4}3m$	(T) r_{41} = 1,03	0,45—0,62	n_0 = 2,07
$(CH_3)_2N_2(H_3MT$-тетиметилметилтриамин)	$\bar{4}3m$	(T) r_{41} = 0,71—0,8 (T) r_{41} = 0,76 (S) r_{41} < 0,14	0,546 0,633 0,633	n_0 = 1,591 (0,589) n_0 = 1,594 (0,633)
Гаусманит (минерал)	$\bar{4}3m$	(T) r_{41} < 0,04	0,633	n_0 = 1,495
$K_2Mg_2(SO_4)_3$	23	(T) r_{41} = 0,40	0,546	n_0 = 1,530 (0,560)
$(NH_4)_2Cd_2(SO_4)_3$	23	(T) r_{41} = 0,70	0,546	n_0 = 1,606 (0,589)
$(NH_4)_2Mn_2(SO_4)_3$	23	(T) r_{41} = 0,53	0,546	n_0 = 1,57 (0,589)
$Tl_2Cd_2(SO_4)_3$	23	(T) r_{41} = 0,37	0,546	n_0 = 1,790 (0,589)
$K_2Mn_2(SO_4)_3$	23	(T) r_{41} = 2,0	0,453—0,642	1,62 (0,45—0,65)
$Rb_2Mn_2(SO_4)_3$	23	(T) r_{41} = 1,9	0,453—0,642	1,60 (0,45—0,65)
$Tl_2Mn_2(SO_4)_3$	23	(T) r_{41} = 2,1	0,453—0,642	1,60 (0,45—0,65)
$K_2Ni_2(SO_4)_3$	23	(T) r_{41} = 1,0	0,453—0,642	1,70 (0,45—0,65)
$NaClO_3$	23	(T) r_{41} = 0,4	0,589	n_0 = 1,515
$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$	23	(T) $n_1^3 r_{41}$ = 5,66 (T) $n_1^3 r_{41}$ = 5,62	0,42 1,06	
Уранилацетат натрия	23	(T) r_{41} = 0,87	0,546	n_0 = 1,507 (0,546)
$LiKSO_4$	6	(T) $r_{\perp}$ = 1,6	0,546	$n_0 = n_1 = n_2$ = 1,474 (0,546)
$LiNaSO_4$	3m	(T) r_{33} < 0,02	0,546	n_3 = 1,495 $n_1 = n_2$ = 1,490
Турмалин	3m	(T) r_{22} = 0,3 (S) $r_{22} = r_{33}$ = 1,7	0,589 0,633	n_3 = 1,63 $n_1 = n_2$ = 1,63
$Na_2Li(CrO_4)_2 \cdot 6H_2O$	3m	(T) r_{22} = 0,02 (T) r_{33} = 0,82 (T) r_{13} = 0,77	0,50 0,52 0,60	$n_3 = n_2$ = 1,643 (0,60) $n_1 = n_2$ = 1,635 (0,52) $n_1 = n_2$ = 1,612 (0,60)
Ag_3AsS_3 (пруститит)*	3m	(S) $(n_1^3 r_{13} - n_3^3 r_{33})$ = 70 (S) $n_1^3 r_{22}$ = 29	0,633 0,633	n_3 = 3,02 (0,633) n_3 = 2,74 (0,633)
$K_2S_2O_6$	32	(T) r_{11} = 0,26	0,546	n_3 = 1,5118 $n_1 = n_2$ = 1,466
$Cs_2C_4H_4O_6$	32	(T) r_{11} = 1,0	0,546	n_3 = 1,546 $n_1 = n_2$ = 1,564
$SrS_2O_6 \cdot 4H_2O$	32	(T) r_{11} = 0,1	0,546	n_3 = 1,528 $n_1 = n_2$ = 1,522
Se^{2+}	32	(S) $n_1^3 r_{11}$ = 89 (S) r_{41} = 2,5	1,15 10,6	n_1 = 2,737 (1,15) n_2 = 3,573 n_1 = 2,64 (10,6) n_2 = 3,41
SiO_2 (кварц)[5,6]	32	(T) r_{11} = −0,67 (T) r_{41} = 0,20 (S) r_{11} = 0,23 (S) r_{41} = 0,29 (S) r_{41} = 0,174	0,400—0,005 0,633 0,633 0,633 0,633	n_3 = 1,555 (0,546) $n_1 = n_2$ = 1,546 (0,546)
$(C_6H_{12}O_6)_2$ NaBr·H_2O	32	(T) r_{11} = 0,1	0,546	n_3 = 1,560 (0,546)
$AgGaS_2$[4]	$\bar{4}2m$	(T) r_{63} = 3,0 (T) r_{41} = 4,0	0,633 0,633	$n_1 = n_2$ = 2,66 (0,633) n_1 = 2,50
$Gd_2(MoO_4)_3$[7]	$\bar{4}2m$	(T) $n_1^3 r_{41}$ = 17 (450°K)	0,633	$n_1 = n_2$ = 1,528 $n_3 = n_4$ = 1,848 (0,633)
$CdGa_2S_4$	$mm2$ $\bar{4}$	(T) $n_1^3 r_{13} = n_2^3 r_{31}$ = 17,5 (300°K) (T) r_{13} = 0,37 r_{63} = 3,5	0,633 0,50 0,50	n_3 = 1,901 (0,633) $n_1 = n_2$ = 2,3 (0,50)
$(NH_4)_2C_2O_4 \cdot H_2O$	222	(T) r_{41} = 230 (T) r_{52} = 330 (T) r_{63} = 250 (T) r ≪ 250 (S) r_{63} ≈ 2	0,633 0,633 0,633 0,633 0,633	n_1 = 1,437 (0,66) n_2 = 1,547 n_3 = 1,590

Вещество	Симметрия	r_{ik}, 10^{-12} м/в	λ, мкм	n_i (λ, мкм)
$NaNO_2$[*]	$mm2$	(T) $r_{22} - \left(\frac{n_3}{n_2}\right)^3 r_{32} = 4{,}1$	0,546	$n_1 = 1{,}347$ (0,546)
		(T) $r_{32} - \left(\frac{n_1}{n_3}\right)^3 r_{12} = 4{,}2$		$n_2 = 1{,}415$
		(T) $r_{22} - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 r_{12} = 0{,}6$		$n_3 = 1{,}601$
		(T) $r_{43} = -1{,}9$		
		(T) $r_{41} = -3{,}0$		
$C(CH_2OH)_4$	2	(T) $r_{32} = 1{,}45$	0,46—0,70	$n_1 = 1{,}528$
		(T) $\lvert r_{12} - r_{32} \rvert = 0{,}7$	0,46—0,70	$n_2 \approx n_3 = 1{,}56$
$Ca_3Nb_2O_7$	2	(T) $\left\lvert r_{22} - \frac{n_1^3}{n_2^3} r_{12} \right\rvert = 12$	0,63	$n_1 = 1{,}97$
		(T) $\left\lvert r_{23} - \frac{n_3^3}{n_2^3} r_{32} \right\rvert = 14$	0,63	$n_2 = 2{,}16$
		(S) $\left\lvert r_{22} - \frac{n_3^3}{n_2^3} r_{32} \right\rvert = 13$	0,63	$n_3 = 2{,}17$
		(S) $r_{12} = 6{,}7$	0,63	
		(S) $r_{23} = 25{,}5$		
		(S) $r_{32} = 6{,}4$		
		(S) $r_{31} = 2{,}7$		
		(S) $r_{42} \lesssim 0{,}6$		
		(S) $r_{41} = 0{,}9$		

[*] Прозрачен от 0,6 до 15 мкм; $n_1 = n_3 = 20$; $\rho = 80$ ом·см.
[**] Граница прозрачности ~ 8 мкм; $n_1 \approx 8$.
[***] $r_{23} < 0$ и $r_{41} > 0$ в левовращающем кварце.
[****] (S) $n_1 = 14$, (S) $r_1 = 70$.
[*****] $T_K = 425°K$, $n_1 = 8$.
[******] n_1, кривые поляризации сошли, начиная с λ=10 при 425°K; (S) $n_1 = 5$, $n_2 = 4$, $n_3 = 6$.

34.2 ЛИНЕЙНЫЙ МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ (ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ)

Поворот плоскости поляризации света, распространяющегося в среде, находящейся во внешнем магнитном поле, называется линейным магнитооптическим эффектом или эффектом Фарадея. В пара- и диамагнитных материалах угол поворота плоскости поляризации ϕ_F дается соотношением

$$\phi_F = VHl \cos\gamma, \qquad (1)$$

где V — постоянная Верде, зависящая от природы вещества, частоты света и температуры; H — напряженность приложенного магнитного поля; l — длина пути луча в веществе; γ — угол между направлением приложенного поля и направлением распространения луча.

В ферромагнитных материалах магнитное поле в выражении для ϕ_F заменяется на намагниченность M, а постоянная Верде на постоянную Керра K. В таблицах обычно приводится характерное для ферромагнетиков значение вращения при насыщенной намагниченности M_s, определяемое как удельное фарадеевское вращение плоскости поляризации для света, распространяющегося вдоль M_s, т. е.

$$F = KM_s \qquad (2)$$

При рассмотрении магнитооптических характеристик веществ необходимо учитывать ослабление излучения при распространении его в вращающей среде. Для характеристики качества различных магнитоактивных сред служит величина $2F/\alpha$, где α — коэффициент ослабления или поглощения в законе $I = I_0 \exp(-\alpha l)$.

К соотношениям (1) и (2) применимо обычное правило правой руки. Так, положительные φ_F и F соответствуют случаю, когда свет распространяется вдоль направления магнитного поля и плоскость поляризации вращается по часовой стрелке.

В табл. 34.6 – 34.7 — приняты обозначения:

Температура Кюри	T_K
Температура фазового перехода	T_P
Температура Нееля	T_N
Температура компенсации	$T_{комп}$
Индукция насыщения при 0°К, гс	$4\pi J_s$
Удельное фарадеевское вращение, град/см	F
Коэффициент поглощения, см⁻¹	α
Характеристика качества, град	$2F/\alpha$
Длина волны излучения, мк	λ
Объемноцентрированный куб	о.ц.к.
Гексагональная плотная упаковка	г.п.у.
Гранецентрированный куб	г.ц.к.

Таблица 34.5

Характеристики ферромагнитных, ферримагнитных и антиферромагнитных веществ [2]

Вещество	Структура кристалла	Критическая температура, °К	$4\pi J_s$, гс	F, $10^5 \frac{град}{см}$	α, 10^5 см⁻¹	$2F/\alpha$, град	T, °К	λ, мк
Металлы переходной группы								
Fe	о.ц.к.	$T_K = 1043$	21 800	3,5	7,6	0,59	300	546
				5,1	3,2	3,1	300	1000
				4,4	6,5	1,4	300	500
				6,5	5	2,6	300	1000
				7	4,2	3,3	300	1500
				7	3,5	4,0	300	2000
Co	г.п.у.	$T_K = 1390$	18 200	3,6	8,5	0,85	300	546
				2,9	—	—	300	400
				5,5	6,1	1,8	300	1000
				5,0	4,6	2,4	300	1500
				4,8	3,6	2,7	300	2000
Ni	г.ц.к.	$T_K = 633$	6 400	0,99	8,0	0,25	300	546
				7,2	4,2	3,4	300	1000
				0,8	—	—	300	500
				2,6	5,8	0,9	300	1500
				1,5	4,6	0,6	300	5000
				1	4,1	0,25	300	2000
Ni* (монокристалл)				0,79	—	—	300	546
				0,86	—	—	300	546
				0,97	—	—	300	546
Бинарные соединения и сплавы								
Пермаллой	г.ц.к. Ni : Fe % 82 : 18	$T_K = 800$	10 700	1,2	6	0,4	300	500
CrTe	NiAs	$T_K = 334$	1 016	0,5	2,0	0,5	300	500
				0,4	1,2	0,7	300	900
				0,4	0,6	1,3	300	2500
MnAs	NiAs	$T_K = 313$		0,44	5,0	0,174	300	500
				0,49	4,9	0,200	300	600
				0,59	4,6	0,26	300	700
				0,78	4,5	0,34	300	800
				0,62	4,4	0,28	300	900

* Направление световой волны соответственно вдоль ⟨100⟩, ⟨110⟩ и ⟨111⟩.

Вещество	Структура или состав	Критическая температура, °К	$4\pi M_s$, гс	ρ, 10^{-6} $\frac{эрг/см^3}{см}$	n, 10^{18} см$^{-3}$	$\frac{\Delta E_g}{эрг/см^3}$	T, °К	λ, мм
MnBi	NiAs	T_K — 629	7 700	1,9	6,1	1,4	300	450
			(7 500 при 300° К)	5,0	5,9	1,7	300	500
				7,0	6,1	2,8	300	600
				7,7	4,5	3,4	300	700
				7,8	4,3	3,5	300	800
				7,5	4,2	3,6	300	900
				7,4	4,1	3,6	300	1000
		T_K — 453	15000 при 300° К	3,2	6,1	1,0	300	450
				3,3	5,9	1,1	300	500
				3,3	5,1	1,3	300	600
				3,3	4,7	1,4	300	700
				3,3	4,5	1,4	300	800
				3,2	4,4	1,4	300	900
				3,2	4,4	1,4	300	1000
FeRh	—	T_p — 335		0,9	3,3	0,06	346	700
Ni + Fe	100 : 0		6 000	1,2	7,05	0,34	300	632,8
	90 : 10		8 400	1,6	7,14	0,45	300	632,8
	80 : 20		10 800	2,2	7,10	0,62	300	632,8
	70 : 30		12 900	2,7	7,0	0,77	300	632,8
	60 : 40		14 900	2,9	7,54	0,77	300	632,8
	50 : 50		16 000	2,8	8,10	0,69	300	632,8
	40 : 60		14 400	2,2	8,17	0,54	300	632,8
	30 : 70		8 000		8,17	—	300	632,8
	20 : 80		19 400	3,3	8,1	0,81	300	632,8
	10 : 90		20 800	3,6	8,13	0,89	300	632,8
	0 : 100		21 600	3,5	8,13	0,86	300	632,8
	35 : 65		12 400	2,1	7,7	0,55	300	400 — 700

Вещество	Структура или состав	Критическая температура, °К	$4\pi M_s$, гс	ρ, $\frac{эрг/см^3}{см}$	n, см$^{-3}$	$\frac{\Delta E_g}{эрг/см^3}$	T, °К	λ, мм
Ферриты								
$Li_{0,5}Fe_{2,5}O_4$	—	—		440	150	6	300	1500
				—190	130	3	300	2000
				+10	85	0,2	300	3000
				+85	60	3	300	4000
				+110	44	5	300	5000
				+125	44	6	300	6000
				+135	60	3	300	7000
$MgFe_2O_4$	—	—	—	—60	100	1	300	2500
				—40	40	2	300	3000
				0	12	0	300	4000
				+30	4	15	300	5000
				+35	6	11	300	6000
				+50	13	8	300	7000
$CoFe_2O_4$	Шпинель	T_N = 793	4900	$2,75 \cdot 10^7$	$12 \cdot 10^7$	0,5	300	280
				$3,8 \cdot 10^7$	$14 \cdot 10^7$	0,5	300	330
				$3,6 \cdot 10^7$	$17 \cdot 10^7$	0,4	300	400
				$1,3 \cdot 10^7$	$13 \cdot 10^7$	0,2	300	500
				$-2,5 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^7$	0,8	300	600
$NiFeO_4$	Шпинель	T_N — 858	3350	$2,0 \cdot 10^7$	$5,9 \cdot 10^7$	0,7	300	286
				$2,4 \cdot 10^7$	$7,4 \cdot 10^7$	0,7	300	330
				$-0,75 \cdot 10^7$	$16 \cdot 10^7$	0,09	300	400
				$-1,0 \cdot 10^7$	10^7	0,2	300	500
				$+0,12 \cdot 10^7$	10^7	0,2	300	660
				—120	38	5	300	1500
				+40	32	2,5	300	2000
				+75	15	10	300	3000
				+110	15	15	300	4000
				+110	52	7	300	5000

Вещество	Структура или состав	Критическая температура, °К	$4\pi M_s$, гс	σ, $\frac{\text{эрг}}{\text{см}}$	α, см$^{-1}$	$2K/\alpha$, эрг	T, °К	λ, нм
YIG	Гранат	$T_N = 560$	2500	240	0,069	$7 \cdot 10^4$	300	1200
				2100	1500	3,2	300	555
				1750	1350	2,6	300	568
				1250	1400	1,8	300	620
				800	1150	1,4	300	667
				500	670	2,7	300	715
				750	450	3,3	300	770
				175	$< 0,08$	$> 3 \cdot 10^4$	300	5000—1500
$BaFe_{12}O_{19}$	Гексагональная	—	—	—50	—38	3	300	2000
				+75	20	7,5	300	3000
				+130	13	20	300	4000
$BaFe_{12}O_{19}$	Гексагональная			+150	20	15	300	5000
				+160	20	10	300	6000
				+165	22	15	300	7000
$Ba_2Zn_2Fe_{12}O_{22}$	Гексагональная	—	—	+90	120	1,5	300	5000
				+80	70	2	300	6000
				+75	65	2	300	7000
				+70	85	2	300	8000
GdIG	Гранат	$T_N = 564$	7300	—2000	6000	0,6	300	500
		$T_{co} = 286$		—1060	900	2,3	300	600
				—450	600	2,3	300	700
				—300	100	6	300	800
				—220	230	1,9	300	900
				—80	70	2,3	300	1000
Фториды								
FeF_3^*	—	$T_K = 365$	40 (300°К)	670	14	95	300	340
				415	6,2	101	300	404
				180	4,4	82	300	522,5
$RbNi_{0,75}Co_{0,25}F_3^*$	Перовскит	$T_N = 100$	...	180	9	60	77	600
$RbFeF_3^*$	Перовскит	$T_P = 102$	—	3400	7	900	82	300
				1700	3	1100	82	400
				950	4,6	410	82	500
				620	1,5	830	82	600
				420	1,2	700	82	700
				300	2,5	240	82	800
$RbNiF_3^{2*}$	Перовскит	$T_N = 290$	1250	360	35	20	77	450
				210	12	35	77	500
				70	10	14	77	600
				—70	30	5	77	700
				310	70	9	77	800
				100	60	3	77	900
				75	25	6	77	1000
Трихлориды								
$CrCl_3$	BiI_3	$T_K = 15,8$	3880	2000	200	20	1,5	410
				—500	300	3	1,5	450
				—1000	70	30	1,5	590

* Имеется сильное естественное двулучепреломление.
** Измерено вдоль оси [111].

Вещество	Структура или состав	Критическая температура, °К	σM_s, ат	F, $\frac{эрг/см^3}{см}$	α, $см^{-1}$	$2F/\alpha$, эрг/см²	T, °К	λ, нм
$CrBr_3$	BiI_3	$T_K = 32,5$	3990	$3 \cdot 10^5$ $1,6 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$ $1,4 \cdot 10^4$	200 23	 1,5	478 500
CrI_3	BiI_3	$T_K = 68$	2990	$1,1 \cdot 10^5$ $0,6 \cdot 10^5$	$6,3 \cdot 10^5$ $3 \cdot 10^5$	35 53	1,5 1,5	970 1030
Бораты $FeBO_3^{27}$	Кальцит	$T_K = 348$	115 (300°К)	3200 2300 1100 450	140 40 100 38	45 115 22 24	300 300 300 300	500 525 600 700
Халькогениды								
EuO	NaCl	$T_c = 69$	23 700	$-1,0 \cdot 10^5$ $1,2 \cdot 10^5$ $3 \cdot 10^5$ $3,6 \cdot 10^5$ $0,5 \cdot 10^5$ $3 \cdot 10^5$ 680	$0,5 \cdot 10^5$ $7,0 \cdot 10^3$ $9,7 \cdot 10^5$ $9,7 \cdot 10^5$ $7,8 \cdot 10^5$ $\geq 0,5$ $\geq 1,0$	40 8,5 10 7,5 1,3 $\sim 10^5$ ~ 1300	5 5 5 6 5 20 20	1100 800 700 600 500 2500 10600
EuS	NaCl	$T_c = 16,3$	—	$-1,6 \cdot 10^5$ $-0,6 \cdot 10^5$ $5,5 \cdot 10^5$ $6,1 \cdot 10^5$	~ 0 $3,3 \cdot 10^4$ $1,2 \cdot 10^5$ $1,0 \cdot 10^5$	— 58 92 10	6 6 6 6	825 690 565 495
EuSe	NaCl	$T_c = 7$	13 200	$1,45 \cdot 10^5$ $1,17 \cdot 10^5$ $0,95 \cdot 10^5$	60 70 60	3600 3340 3170	4,2 4,2 4,2	750 775 800

Вещество	σM_s, ат		F (эрг/см) при γ (см)						γ, $см^{-1}$ или λ—1250 нм
			700	800	1000	1200	1400	1600	
Ортоферриты*									
$EuFeO_3$	88	E оси	8600	2200	1000	800	700	600	~ 38
$GdFeO_3$	94								~ 10
$TbFeO_3$	137								~ 29
$DyFeO_3$	128								~ 90
$HoFeO_3$	91								~ 10
$ErFeO_3$	81								~ 15
$TmFeO_3$	140								~ 5
$YbFeO_3$	143								12,5
$LuFeO_3$	119								~ 5
$SmFeO_3$	54	‖ оси	3400	700	400	300	200	150	~ 50
$YFeO_3$	105								~ 10
$LaFeO_3$	83								~ 10
$PrFeO_3$	71								~ 35
$NdFeO_3$	62								~ 10

* Все ортоферриты обладают малым естественным двоякопреломлением.

Парамагнитные вещества [2]

Кристалл	Ион	Концентрация, %	T, °K	λ, нм	V, $\frac{Мрад}{м \cdot сек}$	α, см⁻¹	V/α
Ионы редких земель в кристаллах							
CaF_2	Eu^{2+}	3	4,2	470	29	11,5	2,5
			1,2	440	22	1,8	12
CaF_2	Nd^{3+}	2,9	4,2	426,4	0,19	5	0,01
EuF_2	Eu^{2+}		300	450	1,5	20	0,2
		—	300	500	2,6	7	0,4
			300	550	1,6	6	0,3
			300	600	1,1	5,5	0,2
			300	630	0,8	5	0,16

Вещество	T, °K	λ, нм	V, $\frac{км}{сек}$	λ см. спл, Å	
				100 см⁻¹	1 см⁻¹
Перовскиты (оксиды)					
$SrTiO_3$	298	413	0,78	368	413
		496	0,31	—	—
		620	0,14	—	—
		896	0,066	—	—
$BaTaO_3$	303	427	0,95	390	446
		496	0,38	—	—
		620	0,18	—	—
		896	0,072	—	—
$KTaO_3$	298	332	0,44	327	370
		413	0,19	—	—
		496	0,096	—	—
		620	0,051	—	—
		896	0,022	—	—

Вещество	T, °K	V, мрад/(м · сек), при λ, нм							
		406	413	491	589	546	578	633	620
Редкоземельные гранаты									
TbAlG*	300	2,226	—1,565	—1,230	—1,000	0,912	—0,787	—0,620	0,542
	77	—			—3,125	—3,061	—2,603	2,006	—1,816
	4,2		—102,16	—83,15	—64,90	—68,76	—53,77	—48,30	—45,15
	1,45	—	—200,96	172,52	—139,28	125,07	—111,27	—97,47	—93,42
DyAlG	300	—1,241	—0,942	—0,803	—0,667	—0,568	—0,518	0,411	—0,339
HoAlG	300	—0,709	—0,320	—0,260	—0,335	—0,304	—0,259	—	—0,206
ErAlG	300	—0,180	0,240	—0,154	—0,109	0,157	—0,146	—0,105	—0,089
TmAlG	300	+0,151	+0,103	+0,093	0,076	+0,069	+0,059	+0,046	—
YbAlG	298	0,287	0,215	0,186	0,140	0,133	0,116	0,091	—
	77	0,718	0,510	0,481	0,393	0,342	0,302	0,239	—

* a = Å, 0,0 см⁻¹ при T = 300°K.

Таблица 34.7

Магнитооптические свойства стекол [2]

Стекло	Мольная концентрация, %				V, мин/(э·см), при T=320 K для λ, нм									
	Fe^{2+}	FeO	Al_2O_3	B_2O_3	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850
Европиевое	12,9	14,4	15,3	70,2	0,533	0,341	−0,282	−0,162	−0,104	−0,076	−0,061	−0,049	−0,042	−0,032
	14,7	16,5	11,2	72,0	−0,748	−0,400	−0,327	−0,159	0,131	−0,090	−0,070	−0,055	−0,046	−0,038
	17,0	20,0	13,4	66,2	−1,18	−0,675	−0,525	−0,258	−0,206	−0,149	0,113	0,091	−0,072	−0,060
	26,7	29,9	11,0	60,0	—	−1,27	−0,980	−0,523	−0,367	−0,258	−0,191	−0,158	−0,129	−0,110
	30,5	34,2	14,6	50,7	—	—	−2,55	−1,35	−0,721	−0,478	−0,360	−0,268	−0,225	−0,174

Стекло	Состав*		V, мин/(э·см), при T=320 K для λ, нм									
	R	x	405	415	450	500	550	590	600	625	650	670
Боратные с ионами редкоземельных элементов	La	3,04	0,043	0,036	0,029	0,026	0,023	0,022	0,019	0,018	0,016	0,014
	Pr—La	3,41	0,380	−0,307	−0,230	−0,220	−0,214	0,178	−0,153	−0,146	−0,128	−0,110
	Nd—La	3,41	−0,180	−0,147	−0,120	−0,111	−0,096	−0,094	−0,080	−0,059	−0,056	−0,036
	Sm—La	4,97	0,032	0,030	0,026	0,024	0,022	0,019	0,017	0,016	0,014	0,010
	Eu—La	4,60	−0,081	−0,068	−0,036	−0,033	−0,029	−0,024	0,019	−0,016	−0,014	−0,012
	Gd—La	4,71	0,032	0,026	0,024	0,022	0,021	0,020	0,018	0,017	0,015	0,013
	Tb—La	4,73	−0,512	0,419	−0,319	0,285	−0,262	−0,234	0,205	−0,186	−0,167	−0,142
	Dy—La	4,66	−0,436	−0,361	−0,299	−0,273	−0,246	−0,220	−0,192	−0,177	0,159	−0,138
	Ho—La	4,36	−0,269	0,252	−0,123	−0,131	−0,112	−0,128	−0,102	−0,096	—	−0,074
	Er—La	4,60	−0,096	−0,078	−0,068	−0,062	—	−0,045	−0,042	−0,040	−0,035	−0,034
	Tm—La	4,75	0,060	0,046	0,039	0,034	0,031	0,025	0,023	0,021	0,016	0,016
	Yb—La	8,58	0,115	0,094	0,073	0,066	0,060	0,054	0,046	0,043	0,037	0,033
	Tb—Pr	4,99	−0,940	−0,766	−0,560	0,520	−0,469	−0,436	−0,380	−0,348	−0,306	−0,265
	Dy—Pr	4,63	−0,850	—	—	−0,497	−0,465	−0,413	−0,358	−0,332	−0,290	−0,252
	Pr	2,56	−0,843	−0,646	−0,471	−0,480	−0,432	−0,390	−0,334	−0,317	−0,271	−0,243

* Состав: для La и Pr: $R_2O_3 \cdot x\,B_2O_3$;
для Tb—Dy и Dy—Dy: $R_2^{III}O_3 \cdot R_2^{III}O_3 \cdot x\,B_2O_3$;
для других $R_2O_3 \cdot 0{,}55\,Li_2O \cdot x\,B_2O_3$.

Продолжение табл. 34.7

Стекло	Состав, мольное содержание, %					V, мм/(л·ат) для λ, мк									T, °K
						365	404	546	650	701	800	900	1100	1250	1800	
Алюмосиликат																
Празеодимовый	Pr_6O_{11}	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Sb_2O_3	−1,04	−0,760	−0,350	−0,238	−0,196	−0,147	−0,112	−0,067	−0,051	−0,035	296
	58	25	12	4	1	−3,42	−2,51	1,16	0,780	−0,655	−0,499	−0,371	−0,228	−0,183	−0,138	77,4
Диспрозиевый	Dy_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Sb_2O_3	−0,683	−0,676	−0,337	−0,231	−0,189	—	—	—	—	—	295
	58	25	12	4	1	−3,34	−2,58	−1,28	−0,864	−0,724	—	—	—	—	—	77,4
Тербиевый	Tb_4O_7	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Sb_2O_3	−1,17	−0,857	−0,390	−0,264	−0,216	−0,159	−0,120	−0,074	−0,059	−0,047	295
	58	25	12	4	1	−4,34	−3,20	−1,42	0,978	0,800	−0,593	−0,450	−0,281	−0,[illegible]	−0,182	77,4

Стекло	Состав*		V, мм/(л·ат), при T = 303°K для λ, мк									
	R	x	405	435	450	500	520	546	570	600	630	670
Фосфатное стекло с ионами редкоземельных элементов (R)*	La		0,037	0,030	0,024	0,022	0,020	0,018	0,016	0,014	0,013	—
	Ce	2,67	−0,672	−0,540	−0,386	−0,326	−0,267	−0,253	−0,217	−0,197	−0,173	−0,150
	Pr	3,09	−0,447	−0,332	−0,283	−0,251	0,236	−0,208	0,182	−0,170	−0,150	−0,132
	Nd	2,92	−0,250	−0,209	−0,167	−0,155	−0,136	−0,134	−0,094	−0,080	−0,080	−0,071
	Sm	2,87	0,026	0,024	0,020	0,020	0,017	0,015	0,014	0,012	0,011	0,010
	Eu	2,93	−0,025	−0,017	−0,010	−0,006	−0,006	−0,005	−0,004	−0,003	−0,002	−0,002
	Gd	3,01	0,018	0,015	0,014	0,012	0,012	0,011	0,011	0,010	0,009	0,009
	Tb	2,94	−0,500	−0,408	−0,357	0,322	−0,295	−0,261	−0,226	−0,206	−0,190	−0,164
	Dy	2,51	−0,540	−0,458	−0,339	−0,331	−0,301	−0,256	−0,237	−0,217	−0,197	−0,173
	Ho	2,94	−0,299	0,313	−0,156	−0,153	−0,138	−0,138	−0,119	−0,110	−0,098	−0,084
	Er	3,01	−0,139	−0,121	−0,100	−0,111	−0,095	−0,062	−0,050	−0,057	−0,061	−0,044
	Tm	2,79	0,015	0,013	0,012	0,009	0,008	0,006	0,005	0,004	0,004	0,007
	Yb	3,01	0,087	0,072	0,056	0,060	0,045	0,041	0,038	0,032	0,029	0,024

* Состав: $R_2O_3 \cdot x\,P_2O_5$.

Таблица 34.8

Постоянные Верде V для жидкостей [3]

Жидкость	λ, нм	T, °C	V, 10^{-6} $\frac{\text{мин}}{\text{ат·см}}$
H_2O	546	20	1,54
	578	20	1,37
	589	20	1,307
HCl	589	20	2,24
CCl_4	578	20,5	1,68
N_2	589	−19	0,415
NH_3	578	−40	1,73
N_2O	589	−122	5,54
O_2	589	−18	0,782
PCl_3	578	95	3,05
SO_2	578	−10	1,87
$Ni(CO)_4$	578	17	7,35
Br_2	700	0	5,3
BeH	589	20	3,43
$SiCl_4$	589	16	1,89
HI	589	20	6,13

Таблица 34.9

Постоянные Верде для органических соединений [3]

Вещество	λ, нм	T, °C	V, 10^{-6} $\frac{\text{мин}}{\text{ат·см}}$
C_3H_{12}	578	−10	1,179
C_5H_{12}	589	20	1,1400
C_6H_{14}	589	25	1,240
C_8H_{18}	578	20	3,10
C_7H_{16}	589	20	1,2946
C_9H_{20}	589	15	2,47
$C_{10}H_{18}$	589	20	1,3785
$C_{10}H_{20}$	589	15	3,82
$C_{12}H_{26}$	589	15	3,22
CH_3I	578	18	3,53
$CHCl_3$	578	18	1,67
CCl_4	578	20	1,68
C_6H_5Cl	589	25	2,891
C_6H_5Br	589	25	3,25
CH_4O	589	26	0,9716
C_2H_6O	589	15,9	1,13
C_5H_5N	589	15,2	2,44
C_7H_9N	589	15	4,14

34-3. КВАДРАТИЧНЫЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ (ЭФФЕКТ КЕРРА)

Квадратичный электрооптический эффект, или эффект Керра — появление двойного лучепреломления у изотропного вещества в однородном электрическом поле. Внешнее электрическое поле $\mathbf{E}$ ориентирует молекулы, обладающие электрическим моментом (дипольным, квадрупольным и т. п.), в результате возникает анизотропия и показатели преломления $n_\parallel$ (вдоль поля) и $n_\perp$ (перпендикулярно полю) становятся различными: $n_\parallel - n_\perp = KnlE^2$, разность хода необыкновенного и обыкновенного лучей равна $\Delta = KnlE^2$, здесь K — постоянная Керра, n — показатель преломления в отсутствие поля, l — длина оптического пути.

Эффект Керра, вызванный электрическим полем световой волны, называют высокочастотным. Значение постоянной Керра зависит от природы вещества, частоты света и температуры.

Таблица 34.10

Значения постоянной Керра K для газов при давлении $P = 760$ мм рт. ст. и длине волны $\lambda = 546$ нм [3]

Газ	T, °C	K, 10^{-14} м/в²	Газ	T, °C	K, 10^{-14} м/в²
H_2	34,5	0,045	C_2H_6	0	0,85
O_2	0	0,46	C_2H_4	0	1,06
N_2	0	0,30	$(CH_3)_2O$	18	−5,0
	22	0,14	$(C_2H_5)O$	62,7	−3,9
Cl_2	24	2,3	CH_3Cl	18	36,5
CO_2	17,5	1,5	C_2H_5Cl	18	55,2
N_2O	56,7	21,6	$CHCl_3$	89,5	−7,7
	26	3,08	$CH_3O\times$	108,5	4,7
HCl	18	6,76	$\times CH_2Cl$		
H_2S	18	1,59	$(CH_3)_2CO$	88,1	32,1
NH_3	17,5	3,48	C_6H_6	113,6	5,56
HCN	20	98,0	$C_6H_5CH_3$	137,7	9,0
SO_2	18	−9,4	C_6H_5Cl	153,7	37,2
CH_4	0	0,24	$C_6H_5NO_2$	236,5	146
C_2H_4	0	0,67			

Таблица 34.11

Значения постоянной Керра для жидкостей при длине волны $\lambda = 546$ нм [3]

Жидкость	T, °K	K, 10^{-12} м/в²	Жидкость	T, °K	K, 10^{-12} м/в²
O_2	90	10,1	o-$C_6H_4(CH_3)_2$	293	5,48
N_2	71,4	4,02	$(C_2H_5)_2O$	293	−2,63
CS_2	293	12,1	$CHCl_3$	293	11,6
C_6H_{12}	293	0,227	C_6H_5Cl	293	40,7
C_6H_6	293	1,46	$C_6H_5NO_2$	293	1410

34-4. ПЬЕЗООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Пьезооптический эффект, или эффект фотоупругости, состоит в изменении показателя преломления вещества в результате влияния внешних статических или переменных механических напряжений.

Связь между изменением индикатрисы показателя преломления $\Delta(1/n^2)_{ij}$ и тензором механических напряжений S_{kl} определяется упругооптическим тензором p_{ijkl} четвертого ранга. Так как $(1/n^2)_{ij}$ и S_{kl} симметричны и безразмерны, то элементы тензора p_{ijkl} также безразмерны и в силу симметрии по парам индексов (ij) и (kl) можно использовать упрощенную запись

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^{6} p_{ij}S_{j};\quad i,\ j = 1, 2, \ldots 6,$$

применяя для пар индексов (ij) и (kl) стандартные обозначения: 1 вместо (11), 2 вместо (22), 3 вместо (33) и 4, 5, 6 соответственно вместо (23) и (32), (13) и (31), (12) и (21).

Фотоупругие свойства различных веществ для материалов различных точечных групп симметрии (рис. 34.1) приведены в табл. 34.12.

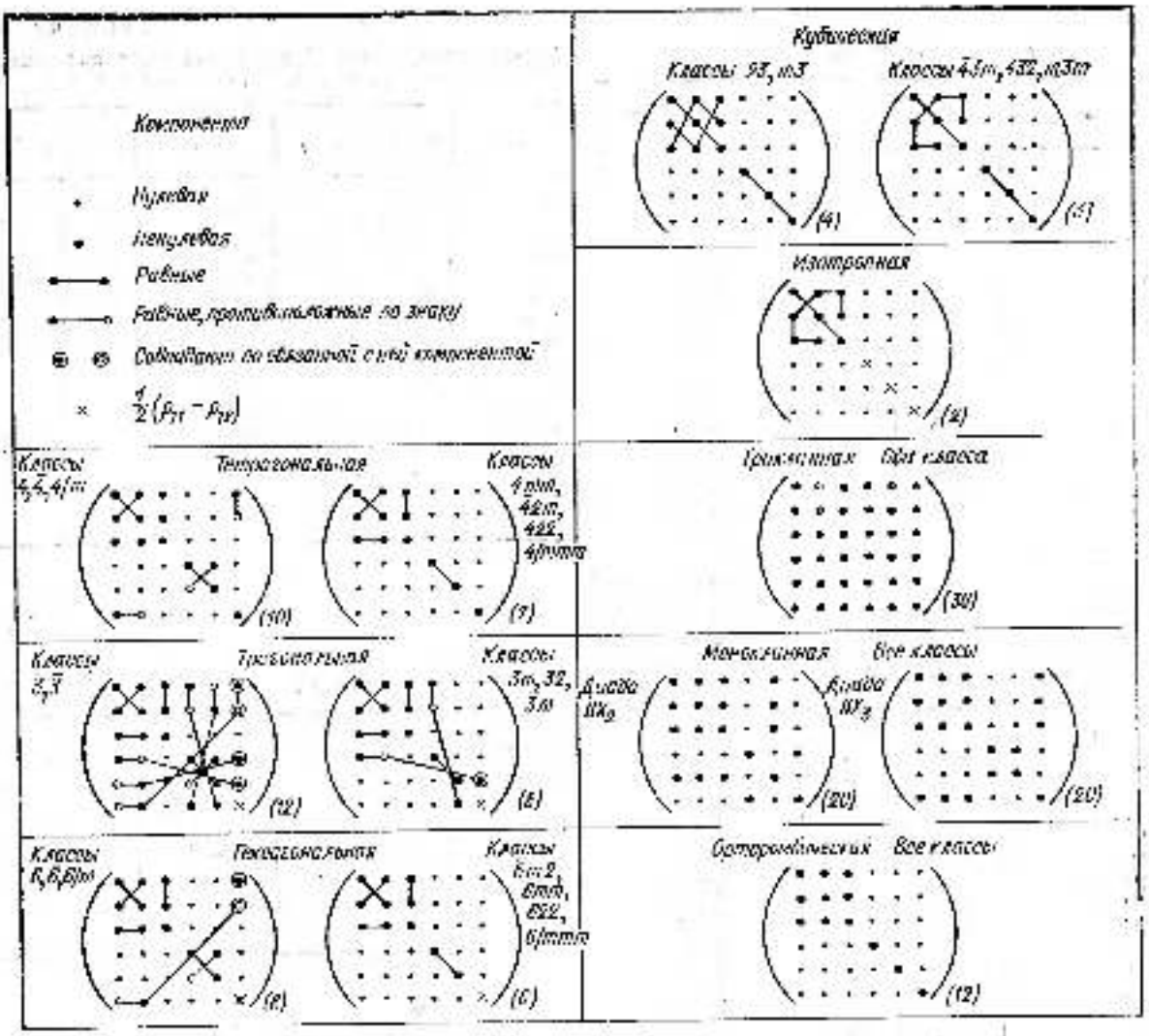


Рис. 34.1. Формы упругооптических тензоров (по системам [4]).

Таблица 34.12

Фотоупругие свойства веществ по системам [4]

Все измерения выполнены при $T = 200°$ К. Средняя погрешность для $P_{ij} \pm 5\%$. Если знак не указан, известен только модуль P_{ij}. Коэффициент качества M_2 нормирован по плавленому кварцу. Для плавленого кварца $M_2 = 1{,}51 \cdot 10^{-18}$ сек³/г

Система (класс)	Вещество	λ, мкм	P_{11}	P_{12}	M_2
Изотропная	Кварц плавленый	0,63	+0,121	0,270	1,0
	As_2S_3 — стекло	1,15	+0,308	0,299	220
	Поде	0,63	0,31	0,31	106
	55% Ge, 35% Se, 12% As	1,06	0,31	0,21	164
	Sb_2O_3	0,63	—	—	18
	Стекло разные	0,59	0,09 ÷ 0,24	0,18 ÷ 0,26	—
	Тяжелый флинт	0,63	0,27	0,24	12,6
	$PbO \cdot 2Sb_2O_3$	0,63	—	—	18,5
	Льдинт	0,63	0,30	0,28	33
	Полистирол	0,63	0,30	0,31	64

Симметрия (класс)	Вещество	λ, мкм	n_{11}	n_{22}	n_{33}	n_{44}	M_2
Кубическая (*43m*, *432* и *m3m*)	GaP	0,63	−0,151	−0,082	−0,074		20,5
	GaAs	1,15	−0,167	−0,140	−0,072		69
	$Y_3Al_5O_{12}$ (YAG)	0,63	−0,029	+0,009	−0,061		0,046
	$Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG)	1,15	0,025	0,073	0,011		0,22
	β-ZnS	0,63	+0,091	−0,01	+0,055		2,4
	Ge	10,6	+0,27	+0,235	+0,125		540,0
	$ZnAl_2O_4$	0,63	+0,009	0,07	—		0,006
	$SrTiO_3$	0,63	0,15	0,095	0,072		1,1
	$Y_3Ga_5O_{12}$	0,63	0,091	0,019	0,079		0,36
	Бромид таллия	0,63	—	—	—		118,3
	Алмаз	0,59	0,31÷0,43	−0,03÷+0,19	0,16		—
	LiF	0,59	+0,02	+0,128	−0,004		—
	MgO	0,59	−0,32	−0,08	—		—
	$Bi_4Ge_3O_{12}$	0,63					33
	KBr	0,59	+0,32	+0,171	−0,093		—
	KCl	0,59	+0,17	+0,124			—
	KI	0,59	+0,210	+0,469	—		—
	NaCl	0,59	+0,110	+0,453	−0,010		

Симметрия (класс)	Вещество	λ, мкм	n_{11}	n_{22}	n_{33}	n_{44}	M_2
Кубическая (*23* и *m3*)	$Bi_{12}(NO_3)_3$	0,63	0,15	0,15	0,20	0,02	15,0
	$Bi_{12}GeO_{20}$	0,63	—	—	—		6,6
	$Bi_{12}SiO_{20}$	0,63	—			—	6,4
	$Pb(NO_3)_2$	0,63	—	—	—		17,0
	$NaBrO_3$	0,59	0,185	0,218	0,215	−0,0139	—
	$NaClO_3$	0,59	0,162	0,21	0,20	−0,198	—

Симметрия (класс)	Вещество	λ, мкм	n_{11}	n_{22}	n_{33}	n_{44}	n_{55}	n_{66}	n_{14}	n_{15}	M_2
Тригональная (*3m*, *32* и *$\bar{3}m$*)	$LiTaO_3$	0,63	0,08	0,08	0,09	0,06	0,09	0,15	0,02	0,02	0,91
	α-Al_2O_3	0,63	0,20	0,075	−0	—	0	0,232	—	0,09	0,22
	Te	10,6	0,155	0,130	—	—	—	—	—	—	2,92
	$LiNbO_3$ (P^{E})	0,63	0,02	+0,08	+0,13	−0,06	+0,17	+0,07	−0,15	+0,12	0,0
	Рубин (Al_2O_3 + + 0,05% Cr)	0,69	−0,23	−0,07	+0,09	0,00	−0,04	−0,20	+0,01	−0,10	—
	α-Кварц (SiO_2)	0,59	+0,126	+0,23	+0,270	−0,029	+0,258	+0,098	−0,042	0,0087	—
	$CaCO_3$	—	+0,095	+0,189	+0,215	−0,006	+0,309	+0,179	+0,01	−0,010	
(*3* и *3*)	Li_2WO_3	0,63			—	—	—			—	2,5
Гексагональная (*6mm*, *6m2*, *622* и *6/mmm*)	CdS	0,63	0,142	0,056			0,042	—		0,051	3,0
(*6*, *$\bar{6}$* и *6/m*)	$LiIO_3$	0,63	0,32	—	—	0,03	0,41	—	-	-	8,3
Тетрагональная (*4mm*, *$\bar{4}2m$*, *422* и *4/mmm*)	TiO_2 (рутил)	0,63	0,017	+0,172	−0,168	—	0,096	−0,068			2,6
	ADP	0,63	+0,302	+0,246	+0,230	—	+0,195	+0,263	—	0,075	4,2
	KDP	0,63	+0,251	+0,249	+0,246	—	+0,225	+0,224	—	0,056	2,5
	$ZrSiO_4$	0,63	0,06	—	0,13	—	0,07	0,09	—	0,10	2,4
	TeO_2	0,63	0,0074	+0,167	+0,340	—	0,090	+0,240	−0,17	−0,045	595,0
	$Sr_{0,75}Ba_{0,25}Nb_2O_6$	0,63	0,16	0,10	0,08		0,11	0,47		—	26,0
	$Sr_{0,6}Ba_{0,4}Nb_2O_6$	0,63	0,05	0,08	0,17	—	0,09	0,23	—	-	6,8
(*4*, *$\bar{4}$* и *4/m*)	$PbMoO_4$	0,63	0,34	0,24	0,255		0,15	0,29		—	23,7
	$CdMoO_4$	0,63	0,12	0,10	0,15	—	0,11	0,18			4,5
	$PbWO_4$										21,0

Сингония (класс)	Вещество	λ, мкм	p_{11}	p_{22}	p_{33}	p_{44}	p_{55}	p_{66}	p_{12}	p_{23}	p_{31}	p_{14}	p_{25}	p_{36}	M_2
Орторомбическая	α-HIO_3	0,63	0,406	0,277	0,304	0,279	0,343	0,305	0,569	0,310	0,334	—	—	0,092	66,0
	$Cs(NbO_3)_2$	0,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,3
	$PbCO_3$	0,63	0,15	0,12	0,16	0,05	0,06	0,21	0,14	0,16	0,12	—	—	—	15,0
	$Ba_2NaNb_5O_{15}$	—	—	—	—	—	—	—	0,17	—	—	—	—	—	5,0÷ ÷10,0
	$BaSO_4$	0,59	+0,21	+0,25	+0,16	+0,34	+0,24	+0,15	+0,27	+0,22	+0,31	+0,002	0,012	+0,037	—
Моноклинная (пос. классы)	Pb_3MoO_5	0,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	27,0

Изменение показателя преломления веществ под действием акустических волн может быть использовано для отклонения и лучков оптических лучей (табл. 34.13).

В табл. 34.12 и 34.13 кроме значений p_{ij} приведены также часто используемые для вычисления свойств материалов коэффициенты «качества» M_1, M_2 и M_3:

$$M_1 = \frac{n^6 p^2}{\rho v^3}; \quad M_2 = \frac{n^6 p^2}{\rho v^3}; \quad M_3 = \frac{n^7 p^2}{\rho v^3},$$

где n — показатель преломления; p — компонента тензора фотоупругости; ρ — плотность вещества и v — скорость звука в нем.

Таблица 34.13

Акустико-оптические свойства веществ [4]

Поляризация определяется параллельно (∥) или перпендикулярно (⊥) к плоскости, проходящей через направление распространения световой и акустической волны. Продольная (поперечная) поляризация помечена знаком ✻ (✻✻). Коэффициенты качества нормированы по плавленому кварцу. Коэффициент перевода: 1,51 · 10^{-15} $см^2/г$. Ослабление звука нарастает с частотой как f^x, где $x \geq 1$. При экстраполяции к f=503 Мгц предполагалось, что $x = 2$

Вещество	Область прозрачности, мкм	λ, мкм	n	Направление акустической волны	$v_{зв}$, тр см/мкс	Поляризация, направление световой волны	M_1	M_2	M_3	Ослабление звука для f = 503 Мгц дБ/мкс
H_2O	0,2—0,9	0,633	1,33	—	1,5	∥ или ⊥	6,1	106	24	75
D_2O	0,2—1,8									
GaP	0,6—10,0	0,633	3,31	✻ [110]	6,32	∥	75	29,5	69	<1,0
				✻✻ [100]	4,13	∥ или ⊥, [010]	17,4	16	25,7	—
Ge	2—20	10,6	4,0	✻ [111]	5,50	∥	1270	540	1350	4,2
				✻✻ [100]	3,51	∥ или ⊥	182	190	368	0,6
Кварц плавленый, SiO_2	0,2—4,5	0,633	1,46	✻	5,96	⊥	1,0	1,0	1,0	1,8
				✻✻	3,76	∥ или ⊥	0,12	0,31	0,2	—
α-HIO_3	0,3—1,8	0,633	1,98	✻ [001]	2,44	⊥, [010]	13,6	55,0	32	0,6
$LiNbO_3$	0,5—4,5	0,633	2,20	✻ [11$\bar{2}$0]	6,57	—	8,3	4,6	7,5	<0,03
$PbMoO_4$	0,4—5,5	0,633	2,39	✻ [001]	3,66	∥ или ⊥, [100]	15,3	23,7	24,9	1,2
As_2S_3-стекло	0,6—11	1,15	2,40	✻	2,6	⊥	78,0	220	182	11,6
$Ge_{18}Se_{82}As_{12}$-стекло	1—14	1,06	2,7	✻	2,52	∥ или ⊥	53,0	164	125	1,8
Te	5—20	10,6	4,8	✻ [11$\bar{2}$0]	2,2	∥, [000]	1320	2920	3500	—
TeO_2	0,35—5,0	0,633	2,27	✻ [001]	4,25	⊥, [010]	16,5	22,8	25,6	1,0
				✻✻ [110]	0,617	∥ или ⊥, [001]	8,8	526	85,0	3,0
TlO_2	0,45—5,5	0,633	2,58	✻ [11$\bar{2}$0]	7,86	⊥ [0001]	7,9	2,6	6,2	—

34.5. ОПТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ

Способность вещества вращать плоскость поляризации света при прохождении его через вещество называется (естественной) оптической активностью. Оптическую активность веществ характеризуют удельным вращением $[\alpha]_\lambda^t$, т. е. углом поворота α плоскости поляризации света, проходящего через слой вещества толщиной 10 см при температуре t, °С, длине волны λ и концентрации оптически-активного вещества, равной 1 $г/см^3$. Для чисто активной жидкости $[\alpha] = \alpha/(l\rho)$, для растворов $[\alpha] = 100\alpha/(lP\rho)$, где α — угол вращения, рад; l — толщина слоя, дм; ρ — плотность, $г/см^3$; P — концентрация оптически-активного вещества в граммах на 100 г раствора.

Молекулярная вращательная способность определяется выражением $[M] = [\alpha]M/100$ $см^2 \cdot$ рад/дм, где M — молекулярная масса активного вещества, г.

Таблица 34.14

Оптическая активность метиловых эфиров [8, 6]

Эфир	$[\alpha]_D^{20}$, $\frac{\text{град}\cdot\text{см}^2}{\text{г}\cdot\text{дм}}$	$[M]_D^{20}$, $\frac{\text{град}\cdot\text{см}^2}{\text{дм}}$
$HCO_2C_{10}H_{19}$	—79,52	—146,3
$CH_3CO_2C_{10}H_{19}$	—79,42	—157,3
$C_2H_5CO_2C_{10}H_{19}$	—75,61	—160,2
$C_3H_7CO_2C_{10}H_{19}$	—69,52	—156,9
$C_4H_9CO_2C_{10}H_{19}$	—65,65	—157,8
$C_5H_{11}CO_2C_{10}H_{19}$	—62,07	—157,7
$C_6H_{13}CO_2C_{10}H_{19}$	—58,85	—165,7
$C_7H_{15}CO_2C_{10}H_{19}$	—55,25	—155,8
$C_8H_{17}CO_2C_{10}H_{19}$	—53,16	—157,3

Таблица 34.15

Оптическая активность этилтартрата в различных растворителях [3, 6]

Растворитель	Дипольный момент растворителя μ, дебая	$[\alpha]_{546,1}^{20}$ M_α, $\frac{\text{град}\cdot\text{см}^2}{\text{дм}}$
$s\text{-}C_6H_3(CH_3)_3$	0	0
$C_6H_5OCH_3$	1,16	5
C_6H_6	0,4	7,4
$C_6H_5CH_3$	0	12,5
C_6H_5I	1,25	20,2
C_6H_5Br	1,56	21,8
C_6H_5Cl	1,56	23,0
C_6H_5CN	3,85	67,9
$C_6H_5NO_2$	3,90	80,6
C_6H_5COH	2,75	107,7
Чистый этилтартрат		—16,25

Таблица 34.16

Удельное вращение кристаллов [3]

Кристалл	Формула	Класс	Длина волны, нм	$[\alpha]_\lambda$ $\frac{\text{град}}{\text{мм}}$
Литий-калий сульфат	$KLiSO_4$	C_6	589	+3,43
Кварц	SiO_2	D_3	434 486,1< 589,3 656,3	41,934[6] 32,761[6] 21,724[6] 17,320[6]
Киноварь	HgS	D_3	687	325
Натрия хлорат	$NaClO_3$	T	556	+1,42
Сахар	$C_{12}H_{22}O_{11}$	C_2	589	1,6—5,4*
Сегнетова соль	$KNaC_4H_4O_6\cdot 4H_2O$	D_2	589	—1,4

* Для различных направлений.

34.6. НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

При воздействии на материальную среду оптического излучения большой интенсивности в этой появляет наведенная поляризация, которая может быть представлена в виде разложения в ряд по степеням действующего электромагнитного поля E:

$$\mathcal{P} = \varepsilon_0 [\chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \cdots],$$

где $\chi^{(1)}$, $\chi^{(2)}$, $\chi^{(3)}$ и т. д. — нелинейные восприимчивости среды, ответственные за нелинейные эффекты, а ε_0 — диэлектрическая проницаемость среды. В общем случае в разложении поляризации по степеням поля необходимо учитывать также инфракрасные поля и, кроме того, акустические и оптические фононы. В этом общем случае нелинейные восприимчивости среды будут описывать целый ряд явлений: различные электро- и магнитооптические эффекты, генерацию второй и третьей гармоник, многофононное поглощение, параметрическую генерацию, вынужденные рассеяния — комбинационное, мандельштам-бриллюэновское и рэлеевское, акустико-оптические и другие эффекты.

Генерация второй гармоники в кристаллах

Генерация второй гармоники в кристаллах описывается поляризацией среды

$$\mathcal{P}_i^{(2\omega)} = \varepsilon_0 \sum_{j,k=1,2,3} d_{ijk}^{2\omega} E_j^{(\omega)} \cdot E_k^{(\omega)},$$

где коэффициенты $d_{ijk}^{2\omega}$ образуют тензор третьего ранга. Перестановка компонент поля $E_j^{(\omega)}$ и $E_k^{(\omega)}$ не влияет на значение $\mathcal{P}_i^{(2\omega)}$, поэтому члены тензора $d_{ijk}^{2\omega}$ удовлетворяют условиям симметрии $d_{ijk}^{2\omega} = d_{ikj}^{2\omega}$. В силу этого, так же как и для тензора пьезоэлектрического эффекта (см. разд. 34.4), для $d_{ijk}^{2\omega}$ можно воспользоваться сокращенной записью $d_{il}^{2\omega}$, где l в зависимости от j и k пробегает значения от 1 до 6. В сокращенной записи компоненты поляризации среды записываются в матричной форме

$$(P_x,\ P_y,\ P_z) = -\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} E_x^2 \\ E_y^2 \\ E_z^2 \\ 2E_yE_z \\ 2E_xE_z \\ 2E_xE_y \end{bmatrix}$$

Число ненулевых членов в тензоре $d_{ij}^{2\omega}$ зависит от группы точечной симметрии среды. Для различных кристаллических классов вид тензора $d_{ij}^{2\omega}$ приведен в табл. 34-17.

Мощность излучения второй гармоники $P^{2\omega}$ определяется соотношением

$$P^{2\omega} \sim \frac{\omega^4 \left(d_{ij}^{(\omega)}\right)^2 \left(P^{\omega}\right)^2 L^2}{r_0^2 n^{2\omega} \left(n^{\omega}\right)^2} f(\Delta k),$$

где ω и P^{ω} — частота и мощность исходного излучения; n^{ω} и $n^{2\omega}$ — показатели преломления среды для излучения исходной частоты и его второй гармоники; L — длина пути луча в среде; r_0 — радиус луча; $f(\Delta k)$ — функция, описывающая рассогласование волновых векторов исходной световой волны и ее второй гармоники k_{ω} и $k_{2\omega}$. В тех случаях, когда выполняется условие синхронизма, т. е.

$$2k_{\omega} = k_{2\omega} \quad \text{или} \quad v(\omega) = v(2\omega),$$

$\Delta k = 0$ и $f(\Delta k) = 1$. Это возможно только в средах, необладающих дисперсией. В реальных же средах фазовые скорости $v(\omega)$ и $v(2\omega)$ различны, в силу чего $\Delta k > 0$ и $f(\Delta k) < 1$. Более того, при распространении световых волн в среде величина Δk постоянно меняется. Поэтому фазовые соотношения между исходной волной и ее гармоникой сохраняются только на некоторой длине, называемой когерентной:

$$l_{\text{ког}} = \frac{\pi}{2\left(k_{2\omega} - 2k_{\omega}\right)}.$$

В кристалле кварца, например, $l_{\text{ког}}$ составляет всего $\sim 10^{-4}$ см.

Существенное увеличение $l_{\text{ког}}$ достигается при точном выполнении условий синхронизма в анизотропных кристаллах. Здесь, так как показатель преломления, а следовательно, и фазовая скорость, зависят не только от частоты, но и от поляризации волны, оказывается возможным выполнение условий синхронизма на значительно бо́льших длинах. При этом, в зависимости от выбора поляризации и ориентации кристалла, возможны два типа фазового синхронизма. В отрицательных одноосных кристаллах, где показатель преломления для обыкновенной волны n_o (волны с поляризацией, перпендикулярной к плоскости, проходящей через оптическую ось кристалла и направление луча) больше показателя преломления для необыкновенной волны n_e (волны с поляризацией параллельной указанной плоскости), имеем в некотором направлении θ_1, отсчитываемом от направления оптической оси кристалла:

$$n_e^{2\omega} = n_o^{\omega},$$

и в направлении θ_2

$$n_e^{2\omega} = \frac{1}{2}\left(n_o^{\omega} + n_e^{\omega}\right).$$

Соответственно для положительных одноосных кристаллов

$$n_o^{2\omega} = n_e^{\omega}; \quad n_o^{2\omega} = \frac{1}{2}\left(n_e^{\omega} + n_o^{\omega}\right).$$

Для двуосных кристаллов также возможно выполнение фазового синхронизма. Однако и для тех и для других кристаллов само по себе наличие анизотропии показателя преломления недостаточно. Необходимо, чтобы соответствующие поверхности показателей преломления для исходной длины волны и ее гармоники по крайней мере касались друг друга, т. е. чтобы анизотропия была достаточно большой.

Когерентная длина $l_{\text{ког}}$ в реальных условиях эксперимента не обращается в бесконечность, как этого следовало бы ожидать при выполнении условия синхронизма. Расходимость реальных световых пучков приводит к тому, что часть лучей отклоняется от направления синхронизма, даже если есть пучка точно направлена по этому направлению.

Синхронизм называется критическим, если направление фазового синхронизма θ отличается от 90°, и некритическим, если $\theta = 90°$. В первом случае поверхности показателей преломления для исходной волны и ее гармоники пересекаются, что соответствует различию в направлениях для групповых скоростей (вектором Пойнтинга) обыкновенной и необыкновенной волн. Во втором — направления групповых скоростей коллинеарны (поверхности показателей преломления касаются). Переход от критического синхронизма к некритическому можно осуществить с помощью выбора температуры кристалла.

Коэффициенты генерации второй гармоники (элементы тензора $d_{ij}^{2\omega}$) нелинейных кристаллов приведены в табл. 34.18. Элементы тензора $d_{ijk}^{2\omega}$ связаны с линейными оптическими восприимчивостями одна через тензор третьего ранга $b_{ijk}^{2\omega}$ (тензор Миллера)*

$$d_{ijk}^{2\omega} = \varepsilon_0 \chi_{ii}^{2\omega} \chi_{jj}^{\omega} \chi_{kk}^{\omega} b_{ijk}^{2\omega}.$$

Значения $b_{ij}^{2\omega}$ также приведены в табл. 34.18. Характерным является то, что вариации элементов тензора $b_{ij}^{2\omega}$ от вещества к веществу значительно меньше, чем вариации для $d_{ij}^{2\omega}$.

Так как абсолютные или относительные знаки коэффициентов второй гармоники определены только для некоторых кристаллов, то они вынесены в отдельную таблицу 34.19.

---

* Соотношение справедливо для кристаллов с симметрией, отличной от триклинной и моноклинной.

Таблица 34.17

Форма тензора генерации второй гармоники для различных кристаллографических классов [6]

Сингония	Класс	Форма тензора	Приложение
Триклинная	$1 - C_1$	$\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix}$	—
Моноклинная	$m - C_s$	$\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 0 & 0 & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 & 0 & d_{26} \\ 0 & 0 & 0 & d_{34} & d_{35} & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp Z$
	$m - C_s$	$\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & d_{35} & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp Y$
	$2 - C_2$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & d_{25} & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	$2 \parallel Z$
	$2 - C_2$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 & d_{24} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{34} & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	$2 \parallel Y$
Ромбическая	$mm2 - C_{2v}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—
	$222 - D_2$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	—
Тетрагональная	$4 - C_4$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & -d_{14} & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—
	$\bar{4} - S_4$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -d_{15} & d_{14} & 0 \\ d_{31} & -d_{31} & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	—
	$4mm - C_{4v}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	—
	$\bar{4}2m - D_{2d}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	—
	$422 - D_4$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—
Тригональная	$3 - C_3$	$\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & d_{15} & -d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & d_{15} & -d_{14} & -d_{11} \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—
Тригональная	$3m - C_{3v}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & -d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp X$
	$3m - C_{3v}$	$\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{22} & 0 & d_{14} \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp Y$
	$32 - D_3$	$\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—
Гексагональная	$\bar{6} - C_{3h}$	$\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & 0 & 0 & -d_{22} \\ d_{22} & d_{22} & 0 & 0 & 0 & -d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—
	$6 - C_6$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & -d_{14} & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	Совпадает с классом $\bar{4} - C_4$
	$\bar{6}m2 - D_{3h}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{22} \\ d_{22} & d_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp X$
	$\bar{6}m2 - D_{3h}$	$\begin{pmatrix} d_{22} & -d_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp Y$
	$6mm - C_{6v}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	Совпадает с классом $4mm - C_{4v}$
	$622 - D_6$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	Совпадает с классом $422 - D_4$
Кубическая	$23 - T$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	—
	$\bar{4}3m - T_d$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} \end{pmatrix}$	—
	$432 - O$	Все члены тензора равны нулю	—

Таблица 34.16

Коэффициенты генерации второй гармоники по спектрам [6]

Кристалл. Вещество	Класс	$d_{ij}^{2\omega}$, 10^{-10} м/в	$\delta_{ij}^{2\omega}$, 10^{-12} м²/в	λ_1, мкм	n^{ω}	$n^{2\omega}(\theta)$, мкм
Моноклинная						
Лития сульфата моногидрат $Li_2SO_4 \cdot H_2O$	$2-C_2$	$d_{14}=(?)$ $d_{21}=(?)$ $d_{22}=0,46\pm0,07$ $d_{23}=0,33\pm0,05$ $d_{24}=0,29\pm0,04$	— — — — —	1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,152	1,4636 1,4521 1,4657 1,4752 1,4704	1,4624 1,4868 1,4868 1,4868 1,4769 (25)
Калия сегнетовая гидрат $K_2C_4H_4O_6 \cdot {}^1/_2H_2O$	$2-C_2$	$d_{21}=0,13$ $d_{22}=4,26$ $d_{23}=0$ $d_{24}=0,19$	0,68 19,2 0 0,93	0,6943 0,6942 0,6942 1,152	1,4893 1,5194 1,5291 1,5043	1,5693 1,5693 1,5693 1,5659(20;40)
Триглицинсульфат (TGS) $(NH_2CH_2COOH)_3 \cdot H_2SO_4$	$2-C_2$	$d_{23}=0,33$	1,09	0,6943	1,567	1,618
Ромбическая						
Аммония биоксалата моногидрат $(NH_4)_2C_2O_4 \cdot H_2O$	$222-D_2$	$d_{14}=0,43$ $\frac{1}{2}(d_{15}+d_{36})=(0,78\pm0,07)$	$\delta_{14}=2,2$ —	1,06 1,06	1,4802 —	1,6996 —
Гадолиния молибдат $Gd_2(MoO_4)_3$	$mm2-C_{2v}$	$d_{15}=2,96\pm0,45$ $d_{24}=2,93\pm0,44$ $d_{31}=2,83\pm0,42$ $d_{32}=2,75\pm0,41$ $d_{33}=0,06\pm0,009$	$\delta_{15}=2,44\pm0,37$ $\delta_{24}=2,4\pm0,36$ $\delta_{31}=2,30\pm0,34$ $\delta_{32}=2,24\pm0,34$ $\delta_{33}=0,04\pm0,007$	1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642	1,8385 1,8384 1,8146 1,8142 1,8637	1,8549 1,8545 1,9102 1,9102 1,9102
Гиппуровая кислота $C_6H_5CO \cdot NH(CH_2CO_2H)$	$222-D_2$	$d_{36}=2,85$	$\delta_{14}=7,16$	0,6943	1,544	1,61
α-Иодноватая кислота $\alpha\text{-}HIO_3$	$222-D_2$	$d_{14}=7,28\pm1,8$	$\delta_{14}=4,43\pm1,09$	1,064	1,9991	1,8547 (24; 41,5)
Калия дигидрофосфат (KDP) KH_2PO_4 при $T<-150°C$	$mm2-C_{2v}$	$d_{14}=4,63\pm0,9$ $d_{15}=0,57\pm0,05$ $d_{24}=0,38\pm0,05$ $d_{31}=0,58\pm0,05$ $d_{32}=0,39\pm0,05$ $d_{33}=0$	$\delta_{14}=3,02\pm0,56$ $\delta_{15}=3,3\pm0,3$ $\delta_{24}=2,2\pm0,3$ $\delta_{31}=3,4\pm0,3$ $\delta_{32}=2,3\pm0,3$ $\delta_{33}=0$	1,1526 0,6943 0,6943 0,6943 0,6943	1,935 1,4906 1,4906 1,5117 1,5117 1,4694	1,845 1,540 1,540 1,4917 1,4917 1,4917
Литий метагалогенево-кислый $LiGaO_2$	$mm2-C_{2v}$	$d_{15}=d_{24}=0,08\pm0,009$ $d_{31}=d_{32}=0,175\pm0,019$ $d_{33}=0,686\pm0,07$	$0,1\pm0,01$ $0,25\pm0,027$ $\delta_{33}=0,88\pm0,09$	1,0642 1,0642 1,0642	1,7433 1,7131 1,7399	1,7705 1,7705 1,7705
Литий формиата моногидрат $LiCHO_2 \cdot H_2O$	$mm2-C_{2v}$	$d_{31}=d_{32}=(0,11\pm0,02)$ $d_{34}=d_{35}=1,27\pm0,09$	$\delta_{31}=1,30\pm0,24$ $\delta_{34}=8,19\pm0,6$	1,0642 1,0642	1,3598 1,4673	1,5229 (61—95) 1,5229 (55,1)
Натрия-бария ниобат $Ba_2NaNb_5O_{15}$	$mm2-C_{2v}$	$d_{33}=1,86\pm0,11$ $d_{15}=14,56\pm0,73$ $d_{24}=13,83\pm0,73$ $d_{31}=14,56\pm0,73$ $d_{32}=14,56\pm1,46$ $d_{33}=20\pm1,46$	$\delta_{33}=10,03\pm0,6$ $\delta_{15}=2,35\pm0,11$ $\delta_{24}=2,23\pm0,11$ $\delta_{31}=2,42\pm0,12$ $\delta_{32}=2,41\pm0,15$ $\delta_{33}=4,06\pm0,30$	1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642	1,5035 2,2133 2,2140 2,2567 2,2580 2,1700	1,5229 2,3666 2,3672 2,2502 (73—75) 2,2502 (75—77) 2,2502
Натрия нитрит $NaNO_2$	$mm2-C_{2v}$	$d_{31}=d_{15}=0,2$ $d_{32}=d_{24}=0,87$	0,68 15,73	1,153 1,153	1,629 1,3391	1,4124 1,4124
Поливинилиденфторид $(CH_2CF_2)_n$	$mm2-C_{2v}$	$d_{31}=0,18$ $d_{32}=0$ $d_{33}=0,36$	$\delta_{31}=1,9$ $\delta_{32}=0$ $\delta_{33}\simeq3,8$	1,064 1,064 1,064	— — —	$\simeq1,43$ — —
Свинца ниобат $PbNb_4O_{11}$	$mm2-C_{2v}$	$d_{15}=6,7\pm1,0$ $d_{24}=6,17\pm0,93$ $d_{31}=7,4\pm1,1$ $d_{32}=6,69\pm1,00$ $d_{33}=10,1\pm1,5$	$\delta_{15}=0,84\pm0,12$ $\delta_{24}=0,76\pm0,11$ $\delta_{31}=0,93\pm0,14$ $\delta_{32}=0,83\pm0,12$ $\delta_{33}=1,19\pm0,18$	1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642	2,3115 2,3131 2,2979 2,3010 2,3254	2,4113 2,4137 2,4396 2,4396 2,4396
d-Треонин	$222-D_2$	$d_{14}=0,46\pm0,07$ $d_{25}=0,49\pm0,07$ $d_{36}=0,46\pm0,07$	$\delta_{14}=1,72\pm0,27$ $\delta_{25}=1,85\pm0,27$ $\delta_{36}=1,74\pm0,27$	1,0642 1,0642 1,0642	1,5821 1,5471 1,5440	1,5943 1,5965 1,6043

Соединение Вещество	Класс	$d_{ij}^{\text{эф}}$, 10^{-12} м/В	$\delta_{ij}^{\text{эф}}$, 10^{-9} м²/Н	λ_{ij}, мкм	n^{∞}	$n^{2\infty}(\theta,\ \text{мкм}^{-2})$
Тербия молибдат $Tb_2(MoO_4)_3$	$mm2-C_{2v}$	$d_{15}=2,67\pm0,43$ $d_{24}=2,9\pm0,4$ $d_{31}=2,6\pm0,4$ $d_{32}=2,62\pm0,38$ $d_{33}=0,12\pm0,03$	$\delta_{15}=2,26\pm0,34$ $\delta_{24}=2,33\pm0,32$ $\delta_{31}=2,09\pm0,32$ $\delta_{32}=1,93\pm0,30$ $\delta_{33}=0,09\pm0,02$	1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642	1,8459 1,8458 1,8225 1,8222 1,8704	1,6649 1,8645 1,9165 1,9185 1,9165
Тригональная						
Алюминия фосфат $AlPO_4$	$32-D_3$	$d_{11}=(0,41\pm0,03)$ $d_{14}=0,009$	$\delta_{11}=2,07\pm0,15$ $\delta_{14}=0,046$	1,0582 1,0582	1,5156 1,5198	1,5275 1,5275
Бензил $C_6H_5COCOC_6H_5$	$32-D_3$	$d_{11}=(4,08\pm0,55)$	$\delta_{11}=9,36\pm1,26$	1,0642	1,6313	1,669
Калия дитионат $K_2S_2O_6$	$32-D_3$	$d_{11}=0,087\pm0,016$	$\delta_{11}=0,60\pm0,12$	0,6943	1,4518	1,4728
α-Кварц α-SiO_2	$32-D_3$	$d_{11}=(0,4\pm0,02)$ $d_{14}=0,009$ $d_{11}=0,364\pm0,04$	$\delta_{11}=1,86\pm0,09$ $\delta_{14}=0,04$ $\delta_{11}=1,6\pm0,2$	1,0582 1,0582 1,0642	1,532 1,536 1,5341	1,542 1,542 1,5468
Литий ниобат $LiNbO_3$	$3m-C_{3v}$	$d_{15}=(3,07\pm0,28)$ $d_{31}=(6,82\pm0,85)$ $d_{22}=(40,58\pm10,4)$ $d_{31}=(0,01\pm0,47)$ $d_{22}=(2,41\pm0,95)$ $d_{15}=(6,28\pm0,63)$ $d_{33}=(30,27\pm7,57)$	$\delta_{15}=0,497\pm0,045$ $\delta_{31}=1,04\pm0,15$ $\delta_{22}=8,7\pm2,2$ $\delta_{31}=0,92\pm0,09$ $\delta_{22}=0,4\pm0,16$ $\delta_{15}=1,18\pm0,12$ $\delta_{33}=6,7\pm1,7$	1,0582 1,0582 1,0582 1,152 1,152 0,6328 1,152	2,2322 2,2322 2,1544 2,2278 2,2278 2,1854 2,1500	2,3244 2,2525 2,2325 2,2153 2,3077 2,2854 2,2153
Литий тантелат $LiTaO_3$	$3m-C_{3v}$	$d_{22}=(2,08\pm0,24)$ $d_{31}=(1,28\pm0,24)$ $d_{33}=(19,39\pm2,36)$	$\delta_{22}=0,48\pm0,06$ $\delta_{31}=0,29\pm0,06$ $\delta_{33}=4,4\pm0,53$	1,0582 1,0582 1,0582	2,1366 2,1366 2,1400	2,2043 2,2089 2,2080
Пираргирит Ag_3SbS_3	$3m-C_{3v}$	$d_{31}=(12,6\pm4)$ $d_{22}=(13,4\pm4)$ $d_{31}=(15,06\pm2,2)$ $d_{15}+d_{22}=(28,36\pm1,8)$	$\delta_{31}=0,58\pm0,18$ $\delta_{22}=0,55\pm0,16$ $\delta_{31}=0,64\pm0,09$	10,6 10,6 1,152 10,6	2,7352 2,7352 2,8042 ~2,697	2,6221 (29±1) 2,756 2,6734(90) ~2,728 (29,5±5)
Пруустит Ag_3AsS_3	$3m-C_{3v}$					
Ртути сульфид α-HgS	$32-D_3$	$d_{11}=50,3\pm17$	$\delta_{11}=2,93\pm1$	10,6	2,596	2,624
Селен Se	$32-D_3$	$d_{11}=79,6\pm42$	$\delta_{11}=4,2\pm2,2$	10,6	2,64	2,645 (40)
Теллур Te	$32-D_3$	$d_{11}=(5319,8\pm837,7)$	$\delta_{11}=1,07\pm0,17$	10,5915	6,243	6,305 (14,16)
Турмалин	$3m-C_{3v}$	$d_{15}=0,27\pm0,04$ $d_{33}=0,08\pm0,01$ $d_{31}=0,16\pm0,03$ $d_{33}=0,57\pm0,07$	$\delta_{15}=0,70\pm0,1$ $\delta_{33}=0,22\pm0,03$ $\delta_{31}=0,42\pm0,08$ $\delta_{33}=1,58\pm0,19$	— — — —	1,618 1,6274 1,6274 1,6068	1,6433 1,6433 1,6231 1,6231
Тетрагональная						
Аммония дигидрофосфат (ADP) $NH_4H_2PO_4$	$\bar{4}2m\ D_{2d}$	$d_{14}=0,553\pm0,024$ $d_{36}=0,568\pm0,028$ $d_{14}=0,462\pm0,024$ $d_{36}=0,487\pm0,028$ $d_{36}=0,544\pm0,14$ $d_{36}=0,57\pm0,058$ $d_{36}=0,66\pm0,14$	$\delta_{14}=3,19\pm0,14$ $\delta_{36}=3,27\pm0,16$ $\delta_{14}=2,02\pm0,12$ $\delta_{36}=2,57\pm0,15$ $\delta_{36}=3,25\pm0,84$ $\delta_{36}=2,93\pm0,36$ $\delta_{36}=3,65\pm0,77$	1,0582 1,0582 0,6943 0,6943 1,15 0,6328 0,8250	1,4874 1,5067 1,4973 1,5193 1,50964 1,5217 1,5145	1,5277 1,4846 (41,9±1) 1,5198 1,5004 (51,9±1) 1,4794 1,5075 1,4967(42)
Аммония дидейтерофосфат (ADDP) $ND_4D_2PO_4$	$\bar{4}2m-D_{2d}$	$d_{36}=0,52\pm0,08$	$\delta_{36}=2,88\pm0,44$	0,6943	1,5138	1,4926(47)
Бария титанат $BaTiO_3$	$4mm-C_{4v}$	$d_{15}=17,2\pm1,42$ $d_{31}=17,97\pm1,42$ $d_{33}=6,6\pm0,5$ $d_{15}=19,33\pm2,0$ $d_{31}=17,85\pm2,0$ $d_{33}=7,79\pm1,17$ $d_{31}=4,9\pm1,5$ $d_{33}=12,85\pm3,8$ $d_{15}=6,6\pm2,5$	$\delta_{15}=1,96\pm0,16$ $\delta_{31}=2,11\pm0,17$ $\delta_{33}=0,85\pm0,06$ $\delta_{15}=2,23\pm0,23$ $\delta_{31}=2,10\pm0,23$ $\delta_{33}=1,0\pm0,15$ $0,78\pm0,21$ $2,20\pm0,65$ $\delta_{15}=1,07\pm0,36$	1,058 1,058 1,058 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642	— — — 2,3175 2,3379 2,2970 2,2506 2,2136 2,2322	— — — 2,4760 2,4126 2,4126 2,3092 2,3092 2,3583
Бария-стронция ниобат $Sr_{0,5}Ba_{0,5}Nb_2O_6$						
Бериллия сульфата тетрагидрат $BeSO_4\cdot4H_2O$	$\bar{4}2m-D_{2d}$	$d_{36}=0,16$	$\delta_{36}=(?)$	0,6328	—	(60±1)
Калия-ртути тиоцианат $Cd[Hg(SCN)_4]$	$\bar{4}-S_4$	$d_{31}=6,0\pm2,4$ $d_{33}=7,57\pm1,4$ $d_{36}=1,76\pm0,53$	$\delta_{31}=4,21\pm1,69$ $\delta_{33}=5,3\pm0,98$ $\delta_{36}=1,23\pm0,37$	1,06 1,064 1,064	1,924 1,924 1,924	1,792 1,792 1,792

Симметрия Кристалла	Класс	d^{ijk}, пм·г·м/в	χ^{ijk}, 10^{-9} г/в	λ_0, мкм	n^{ω}	$n^{2\omega}$ (λ, мкм)
Калия дидейтерофосфат (KDDP) KD_2PO_4	$42m$ — D_{2d}	$d_{14} = 0,65 \pm 0,02$ $d_{36} = 0,5 \pm 0,02$ $d_{14} = 0,46 \pm 0,04$ $d_{36} = 0,5 \pm 0,02$	$\delta_{14} = 3,93 \pm 0,13$ $\delta_{36} = 3,24 \pm 0,13$ $\delta_{14} = 2,71 \pm 0,23$ $\delta_{36} = 3,04 \pm 0,12$	1,0582 1,0582 0,6943 0,6943	1,4769 1,4978 1,4830 1,5092	1,5085 1,4980 1,5285 1,4855 (52)
Калия дигидроарсенат (KDA) KH_2AsO_4	$\bar{4}2m$ — D_{2d}	$d_{14} = 0,55 \pm 0,02$ $d_{36} = 0,59 \pm 0,03$ $d_{14} = 0,41 \pm 0,05$ $d_{36} = 0,45 \pm 0,06$	$\delta_{14} = 2,36 \pm 0,08$ $\delta_{36} = 2,24 \pm 0,13$ $\delta_{14} = 1,58 \pm 0,19$ $\delta_{36} = 1,82 \pm 0,19$	1,0582 1,0582 0,6943 0,6943	1,531 1,534 1,538 1,562	1,572 1,571 1,605 1,549
Калия дигидрофосфат (KDP) KH_2PO_4	$\bar{4}2m$ — D_{2d}	$d_{14} = 0,49 \pm 0,02$ $d_{36} = 0,47$ $d_{14} = 0,47 \pm 0,05$ $d_{36} = 0,47$ $d_{14} = 0,46 \pm 0,07$ $d_{36} = 0,47 \pm 0,08$	$\delta_{14} = 3,10 \pm 0,13$ $\delta_{36} = 3,02 \pm 0,2$ $\delta_{14} = 2,71 \pm 0,17$ $\delta_{36} = 2,73$ $\delta_{14} = 3,01 \pm 0,46$ $\delta_{36} = 3,01 \pm 0,2$	1,0582 1,0582 0,6943 0,6943 1,15 1,0642	1,4751 1,4939 1,4856 1,5058 1,4913 1,4942	1,5123 1,4706(40,3) 1,5335 1,4874(50,4) 1,4587 1,4708
Калия-лития ниобат $K_3Li_2Nb_5O_{15}$	$4mm$ — C_{4v}	$d_{15} = 6,2 \pm 1,1$ $d_{31} = 7,0 \pm 1,5$ $d_{33} = 12,7 \pm 1,8$ $d_{31} = 12,77$	$\delta_{15} = 1,19 \pm 0,2$ $\delta_{31} = 1,39 \pm 0,3$ $\delta_{33} = 3,14 \pm 0,44$ $\delta_{31} = 2,22$	1,0642 1,0642 1,0642 1,0642	2,1585 2,2057 2,1113 2,2001	2,3297 2,1980 2,1980 2,2007
Калия-натрия-бария ниобат $K_{0,8}Na_{0,2}Ba_2Nb_5O_{15}$	$\bar{4}2m$ — D_{2d}	$d_{36} = 0,3 \pm 0,04$	$\delta_{36} = 1,27 \pm 0,17$	0,6943	~1,535	~1,542
Рубидия дигидроарсенат (RDA) RbH_2AsO_4	$\bar{4}2m$ — D_{2d}	$d_{36} = 0,49$ $d_{14} = 0,56 \pm 0,08$ $d_{36} = 0,43 \pm 0,05$	$\delta_{36} = 2,83$ $\delta_{14} = 3,47 \pm 0,49$ $\delta_{36} = 2,74 \pm 0,32$	0,6943 1,0642 1,0642	1,502 1,4813 1,4926	1,4989(66) 1,5100 1,4811
Свинца титанат $PbTiO_3$	$4mm$ — C_{4v}	$d_{15} = 37,9 \pm 5,7$ $d_{31} = 42,6 \pm 6,4$ $d_{33} = 8,5 \pm 1,4$ $d_{15} = 66,5 \pm 19$	$\delta_{15} = 2,09 \pm 0,3$ $\delta_{31} = 2,39 \pm 0,36$ $\delta_{33} = 0,46 \pm 0,08$ $\delta_{15} = 7,17 \pm 2,4$	1,0642 1,0642 1,0642 10,6	2,5704 2,5712 2,5002 2,516	2,7309 2,7260 2,7200 2,383
Серебра тиогаллат $AgGaS_2$	$\bar{4}2m$ — D_{2d}	$d_{36} = 0,26 \pm 0,04$	$\delta_{36} = 0,93 \pm 0,15$	0,6943 1,06	1,563 —	1,572 — (90)
Цезия дигидроарсенат CsH_2AsO_4	$\bar{4}2m$ — D_{2d}	$d_{14} = (111 \pm 33)$	$\delta_{14} = 1,96 \pm 0,58$	10,6	3,094	3,114
Цинка-германия фосфид $ZnGeP_2$	$\bar{4}2m$ — D_{2d}					
Гексагональная						
Бериллия окись BeO	$6mm$ — C_{6v}	$d_{31} = 0,17 \pm 0,01$ $d_{33} = 0,23 \pm 0,01$	$\delta_{31} = 0,26 \pm 0,015$ $\delta_{33} = 0,34 \pm 0,015$	1,0642 1,0642	1,7055 1,7204	1,7376 1,7376
Кадмия селенид CdSe	$6mm$ — C_{6v}	$d_{31} = 79,6 \pm 4,9$ $d_{15} = 31 \pm 7,5$ $d_{31} = 28,5 \pm 6,3$ $d_{33} = 54,0 \pm 12,6$	$\delta_{31} = 3,54 \pm 0,22$ $\delta_{15} = 2,8 \pm 0,67$ $\delta_{31} = 2,56 \pm 0,67$ $\delta_{33} = 4,73 \pm 1,09$	1,058 10,6 10,6 10,6	2,560 2,455 2,446 2,462	3,036 2,447 2,465 2,465
Кадмия сульфид CdS	$6mm$ — C_{6v}	$d_{15} = 17,0 \pm 1,4$ $d_{31} = 18,6 \pm 0,9$ $d_{33} = 30,7 \pm 1,9$ $d_{15} = 28,9 \pm 7,1$ $d_{31} = 25,4 \pm 6,3$ $d_{33} = 44,0 \pm 12,6$	$\delta_{15} = 1,62 \pm 0,13$ $\delta_{31} = 1,5 \pm 0,09$ $\delta_{33} = 2,83 \pm 0,17$ $\delta_{15} = 4,58 \pm 1,2$ $\delta_{31} = 4,45 \pm 1,06$ $\delta_{33} = 7,1 \pm 2,0$	1,0582 1,0582 1,0582 10,6 10,6 10,6	2,336 2,327 2,346 2,252 2,242 2,263	2,649 2,654 2,654 2,244 2,265 2,265
Кремния карбид SiC	$6mm$ — C_{6v}	$d_{15} = 9,1 \pm 1,1$ $d_{31} = 9,83 \pm 1,1$ $d_{33} = 10,4 \pm 1,8$	$\delta_{15} = 0,10 \pm 0,03$ $\delta_{31} = 0,54 \pm 0,05$ $\delta_{33} = 0,84 \pm 0,09$	1,0642 1,0642 1,0642	2,6027 2,5830 2,6225	2,6689 2,7167 2,7167
Лития иодат $LiIO_3$	6 — C_6	$d_{31} = 5,2 \pm 0,7$ $d_{31} = 5,6 \pm 0,3$ $d_{33} = 5,85 \pm 0,36$ $d_{33} = 7,6 \pm 1,1$	$\delta_{31} = 4,8 \pm 0,35$ $\delta_{31} = 5,05 \pm 0,3$ $\delta_{33} = 8,37 \pm 0,51$ $\delta_{31} = 6,79 \pm 1,0$	1,0846 1,0642 1,0642 0,5145	1,856 1,86 1,719 1,7875	1,746 (28,9) 1,750 (30,2) 1,700 1,9018
Лития-калия сульфат $LiKSO_4$	6 — C_6	$d_{31} = 0,38$ $d_{33} = 0,71$	$\delta_{31} = (2)$ $\delta_{33} = (7)$	0,6943 0,6943	— —	— —
Цинка окись ZnO	$6mm$ — C_{6v}	$d_{15} = 2,32 \pm 0,2$ $d_{31} = 2,1 \pm 0,2$ $d_{33} = 7,0 \pm 0,2$	$\delta_{15} = 1,08 \pm 0,09$ $\delta_{31} = 0,98 \pm 0,09$ $\delta_{33} = 3,16 \pm 0,09$	1,0582 1,0582 1,0582	1,947 1,939 1,955	2,031 2,048 2,018
Цинка сульфид ZnS	$6mm$ — C_{6v}	$d_{31} = 13,5 \pm 0,8$ $d_{15} = 21,4 \pm 6,4$ $d_{33} = 16,85 \pm 6,3$ $d_{33} = 37,3 \pm 12,6$	$\delta_{31} = 1,74 \pm 0,1$ $\delta_{15} = 3,42 \pm 1,31$ $\delta_{31} = 3,01 \pm 1,0$ $\delta_{33} = 5,89 \pm 1,99$	1,058 10,6 10,6 10,6	2,359 2,266 2,264 2,269	2,403 2,265 2,270 2,270

Химическая формула вещества	Класс	$d_{ij}^{\text{эксп}}$, 10^{-12} м/в	$\delta_{ij}^{\text{эксп}}$, 10^{-9} м/в	λ_1, мкм	$n^{\text{эксп}}$	$n^{\text{эксп}}$ (0, эксп)
Кубическая						
Алюминия антимонид AlSb	$\bar{4}3m$ — T_d	d_{14} — 49 ± 36	δ_{14} — 0,4 ± 0,29	1,056	3,3	3,87
Висмута германат Bi_4GeO_{12}	$\bar{4}3m$ — T_d	d_{14} — 1,46	δ_{14} — 0,47	1,0642	2,0443	2,1152
Галлия антимонид GaSb	$\bar{4}3m$ — T_d	d_{14} — 628 ± 65	δ_{14} — 2,84 ± 0,28	10,6	3,8	3,82
Галлия арсенид GaAs	$\bar{4}3m$ — T_d	d_{14} = 274 ± 60 d_{15} — 240 ± 15 d_{14} — 186,5 ± 19 d_{14} — 160 ± 10 d_{14} — 137	δ_{14} — 1,4 ± 0,34 δ_{15} — 1,27 ± 0,08 δ_{14} — 2,26 ± 0,21 δ_{14} — 0,72 ± 0,05 δ_{14} — 0,31	1,0182 1,058 10,6 1,06 0,8433 ÷ ÷0,8450	3,479 3,479 3,27 3,478 3,60	4,352 4,352 3,30 4,346 5,90
Галлия фосфид GaP	$\bar{4}3m$ — T_d	d_{14} = 85,6 ± 14,2 d_{15} — 41,2 ± 2,5 d_{14} = 35,0 d_{14} — 109	δ_{14} = 1,14 ± 0,19 δ_{15} — 0,70 ± 0,03 δ_{14} = 0,73 δ_{14} — 1,9	1,058 1,058 3,39 10,6	3,10 3,10 3,018 3,00	3,49 3,49 3,04 3,01
Индия антимонид InSb	$\bar{4}3m$ — T_d	d_{14} — 520 ± 47	δ_{14} — 1,8	1,058	—	—
Индия арсенид InAs	$\bar{4}3m$ — T_d	d_{14} — 364 ± 47 d_{14} — 418,9 ± 12,6	δ_{14} — (?) δ_{14} — 3,27 ± 0,1	1,059 10,6	— 3,49	— 3,54
Индия фосфид InP	$\bar{4}3m$ — T_d	d_{14} — 167,0	δ_{14} — 0,94	1,058	3,44	4,21
Кадмия теллурид CdTe	$\bar{4}3m$ — T_d	d_{14} — 16,7 ± 6,3	δ_{14} = 0,76 ± 0,29	10,6	2,69	2,71
Меди бромид CuBr	$\bar{4}3m$ — T_d	d_{14} — 7,90 ± 2,7 d_{14} — 15,3 ± 6,9	δ_{14} — 3,73 ± 1,27 δ_{14} = 5,07 ± 2,28	10,6 1,064	1,970 2,011	1,972 2,164
Меди хлорид CuCl	$\bar{4}3m$ — T_d	d_{14} — 4,19 d_{14} — 9,1 ± 4,1	δ_{14} — 2,74 δ_{14} — 4,64 ± 2,09	10,6 1,064	1,893 1,923	1,895 2,012
Меди иодид CuI	$\bar{4}3m$ — T_d	d_{14} — 7,96 ± 2,6 d_{14} = 30,2 ± 13,6	δ_{14} — 1,72 ± 0,56 δ_{14} — 4,65 ± 2,00	10,6 1,064	2,176 2,223	2,178 2,352
Натрия бромат $NaBrO_3$	23 — T	d_{14} — 0,28	δ_{14} — 0,71	0,0943	1,611	1,664
Натрия хлорат $NaClO_3$	23 — T	d_{14} = 0,69	δ_{14} = 3,43	0,0943	1,512	1,540
Уротропин $N_4(CH_2)_6$	$\bar{4}3m$ — T_d	d_{14} — 4,73	δ_{14} — 15,7	1,06	1,577	1,593
Цинка селенид ZnSe	$\bar{4}3m$ — T_d	d_{14} — 31,7 ± 1,95 d_{41} — 78,3 ± 29,3	δ_{14} — 2,21 ± 0,14 δ_{41} — 7,6 ± 3	1,058 10,6	2,48 2,42	2,66 2,43
Цинка сульфид β-ZnS	$\bar{4}3m$ — T_d	d_{14} = 24,6 ± 1,5 d_{41} — 30,6 ± 8,2	δ_{14} — 3,2 ± 0,19 δ_{41} — 5,09 ± 1,39	1,058 10,6	2,299 2,21	2,40 2,23
Цинка теллурид ZnTe	$\bar{4}3m$ — T_d	d_{14} — 106,7 ± 6,6 d_{41} — 94,6 ± 9,6 d_{41} — 92,1 ± 33,5	δ_{14} — 2,96 ± 0,18 δ_{41} — 2,62 ± 0,26 δ_{41} — 4,19 ± 1,5	1,058 1,058 10,6	2,772 2,772 2,69	3,182 3,182 2,70

Таблица 34.19

Знаки коэффициентов генерации второй гармоники [6]

Вещество	d_{11}	d_{11}	d_{12}	d_{31}	d_{31}	d_{33}
Барий-натрия ниобат				—	—	—
Барий титанат						
Бериллия окись				—		—
Гадолиния молибдат				—	+	—
Галлия антимонид		+				
Галлия арсенид		+				
Галлия фосфид		+				
Индия арсенид		+				
Кадмия селенид				±		+
Кадмия сульфид				—		+
Кадмия теллурид		—				
Калия дигидрофосфат		+				
Кварц	+					
Кремния карбид				∓		±

Вещество	d_{11}	d_{11}	d_{12}	d_{31}	d_{31}	d_{33}
Лития боратная монокристалл					—	+
Литий галлат						
Лития иодат				—	+	—
Литий ниобат				—		—
Литий тантал				+		—
Меди хлорид				+		—
Натрия нитрит			+			
Свинца ниобат				∓	±	
Свинца титанат				±	±	±
Тербия молибдат				∓		±
Цинка окись				—	±	
Цинка селенид				+		—
Цинка сульфид			?			
Цинка теллурид			+			+
			+			

Показатели преломления нелинейных кристаллов

В табл. 34.20 представлены данные по показателям преломления нелинейных кристаллов [6]. Для двуосных кристаллов принято, что главные показатели преломления соотносятся как

$$n_\gamma \geq n_\beta \geq n_\alpha .$$

Буквами a, b, c обозначены кристаллографические, а X, Y, Z — диэлектрические оси кристаллов. В ряде случаев даны дисперсионные соотношения и значения показателей преломления с температурой. В этих формулах λ, ν и T представляются соответственно в мкм, см$^{-1}$ и °К.

Таблица 34.20

Показатели преломления нелинейных кристаллов [6]

Алюминия фосфат $AlPO_4$

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
0,4	1,5369	1,5465	1,4	1,5112	1,5196
0,5	1,5297	1,5389	1,6	1,5088	1,5174
0,6	1,5243	1,5331	1,8	1,5062	1,5145
0,7	1,5215	1,5301	2,0	1,5034	1,5116
0,8	1,5192	1,5281	2,2	1,5001	1,5083
1,0	1,5161	1,5245	2,4	1,4969	1,5046
1,2	1,5136	1,5223	2,6	1,4926	1,5006

Аммония дигидрофосфат ADP $NH_4H_2PO_4$

λ, мкм	n_o	n_e
0,2138560	1,62596	1,56738
0,2288018	1,60785	1,55138
0,2536649	1,58088	1,52589
0,2967278	1,56462	1,51339
0,3023199	1,56270	1,51163
0,3126663	1,55917	1,50853
0,3131545	1,55897	1,50832
0,3341476	1,55200	1,50313
0,3650146	1,54615	1,49790
0,3654633	1,54608	1,49712
0,3662578	1,54592	1,49696
0,3900410	1,54174	
0,4046561	1,53969	1,49159
0,4077811	1,53925	1,49123
0,4358350	1,53576	1,48831
0,4916036		1,48390
0,5460740	1,52602	1,48079
0,5769590	1,52478	1,47930
0,5790654	1,52466	1,47920
0,6328160	1,52166	1,47685
1,0139-5	1,50835	1,46890
1,128704	1,50440	1,46704
1,152276	1,50364	1,46666

$$n_o^2 = 2,302484 + 1,117089\cdot 10^{-10}\nu^2/(1 - \nu^2/7,605372\times 10^{10}) + 3,7\cdot 1906\cdot 10^{9}/(2,5\cdot 10^{10} - \nu^2)$$

$$n_e^2 = 2,168977 + 9,070312\cdot 10^{-11}\nu^2/(1 - \nu^2/7,786289\times 10^{10}) + 1,451540\cdot 10^{9}/(2,5\cdot 10^{10} - \nu^2)$$

$$\Delta n_o = (n_o^2 - 3,0297 n_o + 2,3004)\cdot 0,715\cdot 10^{-5}(298 - T)$$

$$\Delta n_e = n_e^2 (0,075\cdot 10^{-5})\cdot (298 - T)$$

Аммония дидейтерофосфат ADDP $ND_4D_2PO_4$

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
0,356	1,5414	1,4923	0,690	1,5142	1,4737
0,436	1,5196	1,4784	1,060	1,5088	1,4712

Аммония биоксалата моногидрат $(NH_4)_2C_2O_4\cdot H_2O$

λ, мкм	$n_\alpha = Z$	$n_\beta = Y$	$n_\gamma = X$
0,4471	1,4400	1,5599	1,6119
0,4713	1,4447	1,5561	1,6084
0,4922	1,4435	1,5544	1,6060
0,5016	1,4426	1,5536	1,6037
0,5461	1,4408	1,5493	1,5990
0,5780	1,4391	1,5470	1,5955
0,5876	1,4388	1,5469	1,5932
0,6678	1,4362	1,5423	1,5892
0,7016	1,4352	1,5406	1,5874
1,014	1,4295	1,5312	1,5763
1,129	1,4276	1,5284	1,5726
1,367	1,4235	1,5222	1,5652

Бария титанат $BaTiO_3$

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
0,4579	2,5037	2,4925	0,5321	2,4760	2,4125
0,4765	2,5355	2,4605	0,6328	2,4104	2,3637
0,4880	2,5206	2,4487	1,0642	2,3379	2,2570
0,5145	2,4917	2,4205	2,1284	2,2067	2,2593

$$n_o^2 = 1 + 4,2389\lambda^2/[\lambda^2 - (0,2229)^2]$$

$$n_e^2 = 1 + 4,6654\lambda^2/[\lambda^2 - (0,2067)^2]$$

Бария-натрия ниобат $Ba_2NaNb_5O_{15}$

λ, мкм	$n_\alpha = X$	$n_\beta = Y$	$n_\gamma = Z$
0,4579	2,2931	2,4266	2,4284
0,4765	2,2709	2,4076	2,4091
0,4880	2,2727	2,3974	2,3991
0,4965	2,2679	2,3903	2,3920
0,5017	2,2649	2,3862	2,3879
0,5145	2,2593	2,3767	2,3786
0,5321	2,2502	2,3656	2,3672
0,6328	2,2177	2,3205	2,3222
1,0642	2,1701	2,2567	2,2580

$$n_\alpha^2 = 1 + 3,6063\lambda^2/[\lambda^2 - (0,17911)^2]$$

$$n_\beta^2 = 1 + 3,9465\lambda^2/[\lambda^2 - (0,20035)^2]$$

$$n_\gamma^2 = 1 + 3,9452\lambda^2/[\lambda^2 - (0,20007)^2]$$

Бария-калия-натрия ниобат $K_xNa_{1-x}Ba_2Nb_5O_{15}$

$$n_o^2 = 3,6680 + 24,681/[(4,3001)^2 - (1,2394/\lambda)^2]$$

$$n_e^2 = 2,9198 + 40,137/[(5,1605)^2 - (1,2394/\lambda)^2] \text{ при } 22\ ^\circ C$$

Бензил $(C_6H_5)_2\text{-}(CO)_2$

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
0,4226	1,737	1,737	0,5461	1,667	1,684
0,4358	1,716	1,728	0,5780	1,660	1,680
0,4880	1,712	1,716	0,5893	1,658	1,679
0,4920	1,694	1,705	0,6560	1,648	1,672
0,4960	1,682	1,695			

$n_o^2 - 1 = 1,06 + 0,535\lambda^2/[\lambda^2 - (0,24)^2] + 0,0150\lambda^2/[\lambda^2 - (0,398)^2]$; $n_e^2 - 1 = 1,35 + 0,570\lambda^2/[\lambda^2 - (0,24)^2] + 0,0162\lambda^2/[\lambda^2 - (0,195)^2]$

Бериллия окись BeO, 22,4°C

λ, мкм	n_o	n_e
0,430	1,73039	
0,440	1,72924	1,74566
0,450	1,72820	1,74447
0,460	1,72725	1,74348
0,470	1,72626	1,74251
0,480	1,72542	1,74162
0,490	1,72460	1,74073
0,500	1,72386	1,74002
0,510	1,72306	1,73918
0,520	1,72249	1,73852
0,530	1,72177	1,73779
0,540	1,72121	1,73706
0,550	1,72062	1,73644
0,560	1,72005	1,73588
0,570	1,71950	1,73530
0,580	1,71903	1,73477
0,590	1,71850	1,73425
0,600	1,71795	1,73391
0,610	1,71762	1,73322
0,620	1,71710	1,73279
0,630	1,71668	1,73237
0,640	1,71632	1,73191
0,650	1,71589	1,73156
0,660	1,71554	1,73113
0,670	1,71517	1,73075
0,680	1,71482	1,73041
0,690	1,71450	

$n_o^2 - 1 = 1,915057\lambda^2/(\lambda^2 - 0,00727575) + 3,972393\lambda^2/(\lambda^2 - 159,31087)$; $n_e^2 - 1 = 1,972142\lambda^2/(\lambda^2 - 0,00748584) + 17,57875\lambda^2/(\lambda^2 - 779,49192)$

Висмута германат Bi_4GeO_{12}

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,4765	2,142	0,5321	$2,115_2$
0,4880	$2,135_2$	0,6328	$2,096_1$
0,4965	$2,131_2$	1,0642	$2,044_0$
0,5017	$2,128_2$		
0,5145	$2,123_2$		

$n^2 - 1 = 3,08956\lambda^2/(\lambda^2 - 0,01337)$

Гадолиния молибдат $Gd_2(MoO_4)_3$

λ, мкм	$n_{o\,(\parallel c)}$	$n_{e\,(\perp c)}$	$n_{(\parallel c)}$
0,4579	1,8758	1,8762	1,9342
0,4765	1,8694	1,8699	1,9270
0,4880	1,8659	1,8663	1,9229
0,4965	1,8634	1,8639	1,9201
0,5017	1,8621	1,8625	1,9185
0,5145	1,8588	1,8593	1,9146
0,6321	1,8545	1,8549	1,9102
0,6328	1,8385	1,8390	1,8915
1,064	1,8142	1,8146	1,8637

$n_o^2 - 1 = 2,2450\lambda^2/(\lambda^2 - 0,022383)$; $n_e^2 - 1 = 2,246542\lambda^2/(\lambda^2 - 0,0225803)$; $n^2 - 1 = 2,419575\lambda^2/(\lambda^2 - 0,0246458)$

Галлия арсенид GaAs

λ, мкм	n	λ, мкм	n
1,127	3,455	1,550	3,375
1,239	3,425	1,652	3,366
1,377	3,400		

Галлия фосфид GaP

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,5	3,4595	1,8	3,0439
0,6	3,3496	2,0	3,0379
0,7	3,2442	2,2	3,0331
0,8	3,1830	2,4	3,0299
0,9	3,1430	2,6	3,0271
1,0	3,1192	2,8	3,0236
1,1	3,0981	3,0	3,0215
1,2	3,0844	3,2	3,0197
1,4	3,0646	3,4	3,0181
1,6	3,0549	3,6	3,0166
		3,8	3,0159
		4,0	3,0137

Германия-цинка фосфид ZnGeP

λ, мкм	n_o	n_e
0,64	3,5052	3,5902
0,66	3,4756	3,5407
0,68	3,4477	3,5160
0,70	3,4233	3,4865
0,75	3,3730	3,4329
0,80	3,3357	3,3915
0,85	3,3063	3,3599
0,90	3,2830	3,3338
0,95	3,2638	3,3124
1,00	3,2478	3,2951
1,20	3,2054	3,2495
1,40	3,1820	3,2254
2,00	3,1490	3,1880

Германия-цинка фосфид $ZnGeP^2$

λ, мкм	n_o	n_e
2,00	3,1368	3,1750
3,00	3,1304	3,1693
3,10	3,1263	3,1647
4,00	3,1223	3,1608
4,50	3,1186	3,1561
5,00	3,1149	3,1533
6,00	3,1101	3,1460
7,00	3,1040	3,1320
8,00	3,0961	3,1360
9,00	3,0880	3,1272
10,00	3,0788	3,1187
11,00	3,0689	3,1087
12,00	3,0552	3,0949

Индия антимонид InSb

λ, мкм	n	λ, мкм	n
7,87	4,0	15,13	3,68
8,00	3,99	16,79	3,67
9,01	3,96	16,96	3,66
10,06	3,95	17,85	3,65
11,01	3,93	18,86	3,64
12,06	3,92	19,96	3,62
12,98	3,91	21,16	3,61
13,90	3,90	22,20	3,60

Кадмия селенид CdSe

λ, мкм	n_o	n_e
0,8	2,6448	2,6007
0,9	2,5825	2,5027
1,0	2,5502	2,5096
1,2	2,5132	2,5331
1,4	2,4929	2,5133
1,6	2,4816	2,5006
1,8	2,4732	2,4930
2,0	2,4662	2,4875
2,2	2,4642	2,4840
2,4	2,4612	2,4798
2,6	2,4590	2,4764
2,8	2,4562	2,4757
3,0	2,4542	2,4741
3,2	2,4532	2,4726
3,4	2,4516	2,4714
3,6	2,4509	2,4702
3,8	2,4496	2,4694
4,0	2,4491	2,4685

Кадмия сульфид CdS

λ, мкм	n_o	n_e
0,5120	—	2,751
0,5130	—	2,743
0,5140	—	2,737
0,5150	2,743	2,726
0,5160	2,735	2,720
0,5170	2,727	2,714
0,5180	2,718	2,706
0,5190	2,709	2,702
0,5200	2,702	2,696
0,5210	2,700	2,694
0,5220	2,694	2,689
0,5230	2,687	2,685
0,5240	2,681	2,680
0,5250	2,674	2,675
0,5275	2,661	2,665
0,5300	2,649	2,654
0,5325	2,636	2,644
0,5350	2,628	2,637
0,5375	2,617	2,628
0,5400	2,609	2,622
0,5425	2,602	2,612
0,5450	2,594	2,600
0,5475	2,587	2,600
0,5500	2,580	2,593
0,5750	2,528	2,545
0,6000	2,493	2,511
0,6250	2,467	2,484
0,6500	2,446	2,463
0,6750	2,427	2,446
0,7000	2,414	2,432
0,7500	2,390	2,409
0,8000	2,374	2,392
0,8500	2,364	2,376
0,9000	2,359	2,368
0,9500	2,348	2,359
1,0000	2,334	2,352
1,0500	2,328	2,346
1,1000	2,324	2,340
1,1500	2,320	2,336
1,2000	2,316	2,332
1,2500	2,312	2,329
1,3000	2,309	2,326
1,3500	2,306	2,323
1,4000	2,304	2,321

Кадмия теллурид CdTe

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,903	2,91	7,0—10,0	2,69
1,0	2,84	10	2,69
1,1	2,81	14,0	2,69
1,0—1,3	2,82		

$n^2 = 1 + 4,68 + 1,532^2/(\lambda^2 - 0,356)$

Кадмия-ртути тиоцианат $Cd[Hg(SCN)_4]$, 27°C

λ, мкм	n_o	n_e
0,530	2,005	1,792
0,633	1,970	1,753
1,06	1,924	1,728

Калия битартрат $K_2C_4H_4O_6 \cdot {}^1/_2H_2O$

λ, мкм	n_α	n_β	n_γ
0,3650	1,5156	1,5487	1,5630
0,4047	1,5090	1,5409	1,5541
0,4358	1,5049	1,5368	1,5492
0,5461	1,4964	1,5271	1,5384
0,5780	1,4945	1,5250	1,5363
1,014	1,4846	1,5142	1,5248
1,129	1,4832	1,5127	1,5218
1,367	1,4809	1,5102	1,5183

Калия дигидроарсенат KDA KH_2AsO_4

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
0,4861	1,5762	1,5252	0,5893	1,5674	1,5179
0,5460	1,5707	1,5206	0,6563	1,5632	1,5146

Калия дигидрофосфат KDP KH_2PO_4

λ, мкм	n_o	n_e
0,2138600	1,60177	1,54015
0,2536519	1,57631	1,51586
0,2800620	1,55265	1,50416
0,2880828	1,54618	1,49624
0,3021400	1,54433	1,49708
0,3035761		1,49667
0,3125063	1,54117	1,49434
0,3131525	1,54069	1,49419
0,3341478		1,48964
0,3650146	1,52962	1,48432
0,3654833	1,52925	1,48423
0,3662878	1,52509	1,48409
0,3906410		1,48089
0,4046561	1,52311	1,47927
0,4077814	1,52301	1,47998
0,4358350	1,51900	1,47640
0,4916296		1,47254
0,5460740	1,51152	1,46982
0,5769560	1,50987	
0,5790554	1,50977	1,46870
0,6328160	1,50737	1,46685
1,013975	1,49535	1,46041
1,128704	1,49205	1,45917
1,152276	1,49135	1,45893
1,357070	1,48155	
1,523100		1,45521
1,628625		1,45012

$n_o^2 = 2,259276 + 1,008956 \cdot 10^{-10}\lambda^2/(1 - \lambda^2/7,726406 \cdot 10^2) + \frac{3,291306 \cdot 10^5}{(2,5 \cdot 10^3 - \lambda^2)}$; $n_e^2 = 2,132668 + 8,637494 \cdot 10^{-10}\lambda^2/(1 - \lambda^2/7,142531 \cdot 10^2) + 8,069951 \cdot 10^5/(2,5 \cdot 10^3 - \lambda^2)$; $\Delta n_o = 0,402 \cdot 10^{-4} \cdot (n_o^2 - 1,4321)(298 - T)$; $\Delta n_e = 0,221 \cdot 10^{-4} \times (n_e^2 - 1,105)(298 - T)$

Калия дидейтерофосфат KDDR KD_2PO_4

λ, мкм	n_o	n_e
0,4047	1,5189	1,4776
0,4076	1,5185	1,4772
0,4358	1,5155	1,4747
0,4916	1,5111	1,4710
0,5461	1,5079	1,4685
0,5779	1,5063	1,4670
0,6234	1,5044	1,4656
0,6507	1,5022	1,4639
1,000	1,4700	1,4400

$\Delta n_o = 0,228 \cdot 10^{-4} \cdot (n_o^2 - 1,047)(298 - T)$

$\Delta n_e = 0,955 \cdot 10^{-4} \cdot n_e^2 (298 - T)$

Калия дитионат $K_2S_2O_6$

λ, мкм	n_o	n_e
0,315	1,480	1,568
0,334	1,475	1,557
0,355	1,470	1,546
0,405	1,465	1,537
0,436	1,463	1,530
0,546	1,456	1,518
0,578	1,454	1,516
1,014	1,448	1,503
1,367	1,440	1,500
1,709	1,444	1,496
2,900	1,436	1,489
3,39	1,430	1,485

Калия-литий ниобат $K_3Li_2Nb_5O_{15}$

λ, мкм	n_o	n_e
0,4500	2,4049	2,2512
0,4750	2,3751	2,2315
0,5000	2,3546	2,2144
0,5250	2,3349	2,2010
0,5324	2,3260	2,1975
0,5500	2,3156	2,1900
0,5750	2,3010	2,1801
0,6000	2,2890	2,1720
0,6250	2,2799	2,1645
0,6500	2,2711	2,1586
0,6750	2,2631	2,1529

$n_o^2 - 1 = 3,7063\lambda^2/(\lambda^2 - 0,04601)$

$n_e^2 - 1 = 3,3499\lambda^2/(\lambda^2 - 0,03564)$

α-Кварц α-SiO_2

λ, мкм	n_o	n_e
0,185	1,65751	1,68968
0,198	1,65087	1,68394
0,231	1,61395	1,62655
0,340	1,56747	1,57737
0,394	1,55846	1,56805
0,434	1,55396	1,56339
0,506	1,54822	1,55746
0,5893	1,54424	1,55335
0,7680	1,53903	1,54791
0,8325	1,53773	1,54661
0,9014	1,53711	1,54592
1,1592	1,53283	1,54152
1,3070	1,53090	1,53951
1,3968	1,52977	1,53832
1,4792	1,52865	1,53710
1,5411	1,52781	1,53630
1,6815	1,52583	1,53422
1,7614	1,52466	1,53301
1,9457	1,52161	1,53004
2,0581	1,52000	1,52823
2,3000	1,51601	
2,5000	1,50986	
3,0000	1,49650	
3,5000	1,48451	
4,0000	1,4071	
4,2000	1,4569	
5,000	1,417	
6,4600	1,274	
7,000	1,167	

Кислота гиппуровая $C_6H_5CO\text{-}NH(CH_2COOH)$

λ, мкм	n_α	n_β	n_γ
0,550	1,56	1,61	1,78
0,589	1,5316	1,5921	1,7598
0,700	1,534	1,589	1,75

Кислота α-иодноватая α-HIO_3

λ, мкм	$n_{\gamma=a=x}$	$n_{\alpha=c=z}$	$n_{\beta=b=y}$
0,450	1,8796	2,0184	2,0560
0,500	1,8621	1,9930	2,0192
0,5325	1,8547	1,9829	2,0103
0,560	1,8497	1,9787	2,0049
0,600	1,8400	1,9665	1,9922
0,650	1,8342	1,9571	1,9812
0,700	1,8308	1,9506	1,9755
0,800	1,8250	1,9407	1,9672
0,850	1,8225	1,9378	1,9639
0,900	1,8206	1,9347	1,9596
0,950	1,8189	1,9318	1,9564
1,000	1,8147	1,9292	1,9537
1,065	1,8123	1,9275	1,9508
1,100	1,8116	1,9260	1,9484
1,200	1,8086	1,9230	1,9438

Кремния карбид SiC

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
0,4880	2,6916	2,7423	0,6321	2,6569	2,7167
0,5017	2,6857	2,7377	0,6328	2,6561	2,6791
0,5146	2,6771	2,7261	1,0042	2,5830	2,6225

$n_o^2 = 1 + 5,5510\lambda^2/[\lambda^2 - (0,1625)^2]$

$n_e^2 = 1 + 6,7382\lambda^2/[\lambda^2 - (0,1680)^2]$

Лития галлат $LiGaO_2$

λ, мкм	n_α, β=Y, z	n_γ=x	λ, мкм	n_α, β=Y, z	n_γ=x
0,4103	1,7702	1,804	1,4000	1,7095	1,7372
0,4400	1,757	1,7895	1,6000	1,707	1,735
0,5000	1,7400	1,7785	1,8000	1,7045	1,7293
0,5500	1,7395	1,7702	2,0000	1,7025	1,7303
0,6000	1,7343	1,7615	2,2000	1,7005	1,7269
0,7000	1,7268	1,7600	2,4000	1,6978	1,7242
0,8000	1,7216	1,7507	2,6000	1,6955	1,7225
0,9000	1,7185	1,7475	2,8000	1,6926	1,720
1,0000	1,716	1,7445			
1,2000	1,7122	1,7405			

Лития иодат $LiIO_3$

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
0,4579	1,9160	1,7633	0,5145	1,9018	1,7606
0,4765	1,9124	1,7586	0,5321	1,8978	1,7475
0,4880	1,9099	1,7560	0,6328	1,8815	1,7351
0,4965	1,9055	1,7511	1,0042	1,8517	1,7169
0,5017	1,9051	1,7531			

$n_o^2 = 1 + 2,40109\lambda^2/(\lambda^2 - 0,091865)$

$n_e^2 = 1 + 1,91359\lambda^2/(\lambda^2 - 0,01940)$

Лития формиата монгидрат $LiCHO_2 \cdot H_2O$

λ, мкм	$n_{\alpha=X=a}$	$n_{\beta=Y=b}$	$n_{\gamma=Z=c}$
0,4579	1,3706	1,4901	1,5306
0,4765	1,3698	1,4883	1,5296
0,4880	1,3692	1,4873	1,5272
0,4965	1,3688	1,4866	1,5264
0,5017	1,3686	1,4862	1,5258
0,5145	1,3680	1,4851	1,5245
0,5321	1,3675	1,4838	1,5229
0,6328	1,3645	1,4784	1,5163
1,0042	1,3593	1,4673	1,5036

$n_\alpha^2 = 1 + 0,8495\lambda^2/[\lambda^2 - (0,0903)^2]$; $n_\beta^2 = 1 + 1,1406\lambda^2/[\lambda^2 - (0,1183)^2]$; $n_\gamma^2 = 1 + 1,2464\lambda^2/[\lambda^2 - (0,1246)^2]$

Литий ниобат $LiNbO_3$

λ, мкм	n_o	n_e
0,42	2,4144	2,2638
0,45	2,3914	2,2765
0,50	2,3444	2,2440
0,55	2,3189	2,2241
0,60	2,3002	2,2083
0,70	2,2852	2,1964
0,80	2,2756	2,1874
0,90	2,2598	2,1741
1,00	2,2487	2,1647
1,20	2,2407	2,1560
1,40	2,2291	2,1461
1,40	2,2208	2,1410
1,60	2,2139	2,1351
2,00	2,2074	2,1297
2,20	2,2015	2,1244
2,40	2,1948	2,1187
2,60	2,1882	2,1138
2,60	2,1814	2,1080
3,00	2,1741	2,1020
3,20	2,1663	2,0955
3,40	2,1580	2,0886
3,60	2,1493	2,0814
3,80	2,1398	2,0736
4,00	2,1298	2,0652
4,20	2,1193	2,0564

$$n_o^2-1=3,9130+\frac{1,173\cdot10^6+1,65\cdot10^{-3}\gamma^2}{\lambda^2-(2,12\cdot10^4+2,7\cdot10^{-5}\gamma^2)^2}-2,78\cdot10^{-8}\gamma^2;\quad n_e^2-1=3,5567+2,606\cdot10^{-3}\gamma^2+\frac{0,970\cdot10^6+2,70\cdot10^{-3}\gamma^2}{\lambda^2-(2,01\cdot10^4+6,4\cdot10^{-5}\gamma^2)^2}-2,24\cdot10^{-8}\gamma^2$$

Литий сульфата моногидрат $LiSO_4\cdot H_2O$

λ, мкм	n_x	n_y	n_z
0,3650	1,4771	1,4926	1,5029
0,4047	1,4722	1,4876	1,4980
0,4358	1,4693	1,4849	1,4951
0,4471	1,4685	1,4834	1,4941
0,4713	1,4670		1,4926
0,5016	1,4652	1,4802	1,4906
0,5461	1,4631	1,4782	1,4882
0,5780	1,4619	1,4772	1,4867
0,6076	1,4616	1,4766	1,4856
0,6678	1,4593	1,4743	1,4836
0,7016	1,4585		1,4831
1,014	1,4635	1,4678	1,4777
1,129	1,4625	1,4666	1,4761
1,267	1,4602	1,4635	1,4732
1,530	1,4485		1,4708
1,709	1,4466	1,4589	1,4676

Литий тантал $LiTaO_3$

λ, мкм	n_o	n_e
0,45	2,2420	2,2468
0,50	2,2160	2,2206
0,60	2,1834	2,1878
0,70	2,1652	2,1696
0,80	2,1536	2,1578
0,90	2,1454	2,1493
1,00	2,1391	2,1432
1,20	2,1305	2,1341
1,40	2,1236	2,1273
1,60	2,1174	2,1213
1,80	2,1120	2,1170
2,00	2,1066	2,1115
2,20	2,1000	2,1063
2,40	2,0951	2,0993
2,60	2,0891	2,0936
2,80	2,0825	2,0871
3,00	2,0756	2,0800
3,20	2,0680	2,0727
3,40	2,0601	2,0649
3,60	2,0513	2,0561
3,80	2,0424	2,0473
4,00	2,0335	2,0377

Медь бромид CuBr

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,4358	2,336±0,002	0,5791	2,122±0,002
0,4678	2,229±0,002	0,5896	2,117±0,002
0,4800	2,267±0,002	0,6438	2,096±0,002
0,5086	2,171±0,002	0,7699	2,060±0,004
0,5461	2,141±0,002		

Медь иодид CuI

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,4358	2,502±0,002	0,5791	2,347±0,002
0,4678	2,461±0,002	0,5896	2,342±0,002
0,4800	2,448±0,002	0,6438	2,315±0,002
0,5086	2,411±0,002	0,7699	2,250±0,004
0,5461	2,372±0,002		

Медь хлорид CuCl

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,4047	2,153±0,001	0,5086	2,004±0,001
0,4078	2,141±0,001	0,5461	1,987±0,001
0,4358	2,072±0,001	0,5791	1,976±0,001
0,4678	2,031±0,001	0,5896	1,972±0,001
0,4800	2,023±0,001	0,6438	1,958±0,001
		0,7699	1,941±0,002

Натрия бромат $NaBrO_3$

$$n^2-1=1,3194\gamma^2/[\lambda^2-(0,06)^2]+0,2357\gamma^2/[\lambda^2-(0,2)^2]-0,0174\lambda^2$$

Натрия нитрат $NaNO_3$

λ, мкм	$n_{\text{синий}}$ — X	$n_{\text{зелен}}$ — Y	$n_{\text{красн}}$ — Z
0,4358	1,3531	1,4212	1,690
0,4800	1,350	1,4166	1,675
0,5086	1,3484	1,4158	1,6685
0,5461	1,3470	1,4137	1,6620
0,5791	1,3456	1,4122	1,6567
0,5869	1,3455	1,4120	1,6555
0,6438	1,3442	1,4100	1,6510

Натрия хлорат $NaClO_3$

λ, мкм	n	λ, мкм	
0,2510	1,616	0,4862	1,522
0,2573	1,585	0,5172	1,519
0,2748	1,572	0,5892	1,515
0,3256	1,549	0,6563	1,513
0,3404	1,544	0,6867	1,512
0,3467	1,542	0,7168	1,511
0,3611	1,539		

$n^2 - 1 = 1,1825\lambda^2/[\lambda^2 - (0,09)^2] + 0,07992\lambda^2/[\lambda^2 - (0,165)^2] - 0,00664\lambda^2$

Пираргирит Ag_3SbS_3

$n_o^2 - 1 = 6,585\lambda^2/[\lambda^2 - (0,4)^2] + 0,1132\lambda^2/[\lambda^2 - (15)^2]$

$n_e^2 - 1 = 6,846\lambda^2/[\lambda^2 - (0,4)^2] + 0,0802\lambda^2/[\lambda^2 - (15)^2]$

Прустит Ag_3AsS_3, 20°C

λ, мкм	n_o	n_e
0,6976		2,7896
0,6328	3,0190	2,7391
0,6678	2,9604	2,7094
1,0140	2,8264	2,5901
1,1290	2,8057	2,5705
1,3670	2,7833	2,5570
1,530	2,7726	2,5485
1,700	2,7654	2,5423
2,50	2,7478	2,5262
3,56	2,7379	2,5213
4,62	2,7318	2,5178

$n_o^2 = 7,483 + 0,474/(\lambda^2 - 0,09) - 0,0019\lambda^2$

$n_e^2 = 6,346 + 0,342/(\lambda^2 - 0,09) - 0,0011\lambda^2$

Ртути сульфат α-HgS

λ, мкм	n_o	n_e
0,62	2,9028	3,2500
0,65	2,8665	3,2064
0,68	2,8384	3,1708

Продолжение табл. 34.20

λ, мкм	n_o	n_e
0,70	2,8224	3,1499
0,80	2,7704	3,0743
0,90	2,7383	3,0340
1,00	2,7190	3,0090
1,20	2,6884	2,9680
1,40	2,6700	2,9475
1,60	2,6585	2,9344
1,80	2,6507	2,9258
2,00	2,6516	2,9194
2,20	2,6483	2,9146
2,40	2,6455	2,9109
2,60	2,6433	2,9079
2,80	2,6414	2,9052
3,00	2,6401	2,9036
3,20	2,6387	2,9017
3,40	2,6376	2,9001
3,60	2,6368	2,8987
3,80	2,6360	2,8971
4,00	2,6348	2,8960
5,00	2,6297	2,8853
6,00	2,6253	2,8799
7,00	2,6176	2,8741
8,00	2,6112	2,8674
9,00	2,6066	2,8608
10,00	2,6018	2,8522
11,00	2,5914	2,8434

Рубидия дигидрофосфат RDP RbH_2PO_4

λ, мкм	n_o	n_e
0,4700	1,514	1,4961
0,4880	1,5132	1,4832
0,4965	1,5129	1,4827
0,5017	1,5121	1,4825
0,5145	1,5110	1,4820
0,5321	1,5103	1,4811
0,6328	1,4976	1,4775
1,0642	1,4926	1,4700

$n_o^2 - 1 = 1,2069\lambda^2/(\lambda^2 - 0,01539)$

$n_e^2 - 1 = 1,151239\lambda^2/(\lambda^2 - 0,010048)$

Свинца ниобат $PbNb_4O_{11}$

λ, мкм	$n_{\text{синий}}$ — X	$n_{\text{зелен}}$ — Y	$n_{\text{красн}}$ — Z
0,4579	2,4754	2,4766	2,5047
0,4765	2,4564	2,4671	2,4945
0,4880	2,4445	2,4465	2,4735
0,4965	2,4371	2,4392	2,468
0,5017	2,4329	2,435	2,4618
0,5145	2,4231	2,4254	2,4519
0,5321	2,4113	2,4137	2,4386
0,6328	2,3644	2,3667	2,3922
1,0642	2,2979	2,301	2,3254

$n_x^2 - 1 = 4,125\lambda^2/[\lambda^2 - (0,202)^2]$; $n_y^2 - 1 = 4,139\lambda^2/[\lambda^2 - (0,2011)^2]$ $n_z^2 - 1 = 4,246\lambda^2/[\lambda^2 - (0,2014)^2]$

Свинца титанат $PbTiO_3$

λ, мкм	n_o	n_e
0,4880	2,793	2,7744
0,5017	2,7742	2,7571
0,5145	2,7596	2,7431
0,5321	2,7393	2,7230
0,6328	2,6676	2,6591
1,0642	2,5712	2,5602
1,152	2,5637	2,5623

$n_o^2 = 1 + 5,359\lambda^2/[\lambda^2 - (0,221)^2]$

$n_e^2 = 1 + 5,365\lambda^2/[\lambda^2 - (0,2170)^2]$

Селен Se

λ, мкм	n_o	n_e
1,06	2,790±0,006	3,608±0,008
1,16	2,737±0,006	3,573±0,008
3,39	2,660±0,01	3,466±0,01
10,60	2,64±0,01	3,41±0,01

Серебра тиогаллат $AgGaS_2$, 20°C

λ, мкм	n_o	n_e
0,4916	2,700	2,710
0,5016	2,683	2,676
0,5461	2,619	2,585
0,5780	2,587	2,548
0,5876	2,579	2,537
0,6678	2,529	2,481

$n_o^2 = 5,728 + 0,2410/(\lambda^2 - 0,0970) - 0,00210\lambda^2$

$n_e^2 = 5,497 + 0,2026/(\lambda^2 - 0,1307) - 0,00233\lambda^2$

Теллур Te

λ, мкм	n_o	n_e
4,0	6,372	4,929
5,0	6,316	4,864
6,0	6,286	4,838
7,0	6,270	4,821
8,0	6,257	4,809
9,0	6,253	4,802
10,0	6,246	4,796
12,0	6,237	4,789
14,0	6,230	4,785

Тербия молибдат $Tb(MoO_4)_3$

λ, мкм	$n_{\alpha=b}=Y$	$n_{\beta=a}=X$	$n_{\gamma=c}=Z$
0,4579	1,8864	1,8867	1,9433
0,4765	1,8797	1,8800	1,9358

Продолжение табл. 34.20

λ, мкм	$n_{\alpha=b}=Y$	$n_{\beta=a}=X$	$n_{\gamma=c}=Z$
0,4880	1,8760	1,8764	1,9316
0,4965	1,8734	1,8739	1,9288
0,5017	1,8720	1,8724	1,9271
0,5145	1,8687	1,8690	1,9232
0,5321	1,8645	1,8649	1,9185
0,6328	1,8476	1,8482	1,8993
1,0642	1,8222	1,8228	1,8704

$n_\alpha^2 = 1 + 2,272413\lambda^2/(\lambda^2 - 0,023359)$

$n_\beta^2 = 1 + 2,273955\lambda^2/(\lambda^2 - 0,02335)$

$n_\gamma^2 = 1 + 2,440016\lambda^2/(\lambda^2 - 0,025133)$

α-Треонин

λ, мкм	$n_{\alpha=X}$	$n_{\beta=Y}$	$n_{\gamma=Z}$
0,4079	1,5299	1,6039	1,6126
0,4765	1,5282	1,6017	1,6100
0,4880	1,5272	1,6004	1,6087
0,4965	1,5266	1,5996	1,6077
0,5017	1,5263	1,5991	1,6072
0,5145	1,5254	1,5979	1,6059
0,5321	1,5243	1,5955	1,6043
0,6328	1,5196	1,5898	1,5974
1,0642	1,5114	1,5788	1,5855

$n_\alpha^2 = 1 + 1,2739\lambda^2/[\lambda^2 - (0,1032)^2]$

$n_\beta^2 = 1 + 1,477\lambda^2/[\lambda^2 - (0,1137)^2]$

$n_\gamma^2 = 1 + 1,497\lambda^2/[\lambda^2 - (0,1169)^2]$

Турмалин

λ, мкм	n_o	n_e
0,4765	1,6474	1,6273
0,4880	1,6465	1,6263
0,4965	1,6457	1,6256
0,5017	1,6454	1,6251
0,5145	1,6446	1,6248
0,5320	1,6433	1,6231
0,6328	1,6376	1,6163
1,0642	1,6274	1,6068

$n_o^2 - 1 = 1,63362\lambda^2/(\lambda^2 - 0,010734)$

$n_e^2 - 1 = 1,672507\lambda^2/(\lambda^2 - 0,011346)$

Эритрогин $(CH_2)_4N_4$

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,4861	1,5984	0,5780	1,5899
0,5016	1,5973	0,5876	1,5893
0,5461	1,5917	0,6676	1,5866

Цинка окись ZnO

λ, мкм	n_o	n_e
0,45	2,1058	2,1231
0,50	2,0511	2,0681
0,60	1,9985	2,0147
0,70	1,9705	1,9857
0,80	1,9567	1,9702
0,90	1,9453	1,9564
1,00	1,9435	1,9589
1,20	1,9354	1,9500
1,40	1,9286	1,9429
1,60	1,9257	1,9402
1,80	1,9226	1,9370
2,00	1,9197	1,9340
2,20	1,9173	1,9313
2,40	1,9152	1,9287
2,60	1,9128	1,9265
2,80	1,9100	1,9251
3,00	1,9075	1,9214
3,20	1,9049	1,9186
3,40	1,9022	1,9160
3,60	1,8994	1,9127
3,80	1,8964	1,9101
4,00	1,8931	1,9066

Цинка селенид ZnSe

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,589	2,61	1,5	2,45
1,0	2,46	2,0	2,44

$$n^2 = 1 + 2,835 + 2,0452\lambda^2/(\lambda^2 - 0,1091)$$

Цинка сульфид ZnS

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
0,3600	2,706	2,709	0,5000	2,421	2,426
0,3700	2,657	2,660	0,5250	2,402	2,407
0,4000	2,560	2,564	0,5500	2,386	2,392
0,4100	2,539	2,544	0,6750	2,375	2,378
0,4300	2,522	2,525	0,6000	2,363	2,368
			0,7250	2,354	2,358
0,4250	2,511	2,514			
0,4300	2,502	2,505	0,6500	2,346	2,350
0,4400	2,486	2,488	0,6750	2,339	2,343
0,4500	2,473	2,477	0,7000	2,332	2,337
0,4600	2,459	2,463	0,8000	2,324	2,328
			0,9000	2,310	2,315
0,4700	2,448	2,453			
0,4750	2,445	2,449	1,000	2,301	2,303
0,4800	2,438	2,443	1,200	2,290	2,294
0,4900	2,428	2,433	1,400	2,285	2,289

Цинка теллурид ZnTe, 26°C

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,569	3,111	0,760	2,871
0,577	3,085	0,770	2,866
0,579	3,079	0,800	2,853
0,589	3,064	1,000	2,790
0,600	3,055	1,200	2,758
0,610	3,005	1,300	2,744
0,650	2,962	1,400	2,741
0,700	2,913	1,500	2,734
0,725	2,890	1,515	2,734
0,750	2,879	2,000	2,71

Вынужденное рассеяние света

В сильном световом поле в нелинейной среде может происходить взаимодействие оптических волн не только друг с другом, но и с акустическими и молекулярными колебаниями вещества. Интенсивная световая волна частоты ω, возбуждая в среде когерентные акустические или молекулярные колебания с частотой Ω, одновременно дает рассеянную световую волну с частотой

$$\omega' = \omega \pm \Omega.$$

Если возбуждаемые колебания являются акустическими, то рассеяние носит название вынужденного рассеяния Мандельштама — Бриллюэна (ВРМБ) и

$$\Omega_{M-B} = 2\omega\,(v_{зв}/c)\sin(\theta/2),$$

где $v_{зв}$ и c — соответственно скорости звука и света в среде; θ — угол, отсчитываемый от направления распространения световой волны (угол наблюдения). Наибольший сдвиг частоты происходит при рассеянии назад ($\theta = \pi$), при этом $\Omega_{M-B} \sim 10^{11}$ гц (~ 1 см$^{-1}$).

Если возбуждаются молекулярные колебания, то в зависимости от строения молекул вещества $\Omega \sim (100 \div 1000)$ см$^{-1}$ и рассеяние носит название вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). В общем случае в ВКР может наблюдаться целый набор частот[9]

$$\omega' = \omega \pm n\Omega' \pm n\Omega'' \pm \ldots,$$

где Ω', Ω'' — характерные молекулярные колебания данного вещества, а n и n — целые числа.

Характерные сдвиги частот Ω при ВКР [7]

Жидкости	Ω, см$^{-1}$
Бромнафтин	292
Тетрахлористый углерод	447
Четыреххлористый углерод	460
Этил иодистый	497
Гексафторбензол	615
Бромоформ	539
Трихлорэтилен	640
Сероуглерод	656
Хлороформ	667
о-Ксилол	730

[9] Для рассеяния Мандельштама—Бриллюэна аналогично (k—вектор):

$$\omega' = \omega + kV_{M-B}.$$

	ν, см⁻¹
α-Диметилфенетиламин	836
Диоксан	836
Морфолин	841
Тиофенол	916
Нитрометан	927
Бензол дейтерированный	944
Кумол	990
1,3-Дибромбензол	990
Бензол	992
Пиридин	992
Анилин	997
Стирол	998
м-Толуидин	999
Бромбензол	1000
Хлорбензол	1001
Бензонитрил	1002
трет-Бутилбензол	1002
Этилбензол	1002
Толуол	1004
Фторбензол	1012
γ-Пиколин	1016
м-Крезол	1029
1-Фтор-2-хлорбензол	1030
м-Дихлорбензол	1030
Иодбензол	1070
Бензоил хлористый	1086
Бензальдегид	1089
Анизол	1097
Пирол	1178
Фуран	1180
Стирол	1315
Нитробензол	1344
1-Бромнафталин	1368
1-Хлорнафталин	1368
2-Этилнафталин	1381
м-Нитротолуол	1389
Хиноксалин	1427
Бромциклогексан	1438
Фурфурол	1522
Метиловый эфир салициловой кислоты	1612
Коричный альдегид	1624
Стирол	1629
2-Метилбутанол	1638
Пентадиен	1655
Изопрен	1792
Гексин-1	2116
о-Дихлорбензол	2202
Бензонитрил	2229
Ацетонитрил	2250
1,2-Диметилпиперидин	2252
Метилциклогексан	2817
Метиловый спирт	2831
цис-, транс-1,3-Диметилциклогексан	2844
Тетрагидрофуран	2849
Циклогексан	2852
цис-1,2-Диметилциклогексан	2854
α-Диметилфенетиламин	2856
Диоксан	2863
Циклогексанол	2863
Циклогексанон	2863
цис-, транс-1,3-Диметилциклогексан	2870
цис-1,4-Диметилциклогексан	2873
Циклогексан	2884
Хлористый метилен	2902
Морфолин	2902
2-Октан	2906
2,3-Диметил-1,5 гексадиен	2910
Диоксан	2910
м-Ксилол	2913
Гексин-1	2915
цис-2-Гептен	2920

	ν, см⁻¹
Мезитилен	2920
2-Бромпропан	2920
Ацетон	2921
Этиловый спирт	2921
Карлон	2922
цис-1,2-Диметилциклогексан	2927
Диметилформамид	2930
2-Хлор-2-Метилбутан	2931
2-Октан	2931
цис, транс-1,3-Диметилгексан	2931
м-Ксилол	2933
1,2-Диэтиловый эфир винной кислоты	2933
о-Ксилол	2933
Гиперидин	2933
1,2-Диэтилбензол	2934
2-Хлор-2-Метилбутен	2935
1-Бромпропан	2935
Пиперидин	2936
Тетрагидрофуран	2939
Пиперидин	2940
Циклогексанон	2945
2-Нитропропан	2948
1,2 Диэтилкарбонат	2955
1,2-Дихлорэтан	2956
транс-Дихлорэтилен	2956
1-Бромпропан	2962
2-Хлор-2-Метилбутан	2962
α-Диметилфенетиламин	2967
Диоксан	2967
Циклогексанол	2982
Циклопентан	2982
Циклопентанол	2982
Бромциклопентан	2982
о-Дихлорбензол	2982
м-Хлортолуол	2982
о-Пиколин	2982
м-Ксилол	2988
п-Ксилол	2992
Дибутилфталат	2992
1,1,1-Трихлорэтан	3018
Хлорпропан бензол	3022
Изофорон	3022
Нитроэтилметиламин	3022
Пропаметилкетон	3022
Циклогексанол	3026
Стирол	3026
Бензол	3064
трет-Бутилбензол	3064
1-Фтор-2-Хлорбензол	3064
Жженка	3090
Псевдокумол	3093
Уксусная кислота	3102
Ацетонилацетон	3102
Метилметакрилат	3102
γ-Пиколин	3102
Анилин	3000
Вода	3651

Твердые вещества

	ν, см⁻¹
Кварц	128
Иодат лития	152
α-Сера	216
Иодат лития	248
Кварц	416
α-Сера	470
Нитрат лития	628
Вольфрамат кальция	911
Стильбен	997
Полистирол	1001
Кальцит	1084
Алмаз	1332

	Ω, см$^{-1}$
Нафталин	1380
Стилбен	1591
Триглицинсульфат	2422
Триглицинсульфат	2702
Триглицинсульфат	3022
Полистирол	3064
Газы	
Кислород	1552
Калий пар	2721
Метан	2916
Дейтерий	2991
Водород	4165

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaufman I. P., Turner E. H. Handbook of Lasers. Ed. Pressley R. J. The Chemical Rubber C°, Cleveland, 1971, p. 447.
2. Chen D. См. [1], p. 460.
3. Волькенштейн М. В. Молекулярная оптика. М.—Л., Гостехиздат, 1951.
4. Pinnow D. A. См. [1], p. 478.
5. Справочник химика. М.—Л., «Химия», 1965.
6. Singh S. См. [1], p. 489.
7. Johnson F. M. См. [1], p. 526.

ГЛАВА 35

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

35.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ В СПЕКТРОСКОПИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рентгеновское излучение называют электромагнитное полем, длины которых лежат в интервале от 80 до 10^{-4} нм.

Исторически первый и наиболее распространенный способ получения рентгеновского излучения состоит в бомбардировке твердого вещества заряженными частицами, ускоренными до достаточно больших энергий. При этом могут иметь место два механизма возникновения рентгеновского излучения.

При первом механизме рентгеновское излучение возникает как тормозное излучение заряженных частиц, взаимодействующих с полем атомов вещества. Спектр этого тормозного излучения имеет непрерывный характер, причем граничное значение длины волны не зависит от атомного номера вещества мишени и определяется только энергией заряженных частиц $h\nu_{гр} = E_{кин}$.

Второй механизм состоит в возбуждении электронов внутренних электронных оболочек атомов вещества мишени и последующем излучении этих атомов. Спектр возникающего таким образом рентгеновского излучения имеет линейчатый характер, причем длина волны однозначно определяется атомным номером Z и электронной структурой атомов вещества мишени.

В рентгеновской спектроскопии приняты следующие обозначения. *Термы уровней* атома, для которых главное квантовое число равно 1, 2, 3, 4, 5, 6, обозначаются соответственно буквами K, L, M, N, O, P. Индексы у этих букв соответствуют разным значениям орбитального и полного момента электрона согласно приведенной ниже схеме:

Уровень электрона в атоме	$1s$	$2s$	$2p_{1/2}$	$2p_{3/2}$	$3s$
Терм уровня	K	L_I	L_{II}	L_{III}	M_I
Уровень электрона в атоме	$3p_{1/2}$	$3p_{3/2}$	$3d_{3/2}$	$3d_{5/2}$	и т. д.
Терм уровня	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V	и т. д.

Линии, соответствующие переходам электронов в атоме на K-, L-, M-, N-оболочки, образуют K-, L-, M-, N-серии. Линии, возникающие при переходах по этой простой электронным уровней называются *диаграммными линиями*. Обозначения диаграммных линий и соответствующие им переходы приведены в табл. 35.1.

Таблица 35.1

Обозначения диаграммных линий рентгеновского излучения [2]

K-серия		L-серия		M-серия	
Переход	Индексы линии	Переход	Индексы линии	Переход	Индексы линии
$K—L_{II}$	α_2	$L_I—M_{II}$	β_4	$M_{III}—N_V$	γ
$K—L_{III}$	α_1	$L_I—M_{III}$	β_3	$M_{IV}—N_{III}$	δ
$K—M_{II}$	β_2	$L_I—M_{IV}$	β_{10}	$M_{IV}—N_{VI,VII}$	β
$K—M_{III}$	β_1	$L_I—M_V$	β_9	$M_{IV}—O_{II,III}$	η
$K—M_{IV}$	β_5^{II}	$L_I—N_{II}$	γ_2	$M_V—N_{II}$	ε_1
$K—M_V$	β_5^{I}	$L_I—N_{III}$	γ_3	$M_V—N_{III}$	ε_2
$K—M_{IV,V}$	β_6	$L_I—O_{II}$	γ_4	$M_V—N_{II,III}$	ζ
$K—N_{II}$	γ_5^{II}	$L_I—O_{III}$	γ_4	$M_V—N_{VI}$	α_2
$K—N_{III}$	β_2^{I}	$L_I—P_{II,III}$	γ_{13}	$M_V—N_{VII}$	α_1
$K—N_{II,III}$	β_9	$L_{II}—M_I$	η		
$K—N_{IV}$	γ_{11}	$L_{II}—M_{IV}$	β_1		
$K—N_V$	γ_2	$L_{II}—N_I$	γ_1		
		$L_{II}—N_{IV}$	γ_1		
		$L_{II}—O_I$	γ_2		
		$L_{II}—O_{IV}$	γ_6		
		$L_{III}—M_I$	l		
		$L_{III}—M_{II}$			
		$L_{III}—M_{III}$	s		
		$L_{III}—M_{IV}$	α_2		
		$L_{III}—M_V$	α_1		
		$L_{III}—N_I$	ζ_1		
		$L_{III}—N_{IV}$	β_{15}		
		$L_{III}—N_V$	β_6		
		$L_{III}—N_{VI,VII}$	β_7		
		$L_{III}—O_I$	γ_7		
		$L_{III}—O_{IV,V}$	β_5		

Переходы, имеющие одинаковое начальное (конечное) состояние и различающиеся значениями полного момента конечного (начального) состояния, дают две диаграммные линии, называемые *спин-дублетом*. Например, K_{α_1}- и K_{α_2}-линии образуют спин-дублет.

Помимо диаграммных линий в характеристическом спектре рентгеновского излучения существуют слабые по интенсивности линии, называемые *недиаграммными линиями*, или *сателлитами диаграммных линий*. Коротковолновые сателлиты могут возникать при дополнительной ионизации излучающего атома, а также при переходах на внутренний уровень с оптических уровней атомов, которые были предварительно возбуждены. Сателлиты, проявляющиеся с длинноволновой стороны от диаграммной линии, могут появляться при перекрестных переходах электронов атомов, образующих химическое соединение. Например, длинноволновой сателлит K-линии хлора проявляется в соединении KCl и может быть объяснен переходами $2p$ электронов ионов K^+ на уровень 1s ионов Cl^- [1, 2].

35.2. ЗАКОН МОЗЛИ И ПРАВИЛО СПИН-ДУБЛЕТОВ ДЛЯ ДИАГРАММНЫХ ЛИНИЙ

Для энергий валентных уровней атомов можно в первом приближении использовать выражение для уровней энергии водородоподобных атомов, тогда для длины волны зависимость от атомного номера вещества анода имеет следующий вид (закон Мозли):

$$\sqrt{k/R} = \varkappa (Z - \sigma),$$

где k — волновое число рентгеновской линии; R — постоянная Ридберга; величины $\varkappa$ и σ постоянны для рассматриваемой линии. Например, для K_{α_1}-линии $\sigma = 1{,}13$, $\varkappa = 0{,}874$; для L_{α_1}-линии $\sigma = 7{,}9$, $\varkappa = 0{,}376$.

В этом же приближении можно получить другое простое соотношение для $\Delta\lambda$-разности длин волн двух спин-дублетных рентгеновских линий: $\Delta\lambda$ не зависит от атомного номера [1].

35.3. ТАБЛИЦЫ ДИАГРАММНЫХ ЛИНИЙ И КРАЕВ ПОГЛОЩЕНИЯ ЛИНИЙ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Практическое использование рентгеновского излучения часто требует более точного знания характеристического спектра для каждого элемента, чем то, которое следует из закона Мозли. В табл. 35.2—35.5 представлены длины волн и края поглощения для различных элементов.

Длины волн рентгеновского излучения обычно измеряют в единицах иксов (X) или килоиксов (kX), которые имеют следующую связь с метрической единицей: $1\ kX = (0{,}100202 \pm 0{,}000009)$ нм.

K-серия

Таблица 35.2

Диаграммные линии и края поглощения *K*-серии элементов от Pm до Nb (длины волн в *X*) [1, 2]

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень K)											Край поглощения
	L_{II}	L_{III}	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V	N_{II}	N_{III}	N_{IV}	N_V	$O_{II,III}$	
^{61}Pm	107,661	102,597	—	90,926	—		66,302		—		—	67,436
^{63}Eu	110,233	105,171	—	93,184	—	—	69,496		—		—	70,616
^{64}Gd	113,251	107,830	—	95,594	—	—	72,761		—		—	73,868
^{65}Tb	116,611	110,576	—	97,917	—	—	76,103		—		—	77,194
^{66}Dy	118,261	113,412	—	100,402	—	—	79,521		—		—	80,598
^{68}Er	121,585	116,312	—	102,958	—	—	100,019		—		—	99,082
^{69}Tm	124,406	119,369	—	105,620	—	—	102,602		—		—	101,651
^{70}Yb	127,526	122,493	—	108,353	—	—	105,273		—		—	104,300
^{92}U	136,846	125,686	112,062	111,161	110,46	—	108,15	107,96	107,58	—	107,22	106,56
^{90}Th	137,542	132,536	118,422	117,152	116,43	116,43	114,11	113,60	113,42	—	113,08	112,70
^{83}Bi	165,370	160,433	142,164	141,655	140,82	140,82	137,86	137,07	137,30	—	136,81	136,78
^{82}Pb	169,912	165,031	146,500	145,668	144,82	144,63	141,80	141,62	141,26	—	140,72	140,49
^{81}Tl	174,675	169,788	150,666	149,830	148,86	148,86	145,84	146,05	146,23	—	144,79	144,41
^{80}Hg	179,56	174,69	154,92	154,08	153,13	153,13	150,00	149,79	149,36	—	148,90	148,53
^{79}Au	184,691	179,822	159,477	158,651	157,772	157,661	154,516	154,246	153,90	—	153,374	153,20
^{78}Pt	189,968	185,130	164,157	163,331	162,36	162,20	159,053	158,863	158,18		157,92	157,70
^{77}Ir	195,404	190,648	169,016	168,193	167,23	167,02	163,804	163,613	163,18	—	162,68	162,09
^{76}Os	201,220	196,386	174,072	173,247	172,26	172,09	168,75	168,56	168,07		167,63	167,55
^{75}Re	207,170	202,359	179,285	178,509	177,46	177,29	173,88	173,69	173,26	173,26	172,72	173,[illegible]
^{74}W	213,384	208,573	184,780	184,000	182,862	182,711	179,232	179,02	178,55	178,55	178,07	178,22
^{73}Ta	219,846	215,050	190,492	189,693	188,53	188,36	184,802	184,625	184,12	184,12	183,65	183,60

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень K)											Край поглощения
	C_{II}	L_{III}	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V	N_{II}	N_{III}	N_{IV}	N_V	$O_{II,III}$	
^{65}Tb	226,56	221,76	195,66	195,16	—	—	190,44	190,44	—	—	—	150,10
^{71}Lu	233,61	226,85	202,55	201,74	—	—	196,52	196,52	—	—	—	196,10
^{70}Yb	241,00	236,27	209,19	208,37	—	—	203,25	203,25	—	—	—	201,6
^{69}Tm	248,64	243,90	215,61	214,90	—	—	—	—	—	—	—	208,6
^{68}Er	256,70	252,00	223,06	222,18	—	—	216,74	216,74	—	—	—	—
^{67}Ho	264,99	260,30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	222,04
^{66}Dy	273,68	268,91	237,00	237,13	—	—	231,31	231,31	—	—	—	230,10
^{65}Tb	282,92	278,22	246,32	245,54	—	—	239,15	239,15	—	—	—	237,6
^{64}Gd	292,53	287,80	254,74	254,97	—	—	247,65	247,65	—	—	—	246,2
^{63}Eu	302,09	297,97	263,89	263,10	—	—	256,46	256,48	—	—	—	254,6
^{62}Sm	312,13	308,45	273,56	272,74	—	—	265,78	265,78	—	—	—	264,4
^{61}Pm	323,73	319,06	—	282,04	—	—	275,07	275,07	—	—	—	—
^{60}Nd	335,766	331,153	293,410	292,692	—	—	285,76	285,76	—	—	—	284,58
^{59}Pr	348,025	345,426	304,337	303,625	—	—	296,43	296,17	—	—	—	296,1
^{58}Ce	360,166	356,536	316,857	315,155	312,91	312,77	307,77	307,514	303,72	303,72	303,030	306,23
^{57}La	374,522	369,982	327,900	327,296	324,97	324,78	319,446	319,01	318,64	318,97	317,97	318,14
^{56}Ba	388,861	384,313	340,80	340,102	337,64	337,44	332,064		331,59	331,59	330,57	330,70
^{55}Cs	403,996	399,461	354,82	353,693	—	—	345,386		—	—	—	344,64
^{54}Xe	419,09	415,12	—	367,72	—	—	359,16		—	—	—	357,77
^{53}I	433,922	432,420	383,77	383,110	—	—	374,05		—			373,11
^{52}Te	454,832	450,363	399,629	399,166	—	—	390,252		—	—	388,93	389,27
^{51}Sb	473,834	469,375	416,87	416,22	413,02	412,02	407,126		406,62	406,18	405,82	406,09
^{50}Sn	494,02	489,57	434,96	434,32	430,90	430,87	425,02		424,13	424,07	423,79	423,82
^{49}In	515,484	511,059	454,23	453,69	450,05	449,03	444,071		443,47	443,01	442,52	442,98
^{48}Cd	538,017	533,904	474,73	474,10	470,38	470,39	464,30		463,53	463,33	—	463,17
^{47}Ag	562,65	558,253	496,65	496,01	489,09	488,00	486,00		484,85	484,86	—	484,84
^{46}Pd	588,62	584,240	520,09	519,47	515,60	515,65	509,18		—	—	—	506,12
^{45}Rh	616,37	612,00	545,09	544,49	540,09	539,92	534,01		533,17	532,94	—	532,88
^{44}Ru	646,056	641,735	571,93	571,31	566,83	566,68	560,51		559,74	559,74	—	559,34
^{43}Tc	667,90	673,57	600,20	600,20	—	—	588,99		588,99	588,99	—	—
^{42}Mo	712,105	707,831	631,543	630,978	625,70	625,62	619,696		618,06	618,73	—	618,18
^{41}Nb	748,887	744,649	664,96	664,376	—	—	652,83		651,86	651,86	—	651,59
^{40}Zr	768,513	784,207	700,83	700,284	694,47	694,47	688,50		687,56	687,56	—	687,36
^{39}Y	831,317	827,122	739,72	739,188	733,01		727,13	726,19			—	726,15
^{38}Sr	877,613	873,447	781,83	781,299	774,80		769,21	768,30			—	768,14
^{37}Rb	927,761	923,636	827,49	826,956	820,17		814,76	813,63			—	814,86
^{36}Kr	982,1	978,1	877,19	876,68	869,04		864,34	863,17			—	863,72
^{35}Br	1041,80	1037,59	931,34	930,86	923,6		918,66	—		—	—	918,09
^{34}Se	1103,52	1102,48	990,62	990,13	982,3		977,90	—		—	—	977,73
^{33}As	1177,43	1173,44	1055,64	1055,12	1046,6		1042,87	—		—	—	1042,63
^{32}Ge	1255,43	1251,46	1127,64	1126,62	1117,11		1114,57	—		—	—	1114,3
^{31}Ga	1341,24	1337,35	1205,67	1205,42	1195,37		1193,54	—		—	—	1193,1
^{30}Zn	1436,04	1432,20	—	1282,55	1282,2		1281,07	—		—	—	1280,7
^{29}Cu	1541,23	1537,396	1389,74	1389,36	1376,4		—			—	—	1377,65
^{28}Ni	1658,34	1654,51	1497,05		1485,57		—		—	—	—	1485,02
^{27}Co	1789,17	1785,30	1617,48		1605,56		—			—	—	1604,87
^{26}Fe	1935,99	1932,08	1752,99		1740,32		—		—	—	—	1739,87
^{25}Mn	2101,36	2097,51	1905,24		1893,21		—		—	—	—	1892,54
^{24}Cr	2288,80	2285,00	2080,59		2066,82		—		—	—	—	2065,9
^{23}V	2502,24	2498,42	2279,72		2264,87		—		—	—	—	2263,0
^{22}Ti	2746,51	2742,67	2506,74		2493,0		—		—	—	—	2491,2
^{21}Sc	3028,4	3025,0	2773,9		2758,0		—		—	—	—	2751,7
^{20}Ca	3351,61	3351,46	3083,4		3068,0		—	—	—	—	—	3054,3
^{19}K	3737,07	3733,68	—	3445,8	3434,5		—	—	—	—	—	3431,0
^{18}Ar	4196,10	4193,17	—	3877,59	—	—	—	—	—	—	—	3852,88
^{17}Cl	4720,96	4718,07	—	4394,2		—	—	—	—	—	—	4368,0
^{16}S	5363,92	5361,10	—	5021,56	—	—	—	—	—	—	—	5008,1
^{15}P	6144,4	6141,7	—	5792,1	—	—	—	—	—	—	—	5776,9
^{14}Si	7113,96	7110,92	6764,0	6764,0	—	—	—	—	—	—	—	6715,2
^{13}Al	8223,30	8221,96	8042	7944	—	—	—	—	—	—	—	7935,2
^{12}Mg	9872	9872	9647	9539	—		—	—	—	—	—	9492,5
^{11}Na	11884	11884	11702	11550	—	—	—	—	—	—	—	11516,0
^{10}Ne	14618	14618	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

L-серия

Диаграммные линии и края поглощения L-серии для элементов от Fm до Na (длины волн в X-единицах) [2]

Таблица 35.3

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_I)									Конечный уровень (начальный уровень L_I)					
	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V	N_{II}	N_{III}	O_{II}	O_{III}	$P_{II,III}$	M_I	M_{IV}	N_I	N_{IV}	O_I	O_{IV}
^{100}Fm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	567,960		465,492	—	—
^{99}Es	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	564,57	—	490,758	—	—
^{98}Cf			—	—	—	—	—	—	—	—	601,741	—	514,342	—	—
^{97}Bk	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	619,548	—	529,439	—	—
^{96}Cm	—		—	—	—	—	—	—	—	—	636,014	—	548,090	—	—
^{95}Am	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	657,125	—	561,337	—	—
^{94}Pu	—		—	—	—	—	—	—	—	—	676,934	—	576,151	—	—
^{93}Np	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	697,463	—	595,600	—	—
^{92}U	746,4	708,79	686,4	679,6	668,85	697,11	575,3	575,6	568,9	803,6	718,61	634,2	613,50	600,0	598,4
^{91}Pa	764,2	730,7	707,3	700,3	629,6	615,6	592,5		—	827,8	740,7	653,6	632,5	—	612,0
^{90}Th	791,92	753,24	728,6	721,8	640,79	634,13	611,2	609,5	604,6	852,6	763,56	673,4	651,70	637,4	631,13
^{89}Ac	975,61	936,61	903,5	896,0	794,00	789,46	766,6	759,3	756,3	1056,5	950,02	837,7	811,43	—	788,74
^{88}Pb	1005,63	967,21	932,3	925,1	819,17	812,93	781,3		—	1090,0	980,83	864,7	838,01	822,0	815,14
^{87}Tl	1036,59	998,50	961,6	954,5	845,71	839,34	810,1		—	1125,4	1012,99	892,9	865,71	849,0	842,28
^{86}Hg	1069,2	1030,46	993,6	984,2	872,4	865,2	831,6		—	1161,6	1046,52	922,9	894,6	—	872,4
^{85}Au	1104,34	1065,64	1025,60	1018,64	902,44	896,20	866,13	865,34	—	1200,27	1081,26	953,73	924,70	908,25	901,16
^{84}Pt	1170,68	1101,65	1060,0	1052,4	952,35	925,90	895,2		—	1240,3	1117,68	985,7	955,99	938,0	932,3
^{83}Ir	1177,15	1138,47	1094,8	1087,4	963,32	957,13	925,7		—	1281,7	1155,40	1019,5	988,75	971,9	964,9
^{82}Os	1215,0	1177,2	—	—					—	—	1194,50	—	1022,96	—	—
^{81}Re	1256,3	1217,6	1169,8	1162,4	1029,0	1023,6	991,0		—	1370,6	1235,03	1091,2	1058,7	—	1034,4
^{80}W	1299,14	1260,3	1209,77	1202,37	1035,89	1059,60	1025,19	1026,57	—	1418,26	1279,18	1150,09	1096,31	1078,93	1072,26
^{79}Ta	1343,07	1304,09	1251,4	1244,4	1103,0	1097,09	1052,4		—	1467,9	1324,23	1170,8	1135,58	1116,5	1111,0
^{78}H	1389,3	1349,7	1296,7	1287,0	1141,3	1135,6	1100,1		—	1519,7	1371,1	1212,1	1176,5	—	—
^{77}Lu	1437,2	1396,9	1340,8	1333,0	1163,2	1177,6	1141,1		—	1573,6	1420,7	1256	1220,3	1202	1195,9
^{76}Yb	1488,2	1449,4		—	1225,6	1219,8	1182,0		—	1631	1472,5	1303,0	1264,8	1248,3	1240,5
^{75}Tm	1541,2	1502,3	—	—	1271,2	1265,3	1226,4		—	1692,3	1526,8	1362,3	1312,7	—	
^{74}Er	1596,4	1557,9	1491,3	1482,3	1318,4	1311,8	1273,2		—	1754,8	1583,1	1403	1362,6	—	—
^{73}Ho	1656,3	1616,0	—	—	1367,7	1361,3	1319,7		—	1822,0	1643,5	1460	1414,2	—	—
^{72}Dy	1716,7	1677,0			1420,3	1413,9	1371,4		—	1893,5	1706,6	1515,2	1469,7	—	—
^{71}Tb	1781,4	1742,5	1684	—	1473,8	1468,3	1423,9		—	1935	1772,7	1574,2	1526,6	—	—
^{70}Gd	1849,3	1810,9	1728,1		1531,0	1525,9	1481,8		—	2045,2	1842,5	1637,6	1585,6	—	—
^{69}Eu	1922,1	1882,7	1796	1788	1593,9	1587,7	1540,7		—	—	1916,3	1700	1654,3	1629	—
^{68}Sm	1996,4	1958,0	1865,7	1858,1	1655,9	1651,7	1600,3		—	2214	1993,6	1775,1	1723,1	—	—
^{67}Pm	—	2037,9	—	—	—	—			—	—	2075,4	—	1795,2	—	—
^{60}Nd	2162,2	2122,2	2019,3	2011,7	1797,4	1792,5	1740,8		—	2404,2	2162,2	1931,3	1874,6	1861,4	—
^{59}Pr	2270,1	2212,4	2102,5	2096,8	1876,0	1869,9	1815,3		—	2507	2253,9	2016,1	1956,8	1932,2	
^{58}Ce	2324,2	2285,9	2191,6	2184,0	1955,9	1950,9	1895,2		—	2614,7	2351,0	2103,6	2044,3	2019	—
^{57}La	2383,8	2405,3	2285	2277	2041,6	2036,6	1978,7		—	2734	2453,5	2200,8	2137,2	—	
^{56}Ba	2449,7	2510,9	2381,7	2371,3	2134,1	2129,0	2071,0			2856,2	2562,2	2302,5	2235,7	2218	—
^{55}Cs	2561,1	2622,9	2486,6	2475,0	2232,4	2228,0	2169,6		—	2986,7	2678,0	2412,2	2343,0	—	—
^{54}I	2406,10	2858,40	2715,4	2707,95	2442,4		2386,3			3273,25	2931,41	2531,65	2577,14		—
^{53}Te	3046,35	3032,75	2841,00	2833,20	2562,1		2506,1		—	3431,30	3070,46	2784,30	2706,84	—	—
^{52}Sb	3183,60	3146,10	2973,05	2966,50	2689,7		2634,3			3600,25	3219,09	2921,85	2845,75		—
^{51}Sn	3336,50	3296,10	3115,35	3108,80	2820,6		2771,7		—	3782,95	3377,96	3076,50	2995,01	—	—
^{50}In	3499,75	3462,70	3267,35	3260,95	2973,6		2920,3		—	3976,00	3548,03	3212,45	3155,71		—

Продолжение табл. 35.3

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_I)									Конечный уровень (начальный уровень L_{II})					
	M_{II}	N_{III}	M_{IV}	M_V	N_{II}	N_{III}	O_{II}	O_{III}	$P_{II, III}$	M_I	M_{IV}	N_I	N_{IV}	O_I	O_{IV}
^{48}Cd	3674,35	3637,40	3429,6	3423,10	3131,2		—		—	4164,50	3730,54	3418,30	3328,80	—	—
^{47}Ag	3902,40	3825,45	3604,15	3597,70	3300,0		—		—	4400,2	3926,50	3609,05	3516,45	—	—
^{46}Pd	4092,7	4026,2	3791,0	3784,2	3482,1		—		—	4650,8	4137,60	3814,4	3716,9	—	—
^{45}Rh	4290,0	4213,5	—	—	3678,0		—		—	4911,6	4365,10	4036,6	3930,5	—	—
^{44}Ru	4513,7	4477,5	—	—	3889,4		—		—	5194,1	4611,10	4276,5	4175,6	—	—
^{43}Mo	5009,4	5006,0	—	—	4370,9		—		—	5835,4	5100,35	4827,0	4710,1	—	—
^{41}Nb	5394,5	5290,2	—	—	4614,7		—		—	6198,1	5481,0	5141,1	5025,6	—	—
^{40}Zr	5756,5	5621,4	—	—	4943,4		—		—	6559,5	5824,6	5486,4	5365,2	—	—

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_{III})											Край поглощения		
	M_I	M_{II}	N_{III}	M_{IV}	M_V	N_I	N_{IV}	N_V	$N_{VI, VII}$	O_I	$O_{IV, V}$	L_I	L_{II}	L_{III}
^{100}Fm	—	—	—	767,899	765,416	—	—	622,416	—	—	—	449,878	465,430	591,670
^{99}Es	—	—	—	784,890	772,441	—	—	635,930	—	—	—	462,905	479,128	605,273
^{98}Cf	—	—	—	802,769	790,062	—	—	671,897	—	—	—	476,416	493,341	620,574
^{97}Bk	—	—	—	820,565	808,217	—	—	667,368	—	—	—	490,408	508,090	635,784
^{96}Cm	—	—	—	839,246	827,017	—	—	683,365	—	—	—	504,959	523,390	651,553
^{95}Am	—	—	—	858,580	846,492	—	—	699,049	—	—	—	520,027	539,270	667,906
^{94}Pu	—	—	—	878,639	866,517	—	—	717,109	—	—	—	535,697	555,790	684,878
^{93}Np	—	—	—	899,331	887,271	—	—	734,870	—	—	—	551,947	572,950	702,432
^{92}U	1077,9	1032,0	931,42	920,02	908,74	785,79	756,14	753,07	739,3	734,6	724,85	568,0	591,3	720,911
^{91}Pa	1088,5	—	—	942,7	930,9	806,2	—	772,1	—	753,0	743,7	—	—	—
^{90}Th	1112,8	1078,5	1009	965,85	954,05	826,40	793,94	791,92	775,2	772,8	763,6	603,0	629,3	760,0
^{88}Ra	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	670	802
^{83}Bi	1303,7	1269,3	1209,1	1153,01	1141,50	991,31	955,08	953,24	953,0	933,0	922,65	755,9	787,8	922,1
^{82}Pb	1347,4	1305,0	1242,0	1181,08	1172,09	1019,06	980,83	960,83	959,5	960,3	950,77	764,2	814,3	949,2
^{81}Tl	1381,9	—	—	1216,26	1204,93	1047,48	1010,0	1008,22	987,0	988,0	978,49	807,2	841,0	977,8
^{80}Hg	1418,41	—	—	1249,51	1236,53	1076,8	—	1037,70	—	1015,5	1006,7	834,2	870,8	1007,5
^{79}Au	1456,67	1410,0	1348,21	1287,02	1273,69	1106,79	1069,80	1068,01	1045,30	1047,79	1038,31	862,2	900,9	1038,2
^{78}Pt	1495,4	1449,0	—	1321,55	1310,33	1141,00	1101,6	1099,74	1076,9	1079,4	1070,21	891,4	932,1	1070,0
^{77}Ir	1530,9	1490,0	1429,5	1359,8	1348,47	1175,45	1134,6	1132,97	1109,1	1112,6	1103,57	922,3	965,4	1103,8
^{76}Os	—	—	—	1398,66	1388,59	1204,8	—	1166,84	—	—	1140	955,8	999,8	1139,0
^{75}Re	1627,3	—	—	1441,0	1429,97	1248,1	1206,7	1204,1	—	1183,3	1174,7	987,3	1035,4	1175,5
^{74}W	1674,75	1621,6	1561,0	1484,42	1473,37	1287,32	1243,80	1242,07	1216,23	1221,51	1213,01	1022,53	1072,15	1212,02
^{73}Ta	1721,9	1671,7	1608,6	1529,78	1518,85	1328,1	1287,8	1281,90	—	1261,3	1253,2	1057	1110,2	1251,7
^{72}Hf	1774,4	—	—	1577,04	1566,07	1371,1	1323,5		—	1303,5	1298,7	1095,3	1151,5	1293,0
^{71}Lu	1831,8	—	—	1626,56	1615,51	1414,3	1367,2		—	1345,9	1339,8	1136,21	1194,0	1337,5
^{70}Yb	1890	—		1678,9	1667,6	1462,7	1412,6		—	—	—	1176,4	1239,2	1392,64
^{69}Tm	1964,1	—	—	1730,9	1722,8	1511,5	1460,2		—	—	—	1219,6	1284,9	1429,9
^{68}Er	2015,1	—		1791,4	1780,4	1563,6	1510,6		—	1489,2	—	1265,8	1335,60	1479,49
^{67}Ho	2062,1	—	—	1842,1	1841,0	1618,8	1563,7		—	—	—	1314,6	1387,9	1532,2
^{66}Dy	2154,0	—	—	1915,96	1904,90	1677,7	1619,8		—	1595,7	—	1362	1435	1576
^{65}Tb	2220,0	—	—	1982,3	1971,5	1737,5	1679,0		—	1655,8	1656	1418,1	1496,1	1645,3

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_{III})						Край поглощения		
	M_I	M_{IV}	M_V	N_I	N_V	O_3	L_I	L_{II}	L_{III}
^{64}Gd	2307,1	2062,6	2041,9	1603,1	1741,9	1719,6	1474,0	1506,1	1706,0
^{63}Eu	2390,3	2127,3	2106,3	1870,5	1808,2	1784	1533,3	1622,8	1771,7
^{62}Sm	2477	2215,7	2190,9	1942,2	1876,1	1852,3	1595,4	1699,1	1840,8
^{61}Pm	—	2287,9	2277,5	—	1961,8	—	—	—	—
^{60}Nd	2670,3	2370,6	2365,3	2099,3	2031,4	2004,3	1731,7	1839,1	1990,7
^{59}Pr	2778,1	2467,6	2457,7	2185,9	2114,8	2087,4	1807,1	1920,1	2072,8
^{58}Ce	2885,7	2565,1	2556,0	2276,9	2204,1	2176,3	1885,6	2006,7	2159,5
^{57}La	3000	2658,9	2659,7	2373,9	2298,0	2270	1968,9	2098,9	2213,7
^{56}Ba	3128,7	2779,3	2780,6	2477,3	2390,4	2370,7	2063,5	2200,2	2358,0
^{55}Cs	3270,1	2896,8	2866,2	2587,6	2506,4	2479,6	2162,8	2309,1	2468,9
^{54}Xe	—	—	—	—	—	—	2259,1	2424,1	2587,2
^{53}J	3600,20	3151,43	3142,14	2830,90	2744,89	—	2363,9	2527,5	2713,9
^{52}Te	3709,40	3291,70	3282,46	2951,80	2876,26	—	2505,4	2682,0	2840,6
^{51}Sb	3880,30	3441,33	3432,22	3106,70	3017,24	—	2634,1	2824,0	2993,9
^{50}Sn	4063,25	3601,46	3602,61	3262,90	3168,79	—	2771,5	2976,0	3140,5
^{49}In	4259,56	3772,98	3764,31	3429,00	3331,59	—	2919,8	3140,6	3317,7
^{48}Cd	4470,95	3956,83	3948,91	3607,20	3506,99	—	3078,5	3319,0	3496,7
^{47}Ag	4697,9	4151,30	4143,75	3800,10	3696,60	—	3247,4	3505,7	3650,8
^{46}Pd	4942,3	4366,00	4358,80	4007,9	3900,8	—	3427,6	3716,3	3800,2
^{45}Rh	5206,2	4595,00	4589,00	4233,0	4122,2	—	3618,60	3934,3	4121,3
^{44}Ru	5492,3	4840,15	4835,75	4477,5	4362,7	—	—	4171,1	4360,1
^{43}Mo	5438,1	5403,15	5395,35	5038,4	4913,1	—	4289,7	4708,5	4902,6
^{41}Nb	6504,2	5720,1	5712,5	5350,3	5227,1	—	4571,7	—	5212,1
^{40}Zr	6904,3	6065,3	6058,0	5698,4	5574,8	—	4867,4	5367,0	5571,6

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_{II})			Конечный уровень (начальный уровень L_{III})			Конечный уровень (начальный уровень L_{III})				Край поглощения		
	M_{II}	M_{III}	$N_{II,III}$	N_I	N_{IV}	N_V	M_I	M_{IV}	M_V	N_I	L_I	L_{II}	L_{III}
^{39}Y	6006,2	5970,8	7272,2	7026,1	6199,2	6063,3	7341,2	6442,5	6435,6	6081,7	5221,6	5737,3	5944,4
^{38}Sr	6289,7	6304,4	5652,8	7501,6	6810,3	6283,5	7819,0	6833,6	6846,7	6505,7	5571,0	6662,1	6362,0
^{37}Rb	6806,7	6773,6	6035,4	8024,7	7001,4	6741,4	8346,4	7310,1	7303,3	6969,8	5965,4	6670,0	6849,6
^{36}Br	—		—	8536	8100	—	9064	8356		—	—	—	—
^{35}Se	—		—	9969	8718	—	10 272	8972		—	7450,4	8399,7	8,28,2
^{33}As	8912		—	10 711	9895	—	11 018	9652		—	8090,8	9106	9349,2
^{32}Ge	—		—	11 587	10 174	—	11 922	10 436		—	—	—	—
^{31}Ga	—		—	12 556	11 023	—	12 970	11 290		—	—	—	—
^{30}Zn	11 163		—	13 652	11 985	—	14 053	12 237		—	—	11837	12 106,4
^{29}Cu	12 070		—	14 870	13 053	—	15 296	13 350		—	—	12 964,4	13 261,9
^{28}Ni	13 120		—	16 280	14 279	—	16 708	14 566		—	—	—	—
^{27}Co	14 240			18 000	15 657	—	18 297	15 968		—	—	—	—
^{26}Fe	15 710		—	19 730	17 266	—	20 149	17 567		—	—	—	—

Продолжение табл. 25.3

Элемент	Конечный уровень (основный уровень L_{II})			Конечный уровень (основный уровень L_{III})			Конечный уровень (основный уровень L_{III})				Край поглощения		
	M_{II}	M_{III}	$N_{II,III}$	M_I	M_{IV}	N_I	M_I	M_{IV}	M_V	N_I	L_I	L_{II}	L_{III}
^{25}Mn	17 640		—	21 620	19 120	—	22 270	19 450		—	—	—	
^{24}Cr	—		—	24 210	21 280	—	24 790	21 670		—	—	—	
^{23}V	—		—	27 320	23 850	—	27 770	24 260		—	—	—	
^{22}Ti	—		—	30 880	27 020	—	31 350	27 390		—	—	26 260	
^{21}Sc	—		—	36 130	31 010	—	36 600	31 330		—	—	—	
^{20}Ca	—		—	40 460	35 950	—	40 960	36 320		—	—	35 630	
^{19}K	—		—	47 230	—	—	47 740	—		—	—	—	
^{18}Ar	—			—	—	—	—	—		—	—	50 100	
^{17}Cl	—		—	67 270	—		67 840	—		—	—	60 900	
^{16}S	—			79 200		—	79 880	—		—	—	75 700	
^{15}P	—	—	—	—	100 800	—	—	—	103 800	—	—	—	—
^{14}Si	—	—		—	135 500	—	—	—	139 500	—	—	—	125 500
^{13}Al	—		—	—	169 620	—	—	—	170 530	—	—	169 600	170 560
^{12}Mg	—	—	—	—	249 080	—	—	—	250 450	—	~200 000	249 000	250 260
^{11}Na	—		—	—	405 490	—	—	—	405 450	—	—	—	

Таблица 35.4

Диаграммные линии и край поглощения *M*-серии для элементов от U до Ni (длины волн даны в *kX*-единицах) [2]

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень M_I)	Конечный уровень (начальный уровень M_{II})			Конечный уровень (начальный уровень M_{III})				
	$M_{II, III}$	M_I	M_{IV}	α_{IV}	M_I	M_{IV}	M_V	α_I	$\alpha_{IV, V}$
^{92}U	2,745	3,392	2,613	2,410	4,322	3,514	3,473	3,114	2,941
^{90}Th	2,936	—	3,006	2,618	4,554	3,710	3,672	—	3,124
^{83}Bi	3,732	—	3,629	—	5,526	4,560	4,522	4,093	3,926
^{82}Pb	3,896	—	3,904	—	5,694	4,705	4,669	4,255	4,063
^{81}Tl	4,085	—	4,110	—	5,870	4,855	4,815	—	4,207
^{79}Au	4,291	—	4,424	—	6,241	5,175	5,135	4,693	4,514
^{78}Pt	4,451	—	4,590	—	6,442	5,346	5,309	4,866	4,642
^{77}Ir	—	—	4,770	—	6,653	5,529	5,490	—	4,859
^{76}Os	—	—	4,944	—	—	5,712	5,670	—	—
^{75}Re	—	—	—	—	—	5,919	5,875	—	—
^{74}W	5,163	—	5,342	—	7,346	6,121	6,070	5,620	—
^{73}Ta	—	—	5,556	—	7,596	6,340	6,299	—	—
^{72}Hf	—	—	—	—	7,871	—	6,530	—	—
^{71}Lu	—	—	—	—	—	—	6,748	—	—
^{70}Yb	—	—	—	—	—	—	7,009	—	—
^{68}Er	—	—	—	—	—	—	7,650	—	—
^{67}Ho	—	—	—	—	—	—	7,849	—	—
^{66}Dy	—	—	—	—	—	—	8,127	—	—
^{65}Tb	—	—	—	—	—	—	8,468	—	—

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень M_I)			Конечный уровень (начальный уровень M_{II})		Конечный уровень (начальный уровень M_{III})				
	M_{II}	M_{III}	$\alpha_{II, III}$	M_{IV}	M_I	M_{IV}	M_{IV}	M_V	M_I	M_V
^{64}Gd	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8,646
^{63}Eu	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9,192
^{62}Sm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9,560
^{60}Nd	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10,483
^{59}Pr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10,915
^{58}Ce	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11,511
^{50}Sn	—	—	—	47,3	—	—	54,15		—	—
^{47}Ag	—	—	18,80	54,00	24,35	20,65	—	60,63	25,95	21,86
^{46}Pd	—	—	20,1	56,14	26,2	22,1	—	63,00	28,0	—
^{45}Rh	—	—	—	59,54	27,95	—	—	65,43	29,75	25,00
^{44}Ru	—	—	—	62,18	32,70	26,70	—	68,35	—	26,85
^{42}Mo	—	—	—	68,90	—	—	—	74,90	37,60	—
^{41}Nb	—	—	—	72,13	—	33,0	—	78,45	40,70	34,45
^{40}Zr	—	—	—	76,60	—	—	81,71		—	—
^{39}Y	—	—	—	81,50	—	—	86,60		46,50	—
^{38}Sr	—	—	—	86,93	54,32	—	91,38		53,61	—
^{37}Rb	—	—	—	91,51	57,04	—	96,00		59,16	—
^{35}Br	156,1	134,41	—	109,41	76,56	—	113,8		79,16	—

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень M_{IV})				Конечный уровень (начальный уровень M_V)					Край поглощения				
	M_{II}	M_{III}	$M_{VI, VII}$	$\alpha_{II, III}$	M_{II}	M_{III}	M_{VI}	M_{VII}	α_{III}	M_I	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V
^{92}U	5,040	4,615	3,708	3,570	4,937	3,914	3,902	—	2,228	2,385	2,677	2,927	3,491	
^{90}Th	5,329	4,901	3,934	3,804	5,229	4,143	4,130	—	2,386	2,571	3,069	3,650	3,722	
^{83}Bi	6,571	6,149	4,690	4,813	6,506	5,119	5,108	—	—	—	3,553	4,069	4,702	
^{82}Pb	6,786	6,371	5,065	—	6,720	5,288	5,274	5,157	3,219	3,419	4,074	4,747	4,945	
^{81}Tl	7,017	—	5,239	—	6,980	5,461	5,450	—	—	—	4,184	4,930	5,196	
^{81}Tl$_g$	—		—	—	—	—	—	—	—	—	4,340	5,139	5,331	
^{79}Au	7,007	7,086	5,612	—	7,451	5,649	5,628	5,755	3,742	4,085	4,509	5,330	5,629	
^{78}Pt	7,774	7,356	5,816	—	7,722	6,045	6,043	5,975	3,903	3,736	4,676	5,544	5,746	
^{77}Ir	8,048	7,620	6,026	—	8,002	6,262	6,249	—	—	4,270	4,861	5,764	5,961	

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень M_{IV})				Конечный уровень (начальный уровень M_V)					Край поглощения				
	N_{II}	N_{III}	$N_{VI,\ VII}$	$O_{II,\ III}$	N_{II}	N_{III}	N_{VI}	N_{VII}	O_{III}	M_I	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V
^{76}Os	8,312	—	6,254	—	8,260			6,477	—	4,037	4,412	5,027	5,375	6,194
^{75}Re	8,646	8,222	6,491	—	8,611		—	6,715	—	—	—	—	—	—
^{74}W	8,977	8,550	6,743	6,794	8,943	8,972	6,978	6,969	—	4,365	4,809	5,427	6,487	6,702
^{73}Ta	9,311	—	7,036	7,089	9,207		—	7,217	—	—	—	—	6,704	6,901
^{72}Hf	9,666		7,289	—	9,566			7,524	—	—	—	—	—	—
^{71}Lu	—	—	7,563		10,047		7,824		—	—	—	—	—	—
^{70}Yb	—	—	7,893	—	10,458		8,122		—	—	—	—	—	—
^{68}Er	—	—	8,670	—	11,348		8,780		—	—	—	—	—	—
^{67}Ho	—	—	8,947	—	11,839		9,143		—	—	—	—	—	—
^{66}Dy	—	—	9,365	—	12,401		9,527		—	—	—	—	—	—
^{65}Tb	—	—	9,772	—	12,949		9,917		—	—	—	—	—	—

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень M_{IV})			Конечный уровень (начальный уровень M_V)		Край поглощения			
	N_{II}	N_{III}	$N_{VI,\ VII}$	$N_{II,\ III}$	$N_{VI,\ VII}$	M_I	$M_{II,\ III}$	M_{IV}	M_V
^{64}Gd	—	—	10,293	13,541	10,395	—	—	—	—
^{63}Eu	—	—	10,723	14,101	10,932		—	—	—
^{62}Sm	—	—	11,238	—	11,405	—		—	—
^{60}Nd	—	—	12,375	—	12,650	—	—	—	—
^{58}Ce	—	—	13,755	—	14,030	—	—	—	—
^{56}Ba	—	—	—	20,09	—	—	—	15,50	15,89
^{53}I	—	—	—	—	—	—	—	19,06	
^{51}Sb	28,76		—	29,76		—	—	—	
^{50}Sn	31,23		—	31,23	—	—	—	24,29	
^{48}Cd	36,75		—	36,75		—	—	28,13	
^{47}Ag	39,71		—	39,71	—	—	—	30,92	31,14
^{46}Pd	43,36		—	43,36		—	—	—	—
^{45}Rh	47,67		—	47,67	—	—	—	—	—
^{44}Ru	52,34		—	52,34	—	—	—	—	—
^{42}Mo	64,36		—	64,36	—		—	—	—
^{41}Nb	72,20		—	72,20	—	—		—	—
^{40}Zr	81,71		—	—	—	—	—	—	—
^{39}Y	93,60		—	93,60	—	—		—	—
^{37}Rb	127,82	126,71	—	128,46	—	—	—	—	—
^{35}Br	191,04	189,97	—	192,57	—	—	—	—	—
^{34}Se	—	—	—	—	—	—	—	—	227,70
^{29}Cu	—	—	—	—	—	110,7	165,8	—	—
^{28}Ni	—	—	—	—	—	—	188,4	—	—

N-серия

Таблица 35.5

Диаграммные линии *N*-серии для элементов от U до Cs (длины волн даны в Å) [2]

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень N_{IV})			Конечный уровень (начальный уровень N_{VI})			Конечный уровень (начальный уровень N_{VII})		Конечный уровень (начальный уровень N_{VII})
	N_{VI}	O_{II}	O_{III}	$N_{VI,\ VII}$	O_{II}	O_{III}	O_{IV}	O_V	O_V
^{92}U	31,78	—	—	34,61	—	—	42,06		42,08
^{90}Th	33,57	—	—	35,32	—	—	49,53	48,18	50,00
^{83}Bi		—	—	—		—	91,09		93,09
^{82}Pb	42,25	—	—	44,96	—		102,38	100,21	104,50
^{81}Tl		—	—	46,35		—	111,34	113,03	117,74
^{80}Hg	43,6	—	—	46,4	—		—	—	
^{79}Au	46,9	—	—	49,1	—	—		—	—
^{78}Pt	46,0	—	—	50,0	—	—	—	—	—
^{77}Ir	50,1	—	—	52,6	—	—	—	—	
^{76}Os	51,8	—		54,6	—	—	—		—
^{74}W	55,8	—	—	58,5	—			—	
^{73}Ta	56,1	—	—	61,0	—	—	—	—	—

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень N_{VI})			Конечный уровень (начальный уровень N_{VI})			Конечный уровень (начальный уровень N_{VII})		Конечный уровень (начальный уровень N_{VIII})
	N_{VI}	O_{II}	O_{III}	$N_{VI,\ VII}$	O_{II}	O_{III}	O_{IV}	O_V	O_V
^{71}Lu	62,99	—	—	63,7	—	—	—	—	—
^{70}Yb	65,1	—	—	69,4	—	—	—	—	—
^{69}Tm	72,7	—	—	76,3	—	—	—	—	—
^{66}Dy	—	97,2		83,37	—	—	—	—	—
^{65}Tb	—	102,23		86,76	—	—	—	—	—
^{63}Eu	—	112,6		—	—	—	—	—	—
^{62}Sm	—	118,12		—	—	—	—	—	—
^{60}Nd	—	129,6		—	—	—	—	—	—
^{59}Pr	—	136,5		—	—	—	—	—	—
^{58}Ce	—	144,4		—	144,4		—	—	—
^{57}La	—	152,62		—	152,62		—	—	—
^{56}Ba	—	163,25	159,06	—	—	164,60	—	—	—
^{55}Cs	—	188,60	183,8	—	—	190,3	—	—	—

35.4. ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛИНИЙ

Интенсивности линий рентгеновского излучения определяются силами осцилляторов и частотами соответствующих переходов, а также статистическими весами уровней атомов. Вычисление сил осцилляторов представляет собой очень трудоемкую задачу. Однако для относительных интенсивностей линий внутри одного мультиплета можно получить простые соотношения, использовавшиеся следующим правилом Бурдера—Дорменсо: если расщеплением начальных (конечных) уровней пренебречь, то суммы интенсивностей тех линий, частоты которых получаются одинаковыми, пропорциональны статистическим весам конечных (начальных) состояний. Отсюда, в частности, следует для отношения интенсивностей дублета K_α, K_β:

$$I_{K_{\alpha_1}} : I_{K_{\alpha_2}} = 2 : 1,$$

что хорошо подтверждается экспериментом. Для линий триплета

$$I_{L_{\beta_1}, \alpha_2, \alpha_1} : \quad I_{L_{\beta_1}} : I_{L_{\alpha_2}} : I_{L_{\alpha_1}} = 9 : 1 : 5,$$

что также довольно близко к экспериментальным данным.

Таблица 35.6

Относительные интенсивности линий [2]

Элемент	K-серия					L-серия						
	Конечный уровень					Конечный уровень (начальный уровень L_I)						
	L_{III}	L_{II}	M_{III}	$N_{II,\ III}$	$M_{IV,\ V}$		N_{II}	N_{III}	M_{IV}	M_V	O_{II}	O_{III}
^{23}V	100	52,1	20,5	—	0,48	^{42}Mo	9,9	14,2	—	—	—	—
^{24}Cr	100	51,6	17,9		0,66	^{45}Rh	7,0	12,1	—	—	—	—
^{25}Mn	100	54,9	22,1	—	0,34	^{46}Pd	6,4	10,0	—	—	—	—
^{26}Fe	100	50,0	16,7	—	0,26	^{47}Ag	5,6	9,4	—	—	—	—
^{27}Co	100	49,7	16,0	—	0,25	^{73}Ta	6,4	7,4	—	0,4	2,0	2,7	0,6
^{28}Ni	100	49,5	18,7	—	0,20	^{74}W	5,2	8,2	0,6	0,6	1,5	2,0	0,6
^{29}Cu	100	49,7	20,0	—	0,15	^{78}Pt	5,2	8,2	—	—	—	—	—
^{30}Zn	100	50,3	26,7	0,36	—	^{90}Th	—	3,3	—	—	1,5	—	0
^{31}Ga	100	50,6	21,6	—	—	^{92}U	4,1	4,2			1,5	1,4	0
^{24}Cr	100	49,9	24,0	1,32	—								
^{35}Br	100	49,2	21,7	0,69	—								
^{36}Kr	100	50,5	26,0	1,07	—								
^{37}Br	100	50,9	22,2	1,73	—								
^{37}Rb	100	49,3	23,0	2,62	—								
^{38}Sr	100	50,3	27,4	4,10	—								
^{39}Y	100	50,6	25,3	3,19	—								
^{40}Zr	100	50,2	27,4	4,00	—								
^{41}Nb	100	49,6	27,9	4,90	—								
^{42}Mo	100	49,9	27,9	5,17	—								
^{43}Tc	100	50,1	29,3	5,63	—								
^{45}Rh	100	50,3	27,9	5,78	—								
^{46}Pd	100	50,0	25,0	6,13	—								
^{47}Ag	100	49,6	29,0	6,17	—								
^{48}Cd	100	49,9	29,7	6,42	—								
^{49}In	100	49,9	29,6	6,47	—								
^{50}Sn	100	49,8	29,6	7,02	—								
^{51}Sb	100	50,3	31,0	7,66	—								
^{52}Te	100	49,7	30,6	7,36	—								
^{74}W	100	47,0	18,1	4,8	0,25								
^{78}Pt	100	52,0	20,0	7,8	0,38								

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_{II})				
	M_I	M_{IV}	N_I	N_{IV}	O_{IV}
^{42}Mo	—	62	—	6,8	—
^{45}Rh	—	61	—	7,7	—
^{46}Pd	—	69	—	8,5	—
^{47}Ag	—	59	—	12	—
^{73}Ta	1,2	57	0,6	11	0,2
^{74}W	1,3	62	0,4	9	0,3
^{78}Pt	1,5	51	—	11	—
^{90}Th	1,8	52	0	14	3,9
^{92}U	1,0	49,4	0	12	2,2

Продолжение табл. 35.6

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень O_{III})						
	M_{IV}	M_{IV}	M_V	N_I	N_V	O_I	$O_{IV,V}$
^{42}Mo	—	13	100	—	5	—	—
^{45}Rh	—	13	100		13	—	—
^{46}Pd	—	12	100	—	13	—	—
^{47}Ag	—	12	100	—	21	—	—
^{73}Ta	3,6	11	100	—	20	0,4	—
^{74}W	3,2	11,5	100	1,0	20	—	0,2
^{78}Pt	3,4	11,4	100	1,5	23	—	—
^{90}Th	3,6	12	100	1,4	26	0,5	—
^{92}U	2,4	11	100	1,6	26	—	—

35.5. ШИРИНА И ФОРМА ЛИНИЙ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ширина линии характеристического спектра рентгеновского излучения равна сумме ширин верхнего и нижнего уровней атома. Полная ширина уровня определяется радиационными и безрадиационными (эффект Оже) переходами. Оже-переходы какого-либо определенного типа возможны только в том случае, если энергия перехода превышает энергию связи соответствующего электрона. Поэтому на кривой зависимости ширины данной линии от Z появляются изломы.

Теоретическая форма линии имеет симметричный вид относительно максимума интенсивности. Однако для ряда элементов форма линии несимметрична. Особенно сильна асимметрия у элементов переходной группы железа. Такая асимметрия линии объясняется спин-спиновым взаимодействием 2p электронов с электронами незаполненной 3d-оболочки [3]. Это взаимодействие приводит к расщеплению 2p-уровня, несимметричному относительно начального положения 2p-уровня. Так как расщепление меньше полной ширины каждого из подуровней, то форма результирующей линии становится асимметричной. Аналогичная картина асимметрии линий рентгеновского излучения наблюдается в некоторых химических соединениях и сплавах и связана с характером химической связи [3].

Количественно асимметрию линий характеризует индексом асимметрии α, равным отношению длинноволнового отрезка α ширины линии к коротковолновому отрезку β (рис. 35.1):

$$\alpha = \alpha/\beta.$$

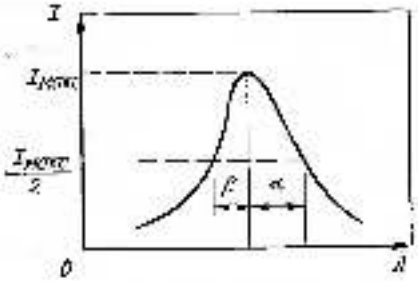


Рис. 35.1. Схема, поясняющая индексы асимметрии рентгеновской линии.

Таблица 35.7

Ширина линий K-серии на середине кривой максимума интенсивности [2]

Элемент	Переход $K-L_{III}$		Переход $K-L_{II}$		Элемент	Переход $K-L_{III}$		Переход $K-L_{II}$	
	$\Delta\lambda$, Å	ΔE, эв	$\Delta\lambda$, Å	ΔE, эв		$\Delta\lambda$, Å	ΔE, эв	$\Delta\lambda$, Å	ΔE, эв
^{21}Ca	1,60	1,70	1,50	1,69	^{38}Sr	0,43	3,1	0,40	3,7
^{22}Ti	1,22	2,00	1,42	2,33	^{40}Zr	0,35	5,7	0,36	6,9
^{23}V	1,15	2,28	1,35	2,67	^{41}Nb	0,33	6,6	0,35	6,9
^{24}Cr	1,03	2,22	1,23	2,89	^{42}Mo	0,28	7,1	0,31	6,9
^{25}Mn	1,10	3,09	1,22	3,43	^{44}Ru	0,29	7,2	0,32	7,7
^{26}Fe	1,01	3,34	1,12	3,60	^{45}Rh	0,29	8,7	0,29	8,6
^{29}Cu	0,81	3,1	0,90	3,7	^{46}Pd	0,29	9,6	0,28	9,4
^{28}Ni	0,68	3,07	0,85	3,78	^{47}Ag	0,26	10,1	0,29	10,3
^{29}Cu	0,58	3,0	0,77	4,0	^{74}W	0,152	41,1	0,29	41,3
^{30}Zn	0,51	3,1	0,58	3,6			43,0	0,150	43,3

Ширина линий L-серии

Элемент	Переход											
	$L_I - M_{II}$		$L_I - M_{III}$		$L_I - N_{II}$		$L_I - N_{III}$		$L_I - O_{III}$		$L_{II} - M_{IV}$	
	Δλ, Å	ΔE, эв	Δλ, Å	ΔE, эв	Δλ, Å	ΔE, эв	Δλ, Å	ΔE, эв	Δλ, Å	ΔE, эв	Δλ, Å	ΔE, эв
^{47}Ag	7,1	5,9	7,9	6,6	9,7	11,0	9,6	10,2	—	—	3,0	2,4
^{73}Ta	2,85	14,1	1,61	11,7	1,15	11,6	0,59	10,0	—	—	0,91	6,6
^{74}W	2,22	15,1	1,59	12,3	1,12	12,1	1,00	11,0	1,40	16,2	0,85	6,5
^{75}Re	2,10	16,4	1,69	13,6	1,14	13,2	1,02	12,0	—	—	0,81	6,5
^{76}Os	2,05	17,1	1,65	14,7	1,13	14,0	1,00	12,6	—	—	0,76	6,6
^{77}Ir	1,96	17,7	1,66	14,9	1,10	14,6	0,99	13,3	—	—	0,73	6,8
^{78}Pt	2,05	19,4	1,70	17,2	—	—	1,09	15,6	—	—	0,84	8,3
^{79}Au	2,05	20,7	1,70	18,4	1,20	18,1	1,07	16,4	—	—	0,81	8,5
^{81}Tl	1,89	21,6	1,60	19,7	1,12	19,3	1,02	17,8	—	—	0,75	9,0
^{82}Pb	1,83	22,2	1,39	18,3	1,08	19,9	1,04	19,4	—	—	0,66	8,4
^{83}Bi	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,70	9,6
^{92}U	1,46	32,2	0,77	18,8	1,17	30,4	0,94	32,4	—	—	0,60	14,3

Элемент	Переход													
	$L_{II} - N_{IV}$		$L_{II} - O_{IV}$		$L_{III} - M_{IV}$		$L_{III} - M_V$		$L_{III} - N_I$		$L_{III} - N_V$		$L_{III} - O_{IV,V}$	
	Δλ, Å	ΔE, эв	Δλ, Å	ΔE, эв	Δλ, Å	ΔE, эв	Δλ, Å	ΔE, эв	Δλ, Å	ΔE, эв	Δλ, Å	ΔE, эв	Δλ, Å	ΔE, эв
^{47}Ag	2,88	3,95	—	—	—	—	4,5	3,2		—	3,00	3,72	—	—
^{73}Ta	0,99	9,5	—	—	—	—	—	—	—	—	1,31	9,8	—	—
^{74}W	0,91	9,3	0,69	7,0	—	—	1,26	7,2	—	—	1,23	9,8	0,65	6,5
^{75}Re	0,87	9,5	—	—	—	—	—	—	—	—	1,23	9,8	—	—
^{76}Os	0,80	9,4	—	—	—	—	—	—		—	1,10	9,9	—	—
^{77}Ir	1,12	9,6	—		—		1,19	8,1	—	—	1,01	9,7	—	
^{78}Pt	0,85	11,4	—	—	—	—	1,17	8,4	—	—	1,09	11,1	—	—
^{79}Au	0,80	11,5	—	—	—	—	1,15	8,6	—	—	1,04	11,2	—	—
^{81}Tl	0,71	11,7	—	—	—	—	1,11	9,4	—	—	0,96	11,5	—	—
^{82}Pb	0,65	11,4	—	—	—	—	1,05	9,5	—	—	0,92	11,8	—	
^{83}Bi	0,67	12,5	—	—	—	—	1,03	9,8	—	—	0,90	12,1	—	—
^{92}U	0,49	15,9	0,47	16,4	0,99	14,4	0,86	13,1	0,97	19,4	0,74	16,4	0,50	11,9

Ширина линий M-серии

Элемент	Переход	Δλ, Å	ΔE, эв	Элемент	Переход	Δλ, Å	ΔE, эв
^{38}Sr	$M_V - N_{II,III}$	2,02	1,99	^{47}Ag	$M_{II} - M_{IV}$	0,9	3,8
^{40}Zr	$M_V - N_{II,III}$	1,17	2,09	^{47}Ag	$M_{III} - M_V$	1,1	3,7
^{41}Nb	$M_V - N_{II,III}$	1,25	3,44	^{47}Ag	$M_{III} - N_{IV}$	0,26	7,5
^{42}Mo	$M_V - N_{II,III}$	1,02	3,05	^{48}Cd	$M_V - N_{II,III}$	1,65	14,8
^{44}Ru	$M_V - N_{II,III}$	0,96	3,79	^{50}Sn	$M_V - N_{II,III}$	1,32	16,4
^{45}Rh	$M_V - N_{II,III}$	0,84	4,57	^{51}Sb	$M_V - N_{II,III}$	1,26	15,5
^{46}Pd	$M_V - N_{II,III}$	1,03	6,74	^{52}Te	$M_V - N_{II,III}$	1,07	16,6
^{46}Ag	$M_{III} - N_V$	0,39	6,6	^{56}Ba	$M_V - N_{II,III}$	0,24	7,0
^{47}Ag	$M_V - N_{II,III}$	1,45	13,6	^{57}La	$M_V - N_{II,III}$	0,27	9,1
				^{58}Ce	$M_V - N_{II,III}$	0,26	10,6

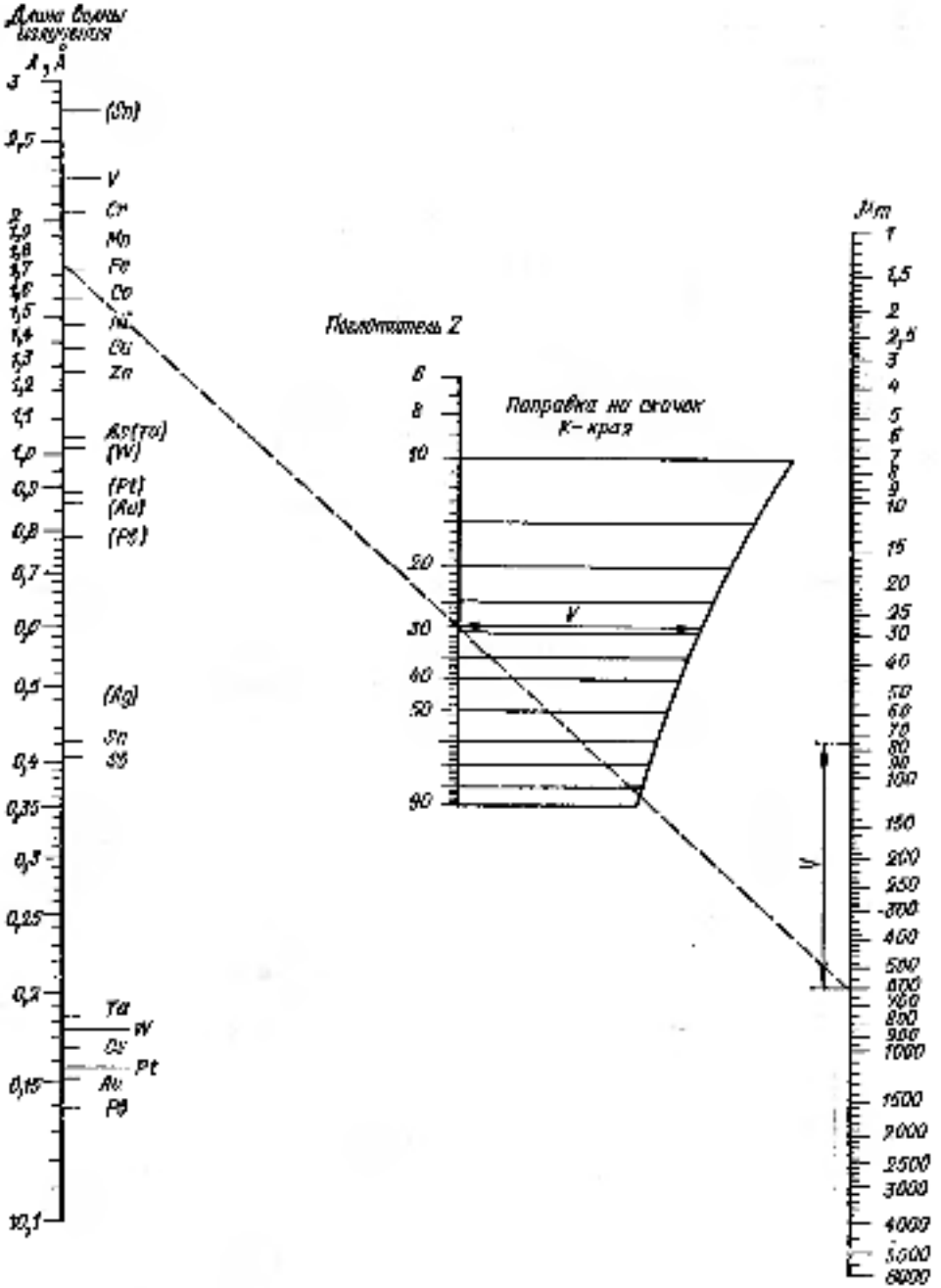


Рис. 35.2. Номограмма для определения массового коэффициента ослабления μ_m [2].

Элемент	$M_V - N_{VII}$		$M_V - N_{VI}$		$M_{IV} - N_{VI, VII}$		$M_{III} - N_V$		$M_{IV} - N_{III}$		$M_{IV} - O_{II, III}$		$M_V - N_{II}$		$M_V - N_{III}$		$M_{III} - N_I$	
	Δλ, Å	ΔE, кэв	Δλ, Å	ΔE, кэв	Δλ, Å	ΔE, кэв	Δλ, Å	ΔE, кэв	Δλ, Å	ΔE, кэв	Δλ, Å	ΔE, кэв	Δλ, Å	ΔE, кэв	Δλ, Å	ΔE, кэв	Δλ, Å	ΔE, кэв
^{74}W	6,6	1,68	1,2	0,31	7,85	2,14	16,0	6,0	4,97	0,84	10,9	3,01	83,5	12,5	13,3	2,3	—	—
^{77}Ir	7,7	2,5	—	—	6,6	2,2	22,0	9,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
^{78}Pt	6,8	2,0	—	—	5,3	1,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
^{79}Au	6,8	2,5	6,4	2,5	16,0	8,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	32	10,0

Таблица 35.8

Индексы асимметрии [2]

Элемент	K_{α_1}	K_{α_2}	Элемент	K_{α_1}	K_{α_2}	Элемент	K_{α_1}	K_{α_2}
^{17}Cl	0,9	1,0	^{26}Mn	1,5	1,3	^{31}Ga	1,0	1,2
^{19}K	1,0	1,0	^{26}Fe	1,6	1,3	^{32}Ge	1,0	1,1
^{21}Sc	1,0	1,0	^{27}Co	1,4	1,3	^{35}Br	1,0	1,1
^{22}Ti	1,2	1,0	^{28}Ni	1,2	1,3	^{38}Sr	1,0	1,1
^{23}V	1,2	1,1	^{29}Cu	1,2	1,3	^{40}Zr	1,0	1,1
^{24}Cr	1,4	1,0	^{30}Zn	1,1	1,3	^{42}Mo	1,0	1,0

35.6. ПОГЛОЩЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

Поглощение рентгеновского излучения в веществе сопровождается образованием фотоэлектронов, оже-электронов с испусканием атомами вещества вторичных фотонов. Ослабление интенсивности рентгеновского излучения происходит по экспоненциальному закону:

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x).$$

Здесь $I(x)$ — интенсивность рентгеновского излучения на расстоянии x от поверхности вещества; I_0 — интенсивность на поверхности; μ, $см^{-1}$ — линейный коэффициент ослабления.

Так как энергия рентгеновского излучения намного превышает энергию химической связи, то поглощение рентгеновского излучения атомами вещества происходит независимо. Если вещество состоит из атомов одного сорта, то полезно ввести массовый коэффициент ослабления $\mu_m = \mu/\rho$, где ρ — плотность, $г/см^3$.

На рис. 35.2 показана построенная по экспериментальным данным номограмма, позволяющая определить μ_m в зависимости от Z — атомного номера поглощающих атомов и λ — длины волны излучения. Следует иметь в виду, что коэффициент поглощения как функция длины волны λ испытывает скачки при λ, равной λ_K, λ_{L_1} и т. д., где λ_K, λ_{L_1} ... — длины волн краев поглощения K-, L-серий. Край поглощения определяется переходом на данного уровня на первый из незаполненных уровней, для которого выполняется условие дипольного поглощения. Значения краев поглощения для различных элементов приведены в табл. 35.2—35.4. Физически эти скачки в μ_m связаны с тем, что при $\lambda < \lambda_K$ фотоэффект может происходить на всех электронах атома, при $\lambda > \lambda_K$ из игры исключаются электроны K-оболочки. Аналогичная картина имеет место при $\lambda = \lambda_{L_1}$. Поправки на эти скачки также приведены на диаграмме рис. 35.2, штриховая линия на которой иллюстрирует нахождение μ_m для поглощения $K\beta_1$ линии железа с длиной волны 1,753 Å в меди ($Z = 29$). Через точки $\lambda = 1,753$ Å и $Z = 29$ проводим линию до пересечения с осью μ_m. Это дает значение для μ_m, равное 600. По табл. 35.2 и 35.3 определяем, что рассматриваемая длина волны лежит между краями поглощения K и L_1-серий в меди. Поправка на скачок K-края, измеряемая горизонтальным отрезком V, против значения $Z = 29$, откладывается вверх от цифры 600; получающаяся точка 75 дает искомое значение μ_m.

Для сложного химического вещества линейный коэффициент поглощения может быть выражен через весовые концентрации C_i и массовые коэффициенты ослабления $(\mu_m)_i$ элементов, образующих данное соединение:

$$\mu = \rho \sum_i C_i (\mu_m)_i. \qquad (7)$$

Здесь ρ — плотность сложного вещества, $г/см^3$. Суммирование производится по всем элементам, входящим в сложную молекулу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рентгеновские** лучи. Пер. с нем. и англ. Под ред. М. А. Блохина. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
2. **Блохин М. А.** Физика рентгеновских лучей. М., Гостехтеориздат, 1953.
3. **Вайнштейн Э. Е.** Рентгеновские спектры атомов в молекулах химических соединений и в сплавах. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1950.

VI. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

ГЛАВА 36

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

36.1. ВВЕДЕНИЕ

Элементарными в традиционном смысле этого слова следовало бы называть самые простые, неделимые частицы материи. Однако подавляющее большинство частиц, которые относят к разряду элементарных, не удовлетворяют этому критерию, так как они нестабильны и в результате распада превращаются в другие элементарные частицы. Такая нестабильность не означает, что распадающиеся элементарные частицы состоят из конечных продуктов своего распада, которые можно было бы тогда считать истинно элементарными частицами. Это видно уже из того факта, что схемы распада многих элементарных частиц, а следовательно и конечные продукты распада, могут быть разными. Как известно, традиционное понятие элементарности не применимо к тому, что принято называть элементарными частицами, поэтому в настоящее время существует скорее не определение того, что такое элементарные частицы, а правило, по которому в разряд элементарных частиц относят все мельчайшие частицы материи, за исключением атомных ядер с массовым числом больше единицы.

36.2. ОСНОВНЫЕ ГРУППЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

В зависимости от того, в каких взаимодействиях участвуют элементарные частицы, их разбивают [1] на три основные группы. Самая большая группа — *адроны* — элементарные частицы, участвующие в сильных взаимодействиях. Адроны разделяются на мезоны, частицы с целочисленным значением спина, и барионы, частицы с полуцелым значением спина. Вторую группу — группу *лептонов* образуют частицы, участвующие только в слабом и электромагнитном взаимодействиях. Третья группа состоит из одного *фотона*, участвующего только в электромагнитном взаимодействии.

Строгие квантовые числа элементарных частиц сохраняются во всех взаимодействиях. К их числу относятся:

электрический заряд — величина, кратная для всех частиц заряду электрона;

электронный лептонный заряд $L_e = 1$ для электрона e^- и электронного нейтрино ν_e и $L_e = -1$ для позитрона e^+ и электронного антинейтрино $\bar{\nu}_e$. Для остальных частиц $L_e = 0$;

мюонный лептонный заряд $L_\mu = 1$ для μ^- и ν_μ и $L_\mu = -1$ для μ^+ и $\bar{\nu}_\mu$. Для остальных частиц $L_\mu = 0$. Различие электронного и мюонного лептонных зарядов определяет для типа нейтрино (ν_e и ν_μ);

барионный заряд B, равный 1 для барионов и -1 для антибарионов. Для остальных элементарных частиц $B = 0$. Сохранение барионного заряда означает, что во всех ядерных реакциях любое изменение полного числа барионов должно сопровождаться точно таким же изменением полного числа антибарионов;

спин I — величина, характеризующая внутренний момент количества движения. Сохранение спина связано со свойством изотропности пространства во всех направлениях.

Нестрогие квантовые числа элементарных частиц сохраняются только при определенных взаимодействиях. К их числу относятся: изотопический спин, гиперзаряд, пространственная и зарядовая четности, G-четность и квантовое число A.

Изотопический спин I определяет число частиц в одном зарядовом мультиплете. Сильные взаимодействия элементарных частиц обладают свойством инвариантности относительно вращения изотопического спина. Слабое и электромагнитное взаимодействия нарушают симметрию в изотопическом пространстве, поэтому изотопический спин перестает быть строгим квантовым числом.

Странность S была введена для объяснения экспериментально наблюдаемого эпизодического (ассоциативного) рождения гиперонов и K-мезонов. В сильных взаимодействиях имеет место закон сохранения странности [1, 2]. Это в частности приводит к тому, что гипероны и K-мезоны стабильны по отношению к сильным распадам и могут распадаться только в результате слабых взаимодействий, нарушающих закон сохранения странности. Максимальное значение $|S|$ для известных в настоящее время элементарных частиц равно трем.

Гиперзаряд Y определяется как сумма $B + S$, он связан с зарядом Q и величиной I_z соотношением Гелл-Манна—Нишиджимы: $Q = I_z + Y/2$.

Пространственная четность P определяется характером преобразования волновой функции элементарных частиц при зеркальном отражении. Собственные значения оператора отражения P определяют обычно, исходя из того, что двойное отражение есть тождественное преобразование, т. е. $P^2 = 1$.

Зарядовая четность C определяется как собственное значение оператора зарядового сопряжения. Этот оператор антикоммутирует с оператором полного заряда системы. Поэтому только состояния с полным зарядом, равным нулю, могут обладать определенным значением зарядовой четности. В слабых взаимодействиях происходит нарушение законов сохранения P- и C-четностей. Однако комбинация слабых взаимодействий обладают CP-инвариантностью (закон сохранения комбинированной четности).

В 1964 г. было обнаружено, что наряду с обычным CP-инвариантным распадом $K_L \to 3\pi$ с малой вероятностью (порядка 0,2%) происходит распад $K_L \to 2\pi$, в котором CP-четность нарушается. Возможно, что CP-неинвариантное взаимодействие «сверхслабое» и тогда его можно проявляться практически только в распадах каонов. Это связано с исключительно малой разницей масс нейтральных каонов — K_S и K_L, для которых CP-четности различны.

G-четность определяется как собственное значение оператора G-четности, равного $C\exp(i\pi I_y)$ [3]. Она определена только для сильновзаимодействующих нейтральных частиц с нулевым барионным зарядом, то есть это могут быть либо π- η-мезоны, либо образования элементарных частиц с S и B, равными нулю. G-четность сохраняется только в сильных взаимодействиях. В отличие от C-четности она имеет определенное значение и для заряженных членов изотопического мультиплета. Сохранение G-четности накладывает целый ряд запретов в сильных распадах элементарных частиц.

Квантовое число A введено для объяснения некоторых эмпирических правил отбора в распадах мезонов. Приближенный характер A-инвариантности распадов мезонов связан с тем, что учет роли виртуальных барионов в этих распадах приводит к нарушению A-инвариантности. Однако это нарушение может быть малым, так как порог рождения пары барион — антибарион относительно велик [4].

35.8. УНИТАРНАЯ СИММЕТРИЯ И СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ МАССАМИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Унитарная симметрия элементарных частиц может рассматриваться как обобщение симметрии в изотопическом пространстве. Основой изотопической симметрии является инвариантность сильных взаимодействий относительно преобразований в пространстве изотопического спина. Близость масс изотопических мультиплетов, различающихся только значением гиперзаряда Y, позволяет сделать предположение, что сильное взаимодействие состоит из собственно сильного взаимодействия и умеренно сильного взаимодействия. Собственно сильное взаимодействие допускает более широкую симметрию — унитарную симметрию элементарных частиц, которая включает в одну группу (супермультиплет) элементарные частицы, относящиеся к разным значениям I и Y. Умеренно сильное взаимодействие нарушает унитарную симметрию, снимая вырождение по массам внутри супермультиплетов.

При симметрии в изотопическом пространстве сохраняются два величины I^2, I_z, а изотопические мультиплеты являются неприводимыми представлениями группы $SU(2)$. При унитарной симметрии сохраняются уже три величины: I^2, I_z, Y, а унитарные супермультиплеты являются неприводимыми представлениями группы $SU(3)$ [1].

Наименьшим физически возможным (т. е. имеющим целочисленные значения Y) неприводимым представлением группы $SU(3)$ является октет, которому ставят в соответствие восемь барионов p, n, Λ^0, Σ^+, Σ^-, Σ^0, Ξ^-, Ξ^0. Из октетов строятся неприводимые представления более высокого ранга, например первые два: декуплет и 27-плет. Декуплет образуют барионные резонансы с $J^P = -3/2^+$, а также Ω^--гиперон. Барионные резонансы с $J^P = 1/2^-$ и $J^P = 3/2^+$ группируются в октет ($J^P = 1/2^-$) и декуплет ($J^P = 3/2^+$). Аналогично строятся унитарные супермультиплеты для мезонов и мезонных резонансов.

Преобразования группы $SU(3)$ можно рассматривать как преобразования в пространстве унитарного спина U. Каждому супермультиплету соответствует определенное значение унитарного спина, при этом величина $2U + 1$ равна числу различных значений гиперзаряда Y в данном супермультиплете. Для октетов $U = 1$, для декуплетов $U = 3/2$.

Таблица 35.1

Унитарные супермультиплеты элементарных частиц [8]

Октеты

Y	I	I_z	Барионы $J^P = 1/2^+$	Мезоны $J^P = 0^-$	Мезоны $J^P = 1^-$
1	$1/2$	$1/2$	p	K^+	K^{*+}
1	$1/2$	$-1/2$	n	K^0	K^{*0}
0	1	1	Σ^+	π^+	ρ^+
0	1	0	Σ^0	π^0	ρ^0
0	1	-1	Σ^-	π^-	ρ^-
0	0	0	Λ	η	φ
-1	$1/2$	$1/2$	Ξ^0	$\bar{K}^0$	$\bar{K}^{*0}$
-1	$1/2$	$-1/2$	Ξ^-	K^-	K^{*-}

Декуплет барионов $J^P = 3/2^+$

Частица	I_z	I	Y
Δ^{++}	$3/2$	$3/2$	1
Δ^+	$1/2$	$3/2$	1
Δ^0	$-1/2$	$3/2$	1
Δ^-	$-3/2$	$3/2$	1
Y_1^{*+}	1	1	0
Y_1^{*0}	0	1	0
Y_1^{*-}	-1	1	0
Ξ^{*0}	$1/2$	$1/2$	-1
Ξ^{*-}	$-1/2$	$1/2$	-1
Ω^-	0	0	-2

Расщепление по массам элементарных частиц внутри супермультиплета получают, сделав простейшее предположение, что умеренно сильное взаимодействие ведет себя как эффективное постоянное поле. Квантовыми числами, характеризующими такое расщепление, являются Y и $I(I + 1) - Y^2/4$. Тогда для масс барионов, входящих в супермультиплет, справедливо соотношение

$$m = m_0 + \Delta m_1 Y + \Delta m_2 [I(I+1) - Y^2/4]. \quad (36.1)$$

Отсюда следует, что массы барионов, входящих в октет, связаны условием

$$2(m_N + m_\Xi) = m_\Sigma + 3m_\Lambda. \quad (36.2)$$

Здесь m_i — масса покоя i-й элементарной частицы.

Из (36.1) для барионного декуплета следует условие эквидистантности масс

$$m_\Delta - m_\Sigma = m_{\Sigma^*} - m_{\Xi^*} = m_{\Xi^*} - m_\Omega. \quad (36.3)$$

По аналогичной схеме получают соотношение между квадратами масс элементарных частиц, входящих в мезонные октеты:

$$4m_K^2 = m_\pi^2 + 3m_\eta^2. \quad (36.4)$$

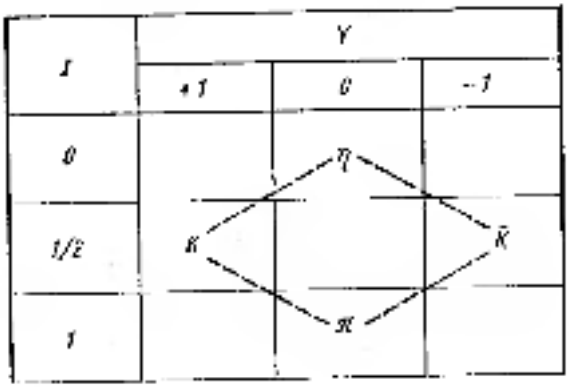
Формулы (36.2)—(36.4) очень хорошо согласуются с экспериментом. Исключение представляет только октет векторных мезонов (φ, K^*, ρ), для которого согласие хуже.

36.4. СИМВОЛИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

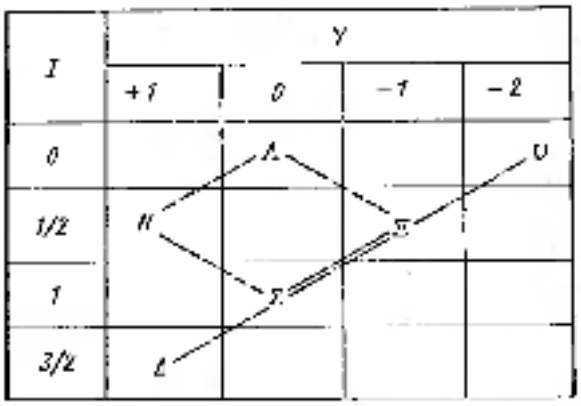
Помимо обычных, «традиционных», наименований элементарных частиц, которые приводятся в таблицах в подглавке «Частицы», существует предложенная Чу, Гелл-Манном и Розенфельдом [6] символика мезонов и барионов, обеспечивающая группировку элементарных частиц по изотопическому спину и гиперзаряду. В табл. 36.2 и 36.3 приведены символы барионов и мезонов в зависимости от I и Y, объединенных в унитарные супермультиплеты. Дополнительные обозначения, которые записываются в виде индексов у символа элементарной частицы, обеспечивают группировку частиц по знакам чётности и спина, а также связывают частицы, расположенные на одной траектории Редже [7]. Правила, по которым вводятся индексы у символов барионов и мезонов, приведены в табл. 36.3. Например, протон и нейтрон, для которых $I = 1/2$; $Y = 1$; $J^P = 1/2^+$ обозначаются символом N_α (или $N_\alpha^{1/2}$).

Таблица 36.2

Символы мезонов и мезонных резонансов* [8]



Символы барионов и барионных резонансов* [8]



* Пунктирной линией показаны частицы, объединяющиеся в унитарный октет. Штрих-пунктирная линия показывает объединение частиц в унитарный декуплет.

Таблица 36.3

Индексы у символов барионов и мезонов [8]

Частица	Индекс	нечетный	I	II	I	II	I	II	I	II
		четный	α	β	γ	δ	ζ	η	θ	ι
Барион	J^P		$1/2^+$	$5/2^+$	$1/2^-$	$5/2^-$	$3/2^-$	$7/2^-$	$3/2^+$	$7/2^+$
Мезон	J^P		0^+	2^+	0^-	2^-	1^-	3^-	1^+	3^+

36.5. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ, СТАБИЛЬНЫЕ ПО ОТНОШЕНИЮ К СИЛЬНЫМ РАСПАДАМ

Приведенные в табл. 36.4 погрешности измерений, как правило, представляют собой среднеквадратические отклонения. Если приведенное значение получено в результате обработки данных различных экспериментов и погрешности измерений распределены не по нормальному закону, то истинное значение погрешности есть вычисленная погрешность, умноженная на приводимый в таблице множитель S («шкала»).

Q — значение выделенной при распаде энергии;

P — наибольшее возможное значение импульса частиц;

c — скорость света.

Таблица 36.4

Характеристики элементарных частиц, стабильных по отношению к сильным распадам [9, 10]

Класс	Частица	Квантовые числа $I(J^{PC})$	Масса покоя, Мэв	Разность масс, Мэв	Среднее время жизни, сек	Каналы распада: Схема распада	Относительная вероятность, %	$\tau_{Мэв}$, сек	$\frac{\tau_{Мэв}}{\tau}$
Фотон	γ	$(1^-)\ C^-$	0 ($<2\cdot10^{-45}$)	—	Стабилен	—	—	—	—
Лептоны	ν_e	$\left(\frac{1}{2}\right)$	0 (<60 эв)	—	Стабильны	—	—	—	—
	ν_μ	$\left(\frac{1}{2}\right)$	0 ($<1,2$)						
	e^-	$\left(\frac{1}{2}\right)$	0,5110034 ± ± 0,0000014	—	Стабильны	—	—	—	—
	μ^-	$\left(\frac{1}{2}\right)$	105,65948 ± ± 0,00035	$m_{\mu^-} - m_{\mu^+} = 33,909 \pm 0,006$	$(2,1994 \pm \pm 0,0000)\ 10^{-6}$, $S = 2,2$	$e\nu_e\bar{\nu}_\mu$ $e\gamma\gamma$ $3e$ $e\gamma$	100 $<1,6\cdot10^{-9}$ $<6\cdot10^{-9}$ $<2,2\cdot10^{-8}$	100,15	52,8
Мезоны	π^+	$1(0^-)\ C_n$	139,5688 ± ± 0,0004	$m_{\pi^+} - m_{\pi^0} = -4,6043 \pm \pm 0,0007$	$(2,6030 \pm \pm 0,0023)10^{-8}$	$\mu^+\nu_\mu$ $e^+\nu_e$ $\mu^+\nu_e\gamma$ $e^+e^+\nu_e$ $e^+\nu_e\gamma$ $e^+e^+e^-$	100 $(1,24 \pm 0,03)\ 10^{-4}$ $(1,26 \pm 0,25)\ 10^{-4}$ $(1,01 \pm 0,09)\ 10^{-6}$ $(3,0 \pm 0,5)\cdot10^{-8}$ $<3,4\cdot10^{-8}$	33,02 135,07< 33,02 1,09 — -	29,80 69,60 29,80 4,50 70 70
	π^0	$1(0^-)\ C_n^-$	134,9646 ± ± 0,0074		$(0,84 \pm 0,10)\ 10^{-16}$, $S = 1,6$	$\gamma\gamma$ γe^+e^- $\gamma\gamma\gamma$ $e^+e^-e^+e^-$ $\gamma\gamma\gamma\gamma$	98,6 $1,19 \pm 0,05$ $<5\cdot10^{-4}$ $(3,2 \pm 0,9)\ 10^{-5}$ $<6,1\cdot10^{-5}$	135,00 130,96 — - —	67,60 67,29 — 67

Класс	Частица	Квантовые числа $I(J^{PC})$	Масса покоя, Мэв	Разность масс, Мэв	Среднее время жизни, сек	Каналы распада: Схема процесса	Относительная вероятность, %		$\frac{G}{c^2}$, Мэв	$\frac{p_{max}}{c}$, Мэв/с
Мезоны	$K^{\pm}$	$\frac{1}{2}(0^-)$	493,707±0,037	$m_{K^+}-m_{K^-}=-3,50\pm0,13$ $S=1,1$	$(1,237\pm0,026)10^{-8}$ $S=1,2$	$\mu^{\pm}\nu_{\mu}$	63,54±0,16	$S=1,6$	388,1	235,6
						$\pi^{\pm}\pi^{0}$	21,12±0,17		219,2	205,2
						$\pi^{\pm}\pi^{+}\pi^{-}$	5,59±0,03		75,0	125,5
						$\pi^{\pm}\pi^{0}\pi^{0}$	1,73±0,06		84,3	133,0
						$\pi^{0}\mu^{\pm}\nu_{\mu}$	3,20±0,06		253,1	215,2
						$\pi^{0}e^{\pm}\nu_{e}$	4,82±0,05		358,3	228,4
						$\pi^{\pm}\pi^{+}\pi^{-}\nu_{\mu}$	$(3,7\pm0,2)\cdot10^{-5}$		214,1	203,5
						$\pi^{\pm}\pi^{\pm}e^{\mp}\nu_{e}$	$<6\cdot10^{-7}$		214,1	203,5
						$\pi^{\pm}\pi^{0}\gamma$	$(9,2\pm0,7)\cdot10^{-4}$		219,2	205,2
						$\pi^{\pm}\pi^{\mp}\mu^{\pm}\nu_{\mu}$	$<1,4\cdot10^{-3}$		109,0	151,1
						$\pi^{\pm}\mu^{+}\mu^{-}$	$<3\cdot10^{-7}$		142,9	171,9
						$\pi^{\pm}e^{+}e^{-}$	$<1,1\cdot10^{-7}$		353,2	227,2
						$e^{\pm}\nu_{e}$	$(1,5\pm1,2)10^{-5}$		453,3	246,9
						$\pi^{\pm}\pi^{+}\pi^{-}\gamma$	$(1\pm0,4)10^{-3}$		75,0	125,5
	$K^{0}=\frac{K_S+K_L}{\sqrt{2}}$, $\overline{K}_0=\frac{K_S-K_L}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{2}(0^-)$	497,70±0,13		50% K_S и 50% K_L	—	—		—	—

Класс	Частица	Квантовые числа $J(J^{PC})$	Масса покоя, Мэв	Разность масс, Мэв	Среднее время жизни, сек	Каналы распада			
						Схема распада	Относительная вероятность, %	Q, Мэв	$\frac{p_{\max}}{c}$, Мэв/с
Мезоны	K_S	$\frac{1}{2}(0^-)$		$m_{K_L} - m_{K_S} = -(-0,46 \pm 0,02)\tau_S^{-1}$	$(0,896 \pm 0,007)10^{-10}$ $S = 2,4$	$\pi^+\pi^-$ $\pi^0\pi^0$	$68,77 \pm 0,26$ $31,23 \pm 0,26$ $S = 1,3$	218,5 227,6	206,0 209,0
	K_L	$\frac{1}{2}(0^-)$		$S = 1,2$	$(5,77 \pm 0,09)10^{-8}$	$\pi^\pm e^\mp \nu$ $\pi^0\pi^0\pi^0$ $\pi^\pm \mu^\mp \nu_\mu$ $\pi^0 e^\mp \nu_e$ $\pi^+\pi^-$	$21,3 \pm 0,6$ $11,5 \pm 0,4$ $27,5 \pm 0,5$ $25,0 \pm 0,6$ $0,177 \pm 0,018$	92,8 83,6 232,6 357,6 218,1	139,3 132,8 216,0 229,3 206,0
	η	$0(0^{-+})$ C^+	$548,8 \pm 0,6$ $S = 1,4$	—	$\Gamma = 12,63 \pm 0,66$ кэв	$\gamma\gamma$ $\pi^0\gamma\gamma$ $3\pi^0$ $\pi^+\pi^-\pi^0$ $\pi^+\pi^-\gamma$ $\pi^0\mu^+\mu^-$	$38,0 \pm 1,0$ $3,1 \pm 1,1$ $30,0 \pm 1,1$ $23,3 \pm 1,4$ $5,1 \pm 0,7$ $<0,04$ $S = 1,2$	548,6 413,0 148,7 134,0 265,1 419,0	274,3 257,7 179,4 174,4 236,1 257,7
Барионы	p	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	$938,2796 \pm 0,0027$	$m_n - m_p = 1,29344 \pm 0,00007$	Стабилен	—	—	—	—
	n	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	$939,5731 \pm 0,0027$		918 ± 14	$pe^-\bar{\nu}_e$	100	0,78	1,19

Класс	Частица	Квантовые числа $I(J^{PC})$	Масса покоя, Мэв	Разность масс, Мэв	Средняя время жизни, сек	Главные моды распада: Схема распада	Относительная вероятность, %	σ, мб	$\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$, %
Барионы	Λ	$0\left(\frac{1^+}{2}\right)$	1115,60 ± ±0,05	-	$(2,578 \pm 0,021)10^{-10}$ $S = 1,6$	$p\pi^-$	64,2 ± 0,5	37,6	100,2
						$n\pi^0$	35,8 ± 0,5 } $S = 1,4$	40,9	100,7
						$p\mu^-\bar{\nu}_\mu$	$(1,57 \pm 0,35)10^{-4}$	71,5	130,6
						$pe^-\bar{\nu}_e$	$(0,813 \pm 0,069)10^{-3}$	176,7	153,1
						$p\pi^-\gamma$	$(0,85 \pm 0,14)10^{-3}$	—	100
	Σ^+	$1\left(\frac{1^+}{2}\right)$	1189,37 ± ±0,06	$m_{\Sigma^-} - m_{\Sigma^+} =$ $= 7,99 \pm 0,08$ $S = 1,2$	$(0,800 \pm 0,006)10^{-10}$	$p\pi^0$	51,6 ± 0,7	116,2	169,0
						$n\pi^+$	48,4 ± 0,7	110,3	185,0
						$n\pi^+\gamma$	$(0,93 \pm 0,10)10^{-3}$	110,3	185,0
						$\Lambda e^+\nu_e$	$(2,02 \pm 0,47)10^{-4}$	73,4	71,6
						$p\gamma$	$(1,85 \pm 0,4)10^{-3}$	251,1	224,6
						$p\mu^+\nu_\mu$	$< 2,4 \cdot 10^{-4}$	144,2	202,4
						$ne^+\nu_e$	$< 1,0 \cdot 10^{-4}$	249,3	223,6
	Σ^0	$1\left(\frac{1^+}{2}\right)$	1192,46 ± 0,09	$m_{\Sigma^-} - m_{\Sigma^0} =$ $= 4,87 \pm 0,07$	$< 1,0 \cdot 10^{-14}$	$\Lambda\gamma$	100	77,0	74,5
						Λe^+e^-	$5,45 \cdot 10^{-3}$	—	74
	Σ^-	$1\left(\frac{1^+}{2}\right)$	1197,35 ± 0,06		$(1,482 \pm 0,017)10^{-10}$ $S = 1,5$	$n\pi^-$	$= 100$	118,1	192,8
						$n\pi^-\gamma$	$\approx 0,1 \cdot 10^{-1}$	118,1	192,8
						$n\mu^-\bar{\nu}_\mu$	$(0,45 \pm 0,04)10^{-3}$	152,0	209,4
						$ne^-\bar{\nu}_e$	$(1,08 \pm 0,02)10^{-3}$	207,1	269,9
						$\Lambda e^-\nu_e$	$(0,80 \pm 0,06)10^{-4}$	81,2	79,0

Класс	Частица	Квантовые числа $J(JPG)C$	Масса покоя, Мэв	Разность масс, Мэв	Среднее время жизни, сек	Канал распада	Относительная вероятность, %	$\frac{p_K}{c}$	$\frac{p_K}{c}$
Барионы	Ξ^0	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	1314,9±0,6	$m_{\Xi^-}-m_{\Xi^0}=$ $=6,4\pm0,6$	$(2,96\pm0,12)10^{-10}$	$\Lambda\pi^0$	≈ 100	63,9	134,6
						$p\pi^-$	$<0,9\cdot10^{-3}$	273,5	298,7
						$p e^-\bar{\nu}_e$	$<1,3\cdot10^{-3}$	375,5	322,2
						$\Sigma^+ e^-\bar{\nu}_e$	$<1,5\cdot10^{-3}$	124,4	119,0
						$\Sigma^- e^+\nu_e$	$<1,5\cdot10^{-3}$	116,6	111,9
						$\Sigma^+\mu^-\bar{\nu}_\mu$	$<1,5\cdot10^{-3}$	—	64
						$\Sigma^-\mu^+\nu_\mu$	$<1,5\cdot10^{-3}$	—	69
						$p\mu^-\bar{\nu}_\mu$	$<1,3\cdot10^{-3}$	—	309
	Ξ^-	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	1321,2±0,14		$(1,652\pm0,023)10^{-10}$	$\Lambda\pi^-$	≈ 100	60,8	138,7
						$\Lambda e^-\bar{\nu}_e$	$(2\pm1)10^{-3}$	204,9	189,4
						$n\pi^-$	$<0,5\cdot10^{-3}$	241,7	308,0
						$\Lambda\mu^-\bar{\nu}_\mu$	$<1,2\cdot10^{-3}$	95,7	102,3
						$\Sigma^0 e^-\bar{\nu}_e$	$<0,3\cdot10^{-3}$	128,0	122,2
						$\Sigma^0\mu^-\bar{\nu}_\mu$	$<0,5$	22,8	60,5
						$ne^-\bar{\nu}_e$	$<1,0$	—	327
	Ω^-	$0\left(\frac{3^+}{2}\right)$	1672,2±0,4		$\left(1,3^{+0,3}_{-0,2}\right)10^{-10}$	$\Xi^0\pi^-$, $\Xi^-\pi^0$	≈ 50	221	256
						ΛK^-	≈ 50	65	216

36.6. МЕЗОНЫ И МЕЗОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ

Зарядовая четность нестранных зарядовых триплетов мезонов обозначена символом C_n, относящимся к нейтральному члену триплета.

Надежно установленные квантовые числа подчеркнуты чертой. Отсутствие черты означает, что соответствующие значения наиболее вероятны. Сокращение свойств относится к нейтралам π^0 и φ. Приводимые иногда за символом частицы цифры в скобках, например $\bar{K}^*$ (890), означают массу частицы в мегаэлектронвольтах и служат для идентификации частицы. Остальные пояснения см. в разд. 36.6.

Таблица 36.5

Характеристики мезонов и мезонных резонансов [9,10]

Тип мезона	Частица	Символ	Квантовые числа $I\ (J^{PG})\ CA$	Масса покоя m, Мэв	Полная ширина резонанса Γ, Мэв	m^2, Гэв^2 [$\Gamma\ (m^2)$, Гэв^2]	Наиболее вероятные каналы распада: Схема распада	Относительная вероятность, %	Q, Мэв	p, Мэв/c
η	η	η_B	$\underline{0(0^{-+})C^+A^-}$	548,8±0,6	$(0,0\pm0,6)\cdot10^{-6}$	0,301	См. табл. 36.4			
	ω	η_1^1	$\underline{0(1^{--})C^-A^-}$	782,7±0,6	10,0±0,4	0,613 [0,008]	$\pi^+\pi^-\pi^0$	90	369	327
							$\pi^0\pi^+\pi^-$	*	504	366
							$\pi^0\gamma$	9±0,4	648	380
							$\eta+$ нейтр.	$<1,7$	234	199
							$\pi^+\pi^-\gamma$	<5	564	366
							e^+e^-	$\simeq0,015$	782	391
							$\mu^+\mu^-$	$<0,1$	572	377
	η'	η_B^1	$0(0^{-+})C^+A^+$	957,6±0,3	<1	0,917 [$<0,001$]	$\pi2\pi$	77±4	131	232
							$\rho\gamma$	23±4	243	182
	$K\bar{K}$ (См. 24*)	η_V	$0(0^{++})C^+A^+$	989±5	40±8	0,986 [0,004]	$\pi\pi$	<10	798	516
							$K\bar{K}$	>30	73	194
	Φ	η_1	$\underline{0(1^{--})C^-A^-}$	1019,7±0,3 $S=1,5$	4,2±0,9	1,040 [0,001]	$K_L K_S$	34,6±2,2	23	109
							K^+K^-	41,6±2,5	32	126
							$\pi\rho+3\pi$	15±5	117	188
							$\pi^0\gamma$	—	886	501
							$\eta+$ нейтр.	<12	471	362
							$\mu^+\mu^-$	0,026±0,009	509	409
							e^+e^-	0,030±0,005	1018	510
	J	η_C^0	$\underline{0(2^{++})C^+A^+}$	1270±10	170±30	1,61 [0,22]	$\pi\pi$	83±5	974	619
							$\eta\eta$	4±1	695	556
							$K\bar{K}$	4±3	265	294
	D	η_V	$0(1^{++})C^+A^-$	1280±10	30±20	1,65 [0,03]	$K\bar{K}\pi$	—	154	303
							K^*K	—	—100	<0
	E	η_V	$0(1^{++})C^+A^-$	1416±10	60±20	2,01 [0,08]	$K^*\bar{K}$	20	36	401
							$K\bar{K}\pi$	40	293	430
							[illegible]	40	—	464
	f'	$\eta_C^{0'}$	$0(2^{++})C^+A^+$	1516±3	40±10	2,29 [0,06]	$K\bar{K}$	~80	505	561
							$K\bar{K}^*(890)$	~40	111	274
							$\pi\pi$	*	1221	739
π	$\pi^\pm$ π^0	π_B	$1(0^{-+})C_n^+A^-$	139,57 134,96	(7,8±0,9)·10	0,019483 [0,018217]	См. табл. 36.4			
	ρ^+	π_1	$\underline{1(1^{--})C_n^-A^+}$	750±10 $S=2,8$	170±10 $S=2,1$	0,562 0,116	2π	$\simeq100$	480	357
							4π	<5	207	243
	ρ^0	π_V	$1(1^{--})C_n^-A^+$	766,4±3,2 $S=1,6$	115,1±6,2 $S=2,1$	0,58 [0,20]	$\pi\gamma$	9	126	370
							e^+e^-	$-0,05$	764	382
							$\mu^+\mu^-$	$\simeq0,003$	559	370
	$K\bar{K}$ (См. 24*)	π_V	$1(0^{++})C_n^+A^+$	976±10	50±20	0,953 [0,049]	K^+K^0	Большая —	11	75
							$\eta\pi$		315	316

Тип мезона	Частица	Символ	Квантовые числа $I(J^{PG})$, СА	Масса покоя m, Мэв	Полная ширина резонанса Γ, Мэв	m^2, Гэв² [Γm^2, Гэв²]	Важнейшие каналы распада: Схема распада	Относительная вероятность, %	Q, Мэв	p, Мэв/с
							См. табл. 36.4			
π	A_1	$\varkappa_1$	$\underline{1}(1^{++})\ \underline{C_n^1}\ A^-$	1080 ± 9	≈300	1,17 [0,33]	$\rho\pi$ $K\bar{K}$ (См. 4**) 3π	$\simeq100$ $\lesssim1$ $\lesssim1,5$	167 — 394	231 — 380
	B	ε	$\underline{1}(1^{+-})\ \underline{C_n^-}A^+$	1237 ± 10	190 ± 20 $S-2,2$	1,53 [0,12]	$\omega\pi$ $\omega\pi$ (См. 5**) $K\bar{K}$ (См. 6**) $\eta\pi$	$\simeq100$ $\lesssim30$ $\lesssim10$ $\lesssim50$	298 — — 662	339 — — 526
	A_2	$\varkappa_0^{11}$	$\underline{1}(2^{++})\ \underline{C_n^+}$	1310 ± 10 $S-2,5$	100 ± 10 $S-1,1$	1,72 [0,13]	$\rho\pi$ $K\bar{K}$ $\eta\pi$ $\omega\pi\pi$ $\gamma(0,8)\pi$	$71,5\pm1,8$ $4,7\pm0,6$ $15,2\pm1,2$ $8,6\pm1,8$ <1	419 333 636 — —	413 428 520 354 290
K	$K^\pm$ K^0	K_L	$\frac{1}{2}(0^-)\ A^-$	493,707±0,037 497,0±0,13		0,244 0,248	См. табл. 36.4			
	$K^*(892)$	K_T	$\frac{1}{2}(1^-)\ A^+$	$892,2\pm0,5$	$49,8\pm1,1$	0,796 [0,044]	$K\pi$ $K\pi\pi$ $K\gamma$	$\simeq100$ $\lesssim0,2$ $\lesssim0,16$	258 119 27	288 216 310
	K_C	κ	$\frac{1}{2}(1^+)\ A^-$	1242 ± 10	127 ± 25	1,54 [0,16]	$K\rho$ $K^*\pi$	$\simeq75$ $\simeq25$	44 184	$\lesssim0$ 253
	$K_A(1250)$	K_S	$\frac{1}{2}(1^+)\ A^-$	1313 ± 8	64 ± 20 $S-1,8$	1,72 [0,14]	$K^*\pi$ $K\rho$ $K\pi$	преобладают Большая —	290 53 687	340 182 638
	$K^*(1420)$	K_V	$\frac{1}{2}(2^+)\ A^+$	1421 ± 5	100 ± 10	2,02 [0,14]	$K\pi$ $K^*\pi$ $K\rho$ $K\omega$ $K\eta$	$55\pm2,7$ $29,5\pm2,5$ $9,2\pm2,4$ $4,4\pm1,7$ $2,0\pm2,0$	767 369 137 124 358	604 414 319 306 492
	$L(1770)$	K	$\frac{1}{2}(2^-)\ A^-$	1765 ± 10	140 ± 50	3,11 [0,25]	$K\pi\pi$ $K\rho$ $K\eta$	Большая Заметная <5	1062 560 1167	789 757 825

** Имеющаяся оценка орбитальной реакции лежит в интервале от 0,5 до 1 и зависит от предположений о характере интерференции.
** Не исключено, что этот резонанс просто связан с большим эффективным углом $K\bar{K}$-рассеяния.
** Согласно SU (3) «запрещен», вероятность мала.
** Данные получены по С-четности для зеркальных элементов J.
** Нормированы, если только $J<N$.

36.7. БАРИОНЫ И БАРИОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ [8]

В колонке «Энергия пучка» приведены значения кинетической энергии E и импульса P первичных частиц (π- или K-мезонов), приводящих к образованию соответствующего барионного резонанса. Остальные пояснения см. в разд. 36.5 и 36.6.

Таблица 36.6

Характеристики барионов и барионных резонансов [9, 10]

Тип бариона	Частица	Масса покоя m_0, Мэв [P, Мэв/с]	$J(J^P)$	Масса покоя m_0, Мэв	Полная ширина резонанса Γ, Мэв	τ, 10^{-23} сек [Γ, 10^{-13} Мэв·сек]	Каналы распада: Схема распада	Относительная вероятность, %	Q, Мэв	P, $\frac{Мэв}{c}$
N	p n	—	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	См. табл. 36.4						
	$N(1470)$	936 [549]	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	~1400—1470	165—300	2,16 [0,37]	πN $\pi\pi N$	≃60 ≃35	322 –	357 368
	$N(1535)$	963 [700]	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^-}{2}\right)$	~1500—1600	50—100	2,36 [0,15]	πN $N\gamma$	≃30 Заметная	472 62	476 210
	$N(1520)$	610 [237]	$\frac{1}{2}\left(\frac{3^-}{2}\right)$	~1510—1540	105—150	2,30 [0,19]	πN	≃60	440	454
	$N(1700)$	921 [1051]	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^-}{2}\right)$	~1665—1765	100—300	2,89 [0,34]	πN $N\rho$	≃55 ≃10	622 5	580 900
	$N(1670)$	900 [1030]	$\frac{1}{2}\left(\frac{5^-}{2}\right)$	~1670—1695	110—175	2,70 [0,23]	πN ΔK	≃35 ≳1	610 75	572 231
	$N(1688)$	900 [1030]	$\frac{1}{2}\left(\frac{5^+}{2}\right)$	~1680—1690	105—180	2,46 [0,24]	πN	≃70	610	572
	$N(2190)$	1937 [2072]	$\frac{1}{2}\left(\frac{7^-}{2}\right)$	~2000—2260	150—325	4,60 [0,55]	πN ΔK	30	1112 577	888 711
	$N(2650)$	3123 [3260]	$\frac{1}{2}\left(\frac{11^-}{2}\right)$	2640 ± 10	≃360	7,02 [0,95]	πN	≃7	1572	1134
	$N(1700)$	[1000]	$\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\right)$	1665—1765	100—300	2,89 [0,34]	πN $\pi\pi N$ ΔK ΣK	~55 ≃25 ~7 ≲3	— — — —	580 547 250 100
	$N(1780)$	[1200]	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	1650—1800	50—350	3,17 [0,36]	πN $\pi\pi N$ ΔK	~20 ≳40 ≲7	— — —	633 603 448
	$N(1810)$	[1250]	$\frac{1}{2}\left(\frac{3^+}{2}\right)$	1770—1860	160—330	3,28 [0,45]	πN $\pi\pi N$ ΔK	~25 ≳50 ~5	— — —	672 624 393
	$N(2220)$	[2140]	$\frac{1}{2}\left(\frac{9^+}{2}\right)$	2200—2245	260—330	4,03 [0,67]	πN	~15	—	965
	$N(3030)$	[4410]	$\frac{1}{2}(?)$	~3030	~400	0,18 [1,21]	πN	—	—	1366

Тип резонанса	Частица	Энергия, эв [P, Мэв/c]	$I(J^P)$	Масса покоя m, Мэв	Полная ширина резонанса Γ, Мэв	$m\tau$, Гэв² [τ(см), τ, сек]	Канал распада	Относительная вероятность, %	Q, Мэв	p, Мэв/c
Δ	Δ (1232)	195 [304]	$\frac{3}{2}\left(\frac{3^+}{2}\right)$	1236,0±0,55 $m_0-m_{++}=-0,45\pm0,85$ $m_-\ -m_{+-}=7,9\pm6,8$	120,0±2,0 $\Gamma_- - \Gamma_{++} = 25\pm25$	1,53 [0,30]	πN	99,4	168	227
	Δ (1600)	867 [997]	$\frac{3}{2}\left(\frac{1^-}{2}\right)$	≃1670	≃160	2,72 [0,23]	πN ππN	≃30 ≃70	502 —	560 510
	Δ (1950)	1346 [1479]	$\frac{3}{2}\left(\frac{7^+}{2}\right)$	≃1920	≃200	3,69 [0,77]	πN ΣK	≃50 ≃2	842 229	722 435
	Δ (2420)	2502 [2538]	$\frac{3}{2}\left(\frac{11^+}{2}\right)$	2423±16	≃275	6,66 [1,33]	πN ΣK	≃10 —	1342 729	1023 829
	Δ (2800)	3709 [3847]	$\frac{3}{2}\left(\frac{13^-}{2}\right)$	2850±12	≃300	8,12 [1,71]	πN	≃3	1772	1266
	Δ(1670)	[1000]	$\frac{3}{2}\left(\frac{3^-}{2}\right)$	1650—1720	190—270	2,79 [0,43]	πN ππN	≃15 ≃60	. —	560 525
	Δ(1890)	[1420]	$\frac{3}{2}\left(\frac{5^+}{2}\right)$	1840—1920	140—350	3,57 [0,47]	πN ππN ΣK	≃17 ≃50 ≃3	— . —	704 677 403
	Δ(1910)	[1460]	$\frac{3}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	1780—1935	300—340	3,65 [0,57]	πN	≃25	—	716
	Δ(3230)	[5080]	$\frac{3}{2}(?)$	~3220	~440	10,43 [1,42]	πN	—	—	1475
Λ	Λ		$0\left(\frac{1^+}{2}\right)$				См. табл. 36.4			
	Λ (1405)		$0\left(\frac{1^-}{2}\right)$	1405±5	40±10	1,97 [0,06]	Σπ	100	68	142
	Λ (1520)	138 [395]	$0\left(\frac{3^-}{2}\right)$	1518,8±1,5	16±2	2,31 [0,02]	$\bar{K}N$ Σπ Σππ Λππ	45±1 41±1 0,8±0,1 10±0,5	83 185 — 125	234 250 140 250
	Λ (1670)	393 [737]	$0\left(\frac{1^-}{2}\right)$	1660—1680	23—40	2,79 [0,06]	$\bar{K}N$ Λη Σπ	15—35 15—25 30—50	239 6 —	410 66 193
	Λ (1810)	862 [1602]	$0\left(\frac{0^+}{2}\right)$	1820±5	70—100	3,29 [0,15]	$\bar{K}N$ Σπ	≃61 ≃11	375 178	542 508

Продолжение табл. 36.6

Тип барион-ов	Частица	Энергия пучка $E_{\text{лаб}}$ [p, Мэв/с]	$I(J^P)$	Масса резон. [ширина], Мэв	Пороговая [полная] кинетическая T, Мэв	σ_t, Гэв [σ_t, мб], Гэв$^{-2}$	Канал распада	Относительная вероятность, %	Q, Мэв	p, Мэв/с
Δ	Δ (1830)	[1050]	$0\left(\frac{5^-}{2}\right)$	1810—1840	70—120	3,35 [0,17]	$\Lambda\eta$ $\Sigma(1385)\pi$	2 25—60 ~10	151 —	307 519 654
	Δ_0^+(2100)	1260 [1703]	$0\left(\frac{7^-}{2}\right)$	2090—2120	80—140	4,41 [0,25]	$\bar{K}N$ $\Sigma\pi$ $\Lambda\eta$ ΣK $\Delta\omega$	≈30 ~5 <3 <3 <3	672 775 — — —	748 690 617 483 443
	Δ(1700)	[796]	$0\left(\frac{3^-}{2}\right)$	1690 ± 10	30—70	2,85 [0,16]	$N\bar{K}$ $\Sigma\alpha$ $\Delta\pi\pi$ $\Sigma\pi\pi$	20—30 30—50 ≈25 ≈25	— — — —	426 409 416 352
	Δ (2350)	[2290]	0(?)	≈2350	140—320	5,52 [0,56]	$N\bar{K}$	—	—	913
	(2585)	[2910]	0(?)	≈2585	~300	6,68 [0,78]	$N\bar{K}$	—	—	1058
Σ	Σ		$1\left(\frac{1^+}{2}\right)$		См. табл. 36.4					
	Σ (1385)		$1\left(\frac{3^+}{2}\right)$	(+) 1383,0 ± 1,0, $S = 1,3$ ( ) 1387,0 ± 1,2 $S = 1,6$	36 ± 2, $S = 2,2$ 42 ± 5, $S = 3,4$	1,92 [0,05]	$\Delta\alpha$ $\Sigma\pi$	86 ± 2 12 ± 2 $S = 1,4$	150 48	208 117
	Σ (1670)	376 [716]	$1\left(\frac{3^-}{2}\right)$	≈1670 ± 10	35—60	2,76 [0,08]	$\bar{K}N$ $\Lambda\pi$ $\Sigma\alpha$ $\Lambda\pi\pi$ $\Delta(1405)\pi$	~8 ~12 ~30—60 ~20 ~30	223 405 323 265 184	410 447 387 369 316
	Σ (1765)	555 [925]	$1\left(\frac{5^-}{2}\right)$	1767 ± 5, $S = 1,1$	≈ 120	3,12 [0,21]	$\bar{K}N$ $\Lambda\pi$ $\Sigma\alpha$ $\Sigma(1385)\pi$ $\Lambda(1520)\pi$	≈41 ≈13 ≈1,0 ≈16 16	323 510 423 235 100	496 518 461 316 187
	Σ (1915)	861 [1282]	$1\left(\frac{5^+}{2}\right)$	≈1915	65	3,67 [0,25]	$\bar{K}N$ $\Lambda\alpha$ $\Sigma\pi$	≈14 ≈5 ≈6	478 860 —	612 619 668

Тип барона	Частица	Энергия связи $B_{\Lambda\Sigma}$ (P, Мэв/с)	$I(J^P)$	Масса покоя m_0, Мэв	Полная ширина резонанса Γ, Мэв	τ_0, $\Gamma_{эв}$ (T (сек)), $\Gamma_{эв}$	Каналы распада: Схема распада	Относительная вероятность, %	G, Мэв	P, $\frac{Мэв}{c}$
Σ	Σ (2030)	1114 [1030]	$1\left(\frac{7^+}{2}\right)$	2020—2040	120—170	4,12 [0,28]	$\bar{K}N$ $\Lambda\pi$ $\Sigma\pi$ ΣK	≃20 ≃20 ~4 ≤2	— 698 — —	700 703 652 412
	Σ(1750)	[940]	$1\left(\frac{1}{2}\right)$	1700—1790	50—100	3,06 [0,13]	$\bar{K}N$ $\Lambda\pi$ $\Sigma\pi$ $\Sigma\eta$	12—15 5—18 6—19 11—44	— 785 — —	491 507 460 54
	Σ(1940)	[1320]	$1\left(\frac{3^-}{2}\right)$	1905—1950	110—280	3,76 [0,43]	$\bar{K}N$ $\Lambda\pi$ $\Sigma\pi$	~21 ~4 ≤7	— — —	678 690 580
	Σ (2250)	[2030]	1(?)	2245—2280	100—230	5,05 [0,36]	$\bar{K}N$		—	980
	Σ (2455)	[2670]	1(?)	≈2455	≈120	6,03 [0,29]	$\bar{K}N$	—	—	979
	Σ(2620)	[2850]	1(?)	≃2620	≃175	6,86 [0,46]	$\bar{K}N$	—	—	1064
Ξ	Ξ	—	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	См. табл. 36.4						
	Ξ (1530)	—	$\frac{1}{2}\left(\frac{3^+}{2}\right)$	(0) 1531,8 ± 0,3 (−) 1535,1 ± 0,7	(0) 9,1 ± 0,5 (−) 10,6 ± 2,6	2,34 [0,02]	$\Xi\pi$	100	70	142
	Ξ (1820)	—	$\frac{1}{2}\left(\frac{3^-}{2}\right)$	1795—1870	12—100	3,31 [0,11]	$\Lambda\bar{K}$ $\Xi\pi$ $\Xi(1530)\pi$ $\Xi\pi\pi$ $\Sigma\bar{K}$	~65 ~10 ~20 ~5 ·	207 260 150 220	306 413 234 350 413
	Ξ (1940)	—	$\frac{1}{2}\left(\frac{5^+}{2}\right)$	1920—1960	40±140	3,76 [0,17]	$\Xi\pi$ $\Xi(1530)\pi$ $\Lambda\bar{K}$	— — —	473 — 320	501 376 505
Ω	Ω⁻	—	$0\left(\frac{3^+}{2}\right)$	См. табл. 36.4						

36.8. МАГНИТНЫЕ МОМЕНТЫ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ [9,10]

Обозначения:

μ_0 — магнетон Бора для электрона ($\mu_0 = 0,57883785 \cdot 10^{-14}$ *Мэв/гс* [9]);

μ_μ — магнетон Бора для мюона ($\mu_\mu = 0,2799641 \cdot 10^{-14}$ *Мэв/гс* [9]);

μ_N — ядерный магнетон Бора ($\mu_N = 3,1524515 \cdot 10^{-14}$ *Мэв/гс* [9]).

Частица	Магнитный момент
e^-	$(1,0011596567 \pm 0,0000000035)\mu_0$
$\mu^\pm$	$(1,00116616 \pm 0,0000031)\mu_\mu$
p	$(2,7928456 \pm 0,0000011)\mu_N$
n	$(-1,913148 \pm 0,000066)\mu_N$
Λ	$(-0,67 \pm 0,05)\mu_N$
Σ^+	$(2,59 \pm 0,41)\mu_N$

36.9. ПАРАМЕТРЫ РАСПАДОВ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ [9,10]

Обозначения: S и P — амплитуды s- и p-волн;

$$\alpha = \frac{2\mathrm{Re}(S^* P)}{|S|^2 + |P|^2}; \quad \beta = \frac{2\,\mathrm{Im}(S^* P)}{|S|^2 + |P|^2};$$

$$\gamma = \frac{|S|^2 - |P|^2}{|S|^2 + |P|^2}; \quad \Delta = \mathrm{arctg}\,\frac{\beta}{\alpha}.$$

Таблица 36.7

Схемы и параметры распадов некоторых элементарных частиц

Схема распада	α	β	γ	Δ, град
$\Lambda \to p\pi^-$	$0,647 \pm 0,013$	—	0,76	$7,6^{+5,7}_{-4,1}$
$\Lambda \to n\pi^0$	$0,651 \pm 0,040$	—	—	—
$\Sigma^+ \to p\pi^0$	$-0,979 \pm 0,016$	—	0,17	187 ± 6
$\Sigma^+ \to n\pi^+$	$0,068 \pm 0,016$	—	$-0,97$	-73^{+30}_{-10}
$\Sigma^+ \to p\gamma$	$-1,03^{+0,07}_{-0,42}$	—	—	—
$\Sigma^- \to n\pi^-$	$0,060 \pm 0,008$	—	0,96	240^{+12}_{-18}
$\Xi^0 \to \Lambda\pi^0$	$-0,44 \pm 0,08$	—	0,64	164 ± 15
$\Xi^- \to \Lambda\pi^-$	$-0,203 \pm 0,023$	$+0,10$	0,92	184 ± 15

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чжен Г.** Физика элементарных частиц. Пер. с англ. М., «Наука», 1966.
2. **Марков М. А.** Гипероны и K-мезоны. М., Физматгиз, 1958.
3. **Lee T. D., Yang C. N.** «Nuovo cimento», 1956, v. 3, p. 749.
   Michel L. «Nuovo cimento», 1963, v. 30, p. 319.
4. **Bronzan I. B., Low F. E.** «Phys. Rev. Lett.», 1964, v. 12, p. 522.
5. **Swart J. J.** «Revs Mod. Phys.», 1963, v. 35, p. 916. (См. перев.: «Успехи физ. наук», 1964, т. 84, с. 651.)
   Сокородынский Я. А. Унитарная симметрия элементарных частиц. «Успехи физ. наук», 1964, т. 84, с. 3.
6. **Chenet G. F. e. a.** «Sci. Amer.», 1964, v. 21, p. 74. (См. перев.: «Успехи физ. наук», 1964, т. 84, с. 525.)
7. **Ширков Д. В.** «Успехи физ. наук», 1970, т. 102, с. 87.
8. **Rosenfeld A. H. e. a.** «Revs Mod. Phys.», 1967, v. 39, p. 1.
9. **Rosenfeld A. N. e. a.** «Phys. Lett.», 1974, v. 50B, № 1.
10. **Rosenfeld A. N. e. a.** «Revs Mod. Phys.», 1975, v. 47, p. 630.

ГЛАВА 37

ЯДЕРНЫЕ СВОЙСТВА НУКЛИДОВ

37.1 ТАБЛИЦА ИЗОТОПОВ

В соответствии с установившейся к настоящему времени терминологией принято атомы с данным числом протонов и нейтронов в ядре называть нуклидами. Нуклиды с одинаковым числом протонов (т. е. принадлежащие одному химическому элементу) называются изотопами.

В табл. 37.1 приведены все достоверно известные радиоактивные и стабильные изотопы в порядке возрастания массового числа для каждого элемента. Данные расположены в шести колонках.

Колонка 1 — указан обозначенный символом элемент и его порядковое число Z.

Колонка 2 — указано массовое число изотопа; символ *m*, следующий за массовым числом, означает, что в таблице приведено метастабильное состояние изотопа. Метастабильные состояния приведены лишь тогда, когда их периоды полураспада достаточно велики ($T_{1/2} > 1$ *сек*), чтобы идентифицировать их различие от основных состояний. Символы *m*1 и *m*2 означают различные метастабильные состояния изотопа.

Колонка 3 — указан полный период полураспада нуклида. Для ряда тяжелых ядер указан также отдельно измеренный парциальный период полураспада для спонтанного деления. Он приведен под основным значением времени жизни ядра и обозначен символом (с. д.).

Колонка 4 — указан основной тип распада изотопа. Использованы следующие символы:

β^- — электронный распад;

β^+ — позитронный распад;

э. з. — захват орбитального электрона;

α — альфа-распад;

и. п. — изомерный переход (распад из возбужденного метастабильного состояния на более низкий уровень);

с. д. — спонтанное деление;

n — испускание нейтронов из возбужденных со-

тонов, возникающих в результате β-распада;

p — испускание протона из возбужденных состояний, возникающих в результате β-распада.

Если у ядра существует несколько типов распада, то все они указаны в колонке 4. В ряде случаев за символом типа распада в круглых скобках приведено относительное разветвление (в процентах) способов распада. Например, ^{8}Li (60). Отсутствие скобок означает, что относительное разветвление типов распада не определено.

Для стабильных изотопов в колонке 4 приведены в процентах значения относительной распространенности нуклида в земной коре. Для радиоактивных изотопов с очень большими периодами полураспада (и поэтому сохранившихся в земной коре) указаны как процентное содержание, так и тип распада. Например, ^{87}Rb — 27,85 β⁻.

Колонка 5 — указаны значения энергий в мегаэлектронвольтах групп наиболее интенсивных частиц (α, β^-, β^+, n, p), испускаемых при распаде нуклида. Цифры, характеризующие значение энергии, помещены на одной строке с обозначением типа распада. В круглых скобках приведена относительная интенсивность групп частиц (в %) на полное число распадов. В косых скобках (например, /22/) приведена интенсивность групп частиц (в %), относящаяся только к конкретному типу распада. Для сплошных β⁺ и β⁻-спектров в таблице представлены, как правило, значения граничной энергии β-группы с наибольшей энергией. Если β-группа с наибольшей энергией имеет относительно слабую интенсивность, то приведены значения граничной энергии и интенсивности одной или нескольких β-групп с меньшими граничными энергиями.

Колонка 6 — указаны значения энергии в мегаэлектронвольтах основного γ-излучения, сопровождающего распад нуклида. В круглых скобках приведена интенсивность γ-излучения (в %), отнесенная к полному числу распадов. В косых скобках приведена (в %) относительная интенсивность γ-излучения. Если после значения энергии скобки отсутствуют, это показывает, что значения интенсивностей только не определены. В ряде случаев указан диапазон значений энергии γ-излучения. Символ 0,511 (ан.) означает, что γ-излучение имеет аннигиляционное происхождение.

Символами ^{x}, ^{xx} и ^{xxx} помечены дублет, сложная линия и случай, когда все линии сложные.

Таблица 37.1

Таблица изотопов [1]

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				Групп частиц	γ-излучения
$_{0}n$	1	11,7 мин	β⁻	0,78	—
$_{1}H$	1	—	99,9852	—	
	2	—	0,0148	—	—
	3	12,262 года	β⁻	0,0185	
$_{2}He$	3	—	$1,3\cdot10^{-4}$	—	
	4	—	~100	—	—
	6	0,757 сек	β	3,508	
	8	0,122 сек	β⁻		0,16 (88)
$_{3}Li$	6	—	7,42	—	—
	7	—	92,58	—	—
	8	0,84 сек	β⁻	13	—
		—	2α	1,6	—
	9	0,176 сек	β⁻	13,61	—
			n	0,76	—
$_{4}Be$	7	53,6 дня	э.з.	—	0,477 (10,3)
	9	—	100	—	—
	10	$2,5\cdot10^{6}$ лет	β⁻	0,555	—
	11	13,6 сек	β⁻	11,5	2,14 (32); 4,67 (2,1); 5,85 (2,4); 6,79 (4,4); 7,56 (1,7)
	12	0,0114 сек	n	—	—
$_{5}B$	8	0,77 сек	β⁺	—	—
		—	2α	1,6	—
	10	—	19,6	—	—
	11	—	80,4	—	—
	12	0,0203 сек	β⁻ (100)	13,37	4,43 (1,3)
		—	3α (1,5)	0,196 (1,5)	—
	13	0,0186 сек	β⁻	13,44	3,68 (7)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада, или содержание стабильных изотопов, %	Энергии, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_6C$	9	0,127 сек	p	8,2 (60); 1,1 (40)	—
	10	19,48 сек	β^+	1,87	0,511 (200, ан.); 0,717 (100); 1,023 (1,7)
	11	20,34 мин	β^+ (99)	0,97	0,511 (200, ан.)
		—	э.з. (0,19)	—	—
	12	—	98,892	—	—
	13	—	1,108	—	—
	14	5730 лет	β^-	0,156	—
	15	2,5 сек	β^-	9,82 (39); 4,51 (61)	5,299 (68)
	16	0,74 сек	n	—	
$_7N$	12	0,01096 сек	β^+ (100)	16,4	0,511 (200, ан.); 4,43 (2,4)
		—	γ_α (3)	0,185 (3)	—
	13	9,96 мин	β^+	1,20	0,511 (200, ан.)
	14	—	99,635	—	—
	15	—	0,365	—	—
	16	7,14 сек	β^-	10,40 (26); 4,27 (74)	2,75 (1); 6,13 (69); 7,11 (5)
			γ (0,0006)	1,7	
	17	4,16 сек	β^-	8,68 (1,6); 7,81 (2,6); 4,1 (95)	0,87 (3); 2,19 (0,5)
		—	n	0,40 (45); 1,21 (45); 1,81 (5)	—
	18	0,63 сек	β^-	9,4	0,89 (59); 1,65 (59); 1,98 (100); 2,47 (41)
$_8O$	13	0,0087 сек	p	6,40/100/; 6,97/24/	
	14	70,91 сек	β^+	4,12 (0,6); 1,81 (99)	0,511 (200, ан.); 2,312 (99)
	15	123 сек	β^+	1,74	0,511 (200, ан.)
	16	—	99,759	—	—
	17	—	0,037	—	—
	18	—	0,204	—	—
	19	29,1 сек	β^-	4,60	0,197 (97); 1,37 (59)
	20	14 сек	β^-	—	1,06 (100)
$_9F$	17	66,6 сек	β^+	1,74	0,511 (200, ан.)
	18	109,7 мин	β^+ (97)	0,635	0,511 (194, ан.)
		—	э.з. (3)	—	—
	19	—	100	—	—
	20	11,06 сек	β^+	5,41	1,63 (100)
	21	4,35 сек	β^-	5,4	0,350/100/; 1,36/13/
	22	4,0 сек	β^-	11	1,28 (100); 2,06 (67)
$_{10}Ne$	17	0,10 сек	p	4,56	—
	18	1,5 сек	β^+	3,49	0,511 (200, ан.); 1,04 (7)
	19	17,4 сек	β^+	2,22	0,511 (200, ан.)
	20	—	90,92	—	—
	21	—	0,257	—	—
	22	—	8,82	—	—
	23	37,6 сек	β^-	4,38	0,439 (33); 1,04 (0,9)
	24	3,38 мин	β^-	1,99	0,472 (100); 0,88 (8)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				группа частиц	γ-излучение
$_{11}Na$	20	0,39 сек	β^+	11,4	—
	—	—	γ	2,14/100/; 2,49/5/; 4,44/21/	—
	21	23,0 сек	β^+	2,09	0,350 (2,3); 0,511 (200, ан.)
	22	2,62 года	β^+ (90,6)	1,820 (0,05); 0,545	0,511 (180, ан.); 1,275 (100)
	—	—	э.з. (9,4)	—	—
	23	—	100	—	—
	24	14,96 ч	β^-	4,17 (0,000); 1,389 (100)	1,369 (100); 2,754 (100)
	24m	0,0203 сек	и.п.	—	0,472
	—	—	β^-	6	
	25	60 сек	β^-	3,83	0,39 (14); 0,58 (14); 0,98 (16); 1,61 (6)
	26	1,04 сек	β^-	6,7	1,82 (100)
$_{12}Mg$	20	0,6 сек	—	—	—
	21	0,121 сек	β	3,3; 3,85; 4,58; 6,14	—
	23	12,1 сек	β^+	3,03	0,44 (9); 0,511 (200, ан.)
	24	—	78,60	—	—
	25	—	10,11	—	—
	26	—	11,29		-
	27	9,46 мин	β^-	1,75	0,18 (0,7); 0,84 (70); 1,013 (30)
	28	21,2 ч	β^-	0,46	0,031 (96); 0,40 (30); 0,96 (30); 1,36 (70)
$_{13}Al$	24	2,10 сек	β^+ (100)	8,5	0,511 (200, ан.)
	—	—	α (~10^{-4})	2	—
	25	7,24 сек	β^+	3,24	0,511 (200, ан.)
	26	$7.4 \cdot 10^5$ лет	β^+ (85)	1,17	0,511 (170, ан.); 1,12 (4);
			э.з. (15)	—	1,81 (100)
	26m	6,37 сек	β^+	3,21	0,511 (900, ан.)
	27	—	100	—	
	28	2,31 мин	β^-	2,85	1,779 (100)
	29	6,6 мин	β^-	2,40	1,28 (94); 2,43 (6)
	30	3,3 сек	β^-	6,0	2,23 (61); 3,51 (39)
$_{14}Si$	25	0,23 сек	β	3,34; 4,06; 4,68; 5,39	—
	26	2,1 сек	β^+	3,53	0,511 (200, ан.); 0,62 (34)
	27	4,14 сек	β^+	3,65	0,511 (200, ан.)
	28	—	92,18	—	—
	29	—	4,71	—	—
	30	—	3,12	—	—
	31	9,62 ч	β^-	1,46	1,26 (0,07)
	32	650 лет	β^-	0,21	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{16}P$	28	0,28 сек	β^+	11,0	0,511 (200, ан.); 1,76 (75); 4,44 (10); 7,6 (5)
	29	4,45 сек	β^+	3,95	0,511 (200, ан.); 1,28 (0,8); 2,43 (0,2)
	30	2,50 мин	β^+	3,24	0,511 (200, ан.); 2,23 (0,5)
	31	—	100	—	—
	32	14,28 дня	β^-	1,710	—
	33	24,4 дня	β^-	0,248	—
	34	12,4 сек	β^-	5,1	2,13 (25); 4,0 (0,2)
$_{16}S$	29	0,19 сек	β^+	3,73; 5,20	—
	30	1,4 сек	β^+	6,09 (20); 4,42 (80)	0,511 (200, ан.); 0,667 (80)
	31	2,72 сек	β^+	4,42	0,511 (200, ан.); 1,27 (1,1)
	32	—	95,0	—	—
	33	—	0,760	—	—
	34	—	4,22	—	—
	35	87,9 дня	β^-	0,167	—
	36	—	0,014	—	—
	37	5,07 мин	β^-	4,7 (10); 1,6 (90)	3,09 (90)
	38	2,87 ч	β^-	3,0 (5); 1,1	1,84 (56)
$_{17}Cl$	32	0,306 сек	β^+	9,9	0,511 (200, ан.); 2,24 (70)
			α (0,01)	—	4,29 (7); 4,77 (14)
	33	2,53 сек	β^+	4,56	0,511 (200, ан.); 2,9 (0,3)
	34	1,56 сек	β^+	4,46	0,511 (200, ан.)
	34m	31,99 мин	β^+ (~50)	2,48	0,145 (49), 0,511 (100, ан.);
		—	и.п. (~50)	—	1,17 (12); 2,12 (38); 3,30 (12)
	35	—	75,53	—	—
	36	$3,08 \cdot 10^5$ лет	β^- (98,1)	0,714	0,511 (0,003, ан.)
			э.з. (1,9)	—	
			β^+ (0,0012)	—	
	37	—	24,47	—	—
	38	37,29 мин	β^-	4,91	1,60 (36); 2,170 (47)
	38m	0,74 сек	и.п.	—	0,60 (100)
	39	55,6 мин	β^-	3,46 (7); 2,18 (6); 1,91	0,246 (44); 1,27 (50); 1,52 (42)
	40	1,4 мин	β^-	7,5	1,46 (100); 2,83 (100); 3,10; 5,8
$_{18}Ar$	33	0,18 сек	β^+	3,16	
	35	1,83 сек	β^+	4,94	0,511 (200), ан.); 1,22 (5); 1,70 (2)
	36	—	0,337	—	—
	37	35,1 дня	э.з.	—	—
	38	—	0,063	—	—
	39	265 лет	β^-	0,565	—
	40	—	99,600	—	—
	41	1,83 ч	β^-	2,49 (0,8), 1,198	1,293 (99)
	42	33 года	—	—	—
$_{19}K$	37	1,23 сек	β^+	5,14	0,511 (200, ан.); 2,79 (2)
	38	7,71 мин	β^+	2,68	0,511 (200, ан.); 2,170 (100)
	38m	0,95 сек	β^+	5,0	0,511 (200, ан.)
	39	—	93,22	—	—
	40	$1,26 \cdot 10^9$ лет	0,118		1,460 (11)
		—	β (89)	1,314	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{19}$K	40	—	э.з. (11)	—	—
		—	β^+ (0,001)	0,483	—
	41	—	6,77	—	—
	42	12,36 ч	β^-	3,52	0,31 (0,2); 1,524 (18)
	43	22,4 ч	β^-	1,82 (1); 1,2 (2); 0,83	0,373 (85); 0,397 (18); 0,59 (13); 0,619 (81)
	44	22,0 мин	β^-	5,2	1,156 (61); 1,74 (8); 2,177 (37); 2,6 (7)
	45	18,3 мин	β^-	4,5; 2,1	—
	47	17,5 сек	β^-	6,1 (1); 4,1	2,4 (84); 2,6 (15)
$_{20}$Ca	37	0,173 сек	p	3,10	—
	38	0,06 сек	β^+		—
	39	0,87 сек	β^+	5,49	0,511 (200, ан.)
	40	—	96,97	—	—
	41	$8 \cdot 10^5$ лет	э.з.	—	—
	42	—	0,64	—	—
	43	—	0,145	—	—
	44	—	2,06	—	—
	45	165 дней	β^-	0,252	—
	46	—	0,0033	—	—
	47	4,536 дня	β^-	1,98 (18); 0,67	0,40 (5); 0,815 (5); 1,308 (74)
	48	—	0,185	—	—
	49	8,8 мин	β^-	1,95	3,10 (80); 4,1 (10)
	50	9 сек	—	—	0,072
$_{21}$Sc	40	0,179 сек	β^+	9,1	0,511 (200, ан.); 3,75
	41	0,60 сек	β^+	6,47	—
	42	0,683 сек	β^+	—	0,511 (200, ан.)
	42m	60,6 сек	β^+	2,82	0,438 (100); 0,511 (200, ан.); 1,52 (105); 1,59 (100)
	43	3,92 ч	β^+	1,20	0,375 (22); 0,511 (180, ан.)
	44	3,92 ч	β^+	1,47	0,511 (188, ан.); 1,159 (100)
	—		э.з. (5)	—	—
	44m	2,44 дня	и.п. (98,6)	—	0,271 (86); 1,02 (1,3)
	—		э.з. (1,4)	—	—
	45	—	100	—	—
	46	83,9 дня	β^-	1,48 (0,004); 0,357	0,889 (100); 1,120 (100)
	46m	18,5 сек	и.п.	—	0,142
	47	3,43 дня	β^-	0,600	0,160 (73)
	48	1,83 дня	β^-	0,65	0,175 (6); 0,983 (100); 1,040 (100); 1,314 (100)
	49	57,5 мин	β^-	2,01	1,76 (0,03)
	50	1,72 мин	β^-	3,6	0,520 (100); 1,12 (100); 1,55 (100)
	50m	0,35 сек	и.п.	—	0,258
$_{22}$Ti	41	0,085 сек	p	2,3/8/; 3,06/17/; 3,69/16/; 4,12/4/; 4,64/50/; 5,30/5/	—
	43	0,56 сек	β^+	5,8	—
	44	48 лет	э.з.	—	0,068 (90); 0,078 (96)
	45	3,09 ч	β^+	1,04	0,718 (0,4); 1,408 (0,3)
	46	—	7,99	—	—
	47	—	7,32	—	—
	48	—	73,99	—	—
	49	—	5,46	—	—
	50	—	5,25	—	—
	51	5,79 мин	β^-	2,14	0,320 (95); 0,605 (1,5); 0,928 (5)
$_{23}$V	46	0,420 сек	β^+	6,63	0,511 (200, ан.)
	47	33 мин	β^+	1,89	1,80 (0,5)
	48	16,0 дней	β^+ (49)	0,696	0,511 (100, ан.); 0,945 (10);
	—		э.з. (51)	—	0,985 (100); 1,312 (97)
	49	330 дней	э.з.	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{23}V$	50	$6 \cdot 10^{15}$ лет	0,25	—	0,783 (30); 1,55 (70)
		—	э.з. (70)	—	—
			β^- (30)	—	—
	51	—	99,75	—	—
	52	3,75 мин	β^-	2,47	1,434 (100)
	53	2,0 мин	β^-	2,50	—
	54	55 сек	β^-	3,3	0,84 (100); 0,99 (100); 2,21 (100)
$_{24}Cr$	48	23 ч	э.з.	—	0,116 (98); 0,31 (99)
	49	41,9 мин	β^+	1,54	0,063 (14); 0,090 (28); 0,153 (13)
	50	—	4,31	—	—
	51	27,8 дня	э.з.	—	—
	52	—	83,76	—	—
	53	—	9,55	—	
	54	—	2,38	—	—
	55	3,59 мин	β^-	2,59	—
	56	5,9 мин	β^-	1,6	0,096; 0,083
$_{25}Mn$	50	0,285 сек	β^+	0,61	—
	51	45,9 мин	β^+	2,17	—
	52	5,60 дня	э.з. (66)	—	0,511 (67, ан.);
		—	β^+ (34)	0,575	0,744 (82); 0,935 (84); 1,434 (100)
	52m	21,1 мин	β^+	2,63	0,511 (197, ан.);
		—	и.п. (2)	—	1,434 (100)
	53	$1,9 \cdot 10^6$ лет	э.з.	—	—
	54	303 дня	э.з.	—	0,835 (100)
	55	—	100	—	—
	56	2,576 ч	β^-	2,85	0,847 (99); 1,811 (29); 2,110 (15)
	57	1,7 мин	β^-	2,55	—
	58	1,1 мин	β^-	—	—
$_{26}Fe$	52	8,2 ч	β^+ (56)	0,80	0,165 (100); 0,511 (112, ан.)
		—	э.з. (44)	—	—
	53	8,51 мин	β^+	3,0	0,38 (32); 0,511 (196, ан.)
	54	—	5,84	—	—
	55	2,00 года	э.з.	—	—
	56	—	91,68	—	—
	57	—	2,17	—	—
	58	—	0,31		—
	59	45,6 дня	β^-	1,57 (0,3); 0,475	0,192 (2,8); 1,095 (56); 1,292 (44)
	60	$3 \cdot 10^6$ лет	—		—
	61	6,0 мин	β^-	2,8	0,10/11/; 0,30/46/; 1,03/98/; 1,20/100/
$_{27}Co$	54	0,194 сек	β^+	—	—
	55	18,2 ч	β^+ (81)	1,50	0,260 (12); 0,511 (160, ан.); 0,930 (80); 1,41 (13)
		—	э.з. (19)	—	—
	56	77,3 дня	э.з. (80)	—	0,511 (40, ан.); 0,847 (100); 1,04 (15); 1,24 (66);
			β^+ (20)	1,49	1,76 (15); 2,02 (11); 2,03 (17); 3,26 (13)
		—			
	57	270 дней	э.з.	—	0,122 (87); 0,136 (11)
	58	71,3 дня	э.з. (85)	—	0,511 (30, ан.); 0,810 (99)
		—	β^+ (15)	0,474	0,865 (1,4)
	58m	9,2 ч	и.п.	—	—
	59	—	100	—	—
	60	5,253 года	β^-	1,48 (0,19); 0,314 (99)	1,173 (100); 1,332 (100)
	60m	10,47 мин	и.п. (>99)	—	0,059 (2,1); 1,33 (0,2)
		—	β^- (0,2)	1,56	—
	61	99,0 мин	β^-	1,22	0,067 (89)
	62	13,9 мин	β^-	9,88	1,17** (191); 1,47 (20); 1,74 (19); 2,03 (7)
	63	52 сек	β^-	3,6	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				грубо частицы	γ-излучение
$_{28}$Ni	56	6,10 дня	э.з.	—	0,163 (90); 0,276 (31); 0,472 (35); 0,748 (48); 0,812 (85); 1,56 (14)
	57	38,6 ч	э.з. (54)	—	0,127 (14); 0,511 (92, ан.); 1,37 (86); 1,89 (14)
		—	β⁺ (46)	0,85	
	58	—	67,76	—	—
	59	$8 \cdot 10^5$ лет	э.з.	—	—
	60	—	26,16	—	—
	61	—	1,25	—	—
	62	—	3,66	—	—
	63	92 года	β⁻	0,067	—
	64	—	1,16	—	—
	65	2,564 ч	β⁻	2,13	1,115 (16); 1,481 (25)
	66	54,8 ч	β⁻	0,20	—
	67	50 сек	β⁻	4,1	0,93* (51); 1,26 (15)
$_{29}$Cu	58	3,21 сек	β⁺	8,2	—
	59	81,5 сек	β⁺	3,7	0,511 (197, ан.); 0,872 (9); 1,305 (11)
	60	23,4 мин	β⁺ (93)	3,22 (6); 3,00 (18); 2,00	0,511 (186, ан.); 0,87 (16); 1,332 (89); 1,76 (62)
		—	э.з. (7)	—	
	61	3,32 ч	β⁺ (60)	1,22	0,067 (4); 0,284 (12);
		—	э.з. (40)	—	0,38 (3); 0,511 (120, ан.); 1,19 (5)
	62	9,76 мин	β⁺	2,91	0,511 (195, ан.); 0,86 (0,3)
	63	—	69,1	—	—
	64	12,80 ч	э.з. (43)	—	0,511 (38, ан.); 1,34 (0,5)
		—	β⁻ (38)	0,573	
		—	β⁺ (19)	0,656	
	65	—	30,9	—	—
	66	5,10 мин	β⁺	2,63	1,039 (9)
	67	56,5 ч	β⁻	0,57	0,092* (23); 0,184 (49)
	68	30 сек	β⁻	3,5	0,60 (17); 1,078 (96)
$_{30}$Zn	60	2,1 мин	—	—	—
	61	1,48 мин	β⁻	4,4	0,48 (11); 0,511 (198, ан.); 0,96 (3); 1,64 (6)
		—			
	62	9,13 ч	э.з. (82)	—	0,042 (20); 0,51** (47); 0,59 (22)
		—	β⁺ (18)	0,66	
	63	38,4 мин	β⁺ (93)	2,34	0,511 (186, ан.); 0,669 (8); 0,962 (6)
		—	э.з. (11)	—	
	64	—	48,89	—	—
	65	245 дней	э.з. (98,3)	—	0,511 (3,4, ан.); 1,115 (49)
			β⁺ (1,7)	0,327	
	66	—	27,81	—	—
	67	—	4,11	—	—
	68	—	18,55	—	—
	69	57 мин	β⁻	0,90	—
	69m	13,8 ч	и.п.	—	0,439 (95)
	70	—	0,62	—	—
	71	2,4 мин	β⁻	2,01	0,39 (1,3); 0,510 (10); 0,92 (3); 1,12 (1,3)
	71m	3,92 ч	β⁻	1,46	0,13 (9); 0,385 (94); 0,495 (75); 0,609 (55); 0,76 (5); 0,99 (8)
	72	46,5 ч	β⁻	0,30	0,615 (8); 0,145 (93); 0,192 (10)
$_{31}$Ga	63	33 сек	—	—	—
	64	2,6 мин	β⁺	6,05 (33); 2,8	0,511 (196, ан.); 0,80 (15); 0,992 (43); 1,36 (14); 2,19 (11); 3,32 (18)
	65	15,2 мин	β⁺ (≥ 50)	2,24 (12); 2,11	0,061 (12); 0,115 (56);
		—	э.з. (≤ 50)	—	0,152 (10); 0,511 (180, ан.); 0,75 (10)
	66	9,45 ч	β⁺ (57)	4,153	0,511 (114, ан.); 1,039 (37);
		—	э.з. (43)	—	2,163 (5); 2,748 (25); 4,30 (5)
	67	77,9 ч	э.з.	—	0,093 (40); 0,184 (24); 0,296 (22); 0,388 (7)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или процентное отношение стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				средняя частица	γ-излучение
$_{31}$Ga	68	68,3 мин	β^+ (89)	1,90	0,511(176, ан.); 1,076(3,5)
		—	э.з. (12)	—	
	69	—	60,2	—	—
	70	21,1 мин	β^-	1,66	0,173(0,16); 1,040(0,5)
	71	—	39,8	—	—
	72	14,12 ч	β^-	3,15	0,630(27); 0,835(96); 2,201(26); 2,50*(20)
	73	4,9 ч	β^-	1,19	0,054(9); 0,295(94); 0,74(6)
	74	8,0 мин	β^-	2,5	0,60*(100); 0,87*(9); 2,35(45)
	75	2,0 мин	β^-	3,3	0,58(3)
	76	32 сек	β^-	6	—
$_{32}$Ge	65	1,5 мин	β^+	3,7	0,511(197, ан.); 0,67(3); 1,72(2)
	66	2,4 ч	β^+ (62)	1,3	0,046(37); 0,114(22); 0,185(23); 0,27(19); 0,34(19); 0,38(48); 0,47(19); 0,511(124, ан.)
		—	э.з. (38)		
	67	18,7 мин	β^+	3,1	0,170*(106); 0,511(170, ан.)
	68	275 дней	э.з.	—	—
	69	30 ч	э.з. (67)	—	0,511(68, ан.); 0,573(13); 0,872(10); 1,107(28)
		—	β^+ (33)	1,32	
	70	—	20,55	—	—
	71	11,4 дня	э.з.	—	—
	72	—	27,37	—	—
	73	—	7,67	—	—
	73m	0,53 сек	и.п.	—	0,054(9)
	74	—	36,74	—	—
	75	82 мин	β^-	1,19	0,199(1,4); 0,265(11)
	75m	48 сек	и.п.	—	0,139(34)
	76	—	7,67	—	—
	77	11,3 ч	β^-	2,2	0,21*(61); 0,263(45); 0,308(15); 0,417(25); 0,563(18); 0,73**(14)
	77m	54 сек	β^- (76)	2,9	0,159(12); 0,215(21)
		—	и.п. (24)	—	
	78	1,47 ч	β^-	0,71	0,277(94)
$_{33}$As	69	15 мин	β^+	2,9	0,25; 0,511(ан.)
	70	52 мин	β^+	2,85(6); 2,14	0,511(183, ан.); 0,60(23); 0,67(26); 0,75(23); 1,040(78); 1,12(23); 1,71(22)
	71	62 ч	э.з. (~ 70)	—	0,175(90); 0,511(60, ан.)
		—	β^+ (~ 30)	0,81	
	72	26 ч	β^+	3,34(17); 2,50	0,511(150, ан.); 0,630(8); 0,835(79)
		—	э.з.	—	
	73	80,3 дня	э.з.	—	0,054(9)
	74	17,9 мин	β^+ (29)	1,54(3); 0,95(26)	0,511(59, ан.); 0,596(61); 0,635(14)
		—	э.з. (39)	—	
			β^- (32)	1,36	
	74m	8,0 сек	и.п.	—	0,263
	75	—	100	—	—
	76	26,4 ч	β^-	2,97	0,559(43); 0,657(6); 1,22*(5)
	77	38,7 ч	β^-	0,68	0,239(2,5); 0,522(0,8)
	78	91 мин	β^-	4,1	0,614(32); 0,70(15); 0,83(8); 1,31(11)
	79	9,0 мин	β^-	2,15	0,36(9); 0,43(9); 0,64(4)
	80	15,3 сек	β^-	6,0	0,660(42); 1,22(4); 1,62(4); 1,77(1,7)
	81	33 сек	β^-	3,6	—
$_{34}$Se	70	~ 44 мин	β^+	—	—
	71	4,5 мин	β^+	3,4	0,16; 0,511(ан.)
	72	8,4 дня	э.з.	—	0,046(59)
	73	7,1 ч	β^+ (65)	1,30	0,066(65); 0,359(99); 0,511(130, ан.)
		—	э.з. (35)	—	

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или генерация слабых нейтронов, %	Энергия, кэв (относительная интенсивность, %)	
				β-лучи частицы	γ-лучи
$_{34}Se$	74	—	0,87	—	—
	75	120,4 дня	э.з.	—	0,121(17); 0,136(57); 0,265(60); 0,280(25); 0,401(12)
	76	—	9,02	—	—
	77	—	7,58	—	—
	77m	17,5 сек	и.п.	—	0,161(50)
	78	—	23,52	—	—
	79	$\sim 6,5 \cdot 10^5$ лет	β^-	0,16	—
	79m	3,91 мин	и.п.	—	0,096(9)
	80	—	49,82	—	—
	81	18,6 мин	β^-	1,58	0,28**(0,9); 0,50**(0,3); 0,83(0,2)
	81m	56,8 мин	и.п.	—	0,103(8)
	82	—	9,19	—	—
	83	25 мин	β^-	1,6	0,22(44); 0,36(69); 1,68(16); 2,29(9)
	83m	70 сек	β^-	3,6	0,35/16/; 0,65/20/; 1,01**/100/; 2,02/40/
	84	3,3 мин	—	—	—
	85	30 сек	—	—	—
$_{35}Br$	74	36 мин	β^+	4,7	0,511 (ан.); 0,64
	75	1,7 ч	β^+ (~90)	1,70	0,266; 0,511 (ан.); 0,62
		—	э.з. (~10)	—	
	76	16,1 ч	β^+ (~62)	3,6	0,511(133, ан.); 0,559(53); 0,657(19); 1,21(13); 1,85(11)
		—	э.з. (~38)	—	
	77	57 ч	э.з. (99)	—	0,24**(30); 0,52(24); 0,58(7)
		—	β^+ (1)	0,34	
	77m	4,2 мин	и.п.	—	0,108
	78	6,6 мин	β^+	2,55	0,511(184, ан.); 0,614(14)
	79	—	50,52	—	—
	79m	4,8 сек	и.п.	—	0,21
	80	17,6 мин	β^+ (92)	2,00	0,511(5, ан.); 0,618(7); 0,666(1)
		—	β^+ (2,6)	0,67	
			э.з. (5,7)	—	
	80m	4,38 ч	и.п.	—	0,037(38)
	81	—	49,48	—	—
	82	35,34 ч	β^-	0,444	0,554(68); 0,619(41); 0,777(83); 1,044(29)
	82m	6,56 мин	и.п. (97,6)	—	0,046(0,3); 0,777(0,15)
		—	β^- (2,4)	—	
	83	2,41 ч	β^-	0,93	0,530(1,4)
	84	31,8 мин	β^-	4,68	0,88(51), 1,00(18); 3,93(13)
	85	3,0 мин	β^-	2,6	—
	86	54 сек	β^-	7,1	1,36/39/; 1,56/100/; 2,76/30/
	87	56,6 сек	β^-	2,6	1,44/100/; 1,85/16/; 2,48/18/; 2,98/25/; 4,19/21/
	88	15,5 сек	β^-	—	0,7
	89	4,5 сек	β^-	—	—
$_{36}Kr$	74	20 мин	β^+	3,1	0,511 (ан.)
	76	14,8 ч	э.з.	—	—
	77	1,19 ч	э.з. (~20)	—	—
		—	β^+ (~80)	1,86	
	78	—	0,354	—	—
	79	34,92 ч	э.з (92)	—	0,398(10); 0,511(15, ан.); 0,609(10)
			β^+ (8)	0,60	
	79m	55 сек	и.п.	—	0,127
	80	—	2,27	—	—
	81	$2,1 \cdot 10^5$ лет	э.з.	—	—
	81m	13 сек	и.п.	—	0,190(65)
	82	—	11,56	—	—
	83	—	11,55	—	—
	83m	1,86 ч	и.п.	—	0,009(9)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада, или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, МэВ и (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{36}$Kr	84	—	56,90		—
	85	10,76 ч	β⁻	0,67	0,514(0,4)
	85m	4,4 ч	β⁻ (77)	0,82	0,150(74); 0,305(13)
		—	и.п. (23)	—	
	86	-	17,37		—
	87	76 мин	β⁻	3,8	0,403(84); 0,85(16); 2,57(35)
	88	2,80 ч	β⁻	2,6	0,191(35); 0,85(23); 1,55(14); 2,40(35)
	89	3,18 мин	β⁻	4,0	0,27(85); 0,51(49); 0,60(100); 0,88(65); 1,12(45); 1,51(85); 0,120(65); 0,636(45); 1,11(48)
	90	33 сек	β⁻	2,80	—
	91	9,8 сек	β⁻	3,6	—
	92	3,0 сек	β⁻	—	—
	93	2,0 сек	β⁻	—	—
	94	1,4 сек	β⁻	—	—
$_{37}$Rb	79	24 мин	β⁺	—	0,15(73); 0,19(29); 0,518(180, ан.)
	80	34 сек	β⁺	4,1	0,511(195, ан.); 0,618(39)
	81	4,7 ч	э.з. (87)	—	
		—	β⁺ (13)	1,03	
	81m	31 мин	β⁺	1,4	—
		—	и.п.	—	
	82	1,25 мин	β⁺ (96)	3,15	0,511(192, ан.);
		—	э.з. (4)	—	0,777(9)
	82m	6,2 ч	э.з. (94)		0,554(66); 0,619(41);
		—	β⁺ (6)	0,78	0,777(83)
	83	83 дня	э.з.	—	0,53**(90); 0,79(0,9)
	84	33,0 дня	э.з. (76)	—	0,511(42, ан.); 0,88(74)
		—	β⁺ (21)	1,66	
		—	β⁻ (3)	0,91	
	84m	20 мин	и.п.	—	0,216(37); 0,260(65); 0,464(32)
	85	—	72,15		—
	86	18,66 дня	β	1,78	1,078(8,8)
	86m	1,02 мин	и.п.	—	0,56
	87	$4,8 \cdot 10^{10}$ лет	27,85	—	—
		—	β⁻	0,274	—
	88	17,8 мин	β⁻	6,3	0,898(13); 1,863(21)
	89	15,4 мин	β⁻	3,92(7); 2,9(5); 1,6	0,66(17); 1,06(75); 1,26(54)
	90	2,91 мин	β⁻	6,6	0,83*(61); 3,34**(15); 4,13(11); 4,34*(18)
	91	1,9 мин	β⁻	4,6	—
	92	5,3 сек	β⁻	—	—
	93	5,6 сек	β⁻	—	—
	94	2,9 сек	β⁻	—	—
$_{38}$Sr	80	1,7 ч	э.з.	—	0,59
	81	25 мин	э.з.	—	—
		—	β⁺	—	—
	82	25,0 дней	э.з.	—	—
	83	32,4 ч	э.з. (84)	—	0,010(24); 0,38(35);
		—	β⁺ (16)	1,15	0,511(32, ан.); 0,76(40)
	84	—	0,56	—	—
	85	64,8 дня	э.з.	—	0,514(100)
	85m	70 мин	и.п. (86)	—	0,150(14); 0,231(85)
		—	э.з. (14)	—	—
	86	—	9,86	—	—
	87	—	7,02	—	—
	87m	2,83 ч	и.п. (99)	—	0,388(80)
			э.з. (1)	—	—
	88	—	82,56	—	—
	89	52,7 дня	β⁻	1,463	0,91(0,009)
	90	27,7 лет	β⁻	0,546	—

Элемент	A	Период полураспада	Вид распада или содержание стабильного изотопа, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{38}Sr$	91	9,67 ч	β^-	2,67	0,645(15); 0,748(27); 1,025(30)
	92	2,71 ч	β^-	1,5(10); 0,55	0,44(3); 1,37(90)
	93	8,3 мин	β^-	2,9	0,60; 0,8; 1,2
	94	1,35 мин	β^-	2,1	1,42(100)
	95	0,5 мин	β^-	—	—
$_{39}Y$	82	12,3 мин	—	—	—
	83	7,4 мин	—	—	—
	84	43 мин	β^+	3,5	0,795(100); 0,962(100); 1,044(50)
	85	5,0 ч	β^+ (70)	2,24	0,231(13);
		—	э.з. (30)	—	0,511(140, ан.)
	85m	2,69 ч	β^+ (55)	1,54	0,51**(200);
		—	э.з. (45)	—	0,92(9)
	86	14,6 ч	э.з. (74)	—	0,51*(35); 0,63*(37);
		—	β^+ (26)	3,16; 2,34	1,077(82); 1,16*(35); 1,925(24)
	86m	48 мин	и.п.	—	0,208(94)
	87	80 ч	э.з. (> 99)	—	0,483
			β^+ (~0,3)	—	—
	87m	14 ч	и.п.	—	0,381(74)
		—	β^+ (~5)	—	
	88	108,1 дня	э.з. (> 99)	—	0,898(91); 1,836(100)
		—	β^+ (0,2)	0,76	
	89	—	100		—
	89m	16,1 сек	и.п.	—	0,91(99)
	90	64,0 ч	β^-	2,27	—
	90m	3,1 ч	и.п.(99,6)	—	0,202(97); 0,482(91)
		—	β^- (0,4)	—	
	91	58,8 дня	β^-	1,545	1,21(0,3)
	91m	50,3 мин	и.п.	—	0,551(95)
	92	3,53 ч	β^-	3,63	0,934(14); 1,40(4,7)
	93	10,3 ч	β^-	2,89	0,267(6); 0,94(2,3); 1,00(1,8)
	94	20,3 мин	β^-	5,0	0,76(6); 0,92(43); 1,13(5)
	95	10,9 мин	β^-	—	—
	96	2,3 мин	β^-	3,5	0,7; 1,0; 1,5**
$_{40}Zr$	84	16 мин	-	-	—
	85	1,4 ч	—	—	—
	86	16,5 ч	э.з	—	0,088(20); 0,243(95); 0,512(5)
	87	1,6 ч	β^+	2,10	0,511 (ан.); 1,2; 2,2
	88	85 дней	э.з.	—	0,394(97)
	89	78,4 ч	э.з. (78)	—	0,511(44, ан.);
		—	β^+ (22)	0,90	0,91(99)
	89m	4,18 мин	и.п. (94)	—	0,588(87); 1,51(6)
		—	э.з. (4,7)	—	—
		—	β^+ (1,4)	2,40(0,2); 0,69(1,2)	—
	90		51,46	—	—
	90m	0,80 сек	и.п.	—	2,18(14); 2,32(86)
	91	—	11,23	—	—
	92	—	17,11	—	—
	93	$1,5 \cdot 10^6$ лет	β^-	0,060	—
	94		17,40	—	—
	95	65,5 дня	β^-	0,89(2); 0,390	0,724(49); 0,756(49)
	96		2,80	—	—
	97	17,0 ч	β^-	1,91	0,747(92)
	98	1 мин	—	—	—
$_{41}Nb$	88	14 мин	β^+	3,2	
	89	1,9 ч	β^+	2,9	0,511(ан.); 1,626; 3,577; 3,838
	89m	42 мин	β^+	3,1	0,511(ан.); 0,588
	90	14,6 ч	β^+	1,50	0,143(75);
		—	э.з.	—	1,14(97); 2,32(82)
	90m	24 сек	и.п.	—	0,123(71)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{41}$Nb	91m	64 дня	и.п. (97) э.з. (3)	— —	0,104(0,6); 1,21(3) —
	92m	10,16 дня	э.з. (>99) β+ (0,06)	— —	0,934(99) —
	93		100	—	—
	93m	13,6 года	и.п.	—	—
	94	$2\cdot10^4$ лет	β−	0,49	0,702(100); 0,871(100)
	94m	6,29 мин	и.п. (>99) β−(0,2)	— —	0,871(0,2) —
	95	35,0 дней	β−	0,160	0,765(100)
	95m	90 ч	и.п.	—	—
	96	23,35 ч	β−	0,7	0,459(28); 0,569(59); 0,778(97); 1,092(49)
	97	72 мин	β−	1,27	0,665(98)
	97m	1,0 мин	и.п.	—	0,747(96)
	98	51 мин	β−	3,1	0,720(75); 0,767(100); 1,16(30)
	99	2,4 мин	β−	3,2	0,140/1/; 0,290/1/
	100	3,0 мин	β−	—	0,36/55/; 0,45/80/; 0,53**/100/
$_{42}$Mo	88	27 мин	β+	2,5	0,511(ан.); 2,09
	89	7 мин	β+	4,9	0,512(ан.)
	90	5,67 ч	э.з. (75) β+ (25)	— 1,2	0,122(71); 0,257(65); 0,511(50, ан.)
	91	15,49 мин	β+	3,44	0,511(ан.)
	91m	64 сек	и.п. (~57) β+ (~43)	— 3,99/15/; 2,78/100/	0,658(54); 1,21(22); 1,53(35)
	92	—	15,86	—	—
	93	>100 лет	э.з.	—	—
	93m	6,95 ч	и.п.	—	0,264(58); 0,685(100); 1,479(100)
	94	—	9,12	—	—
	95	—	15,70	—	
	96	—	16,60	—	—
	97	—	9,45	—	—
	98	—	23,75		—
	99	66,7 ч	β−	1,23	0,181(7); 0,740(12); 0,780(4)
	100	—	9,62	—	—
	101	14,6 мин	β−	2,23	0,191(26); 0,55(21); 1,02(25)
	102	11,5 мин	β−	1,2	—
	103	62 сек	β−	—	—
	104	1,1 мин	β−	4,8	0,070
	105	40 сек	β−	—	—
$_{43}$Tc	92	4,4 мин	β+ (~62) э.з. (~8)	4,1 —	0,14(67); 0,33(90); 0,511(164, ан.); 0,79(95); 1,54(100)
	93	2,75 ч	э.з. (87) β+ (13)	— 0,80	0,511(26, ан.); 1,35(65); 1,49(33)
	93m	43 мин	и.п. (82) э.з. (18)	— —	0,390(63); 2,66(18) —
	94	293 мин	э.з. (89) β+ (11)	— 0,816	0,511(22, ан.); 0,702(100); 0,845(100); 0,871(100)
	94m	53 мин	β+ (66) э.з. (34)	2,47 —	0,511(132, ан.); 0,871(91); 1,53(10); 1,87(9)
	95	20,0 ч	э.з.	—	0,766(82); 0,84(11)
	95m	61 день	э.з. (96) β+ (0,42) и.п. (4)	— 0,68 —	0,204(70); 0,584(36); 0,838(27) —
	96	4,35 дня	э.з.	—	0,778(100); 0,81(84); 0,851(100); 1,12(16)
	96m	52 мин	и.п.	—	—
	97	$2,6\cdot10^6$ лет	э.з.	—	—
	97m	91 день	и.п.	—	—
	98	$1,5\cdot10^6$ лет	β−	0,30	0,66(100); 0,76(100)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада и содержание отдельных каналов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				группа частиц	γ-излучение
$_{43}$Tc	90	$2{,}12 \cdot 10^5$ лет	β⁻	0,292	—
	99m	6,05 ч	и.п.	—	0,140(90)
	100	15,8 сек	β⁻	3,38	0,540; 0,60
	101	14,0 мин	β⁻	1,32	0,307(91); 0,545(6)
	102	4,5 мин	β⁻	2	0,47
	103	50 сек	β⁻	2,2	0,135(17); 0,21(10)
	104	18 мин	β⁻	4,6	—
	105	7,7 мин	β⁻	3,4	0,110
	106	37 сек	β⁻	—	—
	107	20 сек	β⁻	-	—
$_{44}$Ru	94	57 мин	э.п.	—	—
	95	1,65 ч	э.з. (85)		0,340(70); 0,511(30, ан.);
		—	β⁺ (15)	1,33	0,625(13); 1,09(21)
	96	—	5,46	—	—
	97	2,88 дня	э.п.	—	0,215(31); 0,324(8)
	98	—	1,868	—	—
	99	—	12,69	—	—
	100	—	12,53	—	—
	101	—	17,02	—	—
	102	—	31,6	—	—
	103	39,5 дня	β⁻	0,70(3); 0,21	0,497(88); 0,610(6)
	104		18,87	—	—
	105	4,44 ч	β⁻	1,87(11); 1,15	0,317*(11); 0,475*(25); 0,67*(16); 0,724(48)
	106	368 дней	β⁻	0,039	—
	107	4,2 мин	β⁻	3,2	0,195(14); 0,56 (7)
	108	4,5 мин	β⁻	1,3	0,160(28)
$_{45}$Rh	97	32 мин	β⁺	2,47	—
	98	8,7 мин	β⁺	2,6	0,65(100)
	99	4,7 ч	э.з. (90)	—	0,34(70);
		—	β⁺ (10)	0,94	0,511(20, ан.); 0,62(20)
	100	20,8 ч	э.з. (93)	—	0,511(13, ан.); 0,540(88);
		—	β⁺ (7)	2,02	0,620(25); 2,37(39)
	104	3,9 года	э.з.	—	0,127(89); 0,198(75); 0,325(11)
	101m	4,4 дня	э.з. (90)	-	0,307(83); 0,545(6)
		—	и.п. (10)	—	—
	102	206 дней	э.з.		0,475(57); 0,511(25, ан.)
		—	β⁺	1,29	
		—	β⁻	1,15	
	103		100	—	—
	103m	57,5 мин	и.п.	—	0,040(0,4)
	104	43 сек	β⁺	2,44	0,56(2); 1,24(0,13)
	104m	4,41 мин	и.п. (≥ 99)	—	0,051(47); 0,078(2,5);
		—	β⁻ (0,18)	—	0,097(2,6)
	105	35,36 ч	β⁻	0,568	0,309(5); 0,319(19)
	105m	45 сек	и.п.	—	0,129
	106	30 сек	β⁻	3,54	0,512(21); 0,622*(11)
	107	21,7 мин	β⁻	1,20	0,305(73); 0,350(11)
	108	16,8 сек	β⁻	4,5	0,434(43); 0,51*(10); 0,62(22)
	110	5 сек	β⁻	5,5	0,374
$_{46}$Pd	99	22 мин	β⁺	2,0	—
	100	4,0 дня	э.з.	—	0,074(34); 0,084(40); 0,126(16)
	101	8,4 ч	э.з. (97,5)	—	0,295(30); 0,590(24)
		—	β⁺ (2,5)	0,78	
	102	—	0,96		—
	103	17,0 дней	э.з.	—	0,297(0,011); 0,362(0,06); 0,498(0,011)
	104	—	10,97	-	—
	105	—	22,2	—	-
	106	—	27,3	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{46}$Pd	107	~7·10⁶ лет	β⁻	0,04	—
	107m	21,3 сек	и.п.	·	0,21
	108	—	26,7	—	—
	109	13,47 ч	β⁻	1,026	0,068(5); 0,60(0,03)
	109m	4,69 мин	и.п.	—	0,188(56)
	110	—	11,8	·	—
	111	22 мин	β⁻	2,2	0,35/5/; 0,60*/13/; 1,4*/8/
	111m	5,5 ч	и.п. (75)	—	0,17
		—	β⁻ (25)	2,0	—
	112	21,0 ч	β⁻	0,26	0,019(20)
	113	1,4 мин	β⁻	—	—
	115	45 сек	β	—	
$_{47}$Ag	103	60 мин	β⁺	1,6	0,12*/26/; 0,15/27/;
		—	э.з. (~70)	—	0,27/34/; 0,511/100, ан./.
	103m	5,7 сек	и.п.	—	0,138
	104	66 мин	β⁺	0,99	0,556(84); 0,764(48);
			э.з.	—	0,854(39)
	104m	29,8 мин	β⁺	2,70	0,511(120, ан.);
			э.з.	—	0,556(100)
		—	и.п.	·	—
	105	40 дней	э.з.	—	0,280(32); 0,344**(42)
	106	23,96 мин	β⁺	1,96	0,511(140, ан.)
	106m	8,5 дня	э.з.	—	0,512(66); 0,616(23); 0,717**(31);
					0,80**(41); 1,046(29)
	107	—	51,35	—	-
	107m	44,3 сек	и.п.	—	0,094(5)
	108	2,42 мин	β⁺ (97,5)	1,64	0,434(0,45); 0,511(0,55, ан.);
		—	э.з. (2,2)	—	0,632(1,7)
		—	β⁺ (0,28)	0,90	
	108m	≥5 лет	э.з. (90)	—	0,434(69); 0,614(90);
		—	и.п. (10)	·	0,722(90)
	109		48,65	—	—
	109m	39,2 сек	и.п.	—	0,088(5)
	110	24,4 сек	β⁺	2,87	0,658(4,5)
		—	э.з. (0,3)		
	110m	255 дней	β⁻ (98,7)	1,5(0,6); 0,53(31); 0,087	0,658(96); 0,764(23); 0,885(71);
					0,937(32); 1,384(21)
		—	и.п. (1,3)	—	
	111	7,5 дня	β⁻	1,05	0,247(1); 0,342(6)
	111m	74 сек	и.п.	·	0,065
	112	3,14 ч	β⁻	3,94	0,617(41); 1,40(5)
	113	5,3 ч	β⁻	2,0	0,12/10/; 0,30/100/; 0,67/17/
	114	4,5 сек	β⁻	4,6	0,57
	115	20,0 мин	β⁻	3,2	0,14**(12); 0,22**(49); 0,28(13);
					1,48(11); 2,12(13)
	116	2,5 мин	β⁻	5,0	0,58; 0,70
	117	1,1 мин	β⁻	—	-
$_{48}$Cd	103	10 мин	β⁺	—	0,22; 0,511(ан.); 0,63; 0,85
	104	57 мин	э.з.	—	0,694
	105	55 мин	э.з.	—	0,308; 0,320; 0,347;
		—	β⁺	1,69	0,455; 0,511(ан.)
	106	—	1,22	—	—
	107	6,49 ч	э.з. (≥99)	—	0,511(0,56, ан.);
		—	β⁺ (0,28)	0,302	0,706(0,04); 0,825(0,21)
	108		0,88	—	
	109	453 дня	э.з.	·	0,088
	110	·	12,39	—	—
	111	—	12,75	—	—
	111m	48,6 мин	и.п.	—	0,150(30); 0,247(94)
	112	—	24,07	—	
	113	—	12,26	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучение
$_{48}$Cd	113m	13.6 года	β⁻	0,58	0,265 (— 0,1)
	114	—	28,85	—	—
	115	53.5 ч	β⁻	1,11	0,262(2); 0,49(10); 0,53(46)
	115m	43 дня	β⁻	1,62	0,485(0,3); 0,935(1,9); 1,29(0,9)
	116	—	7,58	—	—
	117	2,4 ч	β⁻	2,23	0,273(31); 0,345(48); 0,434(13); 1,308(19); 1,577(17)
	117m	3,4 ч	β⁻	0,67	0,273(15); 0,880(10); 1,24** (11); 1,433(10); 1,998(15)
	118	40 мин	β⁻	—	—
	119	2,7 мин	β⁻	3,5	—
$_{49}$In	106	5,1 мин	β⁺	4,9	0,511(ан.); 0,63; 1,65; 1,85
	107	35 мин	β⁺	2,2	0,22(46); 0,511(ан.)
			э.з.	—	
	108	57 мин	э.з.	—	0,150; 0,175; 0,243;
		—	β⁺	1,29	0,511(ан.); 0,633; 0,872
	109	4,3 ч	э.з. (94)	—	0,206; 0,28**; 0,35**;
		—	β⁺ (6)	2,79	0,65**; 0,91**
	109m₁	1,3 мин	и.п.	—	0,639
	109m₂	0,20 сек	и.п.	—	0,40(20); 0,66(100); 1,04(20); 1,43(77)
	110	66 мин	β⁺ (71)	2,26	0,511(142, ан.);
		—	э.з. (29)	—	0,656(95)
	111	2,81 дня	э.з.	—	0,173(89); 0,247(94)
	112	14,4 мин	β⁻ (44)	0,66	0,511(44, ан.);
		—	β⁺ (22)	1,50	0,617(6)
		—	э.з. (34)	—	
	112m	20,7 мин	и.п.	—	0,155(9)
	113	—	4,23	—	—
	113m	99,8 мин	и.п.	—	0,393(64)
	114	72 сек	β⁻ (98)	1,988	1,298(1,17)
		—	э.з. (1,9)	—	
		—	β⁺ (0,034)	0,42	
	114m	50,0 дней	и.п. (96,5)	—	0,192(17); 0,558(3,5);
		—	э.з. (3,5)	—	0,724(3,5)
	115	6·10¹⁴ лет	95,77	—	—
		—	β⁻	0,48	
	115m	4,50 ч	и.п. (95)	—	0,336(50)
		—	β⁻ (5)	0,83	
	116	13,4 сек	β⁻	3,3	0,434(0,12); 0,95(0,1); 1,293(1,2)
	116m₁	54,0 мин	β⁻	1,00	0,417(36); 1,09(0,3); 1,293(50); 2,111(20)
	116m₂	2,16 сек	и.п.	—	0,164
	117	40 мин	β⁻	0,74	0,159(87); 0,560(100)
	117m	1,93 ч	и.п.(47)	—	0,158(14); 0,314(31)
		—	β⁻ (53)	1,76	
	118	5,7 сек	β⁻	4,2	1,230(15)
	119	2,1 мин	β⁻	1,6	0,82(95)
	119m	17,5 мин	β⁻ (95)	2,7	0,024; 0,20; 0,91*
		—	и.п. (5)	—	
	120	3,2 сек	β⁻	5,6	1,171(15)
	121	3,1 мин	β⁻	3,7	—
	122	8 сек	β⁻	5	0,55; 1,14
	123	36 сек	β⁻	4,6	—
	124	~ 3,6 сек	β⁻	5	0,99(3); 1,13(10); 3,21(3)
$_{50}$Sn	108	9,2 мин	э.з.	—	0,28; 0,42
	109	18,1 мин	э.з	—	0,335; 0,521; 0,89;
		—	β⁺	1,6	1,12
	110	4,0 ч	э.з.	—	0,263(95)
	111	35,0 мин	э.з. (73)	—	0,511(54, ан.);
		—	β⁺ (27)	1,51	0,75(1,1); 1,14(1,8); 1,89(1,0)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или обобщенные изотопные данные, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ излучения
$_{49}$In	112	—	0,95	—	—
	113	115 дней	э.з.	—	0,255 (1,6)
	113m	20 мин	и.п. (91)	—	0,679 (0,6)
		—	э.з. (9)	—	—
	114	—	0,65	—	—
	115	—	0,34	—	—
	116	—	14,21	—	—
	117	—	7,57	—	—
	117m	14,0 дней	и.п.	—	0,158 (87)
	118		24,01	—	—
	119	—	8,56	—	—
	119m	~ 250 дней	и.п.	—	0,024 (16)
	120	—	32,97		
	121	27,5 с	β^-	0,383	—
	121m	76 сек	β^-	0,42	0,037
	122	—	4,71	—	—
	123	125 дней	β^-	1,42	
	123m	39,5 мин	β^-	1,26	0,160
	124	—	5,98	—	—
	125	9,4 мин	β^-	2,34	0,811 (1,5); 0,904 (1,4); 1,068 (4); 1,97 (0,6)
	125m	9,5 мин	β^-	2,04	0,325 (97)
	126	— 10^4 лет	β^-	—	0,060; 0,067; 0,082
	127	4,1 мин	β^-	2,7	0,49 (100)
	128	59 мин	β^-	0,80	0,044 (7); 0,072 (19); 0,50 (61); 0,57 (22)
	129	9 мин	β^-	—	1,15
	130	2,6 мин	β^-	—	—
	131	3,4 мин	β^-	—	—
	132	2,2 мин	β^-	—	—
$_{51}$Sb	112	0,9 мин	β^+	—	0,511 (ан.); 1,27
		—	э.з.	—	
	113	6,4 мин	э.з.	—	0,32; 0,511 (ан.);
		—	β^+	2,42	1,06; 1,2**
	114	3,3 мин	β^+	2,7	0,9; 1,30
			э.з.	—	
	115	31 мин	э.з. (67)	—	0,499 (100); 0,511 (67, ан.);
			β^+ (33)	1,51	0,98 (5); 1,24 (5)
	116	16 мин	э.з. (72)	—	0,511 (56, ан.);
		—	β^+ (28)	2,3	0,93 (26); 1,293 (85); 2,23 (14)
	116m	60 мин	э.з. (81)	—	0,006 (30); 0,140 (30);
		—	β^+ (19)	1,16	0,406 (36); 0,511 (38, ан.); 0,564 (68); 0,90 (35); 1,06 (27); 1,293 (100)
	117	2,8 ч	э.з. (97,4)	—	0,158 (87); 0,511 (5, ан.)
			β^+ (2,6)	0,57	
	118	3,5 мин	э.з.	—	0,511 (150, ан.);
			β^+	2,67	0,83 (0,4); 1,230* (3)
	118m	5,1 ч	э.з. (>99)	—	0,041 (29); 0,254 (93);
			β^+ (0,16)	—	1,049 (100); 1,230 (100)
	119	38,0 ч	э.з.	—	0,024 (16)
	120	15,89 мин	β^+	1,70	0,511 (87, ан.);
		—	э.з.		1,171 (1,3)
	121	—	57,25	—	
	122	2,60 дня	β^- (97)	1,97	0,564 (66);
		—	э.з. (3,0)	—	0,686 (3,4)
			β^+ (0,006)	0,56	
	122m	4,2 мин	и.п.	—	0,061 (50); 0,075 (17)
	123		42,75	—	
	124	60,4 дня	β^-	2,31	0,603 (97); 0,72* (14); 1,692 (50)
	$124m_1$	93 сек	и.п. (80)	—	0,505 (20); 0,603 (20);
		—	β^- (20)	1,19	0,644 (20)
	$124m_2$	21 мин	и.п.	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				время жизни	γ-излучение
$_{51}Sb$	125	2,71 года	β^-	0,61	0,427 (31); 0,463 (10); 0,599* (94); 0,634 (11)
	126	12,5 дня	β^-	1,9	0,41; 0,69**
	127	93 ч	β^-	1,6	0,46; 0,68; 0,7
	128	10,4 мин	β^-	2,6	0,320 (83); 0,75* (200)
	129	4,3 ч	β^-	1,87	0,54; 0,81; 0,91
	130	39 мин	β^-	—	0,19; 0,33; 0,89**; 0,94
	131	26 мин	β^-	—	0,64 (37); 0,95 (48)
	132	2,1 мин	β^-	—	—
	133	1,2 мин	β^-	—	—
	135	2 сек	β^-	—	—
$_{52}Te$	107	2,2 сек	α	3,29	—
	108	5,3 сек	α	3,06	—
	—	—	β	2,6; 3,4; 3,7	—
	115	6,0 мин	β^+ (~ 80)	2,8	0,511 (160, ан.);
	—	—	э.з. (~ 20)	—	0,72 (34); 1,28 (32); 1,38 (32)
	116	2,50 ч	э.з.	—	0,094
	117	61 мин	э.з. (70)	—	0,511 (60, ан.);
			β^+ (30)	1,81	0,72 (65); 0,93 (6); 1,78 (9)
	118	6,0 дней	э.з.	—	—
	119	15,9 ч	э.з.	—	0,645 (85); 0,70 (11);
	—	—	β^+ (5)	0,627	1,76 (3,6)
	119m	4,68 дня	э.з.	—	0,153 (62); 0,270 (25); 1,221 (67); 2,09 (4)
	120	—	0,089	—	—
	121	17 дней	э.з.	—	0,508 (18); 0,573 (60)
	121m	154 дня	и.п. (90)	—	0,212 (82); 1,10 (3)
	—	—	э.з. (10)	—	
	122	—	2,46	—	—
	123	—	0,87	—	—
	123m	117 дней	и.п.	—	0,159 (84)
	124	—	4,61	—	—
	125	—	6,99	—	
	125m	58 дней	и.п.		0,035 (7); 0,110 (0,3)
	126	—	18,71	—	—
	127	9,4 ч	β^-	0,70	0,058 (0,01); 0,21* (0,03); 0,360 (0,05); 0,417 (0,3)
	127m	105 дней	и.п. (99,2)	—	0,089 (0,19); 0,095 (0,09);
	—	—	β^- (0,8)	—	0,67 (0,004)
	128	—	31,79	—	—
	129	68,7 мин	β^-	1,45	0,027 (19); 0,463 (15)
	129m	34,1 дня	и.п. (64)	—	0,19 (6)
	—	—	β^- (36)	1,60	
	130	—	34,49	—	—
	131	24,8 мин	β^-	2,14	0,150 (68); 0,253 (16)
	131m	30 ч	β^- (62)	2,46 (5); 0,9	0,78** (60); 0,85* (31);
	—	—	и.п. (18)	—	1,127 (13); 1,206 (11)
	132	77,7 ч	β^-	0,22	0,053 (17); 0,230 (90)
	133	12,5 мин	β^-	—	—
	133m	55 мин	β^- (87)	2,4	0,432 (50); 0,587 (35);
	—	—	и.п. (13)	—	0,254 (85); 0,91 (57)
	134	42 мин	β^-	—	0,08 (13); 0,17 (16); 0,204 (21); 0,262 (19)
$_{53}I$	117	7 мин	β^+	—	0,16; 0,34; 0,511 (ан.)
	118	13,9 мин	β^+ (~ 54)	—	0,511 (108, ан.); 0,45;
	—	—	э.з. (~ 46)	—	0,60; 1,15
	119	19,5 мин	β^+ (51)	—	0,28; 0,511 (102, ан.);
	—	—	э.з. (49)	—	0,38
	120	1,35 ч	э.з. (54)	—	0,511 (92, ан.); 0,56;
	—	—	β^+ (46)	4,0	0,62; 1,52
	121	2,12 ч	э.з. (91)	—	0,212 (90); 0,32 (6);

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия. Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучение
[illegible]		—	β^+ (9)	1,2	0,511 (18, ан.)
	122	3,5 мин	β^+	3,1	0,511 (ан.); 0,564; 0,69; 0,76
	123	13,3 ч	э.з.	—	0,159 (83)
	124	4,15 дня	э.з. (74)	—	0,511 (50, ан.); 0,606 (67);
		—	β^+ (26)	2,14	0,644 (12); 0,73 (14); 1,69 (14)
	125	60,2 дня	э.з.	—	0,035 (7)
	126	12,8 дня	э.з. (53)	—	0,386 (34); 0,667 (33)
		—	β^- (44)	1,25	
		—	β^+ (1,3)	1,13	
	127	—	100	—	—
	128	24,99 мин	β^- (93,6)	2,12	0,441 (14); 0,528 (1,4)
		—	э.з. (6,4)	—	
	129	$1,7 \cdot 10^7$ лет	β^-	0,160	0,040 (9)
	130	12,3 ч	β^+	1,7 (0,4); 1,04	0,419 (35); 0,538 (99); 0,669 (100); 0,743 (37)
	131	8,05 дня	β^-	0,806 (0,6); 0,606	0,284 (6,4); 0,364 (82); 0,637 (6,8)
	132	2,26 ч	β^-	2,12	0,52** (20); 0,67** (144); 0,773 (49); 0,955 (22)
	133	20,3 ч	β^-	1,27	0,53 (90)
	134	52,6 мин	β^-	2,43	0,61 (18); 0,85 (95); 0,89 (65); 1,15 (10)
	135	6,68 ч	β^-	1,4	1,14 (37); 1,28 (34); 1,46 (12); 1,72 (19)
	136	83 сек	β^-	7,0 (~6); 5,6	0,27 (18); 0,39 (10); 1,32** (96); 2,3** (19)
	137	22,0 сек	β^-	.	.
		—	β^-, n (~6)	—	—
	138	5,9 сек	β^-	—	—
	139	2,7 сек	β^-	—	—
$_{54}$Xe	118	6 мин	β^+	—	0,06; 0,511 (ан.)
	119	6 мин	β^+	—	0,10
	120	40 мин	э.з.	—	0,055; 0,073; 0,176; 0,76
	121	30 мин	β^+	2,8	0,080; 0,096; 0,132; 0,437; 0,511 (ан.)
	122	20,1 ч	э.з.	—	0,040; 0,090; 0,110; 0,148; 0,186; 0,346
	123	2,08 ч	э.з	—	0,090; 0,110; 0,149; 0,178; 0,326; 0,511 (ан.); 0,69; 0,90; 1,10
		—	β^+	1,51	
	124	—	0,095	.	—
	125	16,8 ч	э.з.	—	0,055; 0,188; 0,242
	125m	55 сек	и.п.	.	0,075; 0,111
	126	—	0,090	—	—
	127	36,41 дня	э.з.	—	0,172 (22); 0,203 (65); 0,375 (20)
	127m	75 сек	и.п	—	0,126; 0,175
	128	—	1,919	—	—
	129	—	26,44	.	—
	129m	8,0 дней	и.п	—	0,040 (9); 0,197 (6)
	130	—	4,08	—	—
	131	—	21,18	—	—
	131m	11,8 дня	и.п.	—	0,164 (2)
	132	—	26,89	—	—
	133	5,27 дней	β^-	0,346	0,081 (37)
	133m	2,26 дней	и.п.	—	0,233 (14)
	134	—	10,4	—	—
	135	9,14 ч	β^-	0,92	0,250 (91); 0,61 (3)
	135m	15,6 мин	и.п.	—	0,027 (60)
	136	—	8,87	—	—
	137	3,9 мин	β^-	4,1	0,455 (33)
	138	17,5 мин	β^-	2,4	0,16/33/; 0,25/100/; 0,42/40/; 1,78/66/; 2,02/58/
	139	43 сек	β^-	—	0,18/41/; 0,22/100/; 0,30/57/; 1,16/23/

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильного изотопа, %	Энергии, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				заряж. частицы	γ-излучение
$_{54}$Xe	140	16,0 сек	β^-	—	0,13
	141	1,7 сек	β^-	—	
	142	~ 1,5 сек	β^-	—	—
	143	1,0 сек	β^-	—	—
	144	~ 1 сек	β^-	—	—
$_{55}$Cs	123	8,4 мин	β^+	—	—
	125	45 мин	э.з. (51)	—	0,112; 0,511 (99, ан.)
		—	β^+ (49)	2,05	
	126	1,6 мин	β^+ (62)	3,8	0,386 (38); 0,511 (164, ан.)
			э.з. (18)	—	
	127	6,2 ч	э.з. (96,5)	—	0,125 (10); 0,405 (72);
			β^+ (3,5)	1,08	0,511 (7, ан.)
	128	3,8 мин	β^+ (— 51)	2,9	0,441 (27); 0,511 (110, ан.)
			э.з. (~ 49)	—	
	129	32,1 ч	э.з.	—	0,375 (48); 0,416 (25); 0,550 (5)
	130	30 мин	β^+	1,97	0,54; 0,59
		—	э.з.	—	
		—	β^-	0,442	
	131	9,70 дней	э.з.		—
	132	6,59 дней	э.з. (97)	—	0,48* (14); 0,668 (99)
			β^+ (0,6)	0,40	
		—	β^- (2)	—	
	133		100	—	
	134	2,046 лет	β^-	0,662	0,57** (23); 0,605 (58); 0,796** (99)
	134m	2,895 ч	и.п.	—	0,128 (14)
		—	β^- (~ 1)	0,55	
	135	$3,0 \cdot 10^6$ лет	β^-	0,21	—
	135m	53 мин	и.п.	—	0,781 (100); 0,840 (96)
	136	13,7 дня	β^-	0,337 (7); 0,341	0,16** (36); 0,340 (53); 0,818 (100); 1,05 (89)
	137	30,0 лет	β^-	1,176 (7); 0,514	0,662 (85)
	138	32,2 мин	β^-	3,40	0,463 (33); 1,01 (25); 1,436 (75); 2,21 (18)
	139	9,5 мин	β^-	—	1,28
	140	66 сек	β^-		0,59; 0,88; 1,14; 1,62; 1,86; 2,05; 2,32; 2,72; 3,15
	141	24 сек	β^-	—	—
	142	2,3 сек	β^-	—	—
$_{56}$Ba	125	6,5 мин	—	—	—
	126	97 мин	э.з.	—	0,23/100/; 0,70/33/
	127	13 мин	β^+	—	—
	128	2,43 дня	э.з.		0,134; 0,278
	129	2,61 ч	э.з. (94)	—	0,125/26/; 0,182/100/;
		—	β^+ (6)	1,42	0,21**/65/; 1,45/42/
	130		0,101	—	
	131	12,0 дней	э.з.	—	0,124** (28); 0,216 (19); 0,373 (13); 0,496** (48)
	131m	14,6 мин	и.п.	—	0,107 (40)
	132	—	0,097	—	—
	133	7,2 года	э.з.	—	0,080** (36); 0,302 (14); 0,356 (69)
	133m	38,9 ч	и.п.	—	0,276 (17)
	134	—	2,42	—	—
	135	—	6,59	—	—
	135m	28,7 ч	и.п.	—	0,268 (16)
	136		7,81	—	—
	136m	0,32 сек	и.п.	—	0,164 (40); 0,818 (100); 1,05 (100)
	137		11,32	—	—
	137m	2,554 мин	и.п.	—	0,662 (89)
	138	—	71,66	—	—
	139	82,9 мин	β^-	2,3	0,166 (23); 1,43 (0,4)
	140	12,80 дней	β^-	1,02	0,030 (11); 0,537 (30)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание в обычных условиях, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				частицы	γ-излучение
$_{56}$Ba	141	18 *мин*	β^-	3,0	0,153(100); 0,28(70); 0,46**(30); 0,64(20)
	142	11 *мин*	β^-	1,7	0,090(33); 0,26(100); 0,89(40); 1,20(35)
	143	12 *сек*	β^-		—
$_{57}$La	126	1,0 *мин*	β^+	—	0,250; 0,511 (ан.)
	127	3,5 *мин*	β^+	—	—
	128	4,2 *мин*	β^+	—	0,279; 0,511 (ан.)
	129	10,0 *мин*	β^+	—	—
		—	э.з.	—	—
	130	8,7 *мин*	β^+		0,356; 0,45; 0,511 (ан.);
		—	э.з.	—	0,65; 0,72; 0,81; 0,91; 1,01; 1,19; 1,45; 1,56
	131	56 *мин*	э.з. (72)	—	0,115(23); 0,334(20);
		—	β^+ (28)	1,94	0,417(20); 0,511(46, ан.)
	132	4,5 *ч*	β^+	3,8	0,47; 0,511 (ан.); 0,56; 0,66; 1,03; 1,23; 1,56; 1,92
	133	4,0 *ч*	э.з.	—	0,511 (ан.); 0,8
		—	β^+	1,2	
	134	6,8 *мин*	β^+ (62)	2,7	0,511 (124, ан.);
		—	э.з. (38)	—	0,605 (6)
	135	19,4 *ч*	э.з.	—	0,481 (1,8); 0,588 (0,13); 0,87** (0,24)
	136	9,5 *мин*	э.з. (~ 67)	—	0,611 (66, ан.); 0,818 (2,5)
		—	β^+ (~ 33)	1,9	
	137	$6 \cdot 10^4$ *лет*	э.з.	—	—
	138	$1,12 \cdot 10^{11}$ *лет*	0,089	—	0,81 (30); 1,436 (70)
		—	э.з. (~ 70)	—	
		—	β^- (~ 30)	0,21	
	139	—	99,911	—	—
	140	40,22 *ч*	β^-	2,175 (6); 1,68 (15); 1,36	0,329 (20); 0,487 (40); 0,816 (19); 0,923 (10); 1,596 (96); 2,53 (3)
	141	3,87 *ч*	β^-	2,43	1,37 (2)
	142	92,5 *мин*	β^-	4,51	0,65 (48); 0,90 (5); 1,91 (9); 2,41 (15); 2,56 (11)
	143	14,0 *мин*	β^-	3,3	0,62/100/; 0,60/44/; 1,07/26/; 1,17/57/; 1,58/28/; 1,99/35/; 2,56/27/
$_{58}$Ce	129	~ 13 *мин*	—		0,080; 0,32; 0,75
	130	30 *мин*	—	—	0,13
	132	4,2 *ч*	э.з.		0,18
	133	6,3 *ч*	э.з.	—	0,511 (ан.); 1,8
		—	β^+	1,3	
	134	72,0 *ч*	э.з.	—	—
	135	17,0 *ч*	э.з.	—	0,265 (100); 0,300 (56);
			β^+ (≤ 1)	0,81	0,52**/46/; 0,58**/36/
	136	—	0,193	—	—
	137	9,0 *ч*	э.з. (≥ 99)	—	0,446** (2,3); 0,481** (0,06);
		—	β^+ (≤ 0,002)	—	0,698 (0,04); 0,92** (0,10)
	137m	34,4 *ч*	и.п. (99,4)	—	0,108 (0,4); 0,255 (11);
		—	э.з. (0,6)	—	0,762 (0,16); 0,825** (0,5)
	138	—	0,250	—	—
	139	140 *дней*	э.з.	—	0,165 (80)
	139m	54 *сек*	и.п.		0,746 (93)
	140	—	88,48	—	—
	141	32,5 *дня*	β^-	0,581	0,145 (48)
	142	—	11,07	—	—
	143	33 *ч*	β^-	1,39	0,057 (11); 0,293 (46); 0,668 (7); 0,725 (8)
	144	284 *дня*	β^-	0,31	0,080 (2); 0,134 (11)
	145	3,0 *мин*	β^-	2,0	—
	146	14 *мин*	β^-	0,7	0,110/20/; 0,142/22/; 0,22/50/; 0,27/19/; 0,32/100/

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или отношение стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				β-излучение	γ-излучение
$_{52}$Te	147	65 сек	β^-	—	—
	148	~ 43 сек	β^-	—	—
$_{53}$I	134	17 мин	β^+	—	0,22; 0,36; 0,409; 0,511 (ан.); 0,639; 0,96
	135	22 мин	β^+	2,5	0,160; 0,92; 0,30; 0,511 (ан.)
		—	э.з.	—	
	136	1,9 ч	э.з. (— 67)	—	0,511 (66, ан.)
		—	β^+ (~ 33)	2,6	—
	137	1,5 ч	э.з. (73)	—	0,511 (54, ан.)
			β^+ (27)	1,7	—
	138	2,10 ч	э.з. (77)	—	0,298 (77); 0,40 (9);
			β^+ (23)	1,65	0,511 (46, ан.); 0,79 (100); 1,04 (100)
	139	4,5 ч	э.з. (89)	—	0,511 (18, ан.);
			β^+ (11)	1,09	1,35 (0,5); 1,61 (0,3)
	140	3,35 мин	э.з. (50)	—	0,511 (100, ан.);
		—	β^+ (50)	2,32	1,596 (0,3)
	141	—	β^-	—	—
	142	19,2 ч	β^-	2,16	1,57 (3,7)
	143	12,59 дня	β^-	0,903	—
	144	17,27 мин	β^-	2,99	0,695 (1,5); 1,467 (0,29); 2,186 (0,7)
	145	5,98 ч	β^-	1,80	0,072; 0,08; 0,75; 0,92; 0,96; 1,05; 1,16
	146	24 мин	β^-	3,7	0,455 (77); 0,74 (16); 0,78 (15); 1,54 (27)
	147	12 мин	β^-	2,1	0,078 (17); 0,127 (9); 0,32** (47); 0,56 (39); 0,61 (10); 0,65 (24); 1,26 (11)
	148	2,0 мин	β^-	4,2	0,26
	149	2,3 мин	β^-	2,5	0,08; 0,105; 0,325; 0,36; 0,745
$_{60}$Nd	137	55 мин	β^+	3	0,169; 0,511 (ан.); 0,55**
	138	22 мин	β^+	2,4	
	139[2]	29,7 мин	β^+	—	0,41
	139m	5,5 ч	и.п.	—	0,114 (80); 0,327 (50);
			β^+	3,1	0,511 (140); 0,73** (210);
		—	э.з.	—	0,82** (70); 0,963 (70)
	140	3,3 дня	э.з.	—	—
	141	2,42 ч	э.з. (96)	—	0,145 (0,2); 0,511 (6, ан.);
		—	β^+ (4)	0,79	1,14 (9); 1,30 (1)
	141m	64 сек	и.п.	—	0,755
	142	—	27,13	—	—
	143	—	12,20	—	—
	144	2,4 · 10^{15} лет	α	1,83	—
		—	23,87	—	—
	145	—	8,29	—	—
	146	—	17,18	—	—
	147	11,05 дня	β^-	0,81	0,091 (28); 0,319 (3); 0,43** (4); 0,533 (13)
	148	—	5,72	—	—
	149	1,6 ч	β^-	1,5	0,114 (18); 0,210 (27); 0,27** (26); 0,541 (10)
	150		5,60	—	
	151	12 мин	β^-	2,0	0,118 (40); 0,174** (10); 0,256 (11); 1,160 (9)
$_{61}$Pm	141	22 мин	β^+ (57)	2,6	0,195 (40); 0,511 (114, ан.)
		—	э.з. (43)	—	—
	142	40 сек	β^+ (— 95)	3,78	0,511 (190, ан.)
			э.з. (— 5)	—	—
	143	0,73 года	э.з.	—	0,742 (47)
	144	0,96 года	э.з	—	0,474 (45); 0,045 (99); 0,695 (39)
	145	17,7 года	э.з.	—	0,067 (1,0); 0,072 (2,3)
		—	α ($3 \cdot 10^{-7}$)	2,24 [2]	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				Бета-частицы	Гамма-излучение
$_{73}$Ta	140	4,4 сек	э.з. (65)	—	0,463 (65); 0,75* (65)
		—	β⁻ (35)	0,78	—
	147	2,62 сек	β⁻	0,224	—
	148	5,4 дня	β	2,48	0,561 (27); 0,914 (15); 1,465 (23)
	148m	41,8 дня	β⁻ (93)	0,69	0,551 (95); 0,633 (87);
		—	и.п. (7)	-	0,727 (36)
	149	69,1 ч	β⁻	1,07	0,286 (2); 0,58 (0,1); 0,65 (0,2)
	150	2,68 ч	β⁻	3,05	0,334 (71); 0,831 (18); 1,165 (23); 1,33 (23)
	151	27,8 ч	β⁻	1,19	0,17** (18); 0,340 (21)
	152	6,5 мин	β⁻	2,2	0,122; 0,245
	153	5,5 мин	β⁻	1,65	0,12; 0,18
	154	2,6 мин	β⁻	2,3	—
$_{66}$Sm	140 [2]	14,7 мин	э.з.	—	0,23; 0,14
	141 [2]	23 мин	β⁺	—	0,20; 0,43; 0,78
		—	β⁺	—	—
	142	72 мин	э.з. (~ 50)	—	0,15—0,35**;
		—	β⁺ (~ 50)	1,03 [2]	0,511 (100, ан.)
	143	9,0 мин	э.з. (52)		0,511 (100, ан.)
		—	β⁺ (48)	2,5 [2]	
	143m	66 сек	и.п.		0,749
	144	—	3,16	—	—
	145	340 дней	э.з.	—	0,061; 0,485 (3 · 10⁻⁴)
	146	7·10⁸ лет	α	2,46	—
	147	1,05·10¹¹ лет	α	2,23	—
		—	15,07	—	—
	148	—	11,27	—	—
	149	—	13,82	—	—
	150	—	7,47	—	—
	151	~ 87 лет	β⁻	0,076	0,022 (4)
	152	—	26,63	—	—
	153	46,8 ч	β⁻	0,80	0,070 (5,4); 0,103 (28)
	154	—	22,53	—	—
	155	23,5 мин	β⁻	1,53	0,104 (73); 0,240 (4)
	156	9,4 ч	β⁻	0,72	0,089 (20); 0,166 (10); 0,204 (20)
$_{63}$Eu	149 [2]	1,2 мин	э.з.	—	0,77; 1,03
		—	β⁺		—
	143	2,3 мин	β⁺	4,0	0,511 (ан.)
	144	10,5 сек	β⁺	5,2	0,511 (ан.)
	145	5,9 дня	э.з. (99)	—	0,036/30/; 0,694/100/;
		—	β⁺ (1)	1,7 [2]	1,60/16/
	146	4,59 дня	э.з. (96,5)	- -	0,511 (7, ан.);
		—	β⁺ (3,5)	1,47 (3,3); 2,11 (0,14);	0,634* (77); 0,749 (100)
	147	21,5 дня	э.з. (99,5)		0,122 (20); 0,198 (24);
		—	β⁺ (0,5)	—	0,680 (11); 0,957 (9);
		—	α (0,002)	2,91	1,079 (9)
	148	54 дня	э.з. (> 99)	—	0,551** (120);
		—	β⁺ (0,13)	0,97	0,62** (90);
			α (9·10⁻³)	2,63	0,72** (18)
	149	106 дней	э.з.	—	0,277/10/; 0,328/10/
	150	12,56 ч	β⁻ (93)	1,01	0,334 (4); 0,406 (3);
		—	э.з. (9)	—	0,511 (0,8, ан.)
		—	β⁺ (0,4)	1,24	—
	151	—	47,77	—	—
	152	12,7 года	э.з. (72)	—	0,122 (37); 0,344 (27);
			β⁻ (28)	1,48	0,965 (15); 1,408 (22)
		—	β⁺ (0,021)	0,71	—
	152m₁	9,3 ч	β⁻ (77)	1,88	0,842 (13); 0,963 (12);
		—	э.з. (23)	—	0,122 (8)
		—	β⁺ (0,011)	0,89	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада для большинства изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				корпускулярное	γ-излучение
$_{63}$Eu	$152m_2$	96 мин	и.п.	—	0,090 (74)
	153	—	52,23	—	—
	154	16 лет	β^-	1,85 (10); 0,87	0,123 (38); 0,724 (21); 0,876 (12); 1,02* (31); 1,278 (37)
	155	1,811 года	β^-	0,25	0,087 (32); 0,105 (20)
	156	15,4 дня	β^-	2,45	0,089 (8); 0,812 (9); 1,07** (11); 1,15** (14); 1,94** (IE)
	157	15,1 ч	β^-	1,3	0,054 (27); 0,37 (14); 0,413 (27)
	158	46 мин	β^-	2,5	0,080/100/; 0,18**/25/; 0,95**/95/; 1,19/16/
	159	18,1 мин	β^-	2,6	0,07 (42); 0,09 (18); 0,15 (14); 0,67 (21)
	160[2]	40 сек	β^-	—	0,075; 0,17
$_{64}$Gd	145	25 мин	э.з.	—	0,511 (ан); 0,80/9/;
		—	β^+	2,4	1,03/10/; 1,75/100/
	146	50 дней	э.з.	—	0,078/30/; 0,115** /100/; 0,155 /45/
	147	35 ч	э.з.	—	0,299/150/; 0,39** /85/; 0,64**/70/; 0,77**/60/; 0,932/60/
	148	84 года	α	3,18	—
	149	9,5 дня	э.з. (≥ 99)	-	0,150 (48); 0,299 (26);
		—	α (~ 0,0007)	3,01	0,347 (25); 0,710 (11)
	150	$2,1 \cdot 10^6$ лет	α	2,73	—
	151	120 дней	э.з.	—	0,0216(3); 0,154 (7);
		—	α (~ $8 \cdot 10^{-7}$)	2,60	0,137 (13); 0,244 (7)
	152	$1,1 \cdot 10^{14}$ лет	α	2,1	—
		—	0,20	—	—
	153	242 дня	э.з.	—	0,070 (2,4); 0,099** (66)
	154	—	2,15	—	—
	155	—	14,7	—	—
	156	—	20,47	—	—
	157	—	15,68	—	—
	158	—	24,9	—	—
	159	18,0 ч	β^-	0,95	0,058 (3); 0,363 (9)
	160	—	21,9	—	—
	161	3,6 мин	β^-	1,6	0,102 (11); 0,315 (25); 0,361 (66)
	162 [2]	10,4 мин	β^-	—	0,41; 0,43
$_{65}$Tb	147	24 мин	э.з.	—	0,305; 0,511 (ан.)
		—	β^+	—	
	148	70 мин	э.з.	—	0,511 (ан.); 0,78; 1,12
		—	β^+	4,6	—
	149	4,10 ч	э.з. (84)	-	0,16; 0,35
		—	α (~ 16)	3,90	—
	149m	4,3 мин	э.з.		—
		—	α (0,025)	3,99	—
	150	3,1 ч	э.з	—	0,511/100, ан./;
		—	β^+	3,0	0,037/100/;
		—	α [2]	3,49 [2]	0,93/35/
	151	18 ч	э.з. (≥ 99)		0,108 (35); 0,252 (35);
		—	α (0,0005)	3,42	0,288 (32)
	152	17,4 ч	э.з. (60)	-	0,344/100/; 0,586/14/;
		—	β^+ (~ 20)	2,82	0,779/14/
	153	55 ч	э.з	—	0,040** (11); 0,11** (12); 0,212 (30)
	154	21,0 ч	э.з.	—	0,123; 0,246; 0,347; 0,53*; 0,65**
	155	5,0 дня	э.з.	—	0,087 (37); 0,106 (25); 0,180 (8)
	156	5,1 дня	э.з.	—	0,089 (17); 0,199 (40); 0,535 (70); 1,22 (29); 1,42 (15)
	156m	5,5 ч	и.п.	—	0,088
	157	150 лет	э.з.	—	—
	158	$1,2 \cdot 10^9$ лет	э.з (86)	—	0,080 (12); 0,182 (10);
		—	β^- (14)	0,85	0,782 (10); 0,95* (69)
	158m	10,5 сек	и.п.	—	0,110 (0,5)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или сечение захвата нейтронов, b	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{65}$Tb	159	—	160	—	—
	160	72,1 дня	β^-	1,74 (0,4); 0,96	0,087 (12); 0,298 (30); 0,879 (31); 0,966** (31); 1,178 (15)
	161	6,9 дня	β^-	0,59 (10); 0,52	0,026 (21); 0,049 (19); 0,075 (10)
	162	7,48 мин	β^-	1,3; 1,5 [2]	0,183/26/; 0,258/100/; 0,81/44/; 0,89/64/
	163	6,5 ч	β^-	1,65	0,025; 0,285; 0,330; 0,510
	164 [2]	3 мин	β^-	1,0; 2,9	0,17; 0,69
$_{66}$Dy	149	10—20 мин	э.з.	—	—
	150	7,2 мин	э.з.	—	0,39; 0,511 (ан.)
		—	β^+	—	—
		—	α	4,23	—
	151	18,0 мин	β^+ + э.з. (94)	—	0,145; 0,511 (ан.)
		—	α (6)	4,00	—
	152	2,41 ч	э.з.	—	0,257
		—	α (0,05)	3,65	—
	153	6,4 ч	э.з.	—	0,05**; 0,25**
		—	α (0,0030)	3,48	—
	154	$\gg 1 \cdot 10^6$ лет	α	2,85	—
	154m	13 ч	α	3,37	—
	155	10,2 ч	э.з.	—	—
		—	β^+ (2)	1,08 (0,14); 0,65 (2)	0,227 (69); 0,152** (8); 1,000 (6); 1,16** (6)
	156	—	0,0524	—	—
	157	8,1 ч	э.з.	—	0,326 (91)
	158	—	0,0902	—	—
	159	144 дня	э.з.	—	0,058 (4); 0,349 ($9 \cdot 10^{-4}$)
	160	—	2,294	—	—
	161	—	18,88	—	—
	162	—	25,53	—	—
	163	—	24,97	—	—
	164	—	28,18	—	—
	165	139,2 мин	β^-	1,29	0,095 (4); 0,361 (1,1)
	165m	1,26 мин	и.п.	—	0,108 (3); 0,514 (1,8)
		—	β^- (2,5)	1,04 (0,4); 0,89	
	166	81,6 ч	β^-	0,48 (5); 0,40	0,082 (12); 0,372 (0,5); 0,426 (0,5)
	167	4,4 мин	β^- [2]	—	0,19 — 0,57 [2]
$_{67}$Ho	151	35,6 сек	β^+ + э.з. (80)	—	
		—	α (20)	4,51	—
	152	52,3 сек	э.з.	—	—
			α (19)	4,46	—
	153	9 мин	α (0,3)	3,92	—
		—	э.з.	—	—
	154	7 мин	β^+	—	0,335; 0,511 (ан.)
	155	50 мин	β^+	2,1	0,092; 0,138; 0,511 (ан.)
	156	56 мин	β^+	2,9/1/; 1,8/18/	0,136/100/; 0,266/99/; 0,367/23/; 0,511 (ан.)
	157	14 мин	β^+	—	0,087; 0,102; 0,190; 0,227; 0,511 (ан.)
	158	11,5 мин	э.з.	—	0,099; 0,218; 0,369; 0,419; 0,69; 0,047
	158m	29 мин	и.п.	—	0,099; 0,218; 0,366; 0,412
		—	β^+	1,32	
	159	33 мин	э.з.	—	0,057; 0,060; 0,13; 0,253; 0,309
	159m	6,9 сек	и.п.	—	0,206
	160	25,6 мин	э.з. (≫ 99)	—	0,73; 0,96 [2]
		—	β^+ (~ 0,4)	—	—
	160m	5,0 час	и.п. (66)	—	0,197 (20); 0,646 (20); 0,729 (30); 0,869 (20);
		—	э.з. } (34)	—	
		—	β^+ }	1,9	0,365** (37)
	161	2,4 час	э.з.	—	0,026 (23); 0,075 (16)
	161m	6,1 сек	и.п.	—	0,211 (63)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				частиц	γ-излучение
$_{92}$Uo	102	15 мин	э.з. (95)	—	0,081 (8); 0,511 (9, ан.)
		—	β^+ (5)	1,10	—
	102m	68 мин	и.п. (63)	—	0,185 (26); 0,940 (13);
		—	э.з. (37)	—	1,224 (24)
	103 [2]	~ 30 сек	э.з.	—	—
	103m	1,1 сек	и.п.	—	0,305
	104	36,7 мин	β^- (53)	0,99	0,079; 0,091
		—	э.з. (47)	—	—
	105	—	100	—	—
	106	26,9 ч	β^-	1,84	0,081 (5,4); 1,380 (0,9)
	106m	$1,2 \cdot 10^9$ лет	β^-	—	0,184 (90); 0,260 (30); 0,711 (56); 0,810 (60)
	107	3,1 ч	β^-	0,96	0,06 — 0,58 [2]
	108	3,3 мин	β^-	2,2	0,65
	109	4,8 мин	β^-	1,95	0,16; 0,68; 0,84; 0,02
	170	45 сек	β^-	3,1	0,43
$_{93}$Ir	152	10,7 сек	α (~ 90)	4,80	—
	153	36 сек	α (> 75)	4,67	—
		—	э.з. + β^+ (25)	—	—
	154	5 мин	α	4,15	—
	157	~ 25 мин	β^+	—	0,117; 0,386; 0,511 (ан.); 1,32
	158	2,3 ч	э.з.	—	0,072; 0,250; 0,315;
		—	β^+	0,8	0,387; 0,511 (ан.); 0,875
	159	30 мин	β^+ [2]	—	0,37—2,00 [2]
	160	29,4 ч	э.з.	—	—
	161	3,1 ч	β^+	1,2	0,211 (9); 0,502 (8); 0,836 (63)
	162	—	0,136	—	—
	163	75,1 мин	э.з. (> 90)	—	0,43 (0,06); 1,10 (0,04)
		—	β^+ (0,004)	0,19	—
	164	—	1,58	—	—
	166	10,34 ч	э.з.	—	—
	168	—	33,41	—	—
	167	—	22,94	—	—
	167m	2,3 сек	и.п.	—	0,208 (43)
	168	—	27,07	—	—
	169	9,6 дня	?	0,34	0,008 (0,3)
	170	—	14,68	—	—
	171	7,52 ч	β^-	1,49 (2,3); 1,05	0,112 (21); 0,206 (28); 0,308 (63)
	172	49,5 ч	β^-	0,89 (≤ 10); 0,37	0,407 (46); 0,610 (40)
$_{94}$Tn.	153	1,6 сек	α	5,10	—
	154	3,0 сек	α	5,04	—
	161	32 мин	э.з.	—	0,084; 0,106; 0,112; 0,172
	162	77 мин	э.з.	—	0,102/20/; 0,236/10/
	163	1,8 ч	э.з.	—	0,104/8/; 0,240**/5/
		—	β^+	1,1	—
	164	2,0 мин	э.з. (50)	—	0,091 (4); 0,511 (100, ан.)
		—	β^+ (50)	2,94	—
	165	30,1 ч	э.з.	—	0,243/50/; 0,297** (36);
		—	β^+ (0,007)	0,30	0,407/15/
	166	7,7 ч	э.з. (98,2)	—	0,081; 0,19*; 0,215;
		—	β^+ (2)	1,94	0,46; 0,60**
	167	9,6 дня	э.з.	—	0,057 (4); 0,208 (43); 0,532 (2)
	168	85 сек	э.з.	—	0,19** (77); 0,446 (27); 0,73** (40); 0,82** (88)
	169	—	100	—	—
	170	134 дня	β^-	0,07	0,084 (3,3)
	171	1,92 года	β^-	0,097	0,067

Элемент	A	Период полураспада или	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				грубые частицы	γ-излучения
$_{69}$Tm	172	63,6 ч	β^-	1,83	0,079 (5); 0,181 (2,2); 1,09 (7); 1,39 (7); 1,46 (7); 1,53 (6)
	173	8,2 ч	β^+	1,3 (2); 0,89	0,398 (89); 0,466 (8)
	174	5,2 мин	β^+	1,2	0,176 (67); 0,273 (85); 0,366 (93); 0,60 (15); 0,99 (89)
	175	20 мин	β^+	2,0	0,51
	176	1,5 мин	β^+	4,2	—
$_{70}$Yb	154	0,39 сек	α	5,33	—
	155	1,6 сек	α	5,21	—
	162	~24 мин	—	—	0,041 [2]
	164	75 мин	э.з.	—	—
	165	10,5 мин	э.з.	—	0,080; 0,069 [2]
	166	57,5 ч	β^+	1,6 [2]	0,082 (17)
	167	17,7 мин	э.з.	—	0,113** (90); 0,176 (16)
	168	—	β^+ (0,4)	—	—
	169	31,8 дня	0,140	—	0,065 (45); 0,177 (22); 0,198 (35)
	169 *m*	46 сек	э.з.	—	0,024 [2]
	170	—	и.п.	—	—
	171	—	3,03	—	—
	171 *m*	≤9 дней	14,31	—	0,010; 0,076
	172	—	и.п.	—	—
	173	—	21,82	—	—
	174	—	16,13	—	—
	175	101 ч	31,84	—	—
	176	—	β^-	0,466	0,114 (1,9); 0,283 (3,7); 0,396 (6,0)
	176 *m*	11,7 сек	12,73	—	—
	177	1,9 ч	и.п.	—	0,19; 0,29; 0,39
	177 *m*	6,5 сек	β^-	1,40	0,122 (3); 0,151 (16); 1,080 (5); 1,241 (3)
			и.п.	—	0,104 (65); 0,228 (13)
$_{71}$Lu	165	0,07 сек	α	5,63	—
	166	0,23 сек	α	5,54	—
	167	54 мин	э.з.	—	0,030; 0,278; 0,372; 0,402; 0,511 (ан.)
			β^+ (~1)	1,5	0,087 (7); 0,90 (10); 0,99 (13)
	168	7,1 мин	э.з.	—	0,063; 0,111; 0,191; 0,577
			β^+ (~12)	1,2	0,029 [2]
	169	34 ч	э.з.	—	0,064 (15)
			β^+	1,2	—
	169 *m*	2,7 мин	и.п.	—	0,019 (20); 0,068 (14); 0,741 (68)
	170	2,05 мин	э.з.	—	0,071 (0,2)
			β^+	2,4	0,182 (20); 0,81 (21); 0,91** (45); 1,00 (60)
	170 *m*	0,7 сек	и.п.	—	—
	171	8,3 дня	э.з.	—	0,019 (20); 0,068 (14); 0,741 (68)
			β^+ (~0,007)	—	0,071 (0,2)
	171 *m*	78 сек	и.п.	—	0,182 (20); 0,81 (21); 0,91** (45); 1,00 (60)
	172	6,70 дня	э.з.	—	—
	172 *m*	3,7 мин	и.п.	—	0,079 (14); 0,101 (7); 0,272 (18)
	173	1,37 года	э.з.	—	0,076 (6); 1,24 (9); 0,087; 0,176; 0,273; 0,094
	174	3,6 года	э.з.	—	—
	174 *m*	140 дней	и.п.	—	0,088 (15); 0,202 (65); 0,206 (96)
	175	—	97,40	—	0,068 (10)
	176	$2{,}2 \cdot 10^{10}$ лет	β^- 2,60	0,43	0,113 (2,8); 0,208 (6,1)
	176 *m*	3,69 ч	β^-	1,31	0,113 (23); 0,208 (62); 0,228 (37); 0,378 (29); 0,418 (21)
	177	6,74 дня	β^-	0,497	
	177 *m*	165 дней	β^- (78) и.п. (22)	0,2 [2]	

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{71}$Lu	176	22 мин	β^-	1,50	0,080; 0,214; 0,326; 0,427
	179	4,6 ч	β^+	1,36	0,213
	180	2,5 мин	β^-	3,3	—
$_{72}$Hf	157	0,12 сек	α	5,68	—
	158	3 сек	α	5,27	—
	168	22 мин	β^+ (~2)	1,7	0,129; 0,17
			э.з.	—	
	169	1,5 ч	э.з.	—	0,115
			β^+	1,3	
	170	12,2 ч	э.з.	—	0,120; 0,165; 0,99;
	171	10,7 ч	э.з.	—	1,26; 2,03; 2,36; 2,52; 2,91
					0,192; 0,198; 0,29;
	172	5 лет	э.з.	—	0,34; 0,47; 0,66; 0,80; 1,07
	173	23,6 ч	э.з.	—	0,094 (22); 0,082 (10); 0,125** (21)
	174	2·10^{10} лет	α	2,50	0,13** (96); 0,30** (52);
		—	0,163	—	—
	175	70 дней	э.з.	—	—
	176	—	5,21	—	0,089 (3,4); 0,343 (85)
	177	—	18,56	—	—
	177 *m*	1,1 сек	и.п.	—	—
					0,113 (30); 0,206 (81);
	178	—	27,1	—	0,228 (46); 0,378 (37)
	178 *m*	4,3 сек	и.п.	—	—
					0,089 (54); 0,214 (75);
	179	—	13,75	—	0,326 (94); 0,427 (97)
	179 *m*	18,6 сек	и.п.	—	—
	180	—	35,22	—	0,217 (94)
	180 *m*	5,5 ч	и.п.	—	—
					0,058 (48); 0,215 (52);
	181	42,5 дня	β^+	0,41	0,333 (93); 0,444 (80)
	182	9·10^8 лет	β^-	—	0,133** (48); 0,346 (13); 0,482 (81)
	183	66 мин	β^-	1,6	0,271 (84)
					0,46/56/; 0,82/100/
$_{73}$Ta	172	44 мин	β^+	—	0,092; 0,208;
			э.з.	—	0,511 (ан.)
	173	3,7 ч	э.з.	—	0,090**; 0,170**;
			β^+	—	0,64; 1,00
	174	1,2 ч	э.з.	—	0,091; 0,125; 0,160;
			β^+	—	0,205; 0,280; 0,350; 0,511 (ан.)
	175	10,5 ч	э.з.	—	0,08; 0,13; 0,21;
					0,27; 0,35; 0,45; 0,60;
					0,83; 1, 2; 1,4; 1,7
	176	8,0 ч	э.з.	—	0,088; 0,202
	177	66,6 ч	э.з.	—	0,113 (6); 0,208 (1)
	178	9,35 мин	э.з. (99)	—	0,093/100/;
			β^+ (1)	0,89	0,511(10, ан.); 1,10/11/; 1,35**/46/
	179	~600 дней	э.з.	—	—
	180	—	0,0123	—	—
	180 *m*	8,15 ч	э.з. (87)	—	0,093 (4); 0,103 (0,6)
			β^- (13)	0,71	
	181	—	99,9877	—	—
	182	115,1 дня	β^-	1,71 (0,3); 0,522	0,068 (42); 1,122 (34); 1,222 (27)
	182 *m*	16,5 мин	и.п.	—	0,147 (40); 0,172 (40); 0,184 (20)
	183	5,0 дней	β^-	0,62	0,108 (11); 0,161** (17);
					0,240** (33);
					0,30** (11); 0,354 (11)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{75}$Re	184	8,7 ч	β^-	2,64 (0,2); 1,76 (0,9); 1,19	0,111 (21); 0,25 (42); 0,30 (24); 0,41 (71); 0,90** (49) 0,175 (60)
	185	50 мин	β^-	1,7	0,20 (74); 0,51 (33);
	186	10,5 мин	β^-	2,2	0,61 (33); 0,73 (48)
$_{74}$W	173	16,5 мин	э.з.	—	—
	174	31 мин	э.з.	—	—
	175	34 мин	э.з.	—	0,26; 0,80; 1,3; 1,6
	176	2,3 ч	э.з. (>90) β^+ (~0,6)	—	0,004; 0,100
	177	135 мин	э.з.	—	0,20; 0,42; 0,62; 0,83; 1,00
	178	21,6 дня	э.з.	—	—
	179	37,5 мин	э.з.	—	0,031 (22)
	179 m	5,2 мин	и.п.	—	0,222
	180	—	0,135	—	—
	181	140 дней	э.з.	—	0,006 (1); 0,136 (0,1); 0,152 (0,1)
	182	—	26,4	—	—
	183	—	14,4	—	—
	183 m	5,3 сек	и.п.	—	0,055 (11); 0,090 (9) 0,106 (19)
	184	—	30,6	—	—
	185	75 дней	β^-	0,429	—
	185 m	1,62 мин	и.п.	—	0,100/16/; 0,13/70/; 0,17/100/
	186	—	28,4	—	—
	187	23,9 ч	β^-	1,31 (15); 0,63	0,479 (23); 0,686 (27)
	188	69,4 дня	β^-	0,349	0,227 (0,22); 0,290 (0,40)
	189	11,5 мин	β^-	2,5; 2,0	0,256/100/; 0,417/96/
$_{75}$Re	177	17 мин	β^+	—	—
	178	15 мин	β^+	3,1	—
	179	90 мин	э.з.	—	—
	180	2,4 мин	β^+	1,1	0,11; 0,511 (ан.); 0,88
	181	18 ч	э.з.	—	0,365
	182	12,7 ч	э.з. β^+ (0,5)	1,74	0,068; 0,100; 1,122; 1,189; 1,23**; 2,01; 2,0
	183	71 день	э.з.	—	0,046; 0,053; 0,109**; 0,209 0,246; 0,292
	184	38 дней	э.з.	—	0,111; 0,78**; 0,80**
	184 m	169 дней	и.п. (70) э.з. (30)	—	0,111; 0,78**; 0,90**
	185	—	37,07	—	—
	186	88,9 ч	β^- (95) э.з. (5)	1,07	0,137 (9); 0,632 (0,052); 0,765 (0,035)
	187	$4,3 \cdot 10^{10}$ лет	β^-	0,003	—
	—	—	62,93	—	—
	188	16,7 ч	β^-	2,12	0,155 (16); 0,478 (0,6) 0,633 (0,9)
	188 m	18,7 мин	и.п.	—	0,092 (5); 0,106 (10)
	189	24,3 ч	β^-	1,00	0,180* (4); 0,187* (3) 0,218* (10); 0,246 (4)
	190	2,6 мин	β^-	1,6	0,191/16/; 0,392/10/ 0,57/10/; 0,53/3/
	190 m	2,8 ч	—	—	—
	191	9,8 мин	β^-	1,6	—
	192	6 сек	β^-	2,5	0,20; 0,29; 0,37; 0,48; 0,57
$_{76}$Os	181	23 мин	—	—	—
	182	21,9 ч	э.з.	—	0,180/7/; 0,510/10/

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{76}$Os	183	12,0 ч	э. з.	—	0,114(27); 0,382(90)
	183m	9,9 ч	э. з. (~54)	—	1,005(6); 1,105**(48)
			и. п. (~46)	—	
	184	—	0,018	—	—
	185	93,6 дня	э. з.	—	0,646(80); 0,875**(1)
	186	—	1,59	—	—
	187	—	1,64	—	—
	188	—	13,3	—	—
	189	—	16,1	—	—
	189m	5,7 ч	и. п.	—	—
	190	—	26,4	—	—
	190m	9,9 дня	и. п.	—	0,187 (70); 0,361 (94); 0,509 (98); 0,616 (99)
	191	15,0 дней	β^-	0,143	0,129 (25)
	191m	13,0 ч	и. п.	—	—
	192	—	41	—	—
	193	31,5 ч	β^-	1,13	0,139 (3); 0,29** (2,1); 0,460 (3,9); 0,558 (2,1)
	194	6,0 лет	β^-	0,053	0,043 (10); 0,078 (0,05)
	196	6,5 лет	β^-	2	—
$_{77}$Ir	182	15 мин	э. з.	—	0,133; 0,276; 0,510
	183	0,9 ч	э. з.	—	0,24
	184	3,2 ч	э. з.	—	0,125/100/; 0,367 /200/; 0,392 /50/
			β^+	—	
	185	14 ч	э. з.	—	0,101; 0,254
	186	15,8 ч	э. з. (97)	—	0,137 (45); 0,257 (74); 0,434 (35)
			β^+ (3)	1,94	
	187	10,5 ч	э. з.	—	0,18 /45/; 0,41 /100/; 0,61 /45/; 0,96 /50/
	188	41,5 ч	э. з. (>99)	—	0,155 (34); 0,633* (29)
			β^+ (~0,3)	1,66	
	189	13,3 дня	э. з.	—	0,245 (16)
	190	11 дней	э. з.	—	0,187 (61); 0,37** (39); 0,40** (36); 0,516 (39); 0,56** (72); 0,604 (47)
	$190m_1$	1,2 ч	и. п.	—	—
	$190m_2$	3,2 ч	э. з. (94)	—	0,187 (66); 0,361 (86); 0,609 (92); 0,616 (93)
			и. п. (6)	—	
	191	—	38,6	—	—
	191m	4,9 сек	и. п.	—	0,129 (25)
	192	74,2 дня	β^- (95,5)	0,67	0,290 (29); 0,308 (30);
			э. з. (4,5)	—	0,317 (81); 0,466 (49)
	$192m_1$	1,42 мин	и. п. (>99)	—	0,056 (0,005); 0,317 (0,008);
			β^- (0,017)	1,6	0,612 (0,003)
	$192m_2$	>5 лет	и. п.	—	—
	193	—	61,5	—	—
	193m	11,9 дня	и. п.	—	—
	194	17,4 ч	β^-	2,24	0,328 (10); 0,61* (1)
	194m	47 сек	β^-	2,3	0,13; 0,32; 0,63
			и. п.	—	
	195	4,2 ч	β^-	1,0	0,10; 0,13; 0,33; 0,37; 0,43; 0,66
	196	120 мин	β^-	0,95	0,356 (94); 0,39 (95); 0,44 (96); 0,522 (99); 0,65 (100)
	197	7 мин	β^-	2,0	0,50
	198	50 сек	β^-	3,6	0,79
$_{78}$Pt	174	0,7 сек	α (80)	6,03	—
			э. з. } (90)	—	
			β^+ }		
	175	2,1 сек	α	5,96	—
	176	6,0 сек	α (1,4)	5,74	—
			э. з. } (98,6)	—	
			β^+ }		
	177	0,6 сек	α (0,3)	5,51	—
			э. з. } (>99)	—	
			β^+ }		

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или парциальные ветвления, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				альфа-частицы	γ-излучение
$_{78}$Pt	178	21 сек	α (1,5)	5,44	—
			э. з. / β^+ } (98,7)	—	
	179	33 сек	α (0,1)	5,15	—
			э. з. / β^+ } (>99)	—	
	180	50 сек	α (0,3)	5,14	—
			э. з. / β^+ } (>99)	—	
	181	51 сек	α (0,0006)	6,02	—
			э. з. / β^+ } (>99)	—	
	182	3,0 мин	α (0,02)	4,84	—
			э. з. / β^+ } (>99)	—	
	183	6,5 мин	α (0,001)	4,73	—
			э. з. / β^+ } (>99)	—	
	184	20 мин	α (0,0015)	4,50	—
			э. з. / β^+ } (>99)	—	
	185	1,2 ч	э. з.	—	0,035; 0,63; 1,56
	186	3,0 ч	э. з.		0,67
			α ($1,4\cdot10^{-4}$)	4,23	
	187	2,0 ч	э. з.	—	2,0
	188	10,2 дня	э. з.	—	0,140 /22/; 0,19** /100/; 0,39 /15/
			α ($3\cdot10^{-6}$)	3,93	
	189	10,9 ч	э. з.	—	0,094 /120/; 0,141/124/; 0,187 /137/; 0,243 /100/; 0,36** /200/; 0,51** /180/; 0,722 /156/
	190	$6,9\cdot10^{11}$ лет	α	3,18	—
			0,0127		
	191	3,00 дня	э. з.	—	0,207* (5); 0,410 (3); 0,539 (9)
	192	$\sim10^{15}$ лет	α	2,67	—
		—	0,78	—	—
	193	<500 лет	э. з.	—	—
	193m	4,3 дня	и. п.	—	—
	194	—	32,9	—	—
	195	—	33,8	—	—
	195m	4,1 дня	и. п.	—	0,099 (11); 0,129 (1)
	196	—	25,2	—	—
	197	18 ч	β^-	0,670	0,077 (20); 0,191 (6)
	197m	78 мин	и. п.	—	0,279 (2,6); 0,346 (13)
			β^- (3)	0,777 (3)	
	198		7,19	—	—
	199	31 мин	β^-	1,09	0,197 (9); 0,32* (6); 0,475* (12); 0,540 (24) 0,308 (90)
	199m	14,1 сек	и. п.	—	—
	200	11,5 ч	β^-	—	—
	201	2,3 мин	β^-	2,66	0,16; 0,27; 1,76
$_{79}$Au	177	1,4 сек	α	6,11	—
	178	2,7 сек	α	5,91	—
	179	7,1 сек	α	5,84	—
	181	10 сек	α	5,60; 5,47	—
	183	44 сек	α	5,34	—
	185	4,33 мин	э. з.	—	—
			β^+	—	
			α (~0,01)	5,07	
	186	12 мин	э. з.	—	0,16; 0,22; 0,30; 0,40
	187	8 мин	э. з.	—	—
			α [2]	4,69 [2]	
	188	8 мин	э. з.	—	0,25; 0,33; 0,63
			β^+	—	
	189	30 мин	э. з.	—	0,35; 0,46; 0,71; 0,81 [2]

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				γ-лучи тонкой структуры	γ-лучи сложные
$_{79}$Au	190	39 мин	э. з.	—	0,29** /100/; 0,60** /5/
	191	3,2 ч	э. з.	—	0,14 /10/; 0,30 /60/; 0,60 /10/
	192	4,1 ч	э. з.	—	0,137; 0,158; 0,206; 0,308; 0,317
			β^+ (~1)	2,2	
	193	15,8 ч	э. з.	—	0,114** (6); 0,18** (11); 0,26* (9)
	193m	3,9 сек	и. п.	—	0,258 (65)
	194	39,5 ч	э. з. (~97)	—	0,294 (12); 0,328 (68)
			β^+ (~3)	1,49	
	195	183 дня	э. з.	—	0,099 (10); 0,129 (1)
	195m	30,5 сек	и. п.	—	0,261 (77)
	196	6,18 дня	э. з. (93,8)	—	0,333 (25); 0,356 (94); 0,426 (6)
			β^- (6,2)	0,259 (6)	
	196m	9,7 ч	и. п.	—	0,148 (42); 0,188 (32)
	197	—	100	—	—
	197m	7,2 сек	и. п.	—	0,130 (6); 0,279 (75)
	198	2,697 дня	β^-	0,962	0,412 (95); 0,676 (1)
	199	3,15 дня	β^-	0,46 (6); 0,30	0,458 (37); 0,208 (9)
	200	48,4 дня	β^-	2,2	0,368 (24); 1,227 (23)
	201	26 мин	β^-	1,5	0,53
	205	55 сек	β^-	1,9	0,69
$_{80}$Hg	185	50 сек	э. з.		—
			α [2]	5,64 [2]	
	186	1,5 мин	э. з.	—	0,125; 0,27; 0,36; 0,44
	187	3 мин	э. з.	—	0,175; 0,255; 0,40
	188	3,7 мин	э. з.	—	0,14
			α [2]	5,14 [2]	
	189	9,6 мин	э. з.	—	0,105; 0,24; 0,32; 0,50
	190	20 мин	э. з.	—	0,14**
	191	55 мин	э. з.	—	0,26**
	192	4,8 ч	э. з.	—	0,114 /10/; 0,157 /20/; 0,274 /100/
			β^+ (<1)	—	
	193	~6 ч	э. з.	—	0,187; 0,574; 0,762; 0,855; 1,04; 1,08
	193m	10,0 ч	э. з. (84)	—	0,218; 0,258; 0,574
			и. п. (16)	—	
			β^+ [2]	1,2 [2]	
	194	1,9 года	э. з.	—	—
	195	9,5 ч	э. з.	—	0,20**; 0,261; 0,59*
					0,790; 0,930; 1,110; 1,172
	195m	40,0 ч	э. з. (60)	—	0,200 (35); 0,261 (20); 0,560 (20)
			и. п. (50)	—	
	196	—	0,146	—	—
	197	65 ч	э. з.	—	0,077 (18); 0,191 (2)
	197m	24 ч	и. п. (94)	—	0,134 (42); 0,279 (7)
			э. з. (6)	—	
	198	—	10,02	—	—
	199	—	16,84	—	—
	199m	43 мин	и. п.	—	0,158 (53); 0,375 (15)
	200	—	23,13	—	—
	201	—	13,22	—	—
	202	—	29,80	—	—
	203	46,9 дня	β^-	0,214	0,279 (77)
	204	—	6,85	—	—
	205	5,5 мин	β^-	1,7	0,205
	206	8,1 мин	β^-	1,3 [2]	0,31
$_{81}$Tl	191	10 мин	э. з.	—	0,511 (ан.)
			β^+	—	
	192	11 мин	э. з.	—	0,424
	193	23 мин	э. з.	—	0,158; 0,169; 0,178; 0,187; 0,208;
			β^+	—	0,216; 0,247; 0,511 (ан)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучение
$_{80}$Tl	190m	2,1 мин	э. з.	—	0,365
	191	33,0 мин	э. з.	—	0,427
	194m	32,8 мин	э. з.	—	0,097
	195	1,16 ч	э. з. β^+	— 1,8	—
	196m	3,5 сек	и. п.	—	0,383 (95)
	196	1,84 ч	э. з.	—	0,420
	196m	1,41 ч	э. з. (96) и. п. (4)	— —	0,426
	197	2,84 ч	э. з.	—	0,152; 0,426
	197m	0,54 сек	и. п.	—	0,222 (40); 0,385 (90)
	198	5,3 ч	э. з. β^+ (~0,7)	— 2,4	0,412(90); 0,65** (40); 1,20 (21); 1,42 (24)
	198m	1,87 ч	э. з. (55) э. з. (45)	— —	0,283(30); 0,412 (45); 0,586 (35); 0,635 (35)
	199	7,4 ч	э. з.	—	0,158 (5); 0,208 (12); 0,247 (9); 0,355 (14)
	200	26,1 ч	э. з. β^+ (0,37)	— 1,44 (0,06); 1,07 (0,3)	0,368 (89); 0,579 (10); 1,21** (36)
	201	74 ч	э. з.	—	0,135 (2); 0,167(8)
	202	12,0 дней	э. з.	—	0,439(95); 0,522(0,1)
	203	—	29,50	—	—
	204	3,81 года	β^-(97,9) э. з.(2,1)	0,766 —	—
	205	—	70,50	—	—
	206	4,19 мин	β^-	1,52	—
	207	4,79 мин	β^-	1,44	0,897 (0,16)
	207m	1,3 сек	и. п.	—	0,35; 1,00
	208	3,10 мин	β^-	1,80	0,583 (86); 2,614 (100)
	209	2,2 мин	β^-	1,99	0,45 (100); 1,56(100)
	210	1,32 мин	β^-	2,3	0,296(80); 0,796 (100)
$_{82}$Pb	194	11 мин	э. з.	—	0,204
	195	17 мин	э. з.	—	0,39*
	196	37 мин	э. з.	—	0,192; 0,240; 0,253; 0,367; 0,503
	197m	42 мин	э. з. (80) и. п. (20)	— —	0,085; 0,222; 0,234; 0,385*
	198	2,4 ч	э. з.	—	0,173 (28); 0,290 (16); 0,38** (40)
	198m	25 мин	э. з.	—	—
	199	90 мин	э. з. β^+	— 2,8	0,353 (17); 0,367 (80)
	199m	12,2 мин	и. п.	—	0,424 (20)
	200	21,5 ч	э. з	—	0,108; 0,146*; 0,238; 0,26**; 0,290*; 0,450
	201	9,4 ч	э. з. β^+	— 0,55	0,330; 0,361; 0,406; 0,585; 0,766; 0,907
	201m	61 сек	и. п.	—	0,629(51)
	202	~ 3·10⁵ лет	э. з.	—	—
	202m	3,62 ч	и. п. (90) э. з. (10)	— —	0,422 (90); 0,659 (35); 0,787(45); 0,961 (90)
	203	52,1 ч	э. з.	—	0,279(81); 0,401 (6)
	203m	6,1 сек	и. п.	—	0,825 (70)
	204	—	1,40	—	—
	204m	66,9 мин	и. п	—	0,375 (93); 0,90* (160)
	206	5,0·10⁷ лет	э. з.	—	—
	206	—	25,1	—	—
	207	—	21,7	—	—
	207m	0,80 сек	и. п.	—	0,570 (99); 1,064 (83)
	208	—	52,3	—	—
	209	3,30 ч	β^-	0,635	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				грубо частиц	γ-излучение
$_{82}$Pb	210	20,4 года	β⁻	0,061	0,047 (4)
			α (1,7·10⁻⁶)	3,72	
	211	36,1 мин	β⁻	1,36	0,405 (3,4); 0,427 (1,6); 0,832 (3,4)
	212	10,64 ч	β⁻	0,58	0,239 (47); 0,300 (3,2)
	213	10,2 мин	β⁻	—	—
	214	26,8 мин	β⁻	1,03 (6); 0,67	0,242 (4); 0,295 (19); 0,352 (36)
$_{83}$Bi	198 [2]	11,6 мин	э.з.	—	0,20; 0,32; 0,56; 1,06
	199	24,4 мин	э.з. (>99)	—	—
			α (~0,01)	5,53	
	200	35 мин	э.з.	—	—
	201	1,85 ч	э.з.	—	—
	201m	62 мин	э.з. (>99)	—	—
			α (0,003)	5,28	
	202	95 мин	э.з.	—	0,422; 0,961
	203	11,8 ч	э.з	—	0,82** (79);
			β⁺	1,35	1,52** (31); 1,87* (30)
	204	11,2 ч	э.з	—	0,21**; 0,375; 0,671; 0,91**; 0,96; 1,21**
	205	15,31 дня	э.з.	—	0,703 (28); 0,968 (17);
			β⁺ (0,06)	0,96	1,766 (27)
	206	6,243 дня	э.з.	—	0,516 (46); 0,638 (84);
			β⁺ (8·10⁻⁴)	—	0,803 (99); 0,880 (72)
	207	30,2 года	э.з.	—	0,570 (98); 1,063 (77)
	208	3,68·10⁵ лет	э.з.	—	2,614 (100)
	209	—	100	—	—
	210	5,013 дня	β⁻ (>99)	1,160	—
			α (1,3·10⁻⁶)	4,69 (5·10⁻⁶); 4,65 (7·10⁻⁶)	
	210m	~2,6·10⁶ лет	α (99,6)	4,96 (58); 4,92 (36); 4,57 (6)	0,262 (45); 0,30 (23); 0,34; 0,61
			β⁻(0,4)	—	
	211	2,15 мин	α (>99)	6,62 (84); 6,28 (16)	0,351 (14)
			β⁻ (0,27)	—	
	212	60,60 мин	β⁻ (64)	2,25	0,04 (2); 0,288 (0,5)
			α (36)	6,09 (10); 6,05 (26)	0,46** (0,8); 0,727 (7); 0,785 (1,1); 1,620 (1,5)
	213	47 мин	β⁻ (97,8)	1,39	0,437
			α (2,2)	5,87	
	214	19,9 мин	β⁻ (>99)	3,26	0,609 (47); 0,769 (5); 0,935 (3); 1,120 (17); 1,238 (6); 1,378 (5)
			α (0,021)	5,51 (0,008); 5,45 (0,012)	
					1,40** (4); 1,509 (2); 1,728 (3); 1,764 (17); 1,848 (2); 2,117 (1); 2,204 (5); 2,445 (2)
	215	7 мин	β⁻	—	—
$_{84}$Po	194	0,5 сек	α	6,85	—
	195	3 сек	α	6,63	—
	195m	1,4 сек	α	6,72	—
	196	6 сек	α	6,58	—
	197	54 сек	α	6,30	—
	197m	25 сек	α	6,30	—
	198	1,7 мин	α (>34)	6,16	—
	199	5,6 мин	э.з. (97,3)	—	—
			α (2,7)	6,94	
	199m	4,2 мин	э.з.(74)	—	—
			α (26)	6,65	
	200	10,5 мин	э.з. (88)	—	—
			α (12)	6,86	
	201	15,1 мин	э.з. (98,9)	—	—
			α (1,1)	5,98	
	201m	8,9 мин	э.з. (97)	—	—
			α (3)	5,78	

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия $E_{\alpha\gamma}$ (относительная интенсивность, %)	
				группа частиц	γ-излучение
$_{85}$Po	202	45 мин	э.з. (98) α (2)	— 6,68	—
	203	42 мин	э.з. (>99) α (0,02)	— 6,49	—
	204	3,6 ч	э.з. (>99) α (0,6)	— 6,28	—
	205	1,8 ч	э.з. (>99) α (0,07)	— 6,25	—
	206	8,8 дня	э.з. (96) α (5)	— 5,22 (5)	0,286/35/; 0,328/20/; 0,51**/100/; 0,807/60/; 1,02**/85/
	207	5,7 ч	э.з. (99) α (~0,01) β⁺ (0,5)	— 5,11 1,14	0,25/5/; 0,36/4/; 0,41/13/; 0,74/36/; 0,96/8/; 1,15/6/; 1,37/4/; 2,06/1,6/***
	207m	2,8 сек	и.п.	—	0,28(42); 0,31(40); 0,82(100)
	208	2,93 года	α э.з. (~0,006)	5,11	0,285(0,003); 0,60**(0,006)
	209	103 года	α (>99) э.з. (~0,5)	4,88 (99)	0,261** (0,4); 0,91 (0,5)
	210	138,40 дня	α	5,305 (100)	0,803 (0,0011)
	211	0,52 сек	α	7,45 (99)	0,570 (0,5); 0,90(0,5)
	211m	25 сек	α	8,89 (7); 7,28 (91)	0,570 (92); 1,063 (77)
	212	$3,04 \cdot 10^{-7}$ сек	α	8,78 (100)	—
	212m	45 сек	α	11,65 (97)	0,57 (2); 2,61 (2,6)
	213	$4,2 \cdot 10^{-6}$ сек	α	8,38	—
	214	$1,64 \cdot 10^{-4}$ сек	α	7,69 (100)	—
	215	$1,778 \cdot 10^{-3}$ сек	α (>99) β⁻ (0,00025)	7,39 (100)	—
	216	0,145 сек	α	6,78 (100)	—
	217	<10 сек	α	6,55	—
	218	3,05 мин	α (>99) β⁻ (0,0185)	6,00 (100) —	— —
$_{85}$At	200	0,9 мин	α э.з.	6,47; 6,42 —	—
	201	1,5 мин	α э.з.	6,35 —	—
	202	3,0 мин	э.з. (88) α (12)	— 6,23 (4,3); 6,12(7,7)	—
	203	7,4 мин	э.з. (86) α (14)	— 6,09	—
	204	9,3 мин	э.з. (95,5) α (4,52)	— 6,95	—
	205	26,2 мин	э.з. (82) α (18)	— 5,90	—
	206	32,5 мин	α (~88) э.з. (~12)	6,70 (88) —	0,068(10)
	207	1,8 ч	э.з. (~90) α (~10)	— 5,76	—
	208	1,5 ч	э.з. (>99) α (0,5)	— 6,66	0,18(25); 0,66(100); 0,25
	209	5,5 ч	э.з. (~95) α (~5)	— 5,65 (5)	0,193 (23); 0,525 (62); 0,780 (94)
	210	8,3 ч	э.з. (>99) α (0,17)	5,52 (0,05); 5,44 (0,05); 5,36 (0,06)	0,245 (79); 1,180 (100); 1,436 (25); 1,483 (46); 1,509 (14)
	211	7,21 ч	α (40,9) э.з. (59,1)	5,868 —	0,67
	212	0,30 сек	α	7,86 (60); 7,60 (20)	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв, (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{85}$At	212 m	0,12 сек	α	7,88(20); 7,82(80)	—
	214	~2·10⁻⁴ сек	α	8,78(99)	—
	215	~10⁻⁴ сек	α	8,01	—
	216	~3·10⁻⁴ сек	α	7,90(97)	—
	217	0,0323 сек	α	7,07(>99)	—
	218	~2 сек	α(>99)	6,70(94); 6,55(6)	—
			β⁻(0,1)	—	
	219	0,9 мин	α(~97)	6,28	—
			β⁻(~3)	—	
$_{86}$Rn	201	3 сек	α	6,77	—
	202	13 сек	α	6,64	—
	203	45 сек	α	6,50	—
	203 m	28 сек	α	6,55	—
	204	75 сек	α	6,42	—
	205	1,8 мин	α	6,26	—
	206	6,5 мин	э.з. (35)	—	—
			α (65)	6,36	
	207	10 мин	э.з. (96)	—	—
			α (4)	6,15	
	208	23 мин	э.з. (80)	—	—
			α (20)	6,15	
	209	30 мин	э.з. (83)	—	—
			α (17)	6,04	
	210	2,42 ч	α (~96)	6,04	—
			э.з. (~4)	—	
	211	15 ч	э.з. (74)	—	0,445 (29); 0,680 (71);
			α (26)	6,85 (9); 5,78 (17)	0,865 (18); 0,946 (21); 1,13 (23); 1,37 (38)
	212	25 мин	α	6,27	—
	213	~10⁻⁶ сек	α	8,6	—
	215	4,5·10⁻⁴ сек	α	8,05	—
	217	6,4·10⁻⁴ сек	α	7,74	—
	218	0,035 сек	α	7,12 (99,8)	0,609 (0,2)
	219	4,00 сек	α	6,82 (81); 6,57 (11); 6,42 (8)	0,272 (9); 0,401 (6)
	220	55,3 сек	α	6,29(100)	0,55 (0,07)
	221	26 мин	β⁻ (~80)	—	—
			α (~20)	6,0	
	222	3,8229 дня	α	5,49(100)	0,510 (0,07)
	223	43 мин	β⁻ [2]	—	—
	224	1,9 ч	β⁻ [2]	—	—
$_{87}$Fr	204	2,0 сек	α	7,09	—
	205	3,7 сек	α	6,92	—
	206	15,8 сек	α	6,80	—
	207	19 сек	α	6,78	—
	208	57 сек	α	6,63	—
	209	50 сек	α	6,60	—
	210	2,5 мин	α	6,56	—
	211	3,1 мин	α	6,56	—
	212	19,3 мин	э.з. (56)	—	—
			α (44)	6,42 (16); 6,39 (17); 6,35 (11)	
	213	34 сек	α (>99)	6,78	—
			э.з. (0,5)	—	
	218	5·10⁻³ сек	α	7,85 (99)	—
	219	0,02 сек	α	7,31	—
	220	27,5 сек	α	6,68 (85); 6,64 (13)	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				альфа-частицы	γ-излучения
$_{87}$Fr	221	4,8 мин	α	6,34 (62); 6,12 (15)	0,218 (14)
	222	14,8 мин	β⁻ (≥ 99)	—	—
			α (0,01—0,1)	—	
	223	22 мин	β⁻	1,15	0,050 (40); 0,080 (13); 0,234 (4)
			α (~ 2·10⁻⁴)	5,34 [2]	
$_{86}$Rn	218	2,7 мин	α	6,91	—
	219	~10⁻⁸ сек	α	8,0	—
	220	0,023 сек	α	7,46 (99)	0,435 (1)
	221	30 сек	α	6,76 (30); 6,67 (20); 6,61 (34); 6,59(6)	0,091 (3,5); 0,151 (13); 0,175 (2)
	222	38 сек	α	6,56 (96)	0,320 (4)
	223	11,435 дня	α	5,75 (9); 5,71 (64); 5,61 (26); 5,54 (9)	0,149** (10); 0,270 (10); 0,33** (6)
	224	3,64 дня	α	5,66 (94); 5,45 (6)	0,241 (3,7)
	225	14,8 дня	β⁻	0,36	0,040 (33)
	226	3602 года	α	4,78 (95); 4,60 (6)	0,186 (4)
	227	41,2 мин	β⁻	1,31	0,291 (4); 0,498 (0,6)
	228	6,7 года	β⁻	0,05	—
	230	1 ч	β⁻	1,2	—
$_{85}$At	221	< 1 сек	α	7,63; 7,42 [2]	—
	222	5,6 сек	α	7,00 (93)	—
	223	2,2 мин	α (99)	6,66 (32); 6,65 (42); 6,57 (13)	0,052(0,2); 0,096 (0,2)
			э.з. (1)	—	
	224	2,9 ч	э.з. [~90]	—	0,132 (28);
			α (~10)	6,20 (3); 6,14 (3); 6,04 (3)	0,217 (62)
	225	10,0 дней	α	5,79* (10); 5,83(54); 5,79 (28)	0,069; 0,160; 0,187
	226	29 ч	β⁻ (~80)	1,2	0,158 (32); 0,185 (9); 0,230 (47); 0,253 (11)
			э.з. (~20)	—	
	227	21,6 года	β⁻ (99)	0,046	0,070; 0,166; 0,190
			α (1,4)	4,95*(1,2); 4,80*(0,18);	
	228	6,15 ч	β⁻	2,11	0,34** (15); 0,908 (2); 0,95** (20)
	229	65 мин	β⁻	—	—
	230	< 1 мин	β⁻	2,2	—
	231	15 сек	β⁻	2,1	0,165; 0,29; 0,39; 0,11
$_{90}$Th	223	0,9 сек	α	7,55	—
	224	1,05 сек	α	7,18 (79); 6,91 (19)	0,177 (9); 0,233 (0,4); 0,297 (0,3); 0,410 (0,8)
	225	8,0 мин	α (~90)	6,80 (8); 6,75 (6); 6,50 (12); 6,46 (39); 6,44 (13)	0,246 (5); 0,322 (27); 0,302 (6); 0,45 (1); 0,40 (1)
			э.з. (~10)	—	
	226	30,9 мин	α	6,34 (79); 6,29 (19)	0,111 (3,4); 0,242 (1,2)
	227	18,2 дня	α	6,04 (23); 5,98 (24); 5,76 (21); 5,72* (14)	0,050 (8); 0,237** (15); 0,31** (8)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				корпускулярная	γ-излучение
$_{90}$Th	228	1,910 года	α	5,43 (71); 5,34 (28)	0,084 (1,6); 0,132 (0,2); 0,167 (0,1); 0,214 (0,3)
	229	7340 лет	α	5,05 (7); 4,97**(10); 4,90 (11); 4,84 (58); 4,81 (11)	0,137**(~3); 0,200*(~10)
	230	$8,0\cdot10^4$ лет	α	4,68 (76); 4,62 (24)	0,068 (0,6), 0,142 (0,07)
	231	26,02 ч	β−	0,30	0,026 (2); 0,084**(10)
	232	$1,41\cdot10^{10}$ лет	100	—	—
	233	22,12 мин	α β−	4,01 (76); 3,95 (24) 1,23	0,020 (2,1); 0,037 (2,7); 0,171 (0,7); 0,403 (1)
	234	24,10 дня	β−	0,191	0,063*(3,5); 0,093*(4)
$_{91}$Pa	225	2,0 сек	α	7,25 [2]	—
	226	1,8 мин	α (74) э.з. (26)	6,86 (38); 6,82(34) —	—
	227	38,3 мин	α (~85)	6,47 (43); 6,42** (23); 6,40 (8); 6,36 (7)	0,065** (6); 0,110 (2)
	228	22 ч	э.з. (~10) э.з. (~98) α(~2)	— — 6,11** (1); 6,08 (0,4); 6,03 (0,2); 5,80 (0,2)	0,14 (3); 0,20 (9); 0,28 (5); 0,33 (16); 0,41 (13); 0,48 (32); 0,95 (93); 1,57 (7); 1,85 (4)***
	229	1,5 дня	э.з. (>> 99) α (0,25)	— 5,67(0,05); 5,62**(0,07); 5,58(0,10); 5,54 (0,03)	—
	230	17,7 дня	э.з. (69,6) β− (10,4) α (0,0032)	— 0,41 5,34; 5,32; 5,30 [2]	0,45** (18); 0,91** (24); 0,95 (30)
	231	$3,25\cdot10^4$ лет	α	5,06 (10); 5,02 (23); 5,01 (24); 4,95 (22); 4,73 (11)	0,027 (6); 0,29** (6)
	232	1,31 дня	β−	1,3 (0,7); 0,32	0,150 (12); 0,87**(51); 0,97 (40)
	233	27,0 дней	β−	0,568 (5); 0,257	0,31** (44)
	234	6,75 ч	β−	1,3 (<2); 1,13 (13); 0,53	0,100 (50); 0,126 (26); 0,70 (24); 0,80 (70)***
	234m	1,175 мин	β− (>>99) и. п. (0,13)	2,29 —	0,765 (0,30); 1,001 (0,60)
	235	23,7 мин	β−	1,4	—
	236	12 мин	β−	3,5	—
	237	39 мин	β−	2,3	0,090/50/; 0,146/40/; 0,265/55/; 0,330/40/; 0,46/100/; 0,76/60/; 0,87/100/; 0,92/100/
$_{92}$U	227	1,3 мин	α	6,8	—
	228	9,1 мин	α (≤ 95) э.з. (≤5)	6,69/70/; 6,60/29/ —	0,152 (0,2); 0,187 (0,3); 0,246 (0,4)
	229	58 мин	э.з. (~80) α (~20)	— 6,30 (13); 6,39 (4); 6,30 (3)	—
	230	20,8 дня	α	5,80 (67); 5,82 (32)	0,072 (0,54); 0,231 (0,18)
	231	4,3 дня	э. з. (>>99) α (0,0055)	— 5,46	0,084 (7); 0,218 (1)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				альфа-частицы	гамма-излучение
$_{92}U$	232	72 года	α	5,32 (68); 5,27 (32)	0,058 (0,21); 0,129 (0,092)
	233	$1,62 \cdot 10^5$ лет	α	4,82 (83); 4,78 (15)	0,029 /60/; 0,042 /310/; 0,055 /68/; 0,097 /100/; 0,164 /27/; 0,32* /43/
	234	$2,47 \cdot 10^5$ лет	α	4,77 (72); 4,72 (28)	0,053 (0,2)
	235	$7,1 \cdot 10^8$ лет	α	4,58* (8); 4,40 (57);	0,143 (11); 0,185 (54);
		—	0,7196	4,37 (18)	0,204 (5)
	235m	26,1 мин	и. п.	—	—
	236	$2,39 \cdot 10^7$ лет	α	4,49 (76); 4,44 (24)	—
	237	6,75 дня	β⁻	0,248	0,026 (2); 0,060 (36), 0,166 (2); 0,208 (23)
	238	$4,51 \cdot 10^9$ лет	99,276 α	4,20 (75); 4,15 (25)	—
	239	23,54 мин	β⁻	1,20	0,044 (4); 0,076 (51)
	240	14,1 ч	β⁻	0,36	—
$_{93}Np$	231	~50 мин	α	6,29	—
	232	~13 мин	э. з.	-	—
	233	36 мин	э. з. (>90) α (~10^{-3})	— 5,54	—
	234	4,40 дня	э. з. β⁺ (~0,05)	— 0,8	0,100; 0,23; 0,25; 0,45; 0,50; 0,75; 0,95; 1,21; 1,56***
	235	410 дней	э. з. (>99) α ($1,6 \cdot 10^{-3}$)	— 5,02	—
	236	22 ч	э. з. (51) β⁻ (49)	— 0,52	0,642; 0,686;
	237	$2,14 \cdot 10^6$ лет	α	4,78** (75); 4,65* (12)	0,030 (14); 0,060 (14); 0,145 (1)
	238	2,10 дня	β	1,26	1,012* (42)
	239	2,346 дня	β⁻	0,713 (11); 0,437	0,106 (23); 0,209 (4); 0,228 (12); 0,278 (14)
	240	63 мин	β⁻	0,89	0,16; 0,25; 0,44; 0,56; 0,60; 0,92; 1,00; 1,16
	240m	7,3 мин	β⁻	2,16	0,56 (21); 0,60 (13); 0,92** (3); 1,5** (8)
	241	16 мин	β⁻	1,3	0,14; 0,18 [2]
$_{94}Pu$	232	36 мин	α (>2)	6,59	—
			э. з. (<98)	—	
	233	20 мин	э. з. (>99) α (0,1)	— 6,31	—
	234	9 ч	э. з. (94) α (6)	— 6,20 (4); 6,15 (1,9)	
	235	26 мин	э. з. (>99) α (0,003)	— 5,86	—
	236	2,85 года	α	5,77 (69); 5,72 (31)	0,048 (0,31); 0,109 (0,012)
	237	45,6 дня	э. з. (>99) α (0,0033)	— 5,65 /21/; 5,57 /79/	0,060 (5)
	237m	0,18 сек	и. п.	—	0,145 (2)
	238	86,4 года	α	5,50 (72); 5,46 (28)	0,099 ($8 \cdot 10^{-2}$); 0,150 ($1 \cdot 10^{-3}$)
	239	24390 лет	α	5,16* (88); 5,11 (11)	0,039 (0,007); 0,052 (0,020); 0,129 (0,006); 0,375 (0,0012); 0,414 (0,0012)
	240	6560 лет	α	5,17 (76); 5,12 (24)	0,65** ($2 \cdot 10^{-3}$)
	241	13,2 года	β⁻ (>99) α ($2,3 \cdot 10^{-3}$)	0,021 4,90 (0,0019) 4,85 (0,0001)	0,145 ($1,6 \cdot 10^{-4}$)
	242	$3,79 \cdot 10^5$ лет	α	4,90 (76); 4,86 (24)	—
	243	4,98 ч	β⁻	0,68	0,084 (21); 0,381 (0,7)
	244	~$7,6 \cdot 10^7$ лет	α	4,58; 4,54 [2]	—
	245 [2]	10,48 ч	β⁻	0,9; 1,2	0,33; 0,56
	246	10,85 дня	β⁻	0,33 (10); 0,15	0,044 (30); 0,180 (10); 0,224 (25)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				группа частиц	γ-излучение
$_{95}$Am	237	~1,3 ч	э. з. (>99) α (0,005)	— 6,02	—
	238	1,9 ч	э. з.	—	0,36 (12); 0,58 (29); 0,99* (80); 1,36 (76)
	239	12,1 ч	э. з. (>99) α (0,005)	— 5,78	0,209 (5); 0,228* (18); 0,278 (17)
	240	51,0 ч	э. з.	—	0,90 (23); 1,00 (77)
	241	458 лет	α	5,49 (85); 5,44 (13)	0,060 (36); 0,101** (0,04)
	242	16,01 ч	β⁻ (84) э. з. (16)	0,67 —	—
	242m	152 года	и. п. (>99) α (0,48)	— 5,21 (0,41)	0,049 (0,20); 0,087 (0,096)
	243	7,95·10³ лет	α	5,28 (87); 5,23 (11,5)	0,044 (4); 0,075 (50)
	244	10,1 ч	β⁻	0,337	0,039 (5); 0,154 (19); 0,746 (66); 0,900 (25)
	244m	26 мин	β⁻ (>99) э. з. (0,039)	1,50 —	—
	245	2,07 ч	β⁻	0,91	0,253
	246	25 мин	β⁻	2,10 (7); 1,60	0,739 (29); 1,07** (65)
$_{96}$Cm	238	2,5 ч	э. з. (<90) α (>10)	— 6,51	—
	239	2,9 ч	э. з.	—	0,168
	240	26,8 дня 7,9·10³ лет	α с. д.	6,29 (72); 6,25 (28) —	—
	241	35 дней	э. з. (99) α (1,0)	— 6,94	0,475 (96); 0,60 —
	242	162,5 дня	α	6,12 (74); 6,07 (26)	0,044 (0,041); 0,102 (4·10⁻³);
		7,2·10⁶ лет	с. д.	—	0,168 (2,6·10⁻³)
	243	32 года	α	6,06* (6); 5,99* (6); 5,79 (73); 5,74 (11,5)	0,209 (4); 0,228 (12); 0,278 (14)
	244	17,6 лет	э. з. (0,3) α	— 5,81 (77); 5,77 (23)	0,043 (0,02); 0,100 (0,0015); 0,150 (0,0013)
		1,31·10⁷ лет	с. д.	—	
	245	9,3·10³ лет	α	5,36 (80); 5,31 (7)	0,13 (5); 0,173 (14)
	246	5,5·10³ лет	α	5,39 (81); 5,34 (19)	—
		1,7·10⁶ лет	с. д.	—	
	247	1,64·10⁷ лет	α (2)	—	—
	248	4,7·10⁵ лет	α (69)	5,06 (82); 5,04 (18)	—
		4,6·10⁴ лет	с. д. (11)	—	
	249	64 мин	β⁻	0,9	—
	250	1,7·10⁴ лет	с. д.	—	—
$_{97}$Bk	243	4,6 ч	э. з. (>99) α (0,16)	— 6,70 (0,023); 6,72 (0,019); 6,57 (0,036); 6,64 (0,029); 6,21 (0,020)	0,765; 0,84; 0,946
	244	4,4 ч	э. з. (>99) α (0,006)	— 5,62 (0,003); 6,67 (0,003)	0,218 (100); 0,892 (68)
	245	4,98 дня	э. з. (>99) α (0,11)	— 6,36 (0,018); 6,32 (0,017); 6,15 (0,021); 6,12 (0,016); 6,89 (0,024)	0,253 (31); 0,39* (3)
	246	1,8 дня	э. з.	—	0,800 (40); 1,07** (12)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{97}Bk$	247	$1,4\cdot10^{3}$ лет	α	5,68 (37); 5,52 (58)	0,084 (40); 0,27 (30)
	248	16 ч	β^- (70)	0,65	—
			э.з. (30)	—	
	249	314 дней	β^- (>99)	0,125	0,32* ($3\cdot10^{-5}$)
			α (0,0022)	5,42 (0,0015)	
		$6\cdot10^{3}$ лет	с.д.	—	
	250	128,3 мин	β^-	1,76 (11); 0,73	0,990 (47); 1,032 (39)
$_{98}Cf$	244	25 мин	α	7,16	—
	245	44 мин	э.з. (70)	—	—
			α (30)	7,12	
	246	35,7 ч	α	6,76 (76); 6,72 (22)	—
		$2,1\cdot10^{3}$ лет	с.д.		—
	247	2,5 ч	э.з.	—	0,295 (1); 0,417; 0,460
	248	350 дней	α	6,27 (82); 6,22 (18)	—
		$\geq1,5\cdot10^{4}$ лет	с.д.	—	
	249	360 лет	α	5,81 (84)	0,333 (15); 0,388 (72)
		$1,5\cdot10^{4}$ лет	с.д.	—	
	250	13,2 года	α	6,03 (83); 5,99 (17)	—
		$1,7\cdot10^{4}$ лет	с.д.	—	
	251	~900 лет	α	5,85 (45); 5,67 (55)	0,18
	252	2,646 года	α (96,9)	6,12 (82); 6,08 (18)	—
		85 лет	с. д. (3,1)	—	
	253	17,6 дня	β^- (>99)	0,27	—
			α (0,31)	5,98	
	254	60,5 дня	с.д. (>99)	—	—
			α (~0,2)	5,84	
$_{99}Es$	245	1,3 мин	α (17)	7,70	—
			э.з. (83)	—	
	246	7,3 мин	α (10)	7,33	—
			э.з. (90)	—	
	247	5,0 мин	α (~7)	7,33	—
			э.з. (~93)	—	
	248	26 мин	э.з. (>99)	—	—
			α (~0,3)	6,88	
	249	2 ч	э.з. (>99)	—	—
			α (0,13)	6,77	
	250	8 ч	э.з.	—	—
	251	1,6 дня	э.з. (>99)	—	
			α (0,53)	6,49	
	252	~140 дней	α	6,64 (82); 6,59 (13)	0,228 (0,25); 0,278 (0,21); 0,40** (1,1)
	253	20,47 дней	α	6,64 (90)	0,387** (0,06)
		$6,4\cdot10^{3}$ лет	с.д.	—	
	254	276 дней	α	6,44 (93)	0,060 (2); 0,27** (0,12); 0,31* (0,22)
		$7\cdot10^{3}$ лет	с. д.	—	
	254m	39,3 ч	β^+ (>99)	1,13 (25); 0,43	0,65 (31); 0,99** (38)
			э.з. (0,68)	—	
		>10 лет	с.д.	—	
	255	38,3 дня	β^- (91,5)	—	—
			α (8,5)	6,31	
		>170 лет	с.д.	—	
$_{100}Fm$	245 [2]	4,2 сек	α	8,15	—
	246 [2]	1,2 сек	α	8,24	—
			с.д.	—	
	247 [2]	9,2 сек	α	8,18	—
	247 [2]	35 сек	α	7,87; 7,93	—
	248 [2]	38 сек	α	7,87; 7,83	—
			с.д.		—
	249 [2]	2,6 мин	α	7,53	—
			э.з.	—	

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{100}$Fm	250	30 лет	α	7,42	—
	251	7 ч	э.з. (~99) α (~1)	— 6,83 [2]	0,41 [2]
	252	22,7 ч >8 лет	α с.д.	7,05 —	—
	253	3,0 дня	э.з. (89) α (11)	— 6,95 (9); 6,91 (2)	0,27 [2]
	254	3,24 ч 246 дней	α (>99) с.д. (0,055)	7,20 (82); 7,16 (17) —	—
	255	20,1 ч $1,10^3$ лет	α с.д.	7,03 (93) —	0,059* (0,9); 0,061* (1,1)
	256	2,7 ч	с.д. (97) α (3)	— 6,86	—
	257	80 дней 100 лет	α с.д.	6,53 (94) —	0,180 (8); 0,242 (10)
$_{101}$Md	252 [2]	~8 мин	э.з.	—	—
	255	0,6 ч	э.з. (90) α (10)	— 7,34	—
	256	1,5 ч	э.з. (97) α (3)	— 7,18	—
	257 [2]	4,8 ч	э.з. (~92) α (~8)	— 7,08	—
	258 [2]	54 дня	α	6,73; 6,78	—
$_{102}$(No)*1	251	0,8 сек	α	8,682 (20); 8,58 (80)	—
	252	2,1 сек	α (~70) с.д. (~30)	8,41 —	—
	253	100 сек	α	8,02	—
	254	55 сек	α	8,10	—
	255	180 сек	α	8,11	—
	256	2,7 сек	α с.д. (0,5)	8,43 —	—
	257	20 сек	α	8,27 (50); 8,229 (50)	—
$_{103}$(Lr)*1	256 [2]	35 сек	α	8,35—8,60	—
	257? [2]	35 сек	α	8,50—8,60	—
	258/259 [2]	8 сек	α	~8,0	—
$_{104}$Ku	260	0,3 сек	с.д.	—	—

*1 Названия не заменяются официальными.

Таблица 37.2

Эталонные энергии γ-квантов в диапазоне энергий E_γ от ~ 12 до 3450 кэв [1]

Нуклид	Период полураспада	E_γ, кэв
^{241}Am	458 лет	11,887±0,004
^{241}Am	458 лет	13,9±0,1
^{57}Co	270 дней	14,36±0,05
^{241}Am	458 лет	17,8±0,1
^{241}Am	458 лет	20,8±0,1
^{109}Cd	453 дня	22,1±0,1
^{109}Cd	453 дня	25,0±0,1
^{241}Am	458 лет	26,348±0,010
^{137}Cs	30,0 лет	32,1±0,1
^{137}Cs	30,0 лет	36,5±0,1
^{241}Am	458 лет	59,543±0,015
^{203}Hg	46,9 дня	70,833±0,001
^{131}I	8,05 дня	80,164±0,008
^{203}Hg	46,9 дня	82,5±0,2
^{203}Hg	46,9 дня	84,9±0,1
^{109}Cd	453 дня	87,7±0,2
^{204}Tl	115 дней	100,104±0,002
^{177m}Lu	155 дней	105,35±0,02
^{177m}Lu	155 дней	112,97±0,02
^{177m}Lu	155 дней	121,56±0,03
^{57}Co	270 дней	121,97±0,05
^{177m}Lu	155 дней	128,46±0,02
^{57}Co	270 дней	136,33±0,04
^{51}Cr	28 дня	145,43±0,02
^{182}Ta	115 дней	152,436±0,003
^{177m}Lu	155 дней	153,25±0,04
^{182}Ta	115 дней	156,387±0,003
^{139}Ce	140 дней	165,84±0,03
^{182}Ta	115 дней	179,393±0,004
^{177m}Lu	155 дней	204,08±0,06
^{198}Au	74,2 дня	205,792±0,014
^{177m}Lu	155 дней	208,34±0,06
^{182}Ta	115 дней	222,109±0,005
^{177m}Lu	155 дней	228,44±0,06
^{182}Ta	115 дней	229,322±0,006
^{212}Pb	10,6 час	238,61±0,01
^{214}Pb	26,8 мин	241,924±0,030
^{182}Ta	115 дней	264,072±0,009
^{203}Hg	46,9 дня	279,17±0,02
^{177m}Lu	155 дней	281,78±0,07
^{131}I	8,05 дня	284,301±0,010
^{214}Pb	26,8 мин	295,217±0,030
^{198}Au	74,2 дня	295,958±0,009
^{192}Ir	74,2 дня	308,429±0,010
^{192}Ir	74,2 дня	316,485±0,010
^{51}Cr	27,8 дня	320,09±0,06
^{214}Pb	26,8 мин	351,992±0,062
^{131}I	8,05 дня	364,491±0,015
^{198}Au	2,699 дня	411,796±0,009
^{192}Ir	74,2 дня	468,053±0,014
^{7}Be	53 дня	477,57±0,05
n, e^{+}	*	511,006±0,002
^{207}Bi	30 лет	569,63±0,06
^{208}Tl	3,1 мин	583,139±0,023
^{192}Ir	74,2 дня	588,557±0,017

Нуклид	Период полураспада	E_γ, кэв
^{192}Ir	74,2 дня	604,385±0,017
^{214}Bi	19,8 мин	609,37±0,16
^{192}Ir	74,2 дня	612,436±0,017
^{131}I	8,05 дня	636,90±0,23
^{110m}Ag	253 дня	657,61±0,16
^{137}Cs	30,0 лет	661,595±0,070
^{110m}Ag	253 дня	677,36±0,20
^{110m}Ag	253 дня	686,80±0,25
^{110m}Ag	253 дня	706,38±0,25
^{131}I	8,05 дня	722,91±0,05
^{110m}Ag	253 дня	743,90±0,25
^{110m}Ag	253 дня	763,77±0,20
^{58}Co	71,3 дня	810,46±0,10
^{110m}Ag	253 дня	817,87±0,30
^{54}Mn	303 дня	834,85±0,10
^{60}Co	77 дней	846,77±0,06
^{110m}Ag	253 дня	884,46±0,25
^{46}Sc	83,9 дня	889,18±0,10
^{88}Y	108 дней	897,96±0,10
^{110m}Ag	253 дня	937,2±0,3
^{207}Bi	30 лет	1063,08±0,08
^{95}Zr	245 дней	1115,44±0,01
^{46}Sc	83,9 дня	1120,41±0,10
^{214}Bi	19,8 мин	1120,42±0,46
^{182}Ta	115 дней	1121,28±0,12
^{60}Co	5,26 года	1173,226±0,040
^{182}Ta	115 дней	1189,03±0,20
^{182}Ta	115 дней	1221,42±0,10
^{56}Co	77 дней	1238,05±0,11
^{22}Na	2,60 года	1274,53±0,10
^{60}Co	5,26 года	1332,463±0,046
^{24}Na	15,0 час	1368,526±0,044
^{116m}Ag	253 дня	1475,5±0,4
^{116m}Ag	253 дня	1504,6±0,5
^{116m}Ag	253 дня	1561,8±0,4
^{56}Co	71,3 дня	1674,9±0,3
^{214}Bi	19,8 мин	1764,45±0,22
^{207}Bi	30 лет	1769,71±0,13
^{56}Co	77 дней	1771,64±0,46
^{88}Y	108 дней	1836,06±0,07
^{56}Co	77 дней	2035,13±0,26
^{214}Bi	19,8 мин	2204,20±0,4
^{56}Co	77 дней	2598,75±0,35
^{208}Tl	3,1 мин	2614,47±0,10
^{24}Na	15,0 час	2753,92±0,12
^{56}Co	77 дней	3202,60±0,50
^{56}Co	77 дней	3254,00±0,35
^{56}Co	77 дней	3273,6±0,4
^{56}Co	77 дней	3452,6±0,5

* Аннигиляционное излучение, сопровождающее позитронный распад нуклидов.

37.3. ЭТАЛОННЫЕ ГРУППЫ α-ЧАСТИЦ

Таблица 37.3

Эталонные группы α-частиц в диапазоне энергий от 2,5 до 7 *Мэв* [1]

Нуклид	Период полураспада	Энергия интенсивных α-групп, *Мэв*	Относительная интенсивность, %
^{109}Sn	$7\cdot10^{9}$ лет	2,46 ± 0,02	100
^{140}Ce	84 года	3,18 ± 0,01	100
^{144}Gd	$2,1\cdot10^{7}$ лет	2,73 ± 0,01	100
^{224}Th	$1,41\cdot10^{10}$ лет	4,011 ± 0,005	77
^{234}U	$4,5\cdot10^{8}$ лет	4,200 ± 0,005	77
^{235}U[6]	$7,1\cdot10^{8}$ лет	4,550 ± 0,003	3
		4,438 ± 0,003	3
		4,394 ± 0,002	62
		4,214 ± 0,003	5,5
^{238}U	$2,39\cdot10^{9}$ лет	4,196 ± 0,002	74
^{232}Th	$8,0\cdot10^{9}$ лет	4,6840 ± 0,0015	76
		4,6176 ± 0,0015	24
^{233}U	$2,4\cdot10^{5}$ лет	4,7736 ± 0,0020	72
^{237}Np[3]	$2,14\cdot10^{6}$ лет	4,787 ± 0,002	61
^{233}U[3]	$1,62\cdot10^{5}$ лет	4,8236 ± 0,0012	84
		4,7829 ± 0,0012	13
^{239}Pu[3]	$5,6\cdot10^{4}$ лет	4,890 ± 0,0010	83
		4,853 ± 0,0015	12
^{240}Pu[3]	$3,73\cdot10^{6}$ лет	4,900 ± 0,002	74
		4,856 ± 0,002	26
^{241}Pu[3]	$3,25\cdot10^{4}$ лет	5,057 ± 0,001	11
		5,013 ± 0,001	25
		4,950 ± 0,001	23
^{238}Pu[3]	$2,44\cdot10^{4}$ лет	5,5556 ± 0,0006	73
		5,1433 ± 0,0008	15
		5,1055 ± 0,0008	11
^{242}Pu[3]	$6,56\cdot10^{5}$ лет	5,1677 ± 0,0007	76
		5,1233 ± 0,0007	24
^{243}Am[3]	$7,50\cdot10^{3}$ лет	5,270 ± 0,001	88
		5,235 ± 0,001	11
^{241}Am[3]	458 лет	5,484 ± 0,001	85
		5,442 ± 0,001	13
^{238}[Pu] [3]	86,4 года	5,499 ± 0,001	72
		5,455 ± 0,001	28
^{245}Cm[4]	32 года	5,785 ± 0,001	73
		5,742 ± 0,001	11
^{244}Cm[4]	17,6 года	5,805 ± 0,001	77
		5,763 ± 0,001	23
^{250}Cf[4]	13,2 года	6,0308 ± 0,0005	83
		5,9891 ± 0,0006	15
^{248}Cm[4]	162,5 дня	6,1129 ± 0,0003	74
		6,0695 ± 0,0005	26
^{252}Cf[4]	2,646 года	6,1183 ± 0,0005	84
		6,0757 ± 0,0005	16
^{246}Cf[4]	300 лет	6,1940 ± 0,0007	2
		5,810 ± 0,001	84
		5,760 ± 0,001	4
^{253}Es[4]	20,47 дня	6,631 ± 0,002	91
^{255}Fm[4]	20,1 часа	7,016 ± 0,002	93

37.4. КВАНТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДЕР

В табл. 37.4 приведены экспериментально определенные значения спинов I, магнитных моментов μ и электрических квадрупольных моментов Q основных и некоторых долгоживущих метастабильных (помечены индексом m) состояний [6] для четно-нечетных, нечетно-нечетных и нечетно-нечетных ядер. В таблицу не включены четно-четные ядра, у которых значения спинов и магнитных моментов основных состояний равны нулю. Значения I, μ и Q даны в единицах $h/2\pi$ (где h — постоянная Планка), в ядерных магнетонах и барнах соответственно. Значения спинов в круглых скобках получены косвенно.

Таблица 37.4

Спины, магнитные моменты и электрические квадрупольные моменты ядер

Элемент	A	I, $h/2\pi$	μ	Q, барн
$_{1}$n	1	1/2	−1,9131	—
$_{1}$H	1	1/2	+2,79278	
	2	1	+0,85742	+0,0028
	3	1/2	+2,9789	—
$_{2}$He	3	1/2	−2,1276	
$_{3}$Li	6	1	+0,82202	−0,0008
	7	3/2	+3,2564	−0,04
	8	(2)	+1,6532	—
$_{4}$Be	9	3/2	−1,1776	+0,05
$_{5}$B	10	3	+1,8007	+0,08
	11	3/2	+2,6885	+0,04
	12	(1)	+1,002	—
$_{6}$C	11	3/2	+1,03	±0,031
	13	1/2	+0,7024	
$_{7}$N	12	(1)	+0,46	—
	13	1/2	±0,3221	—
	14	1	+0,4036	+0,01
	15	1/2	−0,2831	—
$_{8}$O	15	1/2	±0,7189	
	17	5/2	−1,8937	−0,026
$_{9}$F	17	(5/2)	+4,722	—
	19	1/2	+2,6288	—
	20	(2)	+2,094	—
$_{10}$Ne	19	1/2	−1,887	—
	21	3/2	−0,6618	+0,09
	23	(5/2)	−1,08	—
$_{11}$Na	21	3/2	+2,386	—
	22	3	+1,746	
	23	3/2	+2,2175	+0,14
	24	4	+1,690	
$_{12}$Mg	25	5/2	−0,8551	+0,22
$_{13}$Al	27	5/2	±3,6414	+0,15
$_{14}$Si	29	1/2	−0,5553	—

Элемент	A	I, h/2π	μ	Q, барн
$_{15}$P	30	1	—	—
	31	1/2	+1,1317	—
	32	1	—0,2525	—
$_{16}$S	33	3/2	+0,6433	—0,055
	35	3/2	+1,00	+0,04
$_{17}$Cl	33	3/2	+0,62183	— 0,079
	35	2	+1,266	— 0,017
	37	3/2	+0,68411	— 0,062
$_{18}$Ar	36	(3/2)	+0,68	—
	37	3/2	+0,95	—
	39	7/2	—1,3	—
$_{19}$K	37	3/2	+0,204	—
	38	3	+1,374	—
	39	3/2	+0,3914	+0,055
	40	4	—1,298	—0,07
	41	3/2	+0,2149	+0,067
	42	2	—1,141	—
	43	3/2	+0,163	—
	45	3/2	±0,173	—
$_{20}$Ca	41	7/2	—1,595	—
	43	7/2	—1,317	—
$_{21}$Sc	43	7/2	+4,62	—0,26
	44	2	+2,56	+0,10
	44m	6	+3,88	—0,19
	45	7/2	+4,7504	—0,22
	46	4	+3,03	+0,12
	47	7/2	+5,34	0,22
	48	6	—	—
$_{22}$Ti	45	7/2	+0,055	~ ±0,02
	47	5/2	—0,7883	+0,29
	49	7/2	—1,1039	+0,24
$_{23}$V	47	3/2	—	—
	48	4	—	—
	49	7/2	+4,5	—
	50	6	+3,3470	±0,06
	51	7/2	+5,149	—0,05
$_{24}$Cr	49	5/2	±0,48	—
	51	7/2	±0,94	—
	53	3/2	—0,4744	+0,03
$_{25}$Mn	51	5/2	±3,57	—
	52	6	±3,06	—
	52m	2	+0,0076	—
	53	7/2	±5,01	—
	54	3	+3,28	—
	55	5/2	+3,444	+0,4
	56	3	+3,218	—

Элемент	A	I, h/2π	μ	Q, барн
$_{26}$Fe	57	1/2	+0,0902	—
	57m	(3/2)	—0,1547	+0,2
	59	3/2	—	—
$_{27}$Co	56	4	±3,83	—
	57	7/2	+4,62	—
	58	2	+4,03	—
	59	7/2	+4,62	+0,4
	60	5	+3,75	—
	60m	2	—	—
$_{28}$Ni	61	3/2	—0,7487	+0,16
	61m	(5/2)	+0,42	—
$_{29}$Cu	60	2	+1,22	—
	61	3/2	+2,13	—
	62	1	—0,38	—
	63	3/2	+2,223	—0,150
	64	1	—0,216	—
	65	3/2	+2,382	—0,195
	66	1	±0,283	—
$_{30}$Zn	65	3/2	—0,262	+0,31
	66	5/2	+0,769	—0,026
	67	5/2	+0,8751	+0,17
$_{31}$Ga	66	0	—	—
	67	3/2	+1,850	+0,22
	68	1	±0,0117	±0,031
	69	3/2	+2,016	+0,19
	70m	1	—	—
	71	3/2	+2,562	+0,12
	72	3	—0,1322	+0,79
$_{32}$Ge	71	1/2	+0,546	—
	73	9/2	—0,8792	—0,26
	75	1/2	±0,51	—
$_{33}$As	70	4	—	—
	72	2	—	—
	75	3/2	+1,439	+0,29
	76	2	—0,905	—
$_{34}$Se	75	5/2	—	+1,0
	77	1/2	+0,534	—
	79	7/2	—1,02	+0,8
$_{35}$Br	76	1	+0,548	±0,25
	77	3/2	—	—
	79	3/2	+2,106	+0,31
	80	1	±0,514	±0,18
	80m	5	+1,317	+0,71
	81	3/2	+2,270	+0,26
	82	5	+1,626	+0,70

Элемент	A	I, ħ/2π	μ	Q, барн
$_{36}$Kr	83	9/2	−0,970	+0,26
	83m	(7/2)	—	+0,44
	85	9/2	±1,005	+0,43
$_{37}$Rb	81	3/2	+2,05	—
	81m	9/2	—	—
	82m	5	+1,643	—
	83	5/2	+1,4	—
	84	2	−1,32	—
	85	5/2	+1,3534	+0,26
	86	2	−1,691	—
	87	3/2	+2,7500	+0,12
	89	2	+0,51	—
$_{38}$Sr	87	9/2	−1,093	+0,3
$_{39}$Y	89	1/2	−0,1373	—
	90	2	−1,63	−0,15
	91	1/2	±0,164	—
$_{40}$Zr	91	5/2	−1,303	—
$_{41}$Nb	93	9/2	+6,167	−0,22
$_{42}$Mo	95	5/2	−0,9133	±0,12
	97	5/2	−0,9325	+1,1
$_{43}$Tc	99	9/2	+5,68	+0,3
$_{44}$Ru	99	5/2	−0,63	—
	99m	3/2	−0,29	−0,1
	101	5/2	+0,09	—
$_{45}$Rh	103	1/2	−0,0883	—
$_{46}$Pd	105	5/2	−0,642	+0,6
$_{47}$Ag	102	5	—	—
	102m	2	+4	—
	103	7/2	+4,4	—
	104	5	+4,0	—
	104m	2	+3,7	—
	105	1/2	+0,101	—
	106	1	+2,9	—
	106m	6	—	—
	107	1/2	−0,1135	—
	108	1	+2,80	—
	109	1/2	−0,1305	—
	109m	7/2	±4,3	—
	110	1	+2,85	—
	110m	6	+3,604	—
	111	1/2	−0,145	—
	112	2	+0,064	—
	113	1/2	+0,159	—

Элемент	A	I, ħ/2π	μ	Q, барн
$_{48}$Cd	105	5/2	−0,74	+0,5
	107	5/2	−0,6144	+0,8
	109	5/2	−0,8270	+0,8
	111	1/2	−0,5943	—
	111m	11/2	−1,11	−1,0
	113	1/2	−0,6217	—
	113m	11/2	−1,087	−0,8
	115	1/2	−0,6477	—
	115m	11/2	−1,040	−0,6
$_{49}$In	109	9/2	+5,53	+0,86
	110	2	+4,36	+0,36
	110m	7	±10,4	±0,21
	111	9/2	+5,53	+0,85
	112	1	+2,81	+0,089
	112m	4	—	—
	113	9/2	+5,523	+0,82
	114m	5	+4,7	—
	115	9/2	+5,534	+0,83
	115m	1/2	−0,244	—
	116m	5	+4,3	—
	117	9/2	—	—
	117m	1/2	−0,2515	—
$_{50}$Sn	113	1/2	±0,88	—
	115	1/2	−0,918	—
	117	1/2	−1,000	—
	119	1/2	−1,046	—
	119m	(3/2)	+0,68	−0,09
	121	3/2	+0,70	±0,06
$_{51}$Sb	115	5/2	+3,46	−0,27
	116	3	—	—
	117	5/2	+2,67	−0,4
	118m	1	±2,5	—
	119	5/2	+3,45	−0,30
	120	1	±2,3	—
	121	5/2	+3,359	−0,29
	121m	(7/2)	+2,51	−0,4
	122	2	−1,90	+0,69
	123	7/2	+2,547	−0,37
	124	3	—	—
	125	(7/2)	±2,6	—
$_{52}$Te	117	1/2	—	—
	119	1/2	+0,25	—
	119m	11/2	—	—
	123	1/2	−0,7359	—
	125	1/2	−0,8871	—
	125m	11/2	+0,60	−0,2
$_{53}$I	123	5/2	—	—
	124	2	—	—
	125	5/2	+3,0	−0,89
	126	2	—	—
	127	5/2	+2,808	−0,79
	127m	(7/2)	—	−0,71
	128	1	—	—
	129	7/2	+2,617	−0,76
	129m	(5/2)	+2,8	−0,68

Элемент	A	I, ħ/2π	μ	Q, барн
$_{53}$I	130	5	—	—
	131	7/2	+2,74	+0,40
	132	4	±3,08	±0,08
	133	7/2	+2,84	−0,26
	135	7/2	—	—
$_{54}$Xe	129	1/2	−0,7768	—
	129 m	(3/2)	—	+0,41
	131	3/2	+0,6908	−0,12
$_{55}$Cs	126	1/2	+1,41	—
	127	1/2	+1,46	—
	129	1/2	+1,479	—
	130	1	+1,4	—
	131	5/2	+3,54	−0,57
	132	2	+2,22	+0,46
	133	7/2	+2,578	−0,003
	134	4	+2,990	+0,36
	134 m	8	+1,095	—
	135	7/2	+2,729	+0,044
	136	5	+3,70	—
	137	7/2	+2,839	+0,045
	138	3	±0,5	—
$_{56}$Ba	136	3/2	+0,8365	+0,18
	137	3/2	+0,9357	+0,26
$_{57}$La	138	5	+3,707	+0,8
	139	7/2	+2,778	+0,22
	140	3	—	—
$_{58}$Ce	141	7/2	±0,9	—
	143	3/2	—	—
$_{59}$Pr	141	5/2	+4,3	−0,07
	142	2	±0,25	+0,03
	143	7/2	—	—
$_{60}$Nd	141	5/2	—	—
	143	7/2	−1,08	−0,46
	145	7/2	−0,66	−0,25
	147	5/2	±0,69	—
	149	5/2	—	—
$_{61}$Pm	147	7/2	+2,7	+0,7
	148	1	+2,0	+0,2
	149	7/2	—	—
	151	5/2	±1,6	±1,9
$_{62}$Sm	147	7/2	−0,813	−0,20
	149	7/2	−0,670	+0,058
	153	3/2	−0,022	+1,0
	155	3/2	—	±0,9
$_{63}$Eu	151	5/2	+3,464	+1,1
	152	3	±1,924	±3,0

Элемент	A	I, ħ/2π	μ	Q, барн
$_{63}$Eu	152 m	0	—	—
	153	5/2	+1,530	+2,8
	154	3	+2,000	—
$_{64}$Gd	153	3/2	—	—
	155	3/2	−0,254	+1,3
	157	3/2	−0,339	+1,7
	159	3/2	—	—
$_{65}$Tb	157	(3/2)	±2,0	—
	158	3	±1,74	+2,7
	159	3/2	±1,99	+1,3
	160	3	+1,66	+3,0
	161	3/2	—	—
$_{66}$Dy	159	3/2	—	—
	161	5/2	−0,46	+2,3
	163	5/2	+0,64	+2,5
	165	7/2	±0,50	—
$_{67}$Ho	161	7/2	—	—
	165	7/2	+4,19	+3,0
	166	0	—	—
$_{68}$Er	163	5/2	+1,1	+3,9
	165	5/2	±0,65	+2,2
	167	7/2	−0,164	+2,6
	169	1/2	+0,510	—
	171	5/2	±0,70	±2,3
$_{69}$Tm	163	1/2	±0,08	—
	165	1/2	—	—
	166	2	±0,047	±4,5
	167	1/2	—	—
	169	1/2	−0,232	—
	170	1	±0,245	±0,69
	171	1/2	+0,229	—
$_{70}$Yb	171	1/2	+0,4919	—
	173	5/2	−0,6770	+5,0
$_{71}$Lu	169	7/2	—	—
	170	0	—	—
	171	7/2	—	—
	175	7/2	+2,23	+5,6
	176	7	+3,18	+8,0
	176 m	1	+0,318	−2,3
	177	7/2	+2,24	+5,4
$_{72}$Hf	177	7/2	+0,61	+3
	179	9/2	−0,47	+5
$_{73}$Ta	181	7/2	+2,36	+4,2
	181 m	(9/2)	+5,1	+3
	183	7/2	—	—

Элемент	A	I, ħ/2π	μ	Q, барн
$_{74}$W	183	1/2	+0,117	—
	185	3/2	—	—
	187	3/2	—	—
$_{75}$Re	185	5/2	+3,172	+2,7
	186	1	±1,73	—+0,4
	187	5/2	+3,204	+2,6
	188	1	±1,76	—+0,4
$_{76}$Os	187	1/2	+0,0449	—
	189	3/2	+0,0666	+0,8
$_{77}$Ir	191	3/2	+0,145	+1,3
	192	4	—	—
	193	3/2	+0,158	+1,2
	194	1	—	—
$_{78}$Pt	195	1/2	+0,6060	—
	197	1/2	—	—
$_{79}$Au	190	1	±0,066	—
	191	3/2	+0,137	—
	192	1	±0,00785	—
	193	3/2	±0,139	—
	194	1	+0,074	—
	195	3/2	±0,147	—
	196	2	+0,6	—
	196 m	12	—	—
	197	3/2	+0,14496	+0,58
	198	2	+0,590	—
	199	3/2	+0,270	—
$_{80}$Hg	193	3/2	—0,62	—2
	193 m	13/2	—1,063	—1,2
	195	1/2	+0,538	—
	195 m	13/2	—1,049	+1,3
	197	1/2	+0,524	—
	197 m	13/2	—1,022	+1,5
	199	1/2	+0,5027	—
	201	3/2	—0,5567	+0,45
	203	5/2	+0,84	—
$_{81}$Tl	195	1/2	—	—
	197	1/2	+1,55	—
	198	2	—	—
	198 m	7	—	—
	199	1/2	+1,59	—
	200	2	—	—
	201	1/2	+1,60	—
	202	2	—	—
	203	1/2	+1,6115	—
	204	2	+0,089	—
	205	1/2	+1,6274	—
	206	0	—	—

Продолжение табл. 37.4

Элемент	A	I, ħ/2π	μ	Q, барн
$_{82}$Pb	207	1/2	+0,5895	—
$_{83}$Bi	199	9/2	—	—
	200	7	—	—
	201	9/2	—	—
	202	5	—	—
	203	9/2	+4,59	—0,64
	204	6	+4,25	—0,41
	205	9/2	+5,5	—
	206	6	+4,56	—0,19
	209	9/2	+4,080	—0,35
	210	1	±0,0442	+0,13
$_{84}$Po	201	3/2	—	—
	203	5/2	—	—
	205	5/2	—+0,23	±0,17
	207	5/2	—+0,27	+0,29
	209	1/2	+0,76	—
$_{85}$At	211	9/2	—	—
$_{89}$Ac	227	3/2	+1,1	+1,7
$_{90}$Th	229	5/2	+0,38	~ ±4,6
$_{91}$Pa	231	3/2	+1,98	—
	233	3/2	+2,4	—3,6
$_{92}$U	233	5/2	+0,54	+3,5
	235	7/2	—0,35	+4,1
$_{93}$Np	237	5/2	+3,3	—
	239	2	—	—
	239	5/2	—	—
$_{94}$Pu	239	1/2	+0,203	—
	241	5/2	—0,73	+5,6
$_{96}$Cm	241	5/2	+1,50	+4,9
	242	1	±0,382	±2,8
	243	5/2	+1,4	+4,9
$_{97}$Bk	245	7/2		
$_{99}$Es	253	7/2	—	—

37.5. РАДИОАКТИВНЫЕ РЯДЫ

На рис. 37.1—37.4 представлены соответственно радиоактивные ряды тория ($4n$), нептуния ($4n + 1$), урана ($4n + 2$) и актиноурана ($4n + 3$). Указаны химический символ элемента, массовое число ядра и его период полураспада. В скобках приведены старые названия естественных радиоактивных нуклидов. Символы у стрелок указывают тип распада (α; β; α, γ — изомерный переход). Если ядро распадается двумя путями, то у стрелок указано (в %) относительное ветвление типов распада. Пунктирные стрелки соответствуют предполагаемым или очень слабоинтенсивным типам распада.

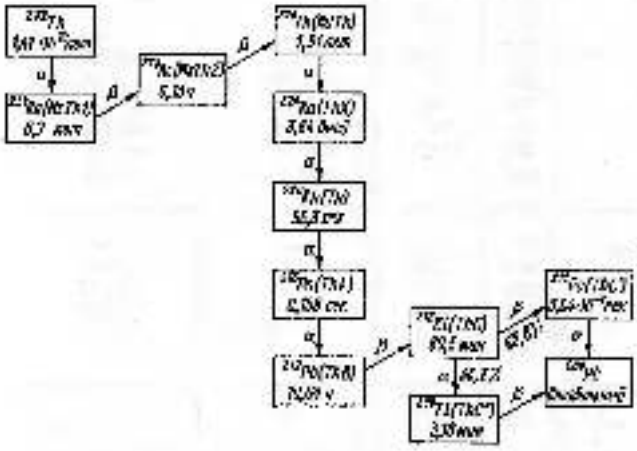


Рис. 37.1. Ториевая серия ($4n$) [8].

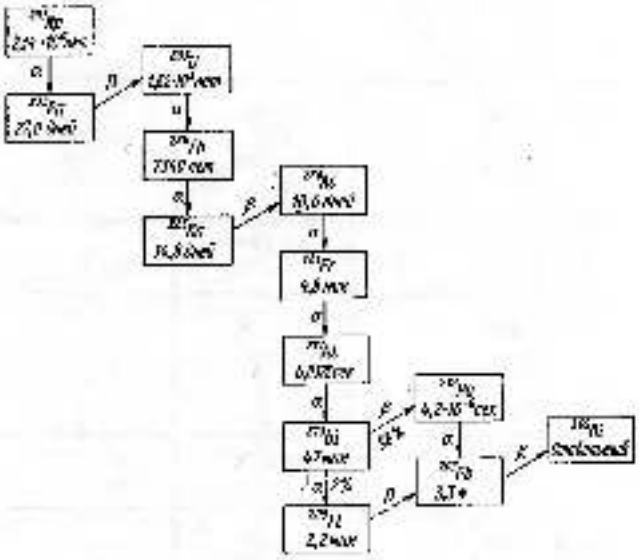


Рис. 37.2. Нептуниевая серия ($4n + 1$) [8].

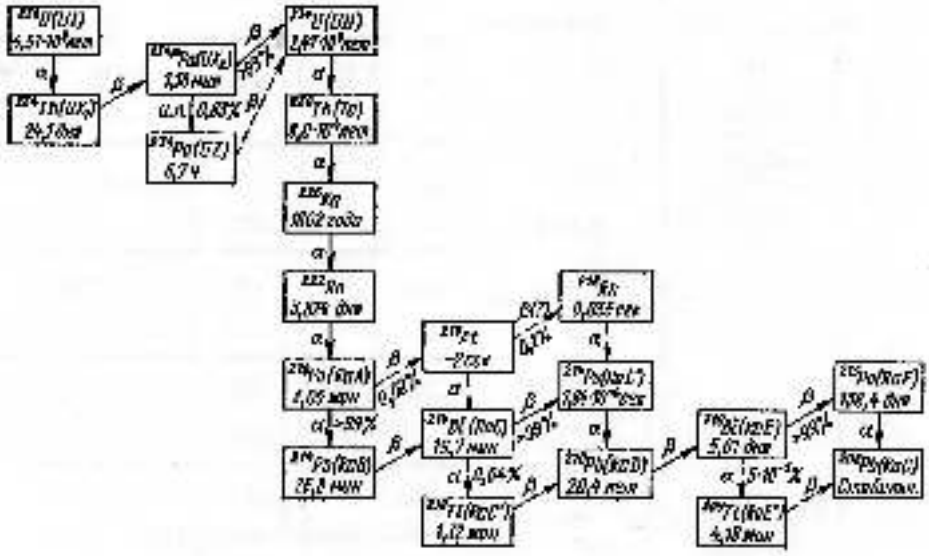


Рис. 37.3. Уран-радиевая серия ($4n + 2$) [8].

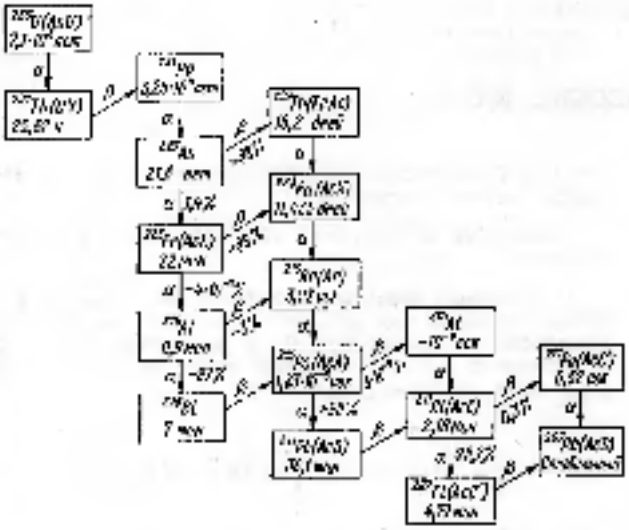


Рис. 37.4. Уран-актиниевая серия (4n + 3) [8].

Таблица 37.5

Старые названия естественных радиоактивных нуклидов [7]

Обозначение	Название	Нуклид	Радиоактивный ряд
Ac	Актиний	^{227}Ac	Ac
AcA	Актиний A	^{215}Po	Ac
AcB	Актиний B	^{211}Pb	Ac
AcC	Актиний C	^{211}Bi	Ac
AcC′	Актиний C′	^{211}Po	Ac
AcC″	Актиний C″	^{207}Tl	Ac
AcD	Актиний D	^{207}Pb	Ac
AcK	Актиний K	^{223}Fr	Ac
AcU	Актиноуран	^{235}U	Ac
AcX	Актиний X	^{223}Ra	Ac
AcEm	Актинон (An)	^{219}Rn	Ac
Pa	Протактиний	^{231}Pa	Ac
RdAc	Радиоактиний	^{228}Th	Ac
UY	Уран Y	^{231}Th	Ac
Io	Ионий	^{230}Th	U
Ra	Радий	^{226}Ra	U
RaA	Радий A	^{218}Po	U
RaB	Радий B	^{214}Pb	U
RaC	Радий C	^{214}Bi	U
RaC′	Радий C′	^{214}Po	U
RaC″	Радий C″	^{210}Tl	U
RaD	Радий D	^{210}Pb	U
RaE	Радий E	^{210}Bi	U

Продолжение табл. 37.5

Обозначение	Название	Нуклид	Радиоактивный ряд
RaE″	Радий E″	^{206}Tl	U
RaF	Радий F	^{210}Po	U
RaEm	Радон (Rn)	^{222}Rn	U
RaG	Радий G	^{206}Pb	U
UI	Уран I	^{238}U	U
UII	Уран II	^{234}U	U
UX_1	Уран X_1	^{234}Th	U
UX_2	Уран X_2	^{234}Pa	U
UZ	Уран Z	^{234}Pa	U
$MsTh_1$	Мезоторий-1	^{228}Ra	Th
$MsTh_2$	Мезоторий-2	^{228}Ac	Th
RdTh	Радиоторий	^{228}Th	Th
Th	Торий	^{232}Th	Th
ThA	Торий A	^{216}Po	Th
ThB	Торий B	^{212}Pb	Th
ThC	Торий C	^{212}Bi	Th
ThC′	Торий C′	^{212}Po	Th
ThC″	Торий C″	^{208}Tl	Th
ThD	Торий D	^{208}Pb	Th
ThX	Торий X	^{224}Ra	Th
ThEm	Торон (Tn)	^{220}Rn	Th

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lederer C. M., Hollander J. M., Perlman I. Table of isotopes. Sixth ed. New York — London — Sydney, John Wiley and Sons, Inc., 1967.
2. Seelmann-Eggebert W., Pfennig G., Münzel H. Nuklidkarte. 3 Auflage. München, Gersbach und Sohn Verlag, 1968.
3. Баранов С. А., Кулаков В. М., Шатинский В. М. «Ядерная физика», 1969, т. 7, вып. 4, с. 727.
4. Баранов С. А., Шатинский В. М., Кулаков В. М. «Ядерная физика», 1971, т. 14, вып. 5, с. 1101.
5. Баранов С. А., Зеленков А. Г., Кулаков В. М. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1960, т. 24, № 9, с. 1095.
6. "Nuclear Data Tables", sec. A, 1969, v. 5, N 5 — 6.
7. Дзелепов Б. С., Пекер Л. К., Сергеев В. О. Схемы распада радиоактивных ядер. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1963, с. 1039.
8. Kirby H. W. The Analytical Chemistry of Actinium. Miamisburg Ohio, Mound Lab., NAT-33-1-GEN-63.

МЁССБАУЭРОВСКИЕ ЯДРА

38.1. ВВЕДЕНИЕ

Эффектом Мёссбауэра называется упругое (без потери энергии на отдачу) излучение или поглощение γ-квантов ядрами атомов, не сопровождающееся изменением внутренней энергии тела.

Чрезвычайно высокое энергетическое разрешение, наблюдаемое в опытах по эффекту Мёссбауэра $\Gamma/E_0 = 10^{-10}$—10^{-16} (Γ — естественная ширина ядерного уровня, E_0 — энергия ядерного γ-перехода), позволяет не только измерить очень малые изменения энергии ($\sim 10^{-10}$ эв), но и наблюдать сверхтонкую структуру ядерных уровней, обусловленную магнитными дипольными и электрическими квадрупольными электронно-ядерными взаимодействиями.

Спектр прошедшего через замедлитель излучения, получаемый обычно в опытах по эффекту Мёссбауэра при относительном (со скоростью v) движении источника и поглотителя, обусловлен изменением энергии γ-кванта $\Delta E = E_0 v/c$ (c — скорость света) за счет эффекта Доплера. Этот спектр $\varkappa(x)$ определяется выражением [1]:

$$\varkappa(x) = f_S \int_{-\infty}^{+\infty} \left[1 - \exp\left[-f_A n\sigma(y)\right]\right] F(y)\, dy,$$

где $\varkappa(x) = \frac{1}{N_0}\left(N_{v_\infty} - N_0\right)$; N_v — интенсивность γ-излучения при относительной скорости v; N_{v_∞} — интенсивность вне резонанса; $x = 2(E_0/\Gamma)\cdot(v/c)$; $y = 2(E_\gamma - E_0)/\Gamma$; E_γ — энергия γ-кванта при относительной скорости v; $\Gamma = \hbar/\tau$; τ — среднее время жизни возбужденного состояния ядра; $\sigma = \sigma_0/(1 + y^2)$ — сечение поглощения γ-кванта с энергией E_γ, где $\sigma_0 = \frac{2I_1+1}{2I_0+1}\frac{2\pi\lambda^2}{1+\alpha}$;

I_0, I_1 — спины исходного и возбужденного состояний ядра; $\lambda = \hbar c/E$ — приведенная длина волны γ-излучения; α — коэффициент внутренней конверсии; f_S, f_A — значения вероятностей излучения и поглощения γ-квантов без отдачи; n, $см^{-2}$ — число ядер мёссбауэровского вещества на единицу площади; $F(y)$ — форма линии излучения.

Максимум величины $\varkappa(x)$ и площадь спектра S для лоренцевской формы линии при $v = 0$ даются выражениями:

$$\varkappa(0) = f_S\left[1 - \exp\left(-f_A n\sigma_0/2\right)\right] I_0\left(f_A n\sigma_0/2\right);$$

$$S = \int_{-\infty}^{+\infty} \varkappa(x)\, dx = \pi n \sigma_0 f_S f_A \left[I_0\left(f_A n\sigma_0/2\right) + I_1\left(f_A n\sigma_0/2\right)\right],$$

где I_0 и I_1 — функции Бесселя нулевого и первого порядков мнимого аргумента.

Основными параметрами мёссбауэровских спектров являются:

1) *изомерный сдвиг* δ мёссбауэровской линии, обусловленный разностью радиусов ядра в исходном и возбужденном состояниях R_0 и R_1, и разностью плотностей электронов на ядрах поглотителя и источника $|\psi_A(0)|^2$ и $|\psi_S(0)|^2$, соответственно:

$$\delta = \frac{4\pi}{5} Z e^2 \left(R_1^2 - R_0^2\right)\left\{\left|\psi_A(0)\right|^2 - \left|\psi_S(0)\right|^2\right\},$$

где e — элементарный заряд, Z — порядковый номер ядра [1];

2) *квадрупольное расщепление* Δ ядерных уровней мёссбауэровской линии, вызванное взаимодействием квадрупольного момента Q ядра с неоднородным электрическим полем, существующим в месте расположения ядра (например, в кристалле с симметрией ниже кубической). $\Delta = E_j - E_k$, где энергии E_j и E_k — собственные значения гамильтониана квадрупольного взаимодействия, принадлежащие различным значениям спина ядра и магнитного квантового числа m_I [2, 3]. В частном случае аксиально-симметричного градиента поля для значения $I = 3/2$:

$$\Delta = E\left(\frac{3}{2}, \frac{3}{2}\right) - E\left(\frac{3}{2}, \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2} e^2 q Q.$$

Здесь q — градиент электрического поля;

3) *магнитное расщепление ядерных уровней*, вызванное взаимодействием дипольного магнитного момента ядра $\overline{\mu}$ со сверхтонким магнитным полем на ядре $\overline{H}_n$, которое создается электронами собственного атома и поляризованными электронами проводимости.

Магнитное расщепление ядерных уровней определяется выражением:

$$\Delta E_m = \overline{\mu} \overline{H}_n / I = g \mu_n H_n,$$

где μ_n — ядерный магнетон; g — гиромагнитное отношение (ядерный g-фактор). Расстояние между соседними уровнями равно $g\mu_n H_n$, а расстояние между крайними и нижним уровнями равно $2g\mu_n H_n$ [2, 3].

38.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ МЁССБАУЭРОВСКИХ ЯДЕР

В табл. 38.1 приведены сведения о материнских изотопах мёссбауэровского ядра (массовое число, тип распада и период полураспада) и следующие характеристики мёссбауэровских ядер:

E — энергия мёссбауэровского γ-перехода (в некоторых случаях приводятся значения энергий двух различных γ-переходов, на которых наблюдается эффект Мёссбауэра);

Содержание мёссбауэровского изотопа в естественной смеси изотопов;

$T_{1/2}$ — период полураспада резонансного уровня (время жизни);

Γ — естественная ширина уровня;

$\Delta\phi(\Gamma)$ — допплеровская ширина уровня;

$E_{отд}$ — энергия отдачи свободного ядра;

σ — полный коэффициент конверсии для резонансного γ-перехода;

σ_0 — полное сечение резонансного поглощения;

I_0 и I_1 — значения спинов основного и возбужденного уровней ядра;

μ_0 и μ_1 — значения магнитных моментов основного и возбужденного уровней ядра в ядерных магнетонах;

Q_0 и Q_1 — значения квадрупольных моментов основного и возбужденного уровней ядра.

Изотоп	Содержание, %	E, кэв	$T_{1/2}$, сек	Γ, эв	$\sigma_0(E)$, барн	$\Gamma_{\text{отд}}$, эв	x	σ_r, см²
$^{40}_{19}K$	0,0118	29,4	$3,9\cdot10^{-9}$	$1,170\cdot10^{-10}$	1,199	$1,100\cdot10^{-6}$	0,35	$1,631\cdot10^{-18}$
$^{57}_{26}Fe$	2,19	14,4125	$9,77\cdot10^{-8}$	$4,6697\cdot10^{-12}$	0,09713	$1,9667\cdot10^{-9}$	9,00	$2,386\cdot10^{-18}$
		136,4	$8,7\cdot10^{-9}$	$5,244\cdot10^{-11}$	0,1152	$1,753\cdot10^{-8}$	0,142	$4,214\cdot10^{-21}$
$^{61}_{28}Ni$	1,19	67,4	$5,3\cdot10^{-9}$	$8,608\cdot10^{-11}$	0,3629	$3,999\cdot10^{-6}$	0,12	$7,212\cdot10^{-20}$
$^{67}_{30}Zn$	4,11	93,0	$9,4\cdot10^{-8}$	$4,854\cdot10^{-14}$	$1,504\cdot10^{-2}$	$6,991\cdot10^{-6}$	0,6	$1,179\cdot10^{-19}$
$^{73}_{32}Ge$	7,76	67,0	$1,62\cdot10^{-9}$	$2,810\cdot10^{-10}$	1,26	$3,302\cdot10^{-6}$	0,229	$4,434\cdot10^{-19}$
$^{83}_{36}Kr$	11,55	9,3	$1,47\cdot10^{-7}$	$3,104\cdot10^{-12}$	0,1000	$5,595\cdot10^{-5}$	11	$1,886\cdot10^{-18}$
$^{99}_{44}Ru$	12,72	90,0	$2,02\cdot10^{-8}$	$2,259\cdot10^{-11}$	0,07525	$4,393\cdot10^{-6}$	—	$1,067\cdot10^{-19}$
$^{107}_{47}Ag$	51,35	93	44	$1,037\cdot10^{-20}$	$3,342\cdot10^{-11}$	$4,34\cdot10^{-6}$	20	$5,386\cdot10^{-20}$
$^{119}_{50}Sn$	8,58	23,875	$1,84\cdot10^{-8}$	$2,48\cdot10^{-11}$	0,31135	$2,572\cdot10^{-6}$	5,5	$1,021\cdot10^{-18}$
$^{121}_{51}Sb$	57,25	37,15	$3,5\cdot10^{-8}$	$1,304\cdot10^{-10}$	1,052	$6,124\cdot10^{-6}$	10,6	$2,037\cdot10^{-18}$
$^{125}_{52}Te$	6,99	35,48	$1,48\cdot10^{-8}$	$3,083\cdot10^{-10}$	2,6045	$5,497\cdot10^{-6}$	13,3	$2,718\cdot10^{-18}$
$^{127}_{53}I$	100	57,6	$1,86\cdot10^{-9}$	$2,458\cdot10^{-10}$	1,2765	$1,403\cdot10^{-6}$	3,75	$2,07\cdot10^{-18}$
$^{129}_{53}I$	Нестационарен	27,75	$1,61\cdot10^{-8}$	$2,834\cdot10^{-11}$	0,30615	$3,205\cdot10^{-6}$	5,0	$3,971\cdot10^{-19}$
$^{129}_{54}Xe$	26,44	39,56	$9,95\cdot10^{-10}$	$4,632\cdot10^{-10}$	3,508	$6,521\cdot10^{-6}$	11	$2,670\cdot10^{-19}$
$^{131}_{54}Xe$	12,18	80,16	$4,5\cdot10^{-10}$	$1,014\cdot10^{-8}$	3,791	$2,634\cdot10^{-5}$	2,1	$6,141\cdot10^{-20}$
$^{133}_{55}Cs$	100	80,99	$6,28\cdot10^{-9}$	$7,265\cdot10^{-11}$	0,2689	$2,046\cdot10^{-6}$	1,63	$1,054\cdot10^{-19}$
$^{141}_{59}Pr$	100	145,43	$1,92\cdot10^{-9}$	$2,376\cdot10^{-10}$	0,4898	$8,054\cdot10^{-6}$	0,46	$1,064\cdot10^{-19}$
$^{149}_{62}Sm$	13,83	22	$7,6\cdot10^{-9}$	$6,003\cdot10^{-11}$	0,218	$1,744\cdot10^{-6}$	12	$3,886\cdot10^{-19}$
$^{151}_{63}Eu$	47,82	21,6	$8,8\cdot10^{-8}$	$5,184\cdot10^{-11}$	0,7195	$1,659\cdot10^{-6}$	29	$2,33\cdot10^{-19}$
$^{153}_{63}Eu$	52,18	97,43	$1,6\cdot10^{-10}$	$2,851\cdot10^{-9}$	8,775	$3,331\cdot10^{-6}$	0,41	$1,817\cdot10^{-20}$
		103,18	$3,98\cdot10^{-9}$	$1,182\cdot10^{-10}$	0,3434	$3,736\cdot10^{-6}$	1,55	$5,972\cdot10^{-20}$
$^{155}_{64}Gd$	14,73	60,0	$2,4\cdot10^{-10}$	$1,901\cdot10^{-9}$	9,60	$1,247\cdot10^{-6}$	7,5	$1,199\cdot10^{-18}$

ровских ядер

J_0	J_1	μ_0	μ_1	Q_0, барн	Q_1, барн	Сведения о материнском ядре
4^-	3^-	−1,298	—	−0,093	—	$^{39}_{19}K$, (n, γ)
$\frac{1}{2}^-$	$\frac{3}{2}^-$	+0,00024	0,1547	0	+0,33	^{97}Mo, (β⁻); 1,7 мин; ^{95}Co, (э. з.); 270 дней
$\frac{1}{2}^-$	$\frac{5}{2}$	—	—	—	—	
$\frac{3}{2}^-$	$\frac{5}{2}^-$	0,746	+0,35	—	—	^{63}Co, (β⁻); 1,7 ч; ^{63}Cu (β⁺); 3,3 ч
$\frac{5}{2}^-$	$\frac{3}{2}^-$	+0,876	—	+0,17	—	^{67}Cu, 60 ч; ^{67}Ga, 78 ч
$\frac{9}{2}^+$	$\frac{9}{2}^+ ; \frac{11}{2}^+$	0,8792	—	−0,26	—	^{79}Ga, 4,8 ч; ^{79}As, 76 дней
$\frac{9}{2}^+$	$\frac{7}{2}^+$	−0,970	—	+0,26	+0,44	^{89}Br, 2,4 ч; ^{89}Rb, 83 дня
$\frac{5}{2}^+$	$\frac{3}{2}^+$	−0,625	−0,285	—	0,15	^{99}Rb, 16,1 дня; ^{99}Tc, $2{,}1\cdot10^5$ лет
$\frac{1}{2}^-$	$\frac{7}{2}^+$	−0,1130	—	—	—	^{105}Cd, (э.з., β⁺); 6,6 ч; ^{105}Pd, (β⁻); $7\cdot10^6$ лет
$\frac{1}{2}^+$	$\frac{3}{2}^+$	−1,046	+0,7	0	−0,07	^{113m}In, 18 мин; ^{113}In, 2,3 мин; ^{115}Sb, 38 ч; ^{115m}Sn, 245 дней
$\frac{5}{2}^+$	$\frac{7}{2}^+$	+3,359	—	−0,29	—	^{121m}Sn, >5 лет; ^{121}Sn, 27 ч; ^{121m}Te, 154 дня; ^{121}Te, 17 дней
$\frac{1}{2}^+$	$\frac{3}{2}^+$	−0,6872	+0,65	0	0,19	^{123}Sb, 2,7 года; ^{123}I, 57 дней
$\frac{5}{2}^+$	$\frac{7}{2}^+$	+2,808	1,96	−0,79	−0,71	^{127m}Te, 105 дней; ^{127}Te, 9,3 ч; ^{127}Xe, 36 дней
$\frac{7}{2}^+$	$\frac{5}{2}^+$	+2,617	+2,84	−0,55	−0,68	^{129m}Te, 33 дня; ^{129}Te, 70 мин
$\frac{1}{2}^+$	$\frac{3}{2}^+$	−0,7768		0	−0,41	^{129}I, $1{,}6\cdot10^7$ лет; ^{129}Cs, 32 ч
$\frac{3}{2}^+$	$\frac{1}{2}^+$	+0,6908	—	−0,12	—	^{131}I, 8,1 дня; ^{131}Cs, 10 дней
$\frac{7}{2}^+$	$\frac{5}{2}^+$	+2,579	+3,25	−0,003	—	^{133}Ba, (э.з.); 7,2 года; ^{133}Xe, (β⁻), 5,3 дня
$\frac{5}{2}^+$	$\frac{7}{2}^+$	+4,3	—	−0,05	—	^{141}Nd, 25 ч; ^{141}Ce, 33 дня
$\frac{7}{2}^-$	$\frac{7}{2}^- ; \frac{5}{2}^-$	−0,75	−1,82; −0,94	+0,05	—	^{149}Pm, 53 ч; ^{149}Eu, 106 дней
$\frac{5}{2}^+$	$\frac{7}{2}^+$	+3,464	+2,67	+1,155	+1,5	^{151}Gd, 120 дней; ^{151}Sm, 93 года
$\frac{5}{2}^+$	$\frac{5}{2}^-$	+1,530	+3,21	+2,93	—	^{153}Gd, (э.з.); 242 дня; ^{153}Sm, (β⁻) 47 ч
$\frac{5}{2}^+$	$\frac{3}{2}^+$	—	+2,03	—	—	
$\frac{3}{2}^-$	$\frac{5}{2}^-$	−0,27	—	+1,3	—	^{159}Eu, (β⁻), 1,81 года; ^{159}Tb, 5 дней

Ядро	Содержание, %	Γ_0, мм	$T_{1/2}$, сек	Γ_1, мм	$\Delta\nu$ (Т), мм/сек	$E_{0,2,3}$, кэв	α	σ_0, см²
$^{152}_{64}Gd$	14,73	86,5	$6,15\cdot10^{-9}$	$7,418\cdot10^{-11}$	0,2571	$2,592\cdot10^{-6}$	0,49	$2,104\cdot10^{-19}$
$^{156}_{64}Gd$	20,47	88,97	$2,19\cdot10^{-9}$	$2,083\cdot10^{-10}$	0,702	$2,725\cdot10^{-6}$	4,08	$3,042\cdot10^{-18}$
$^{158}_{64}Gd$	24,87	79,51	$2,4\cdot10^{-9}$	$1,901\cdot10^{-10}$	0,717	$2,149\cdot10^{-6}$	5,94	$2,788\cdot10^{-18}$
$^{159}_{65}Tb$	100	58,0	$1,3\cdot10^{-10}$	$3,609\cdot10^{-9}$	18,14	$1,136\cdot10^{-6}$	10,1	$9,827\cdot10^{-20}$
$^{160}_{66}Dy$	2,29	86,8	$2,00\cdot10^{-9}$	$2,281\cdot10^{-10}$	0,788	$2,528\cdot10^{-6}$	4,61	$2,894\cdot10^{-18}$
$^{161}_{66}Dy$	18,68	25,65	$2,87\cdot10^{-9}$	$1,09\cdot10^{-11}$	0,1858	$2,194\cdot10^{-6}$	2,5	$1,032\cdot10^{-18}$
		74,58	$3,1\cdot10^{-9}$	$1,472\cdot10^{-10}$	0,6915	$1,855\cdot10^{-6}$	0,05	$3,215\cdot10^{-20}$
$^{166}_{68}Er$	33,41	80,6	$1,82\cdot10^{-9}$	$2,507\cdot10^{-10}$	0,9325	$2,101\cdot10^{-6}$	7,2	$2,296\cdot10^{-18}$
$^{169}_{69}Tm$	100	8,41	$3,9\cdot10^{-10}$	$1,17\cdot10^{-10}$	4,17	$2,247\cdot10^{-5}$	326	$2,123\cdot10^{-18}$
$^{170}_{70}Yb$	3,03	84,26	$1,59\cdot10^{-9}$	$2,869\cdot10^{-10}$	1,021	$2,242\cdot10^{-6}$	6,70	$2,237\cdot10^{-18}$
$^{171}_{70}Yb$	14,31	66,73	$>5\cdot10^{-10}$	$9,125\cdot10^{-10}$	4,0995	$1,398\cdot10^{-6}$	10	$9,989\cdot10^{-20}$
$^{177}_{72}Hf$	18,50	112,95	$5\cdot10^{-10}$	$9,125\cdot10^{-10}$	2,4215	$3,871\cdot10^{-6}$	2,47	$6,906\cdot10^{-20}$
$^{181}_{73}Ta$	99,99	6,25	$6,8\cdot10^{-9}$	$6,700\cdot10^{-14}$	$3,216\cdot10^{-5}$	$1,159\cdot10^{-2}$	45	$1,702\cdot10^{-18}$
$^{182}_{74}W$	26,41	160,1	$1,37\cdot10^{-9}$	$3,32\cdot10^{-10}$	0,9975	$2,956\cdot10^{-6}$	3,97	$2,406\cdot10^{-19}$
$^{183}_{74}W$	14,40	46,48	$2,0\cdot10^{-10}$	$2,281\cdot10^{-9}$	14,715	$6,359\cdot10^{-6}$	9,0	$2,265\cdot10^{-20}$
		99,08	$6,0\cdot10^{-10}$	$7,604\cdot10^{-10}$	2,300	$2,88\cdot10^{-6}$	4,3	$6,855\cdot10^{-19}$
$^{184}_{74}W$	30,64	111,2	$1,26\cdot10^{-9}$	$3,621\cdot10^{-10}$	0,976	$3,608\cdot10^{-6}$	2,75	$2,638\cdot10^{-19}$
$^{186}_{74}W$	28,41	122,5	$1,35\cdot10^{-9}$	$4,345\cdot10^{-10}$	1,033	$4,332\cdot10^{-6}$	1,72	$2,907\cdot10^{-19}$
$^{186}_{76}Os$	1,64	137,2	$8,4\cdot10^{-10}$	$5,431\cdot10^{-10}$	1,187	$5,431\cdot10^{-6}$	1,25	$2,888\cdot10^{-19}$
$^{187}_{75}Re$	62,93	134,24	$1,0\cdot10^{-11}$	$4,062\cdot10^{-5}$	101,9	$5,174\cdot10^{-6}$	2,35	$5,403\cdot10^{-20}$
$^{188}_{76}Os$	13,3	155,03	$7,1\cdot10^{-10}$	$6,426\cdot10^{-10}$	1,2425	$6,894\cdot10^{-6}$	0,84	$2,766\cdot10^{-19}$

I_0	I_1	μ_0	μ_1	Q_0, барн	Q_1, барн	Сведения о материнском ядре
$\frac{3^-}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	−0,27	−0,564	—	—	
0^+	2^+	—	—	—	—	^{155}Eu, 15 дней; ^{155}Tb, 5,4 дня
0^+	2^+		—	—	—	^{156}Eu, 60 лет; ^{156}Tb, 150 лет
$\frac{5^+}{2}$	$\frac{5^+}{2}$	1,7	—	—	—	^{159}Gd, 18 ч; ^{159}Dy, 144 дня
0^+	2^+	—	+0,74	—	−1,0	^{160}Tb, (β^-); 72,4 дня; ^{160}Ho, (э.з., β^+); 26 мин
$\frac{5^+}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	−0,46	+0,55	+1,9	+1,8	^{161}Tb, (β^-), 6,9 дня; ^{161}Ho, (э.з.); 2,48 ч
$\frac{6^+}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	—	1,6	—	—	
0^+	2^+	—	0,62	—	−1,9	^{166m}Ho, $1,2\cdot10^3$ лет; ^{166}Ho, 27 ч; ^{166}Tm, 7,7 ч
$\frac{1^+}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	−0,232	+0,09	—	−1,2	^{169}Er, 9,3 дня; ^{169}Yb, 31 день
0^+	2^+	—	0,669	—	—	^{170}Tm, 127 дней; ^{170}Lu, 2 дня
$\frac{1^-}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	+0,4090	—	—	—	^{171}Tm, 1,9 года; ^{171}Lu, 8,2 дня
$\frac{7^-}{2}$	$\frac{9^-}{2}$	+0,61	+1,05	+3,0	—	^{177m}Lu, 155 дней; ^{177}Lu, 6,7 дня; ^{177}Ta, 56,6 ч
$\frac{7^+}{2}$	$\frac{9^-}{2}$	+2,30	—	+4,2	—	^{181}Hf, 45 дней; ^{181}W, 140 дней
0^+	2^+	—	+0,46	—	−1,37	^{182}Ta, 115 дней; ^{182}Re (β^-) 13 ч; (э.з.), 64 ч
$\frac{1^-}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	+0,117	—	—	−1,61	
$\frac{1^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	+0,117	—		—	^{183}Ta, 5 дней; ^{183}Re, 70 дней
0^+	2^+	—	0,52	—	−2,0	^{184}Ta, 8,7 ч; ^{184m}Re, 165 дней; ^{184}Re, 38 дней
0^+	2^+	—	+0,64	—	—	^{186}Ta, 10 мин; ^{186}Re, 90 ч
0^+	2^+	—	+0,64	—	1,54	^{187}Re, 90 ч; ^{187}Ir (β^-), 15 ч; (э.з.), 1,7 ч
$\frac{5^+}{2}$	$\frac{7}{2}$	+3,204	—	+2,6		^{187}W, 23,8 ч
0^+	2^+	—	0,56	—	—	^{188}Re, 16,8 ч; ^{188}Ir, 41 ч

Ядро	Содержание, %	E, кэв	$T_{3/2}$, сек	Γ, мм	Δv (Г), мм/сек	$N_{\text{отд}}$, мм	ε	σ_0, см²
$^{191}_{77}Ir$	37,3	129,4	$1,28\cdot10^{-10}$	$8,564\cdot10^{-9}$	8,2575	$4,707\cdot10^{-6}$	3,02	$6,462\cdot10^{-18}$
$^{193}_{77}Ir$	62,7	73	$6,6\cdot10^{-9}$	$7,604\cdot10^{-11}$	0,3122	$1,483\cdot10^{-8}$	6	$3,279\cdot10^{-18}$
$^{195}_{78}Pt$	33,8	98,8	$1,6\cdot10^{-10}$	$2,651\cdot10^{-9}$	8,65	$2,088\cdot10^{-8}$	8,55	$5,248\cdot10^{-20}$
		129	$6,2\cdot10^{-10}$	$7,370\cdot10^{-10}$	1,71	$4,582\cdot10^{-7}$	1,79	$7,746\cdot10^{-21}$
$^{197}_{79}Au$	100	77,3	$1,8\cdot10^{-9}$	$2,635\cdot10^{-10}$	0,983	$1,629\cdot10^{-6}$	3,7	$4,355\cdot10^{-20}$
$^{249}_{99}Np$	Нестабилен	59,54	$6,3\cdot10^{-8}$	$7,242\cdot10^{-12}$	$3,646\cdot10^{-8}$	$8,032\cdot10^{-8}$	1,055	$2,917\cdot10^{-19}$
$^{236}_{92}U$ [6]	Нестабилен	44,7	$2,3\cdot10^{-10}$	$1,9836\cdot10^{-9}$	13,303	$1,882\cdot10^{-6}$	660	$9,2\cdot10^{-21}$

38.3. ПАРАМЕТРЫ МЁССБАУЭРОВСКИХ СПЕКТРОВ

Вещество	Спектр
$Na_4[Fe(CN)_6]\cdot 2H_2O$	1,712 мм/сек
Металлическое железо $H_S = 330$ кэ	10,657; 6,197; 1,677
$\alpha - Fe_2O_3$ $H_S = 517$ кэ	10,76; 6,66; 2,65

Рис. 38.1. Схематическое изображение мёссбауэровских спектров поглощения для ядер ^{57}Fe в различных материалах при температуре 300° К [4].

В табл. 38.2 приведены следующие характеристики: формула химического соединения (сплава), которое содержит мёссбауэровские ядра, находящиеся в стабильном состоянии (поглотитель);

формула химического соединения (сплава), содержащего материнские ядра, или химический символ матрицы, в которую введены атомы материнского изотопа (источник). В скобках указан материнский изотоп либо тип ядерной реакции, используемый для создания возбужденного состояния мёссбауэровского ядра;

T — температура поглотителя и источника (в тех случаях, когда температура не указана, более вероятной является комнатная);

Γ — полуширина отдельной линии экспериментально наблюдаемого мёссбауэровского спектра;

ε — эффект поглощения, определяемый отношением интенсивностей γ-излучения, зарегистрированных в резонансе ($N_{\gamma_{рез}}$) и вне резонанса (N_{γ_∞}):

$$\varepsilon = (N_{\gamma_\infty} - N_{\gamma_{рез}}) / N_{\gamma_\infty}.$$

Если ε приводится с учетом фона от посторонного излучения, рядом с цифрой стоит индекс «0»;

δ — сдвиг наблюдаемого спектра, отсчитываемый от значения $v = 0$; считается, что δ положителен в случае, когда источник и поглотитель движутся навстречу друг другу (если знак δ не указан, более вероятно положительное значение);

Δ — квадрупольное расщепление;

H_n — сверхтонкое магнитное поле, действующее на ядра атомов мёссбауэровского изотопа в данном веществе (поглотителе);

f_S и f_a — вероятности излучения и поглощения γ-кванта без отдачи энергии.

I_a	I_b	μ_a	μ_b	Q_a, барн	Q_b, барн	Сведения о материнском ядре
$\frac{3^+}{2}$	$\frac{1^+}{2}$	+0,18	—	+1,3	—	^{191}Os, 15 дней; ^{191}Pt, 3 дня
$\frac{3^+}{2}$	$\frac{1^+}{2}$	+0,17	0,56	1,5	—	^{189}Os, 32 ч; ^{189}Pt, ≤500 лет
$\frac{1^-}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	−0,006	−0,65	· ·	—	^{196}Au, 192 дня; ^{196}Ir, 2,3 ч; ^{196}Ir, 2,3 ч
$\frac{1^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	—	—	—	—	
$\frac{2^+}{2}$	$\frac{1^+}{2}$	+0,1449	+0,37	+0,58	—	^{197}Pt, (β^-), 20 ч; ^{197}Hg (э. з.), 65 ч
$\frac{5^+}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	5,0	+2,0	—	—	^{239}U, 6,75 дня; ^{239}Am, 458 лет
0^+	2^+	—	+0,25	+10,5	−3,0	^{238}Pu (α), 3,79·10^4 лет

Таблица 38.2

Параметры мёссбауэровских спектров

Поглотитель		Источник		Γ, $\frac{мм}{сек}$	ε, %	δ, $\frac{мм}{сек}$	Δ, $\frac{мм}{сек}$	$H_{эф}$, кэ	f_S	f_A
Формула	Температура, °К	Формула	Температура, °К							
KCl	4	KCl (n, γ)	4	11	16	−0,14	—	—	—	—
Fe	—	Cu (Co)	—	0,20	36	−0,228	—	330	—	—
	—	Pd	—	—	—	−0,185	—	—	—	—
	298	Pt	298	0,22	10$_0$	−0,347	—	—	—	—
	300	Нерж. сталь	300	0,39	10$_0$	+0,090	—	—	—	—
α-Fe_2O_3	—	Cr	—	0,40	—	+0,51	0,40	517	—	—
	300	Нерж. сталь	300	—	—	+0,47	0,40	—	—	—
Нерж. сталь	—	Cr	—	0,48	21	+0,05	—	—	—	—
	—	Cu	—	0,46	45$_0$	−0,32	—	—	—	—
	300	Au	—	0,43	—	−0,78	—	—	0,67	—
	300	UO_2	—	—	—	0,82	—	—	—	—
	300	Нерж. сталь	300	0,53	47$_0$	—	—	—	—	—
$KFeS_2$	298	Pd	298	0,28	18$_0$	−0,01	0,60	—	—	—
$Na_2[Fe(CN)_5NO]\cdot 2H_2O$	—	Cu	—	—	—	−0,56	—	—	—	—
$Na_2[Fe(CN)_5NO]\cdot 2H_2O$		Pt	300	0,26	21	−0,61	1,712	—	—	—
	300	Нерж. сталь	298	0,38	13$_0$	−0,18	1,712	—	—	—
Ni	80	Ni (нук. возб.)	80	3,3	4	—	—	—	0,09	0,09
	77	Ni (нук. возб.)	77	—	—	—	—	90	—	—

Соединение: Формула	Соединение: Температура, °К	Источник: Формула	Источник: Температура, °К	Γ, мм/сек	ε, %	b, мм/сек	a, мм/сек	H_g, кэ	f_S	f_A
ZnO [5]	4,2	Mn_2O (Cu)	4,2	$0,6\cdot10^{-3}$	—	−0,021	—	—		—
	4,2	ZnO	4,2	—	0,2	0	—	—		—
Ge	77	Ge (изуч. изотоп.)	77	4,4	0,64	+0,11	—	—	0,01	—
Ru	88	Ru (Rh)	85	0,37	4_b	—	—	—	0,14	—
Sn	77	Sn	77	0,6	—	—	—	—	0,25	—
	77	SnO_2	77	1,4	—	+2,55		—	—	—
	300	Mg_2Sn	300	—	—	0,08	0	—	—	—
SnO	83	Sn	83	2	—	0,09	2	—	—	—
SnO_2	—	Sn		1,3	7,6	+2,6	—		—	
	300	SnO_2	300	1,4	31	—		—	0,70	—
	—	Mg_2Sb		—	—	−1,9	0,50	—	—	—
Mg_2Sn	300	Mg_2Sn	300	1,0	5	—	—	—	—	—
Te	4,2	Te	4,2	5,2	25	—	7,8	—	—	—
TeO_2	300	TeO_2	77	5,2	—	—	—	—	0,12	0,07
$Na_5H_3{}^{127}IO_6$	20	ZnTe	20	4,1	—	+1,6	—	—	—	—
$^{123}I_2$	100	ZnTe	180	0,87	—	+0,62	—			—
$Na^{125}I$	77	ZnTe	77	—	—	−0,40	—	—	0,15	0,29
$^{129}XeF_2$	—	NaI	4,2	21	2	0	42	—	—	—
	—	NaI	4,2	9	2	0	42	—	—	
$Na_4^{128}XeO_6$	4,2	NaI	4,2	13	5,4	−0,3	—		—	—
$^{132}XeF_4$	—	$Na_2H_3IO_6$	—	6,8	—	—	6,0	—	—	—
CsCl	—	$BaCl_2\cdot2H_2O$	4,2	1,1	$0,8_b$	0,01	—	—	—	—
Sm_2O_3	—	Pb_2O_3	—	4	—	—		—	—	
^{151}Eu	4	Eu_2O_3 (Gd)	4	—	—	−8,1	—	—	—	—
$^{151}Pm_2O_3$	77	Pm_2O_3 (Gd)	77	—	25	—		—	0,54	0,54
$^{155}Gd_2O_3$ (E_γ = 60 кэв)	80	Sm_2O_3 (Eu)	80	4,3		—	—	—	—	—
Gd_2O_3 (E_γ = 86,5 кэв)	80	Sm_2O_3 (Eu)	80	1,1	0,06	—	—	—	0,00	0,012
Tb_4O_7	80	Dy_2O_3	80	80	2	—	—	—	—	—
$^{161}Dy_2O_3$	300	Dy_2O_3	300	12		—	—	—	0,10	—
		Gd_2O_3 (Tb)	300	13	6	—	—	—	0,23	—
$^{160}Tb_2O_3$	20	Tb_2O_3	20	2	21_t	0	—	—	—	—
Tm	—	Er_2O_3	800	30	—	+5	144	7000	—	—
	—	Er_2O_3		2,5	—		—	—	—	—
	—	Er_2O_3	300	14	4	—	—			
Tm_2O_3	20	Tm	20		3,5	5,7	—	—	—	—
$^{170}Yb_2O_3$	4,2	Er_2O_3 (Tm)	4,2	11	10	—	11		—	
$^{171}Yb_2O_3$		Lu_2O_3		11	—	—	—	—	0,11	0,04
HfO_2	—	W	300	0,26	4,5	+0,9		—	—	—
Ta	—	W	300	0,05	0,6	—	—	—		—
TaC	300	Ta	22	2,0	44_b	+1,3		—	—	—
^{182}W	22	Ta	77	—			—	—		—
$^{181}W_2O_3$	77	Ta	300	40	4,4	−0,17		—	—	—
^{182}W	300	W (Re)	4,2			−0,10	—			
$^{184}WCl_6$	4,2	Re	4,2	4,25	—	—	—	—	—	—
^{187}W	4,2	Re	10	3,3	74		—		—	—
^{190}Os	10	Re	15	7,5	22_t	—	—	—	0,02	0,11
^{191}Os	15	Os	91	29	1,1	—	—		0,07	—
^{191}Ir	91	Os	4	22	—					
	4	Os	4,2	—		+0,6	—	—		—
^{193}Ir	4,2	Pt (Au)	20		4	—	—	—	—	0,13
Pt	20	Cu (Au)	4,2	20	4	—	—	—		—
	—	Pt	4,2	6	8_b	−1,2	—	—	0,34	0,14
Au	4,2	PuO_2	4,2	45		0	—	2700		—
UO_2 [6]	4,2	PuO_2	77	48	4	0	—	—	—	—

38.4. ИЗОМЕРНЫЙ СДВИГ

Таблица 38.3

Изомерный сдвиг δ некоторых веществ относительно металлического железа при температуре 300°К [4]

Вещество	δ, мм/сек	Вещество	δ, мм/сек
Au	0,639	Mo	−0,060
Sn	−0,550	Ta	−0,033
Zn	0,527	Te	0,0
Sb	−0,325	Nb	+0,015
Pt	0,347	$K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$	+0,045
Cu	−0,290	Нерж. сталь	+0,090
Ir	−0,225	Ti	+0,109
Pd	0,165	Cr	+0,152
Re	−0,120	V	+0,195
Ru	0,114	$Na_2[Fe(CN)_5NO] \cdot 2H_2O$	+0,257

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Физический энциклопедический словарь.** М., «Советская энциклопедия», 1963, с. 183.
2. **Mössbauer** Effect. Principle and Applications. Wertheim G. K. Acad. Press. N. Y. — Lond., 1964.
   Вертхейм Г. Эффект *Мёссбауэра*. Пер. с англ. Под ред. В. В. Скляревского. М., «Мир», 1966.
3. **Шпинель В. С.** Резонанс гамма-лучей в кристаллах. М., «Мир», 1969.
4. **Muir A. H., Ando K. J., Coogan H. M.** *Mössbauer* Effect Data Index 1958–1965. Inter science Publ. New York — London — Sydney, 1966.
5. **Бескровный А. И., Лебедь Н. А., Остапович Ю. М.** В кн. «Proceedings of the Conf. on *Mössbauer* Spectrometry.", Dresden, 1971, v. 2, p. 583.
6. Ruby S. L. e. a. "Phys. Rev.", 1969, v. 184, p. 374.

ГЛАВА 39

РЕАКЦИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕЙТРОНОВ

39.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЙТРОНА

Масса покоя [1] . . . . . $1{,}674954(86) \cdot 10^{-24}$ г = $1{,}008665012(37)$ а. е. м.

Заряд . . . . . $< 10^{-14}$ заряда электрона [2].

Распад [3] . . . . . $n_0^1 \to p^+ + e^- + \nu^-$, $T_{1/2} = (11{,}7 \pm 0{,}3)$ *мин*.

Верхняя граница энергии β-частиц . . . . . (782 ± 13) *кэв* [3].

Спин . . . . . $\pm 1/2$.

Собственная энергия нейтрона . . . . . 939,5 *Мэв*.

Магнитный момент [4]:

$$\mu_n = (-1{,}913148 \pm 0{,}000066)\ \mu_я,$$

где $\mu_я = (0{,}5050824(20)) \cdot 10^{-23}$ *эрг/гс* — ядерный магнетон.

Электрический дипольный момент нейтрона меньше, чем дипольный момент системы, состоящей из двух электронных зарядов, разделенных расстоянием в $5 \cdot 10^{-21}$ *см* [4].

Таблица 39.1

Длины волн, соответствующие различным энергиям нейтронов

Группа нейтронов		λ_0, *ангстрем*	T, °К	v, *см/сек*	λ, *см*
Холодные	$E < 0{,}01$ *эв*	0,001	11,6	$4{,}37 \cdot 10^4$	$9{,}04 \cdot 10^{-8}$
Тепловые	$E \approx 0{,}01 \div 0{,}1$ *эв*	0,0452	293	$2{,}196 \cdot 10^5$	$1{,}80 \cdot 10^{-8}$
Резонансные	$E \approx 0{,}1 \div 50$ *эв*	1,0	$1{,}16 \cdot 10^3$	$1{,}38 \cdot 10^6$	$2{,}85 \cdot 10^{-10}$
Медленные	$E \approx 50 \div 500$ *эв*	100	$1{,}16 \cdot 10^5$	$1{,}38 \cdot 10^7$	$2{,}86 \cdot 10^{-11}$
Промежуточных энергий	$E \approx 500 \div 10^6$ *эв*	10^5	$1{,}16 \cdot 10^8$	$1{,}38 \cdot 10^8$	$2{,}86 \cdot 10^{-12}$
Быстрые	$E \approx 10^6 \div 10^7$ *эв*	10^6	$1{,}16 \cdot 10^{10}$	$1{,}38 \cdot 10^9$	$2{,}86 \cdot 10^{-13}$
Очень больших энергий	$E \approx 10^7 \div 10^8$ *эв*	10^8	$1{,}16 \cdot 10^{12}$	$1{,}26 \cdot 10^{10}$	$2{,}79 \cdot 10^{-14}$
Релятивистские	$E \gg 10^8$ *эв*	10^{10}	$1{,}16 \cdot 10^{14}$	$2{,}99 \cdot 10^{10}$	$1{,}14 \cdot 10^{-14}$

39.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОГОВЫХ РЕАКЦИЙ. ЭНЕРГИИ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ЯДЕР

Характеристики пороговых реакций. В ядерной реакции $A_1 + A_2 \to A_3 + A_4 + Q$, когда два начальных частицы A_1 и A_2 превращаются в две конечные частицы A_3 и A_4, тепловой эффект реакции или энергетический выход Q определяется массами m_1, m_2, m_3, m_4 частиц, участвующих в реакции:

$$Q = (m_1 + m_2 - m_3 - m_4)\, c^2,$$

где c — скорость света в вакууме. Если Q — отрицательная величина, то в лабораторной системе координат (L-система), где частица A_2 покоится, реакция протекает лишь тогда, когда кинетическая энергия W_1 падающей частицы A_1 больше энергии порога реакции $E_{п}$:

$$E_{п} = |Q| \frac{m_1 + m_2}{m_2}.$$

При учете релятивистских эффектов:

$$E_{\text{п}} = |Q|\left(\frac{m_1+m_2}{m_2} + \frac{1}{2}\,\frac{|Q|}{m_2 c^2}\right).$$

В лабораторной системе координат кинетические энергии W_3 и W_4 частиц — продуктов реакции, вылетающих под углами θ_3 и θ_4 к направлению падающей частицы A_1, определяются формулами

$$W_3 = \frac{1}{M^2}\left\{\sqrt{m_1 m_3 W_1}\cos\theta_3 \pm \left[m_1 m_3 W_1 \cos^2\theta_3 + M(m_4 Q + (m_4 - m_1) W_1)\right]^{1/2}\right\}^2,$$

где $M = m_3 + m_4$. Выражение для W_4 получается из предыдущего перестановкой индексов 3 и 4. Углы вылета θ_3 и θ_4 ограничены условиями:

$$\sin^2\theta_3 \leqslant \frac{m_4}{m_3}\left\{\frac{M}{m_1}\left[1 - \frac{|Q|}{W_1}\right] - 1\right\};$$

$$\sin^2\theta_4 \leqslant \frac{m_3}{m_4}\left\{\frac{M}{m_1}\left[1 - \frac{|Q|}{W_1}\right] - 1\right\}.$$

Тепловой эффект реакции Q может быть найден по значению кинетической энергии частицы W_3 и углу вылета θ_3:

$$Q = -\frac{M}{m_4} W_3 - \frac{m_4 - m_3}{m_4} W_1 - \frac{2\sqrt{m_1 m_3 W_1 W_3}}{m_4}\cos\theta_3.$$

Таблица 39.2

Энергии первого E_1 и второго E_2 возбужденных состояний ядер некоторых изотопов [5,6]

Ядро	E_1, Мэв	E_2, Мэв	Ядро	E_1, Мэв	E_2, Мэв
^2D, ^4He	Нет	Нет	^{14}N	2,31	3,95
^6Li	2,19	3,57	^{16}O	6,06	6,13
^7Li	0,479	4,63	^{18}O	1,98	2,15
^9Be	1,70	2,43	^{19}F	0,11	0,20
^{10}B	0,717	1,74	^{23}Na	0,44	2,08
^{11}B	2,14	4,46	^{24}Na	1,37	4,12
^{12}C	4,44	7,66	^{25}Mg	0,584	0,975
	3,09	3,68	^{26}Mg	1,81	2,94

Продолжение табл. 39.2

Ядро	E_1, Мэв	E_2, Мэв	Ядро	E_1, Мэв	E_2, Мэв
^{27}Al	0,842	1,013	^{105}Ag	0,093	0,126
^{28}Si	1,772	4,61	^{106}Ag	0,087	0,129
^{31}P	1,265	2,232	^{110}Cd	0,656	1,38
^{32}S	2,24	3,78	^{113}Cd	0,615	1,23
^{34}Cl	1,22	1,762	^{114}Cd	0,556	1,278
^{35}Cl	0,84	1,73	^{120}In	0,375	0,595
^{40}K	2,53	2,82	^{116}Sn	1,29	2,12
^{40}Ca	3,351	3,73	^{118}Sn	1,22	1,75
^{44}Ca	1,158	1,883	^{120}Sn	1,18	2,215
^{46}Ti	0,892	2,01	^{121}Sb	0,506	0,573
^{48}Ti	0,99	2,31	^{127}I	0,058	0,203
^{51}V	0,321	0,928	^{136}Ba	1,43	1,89
^{52}Cr	1,46	2,43	^{181}Ta	0,136	0,152
^{55}Mn	0,13	0,98	^{182}W	0,101	0,329
^{56}Fe	0,845	2,08	^{183}W	0,046	0,099
^{57}Fe	0,13	0,35	^{184}W	0,11	0,35
^{58}Fe	0,8	1,6	^{186}W	0,125	0,730
^{59}Co	1,098	1,289	^{194}Pt	0,328	0,621
^{60}Ni	1,45	2,45	^{196}Pt	0,099	0,130
^{62}Ni	1,33	2,16	^{198}Pt	0,354	0,686
^{63}Cu	0,668	0,961	^{197}Au	0,077	0,268
^{65}Cu	0,770	1,12	^{198}Hg	0,158	0,208
^{64}Zn	0,980	2,25	^{200}Hg	0,368	0,947
^{66}Zn	0,064	0,118	^{206}Pb	0,803	1,341
^{67}Zn	1,04	2,4	^{207}Pb	0,569	0,894
^{70}Ge	1,036	1,21	^{208}Pb	2,62	3,20
^{74}Ge	0,69	0,84	^{209}Bi	0,90	1,62
^{73}Ge	0,596	1,25	^{230}Th	0,053	0,174
^{75}As	0,199	0,265	^{232}Th	0,049	0,163
^{79}Se	0,55	1,2	^{233}U	0,0404	0,092
^{89}Sr	1,85	2,76	^{234}U	0,007	0,013
^{91}Y	0,913	1,53	^{235}U	0,046	0,151
^{90}Zr	1,77	2,2	^{238}U	0,045	0,148
^{92}Zr	0,93	1,83	^{239}Pu	0,006	0,057
^{93}Nb	0,029	0,763	^{240}Pu	0,043	0,142
^{95}Mo	0,201	0,762	^{241}Pu	0,044	0,090
^{98}Mo	0,770	1,61			

39.3. РЕАКЦИИ (n, γ)

Таблица 39.3

Спектр γ-квантов, испускаемых при поглощении тепловых нейтронов различными ядрами [6]

Исходное ядро	Число фотонов с энергией E, Мэв, на 100 поглощенных нейтронов							Наибольшая энергия γ-квантов, Мэв
	$E = 0 \div 1$	$E = 1 \div 2$	$E = 2 \div 3$	$E = 3 \div 5$	$E = 5 \div 7$	$E = 7 \div 9$	$E > 9$	
H	0	0	100	0	0	0	0	2,23
D	0	0	0	0	100	0	0	6,24
Li	—	—	—	—	40	60	0	7,20
Be	0	0	0	54	73	0	0	6,80
^{10}B	0	0	0	110	28	60	0,5	11,47
^{14}N	0	0	0	100	0	0	0	4,95
O	—	—	—	64	11	15	12	10,83
Ne	—	100	—	—	111	0	0	6,60

Исходные ядра	Числа фотонов с энергией E, Мэв, на 100 поглощенных нейтронов							Поперечное сечение γ-излучения, барн
	E = 0÷1	E = 1÷2	E = 2÷3	E = 3÷6	E = 6÷7	E = 7÷8	E > 8	
Na	96	127	187	70	31	0	0	6,41
Mg	—	—	28	72	10	2,3	0,57	11,09
Al	236	195	69	62	19	19	0	7,721
Si	100	63	30	89	11	41	0,1	10,59
P	290	97	55	98	27	7,2	0	7,94
S	70	32	72	70	44	6,5	0	6,64
Cl	49	85	41	47	55	24	0	8,55
K	100	81	57	106	37	4,7	0	9,36
Ca	14	191	77	85	64	1,8	0	7,83
Sc	62	59	38	65	29	12	0	8,85
Ti	54	160	16,0	24	78	1,3	0,2	10,47
V	83	132	11,4	21	67	16	0	7,98
Cr	85	41	21	12	23	39	6,4	9,716
Mn	125	91	60	50	34	17	0	7,261
Fe	75	60	27	23	25	38	2,1	10,16
Co	61	26	17	42	52	8,5	0	7,480
Ni	84	40	23	23	34	62	0,8	8,997
Cu	68	47	26	30	27	41	0	7,914
Zn	156	98	67	48	20	16	1	9,51
Ga	—	—	—	57	34	0,2	0	7,73
As	—	—	—	47	22	1	0	7,30
Se	—	—	—	65	27	9	1,7	10,483
Br	—	—	—	79	41	6,4	0	7,879
Sr	—	—	—	69	51	14	0,1	9,22
Y	71	23	6	50	59	0	0	6,85
Zr	—	—	—	113	36	4	0	8,66
Nb	—	—	—	54	14	0,4	0	7,19
Mo	137	18	—	84	25	3	0,03	9,15
Rh	91	99	61	38	10	0	0	6,792
Ag	92	87	64	70	17	0,5	0	7,27
Cd	135	92	95	73	17	1	0,1	9,046
In	102	187	78	36	4	0	0	5,86
Sn	210	153	67	139	33	4	0,4	9,35
Sb	150	99	58	36	12	0	0	6,80
Te	68	—	—	—	—	—	—	—
J	30	—	—	97	22	0	0	6,71
Cs	46	—	—	61	25	0	0	6,702
Ba	—	—	—	75	14	1,4	0,1	9,27
La	21,7	8,2	—	35	12,5	0	0	5,045
Pr	—	—	—	34	8	0	0	5,83
Nd	105	—	—	—	—	—	—	—
Sm	167	150	109	45	5	1	0	7,89
Eu	106	153	199	56	5,5	0	0	6,05
Gd	194	117	160	23	34	0,3	0	7,33
Tb	7	—	—	—	—	—	—	—
Dy	90	102	106	43	10	0	0	5,87
Ho	—	98	77	49	8	0	0	6,1
Er	225	145	133	103	14	0	0	6,68
Tm	—	91	73	55	10	0	0	6,5
Hf	137	137	85	52	12	0,5	0	7,62
Ta	137	99	68	60	5	0	0	6,04
W	68	82	59	53	15	0,5	0	7,42
Re	124	88	62	51	10,5	0	0	6,14
Ir	96	85	58	51	19,6	0	0	6,068
Pt	109	92	64	45	15	1	0	7,92
Au	100	69	33	68	38	0,1	0	6,494
Hg	94	122	55	85	41	0	0	6,446
Tl	—	—	—	75	62	0	0	6,54
Pb	0	0	0	0	7	93	0	7,35
Bi	0	0	0	100	0	0	0	4,17
^{232}Th	118	140	64	17	0	0	0	4,92
^{238}U	254	178	91	34	0	0	0	4,062

Таблица 39.4

Сечения реакции (n, γ) в резонансной области для некоторых ядер [6]

Мишень	σ, барн	Мишень	σ, барн
^{110}Cd	2100	^{164}Dy	5000
^{130}Xe	$2{,}7\cdot10^{4}$	^{168}Yb	11000
^{148}Sm	$6\cdot10^{4}$	^{175}Lu	4000
^{151}Sm	9000	^{174}Hf	1500
^{151}Eu	9000	^{191}Ir	4000
^{153}Eu	5500	^{193}Au	35000
^{154}Eu	1000	^{196}Hg	3000
^{155}Eu	1400	^{198}Hg	2500
^{155}Gd	$7\cdot10^{4}$	^{203}Tl	1400
^{157}Gd	$1{,}6\cdot10^{5}$	^{205}Tl	1500
^{164}Dy	2600	^{209}Bi	3000

39.4. РЕАКЦИИ (n, n')

При неупругом рассеянии захват ядром $^{A}_{Z}X$ нейтрона приводит к образованию составного ядра $^{A+1}_{Z}X$, которое впоследствии испускает нейтрон с меньшей энергией, чем первоначальный. После эмиссии нейтрона ядро остается в возбужденном состоянии, переход из которого на основное состояние возможен путем испускания одного или нескольких γ-квантов. Неупругое рассеяние нейтронов возможно только в том случае, если энергия нейтрона в $(A+1)/A$ раз превышает энергию первого (низшего) возбуждённого состояния ядра-мишени. Как правило, энергия порога с увеличением массового числа A уменьшается.

Неупругое рассеяние не может быть полностью описано единственным сечением. Если кинетическая энергия нейтрона E достаточна для возбуждения нескольких уровней, то возбуждение каждого из них может

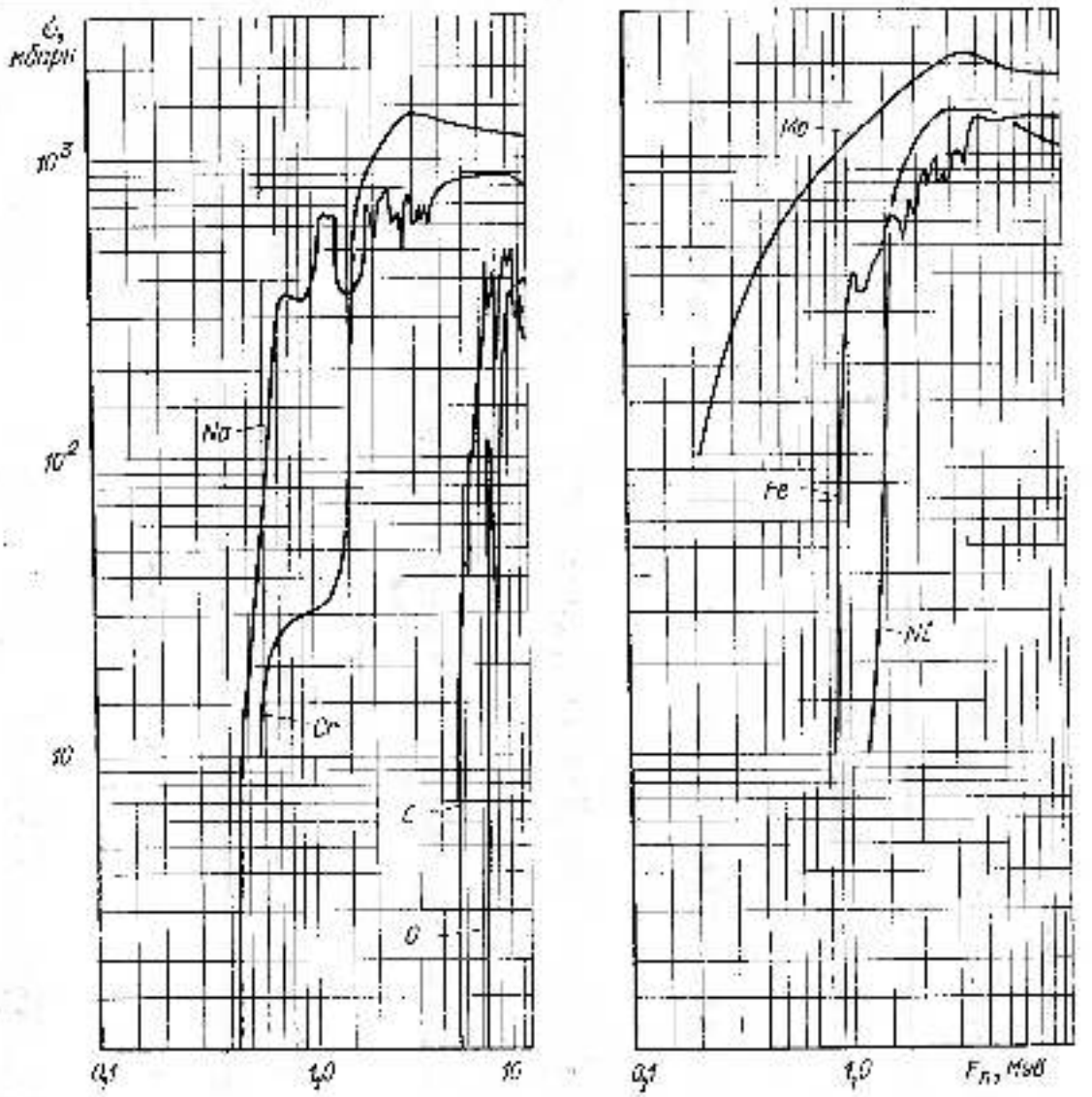


Рис. 39.1. Зависимость сечения неупругого рассеяния нейтронов σ (n, n') для различных ядер — — — — — от энергии нейтронов E_n [11]. —

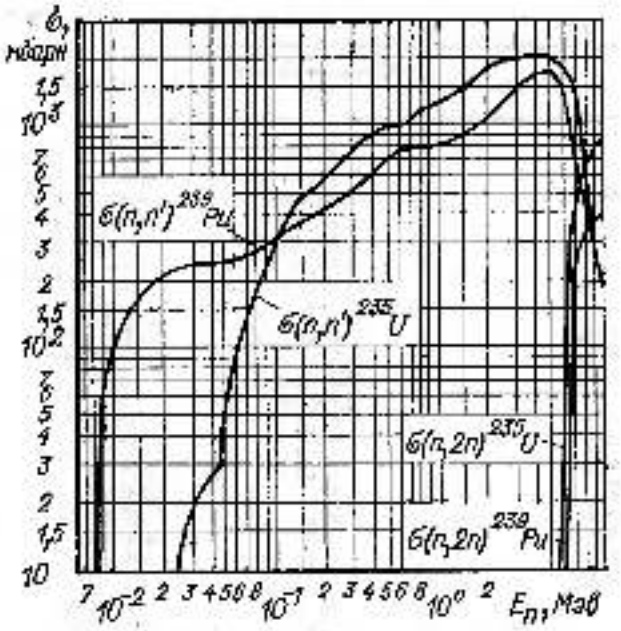


Рис. 39.2. Зависимость сечения σ неупругого рассеяния (n,n') и реакции (n, 2n) для ^{235}U и ^{239}Pu от энергии нейтронов E_n [11].

происходить со своим собственным значением сечения $\sigma(E \to \varepsilon)$; здесь ε — энергия нейтрона после рассеяния. Однако измерения дифференциального сечения $\sigma(E \to \varepsilon)$ достаточно сложны, поэтому часто приводятся интегральные сечения неупругого рассеяния $\sigma_{in}(E)$, которые представляют собой вероятность того, что нейтрон потеряет какую-то количество энергии помимо потери, обусловленной отдачей ядра мишени.

39.5. РЕАКЦИИ (n, 2n)

Если энергия нейтрона на несколько мегаэлектронвольт превышает порог реакции (n, 2n), то эта реакция, как правило, идет с большой вероятностью. Сечение реакции (n, 2n) может быть оценено по формуле [4]:

$$\sigma(n, 2n) = \sigma(n, n)\left[1 - (1 + \varepsilon/T)\,e^{-\varepsilon/T}\right],$$

где $\sigma(n, n) \approx \pi R^2$ — сечение первичного испускания нейтрона; R — радиус ядра; ε — разница энергий вылетающего нейтрона и порога реакции; T — температура остаточного ядра. Тяжелые элементы имеют температуру остаточного ядра $T \sim 1$ МэВ, и легкие ядра несколько больше.

Таблица 39.5

Интегральные сечения неупругого рассеяния $\sigma_{in}(n, n')$

Представлены сечения неупругого рассеяния нейтронов, отвечающие случаям, при которых нейтрон с начальной энергией E имеет после рассеяния энергию меньшую, чем граничная энергия $E_{гр}$ [7]. Обозначения: $E \to E_{гр}$ — минимальный сброс энергии; Сп. дел. — спектр деления.

Элемент	$E \to E_{гр}$, МэВ	$\sigma_{in}(E, n')$, барн	Элемент	$E \to E_{гр}$, МэВ	$\sigma_{in}(E, n')$, барн
Be	14→9	0,18÷0,17	Zr	Сп. дел. →0,7	0,302÷0,020
B	14→8	0,24÷0,04	Ag	Сп. дел. →0,7	0,513÷0,016
C	14→5	0,25÷0,04	Cd	Сп. дел. →0,7	0,560÷0,070
N	14→5	0,16÷0,16		14→9	0,05÷0,07
Al	14→8	0,52÷0,07	Sn	Сп. дел. →0,7	0,959÷0,091
	Сп. дел. →0,7	0,067÷0,082	W	Сп. дел. →0,7	1,010÷0,165
Ti	Сп. дел. →0,7	0,187÷0,069		8→1,5	2,4
V	Сп. дел. →0,7	0,214÷0,090	Au	14→8	0,06÷0,04
Fe	14→9	1,21÷0,60		Сп. дел. →0,7	1,40÷0,12
	Сп. дел. →0,7	0,270÷0,081	Pb	14→8	0,29÷0,04
Ni	Сп. дел. →0,7	0,376÷0,061		Сп. дел. →0,7	0,246÷0,05
Cu	Сп. дел. →0,7	0,501÷0,041		9,5→1	0,35
	14→8	1,32÷0,06	Bi	14→8	0,38÷0,08
Zn	Сп. дел. →0,7	0,506÷0,092		Сп. дел. →0,7	0,197÷0,035
As	Сп. дел. →0,7	1,07			

Таблица 39.6

Пороги реакции (n, 2n) для различных изотопов [2]

Мишень	A	Энергия порога, МэВ	Мишень	A	Энергия порога, МэВ	Мишень	A	Энергия порога, МэВ
H	2	3,34	Tc	54	14,1	Br	115	9,1
	3	8,33		56	11,3	Sn	118	9,2
Li	6	6,2		57	7,9		119	6,6
	7	8,2	Co	59	10,5		124	8,6
Be	9	1,85	Ni	60	11,9	Sb	121	8,3
B	10	9,4		61	7,6		128	9,4
	11	12,0	Cu	63	11,1	Te	—	6,6
C	12	20,3		65	10,2	I	127	9,4
N	14	11,3	Zn	64	11,9	Cs	133	9,1
O	16	17,3		66	11,3	Ba	—	6,8
F	19	10,9		67	7,1	La	139	8,0
Ne	23	12,6		68	10,3	Ce	140	8,1
Mg	24	17,1		70	9,3		142	7,2
	25	7,5	Ga	69	10,2	Pr	141	8,5
	26	11,6		71	9,2	Nd	150	7,4
Al	27	13,2	As	75	10,4	Ta	181	7,6
Si	28	17,4	Se	80	9,9	W	—	6,3
	29	8,7	Br	79	10,9	Re	187	7,3
P	31	12,6		81	10,3	Ir	193	7,6
S	32	15,3	Sr	86	9,6	Pt	194	9,5
	34	11,2		87	8,5		196	6,1
Cl		10,2		88	11,8		198	5,2
K	39	13,6	Zr	90	12,6	Au	197	6,1
Ca	40	16,3		91	7,3	Hg	201	6,3
Ti	46	13,6	Nb	93	8,8	Tl	203	6,8
	48	11,8	Mo	92	13,4		205	7,9
	49	8,9		97	7,2	Pb	206	8,3
V	51	11,4	Ru	—	7,1		207	6,9
Cr	52	13,7	Rh	103	9,4		208	7,4
	52	12,0	Pd	—	7,1	Bi	209	7,4
	53	7,9	Ag	105	9,1	Th	232	6,4
Mn	55	10,3	Cd	113	6,6	U	238	6,0

Таблица 39.7

Сечения реакции $(n, 2n)$ [5]

Ядро	Энергия нейтронов, Мэв	$\sigma(n, 2n)$, мбарн
^{2}H	6,11	67±7
	6,55	73±7
	7,32	88±9
	8,25	110±10
	10,2	140±15
	14,1	190±200
^{4}He	90	16±1,6
Li	14	<100
^{9}Be	Сп. дел.	73±20
	Po-α-Be	310±50
B	14,1	180±2
C	14,1	8±6
	23	44
	27	100
N	12,41	3,03±0,75
	14,1	15±4
	14,7	8,7±0,9
	17,98	11,5±1,2
	Li + D	1,9
	$E_{макс}$ — 13,8	
F	14,1	56±7
Na	14,1	13,8±2,2
P	14,4	10,9±8,5
	17,98	74±7,4
Cl	14,4	5,42±0,4
^{39}K	14,4	3,37±0,27
Sc	Li + D	39
Ti	14,1	520±40
V	14,1	660±50
^{50}Cr	14	32±3,2
Mn	Сп. дел.	1,5
	14,1	900±70
Fe	14	180±30
	14,1	600±40
Co	14,1	870±70
^{58}Ni	Сп. дел.	$1,2\cdot10^{-3}$
	13,52	13±7 [6]
	14,09	23,5±1,2 [8]
	16,50	53,3±1,3 [8]
	19,76	77,4±3,9 [8]
^{63}Cu	Li + D	314
	12,41	186±19 [9]

Продолжение табл. 39.7

Ядро	Энергия нейтронов, Мэв	$\sigma(n, 2n)$, мбарн
	14,74	507±46 [9]
	17,98	836±75 [9]
^{65}Cu	12,05	504±25 [10]
	14,09	908±36 [10]
	16,50	997±56 [10]
	19,76	986±49 [10]
Zn	Li + D	~190
	14	330±60
^{69}Ga	14,8	1070±110
^{71}Ga	14,5	2180±220
^{70}Ge	Сп. дел.	1,5
	Li + D	389
^{75}Se	14,8	1500±500
^{79}Br	14,5	1140±300
^{81}Br	14,5	828±170
Zr	14,1	1250±90
Mo	14,1	1590±120
Ag	14	770±80
Cd	14	890±20
^{115}In	13,3	1428±71
	19,76	1360±140
Sn	14	1040±20
Sb	14	1520±200
^{130}Te	14,5	599±120
I	14,5	1120±400
Cs	14	1600±250
Pr	14,4	1801±130
Nd	14,4	2410±200
Ta	14,1	2640±200
^{187}Re	14,8	1675±170
Au	14,1	2600±200
Hg	14	1900±300
Pb	14	2300±190
	14,1	2710±200
Bi	14,1	2300±190
U	Сп. дел.	11,7±3
^{237}Np	14,5	390

39.8. РЕАКЦИИ С ИСПУСКАНИЕМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

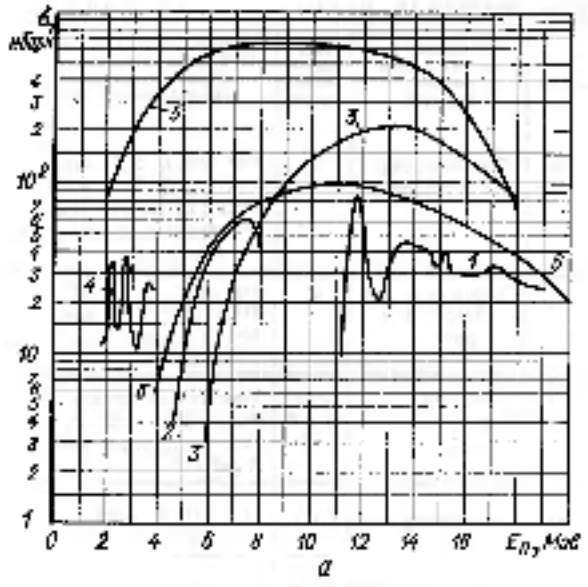
Из составного ядра, образованного при поглощении нейтрона, могут испускаться заряженные частицы, если энергия возбуждения составного ядра была достаточна для того, чтобы заряженная частица имела заметную вероятность проникновения через кулоновский барьер. Реакции с испусканием заряженной частицы на медленных нейтронах обычно экзотермичны, поскольку медленный нейтрон не может сообщить ядру энергию, необходимую для испускания заряженной частицы из ядра.

Таблица 39.8

Реакции на медленных нейтронах с образованием заряженных частиц [4, 5]

Реакция	σ (kT), барн
$^{3}He + n \to {}^{3}H + p + 0,764$ Мэв	5400
$^{6}Li + n \to {}^{3}H + \alpha + 4,785$ Мэв	945
$^{7}Be + n \to {}^{7}Li + p + 1,65$ Мэв	51000
$^{10}B + n \to {}^{7}Li + \alpha + 2,791$ Мэв	3837
$^{14}N + n \to {}^{14}C + p + 0,626$ Мэв	1,75
$^{17}O + n \to {}^{14}C + \alpha + 1,72$ Мэв	0,5
$^{33}S + n \to {}^{33}P + p + 0,75$ Мэв	0,002
$^{35}Cl + n \to {}^{35}S + p + 0,62$ Мэв	0,3
$^{23}Na + n \to {}^{23}Ne + p$	0,0007*
$^{24}Mg + n \to {}^{24}Na + p - 4,734$ Мэв	0,001*
$^{27}Al + n \to {}^{27}Mg + p - 1,835$ Мэв	0,0028*
$^{28}Si + n \to {}^{28}Al + p - 3,867$ Мэв	0,004*
$^{31}P + n \to {}^{31}Si + p - 0,694$ Мэв	0,019*
$^{37}Cl + n \to {}^{36}S + p$	0,00024*
$^{54}Fe + n \to {}^{54}Mn + p - 2,98$ Мэв	0,011*

* Для нейтронов спектра деления.



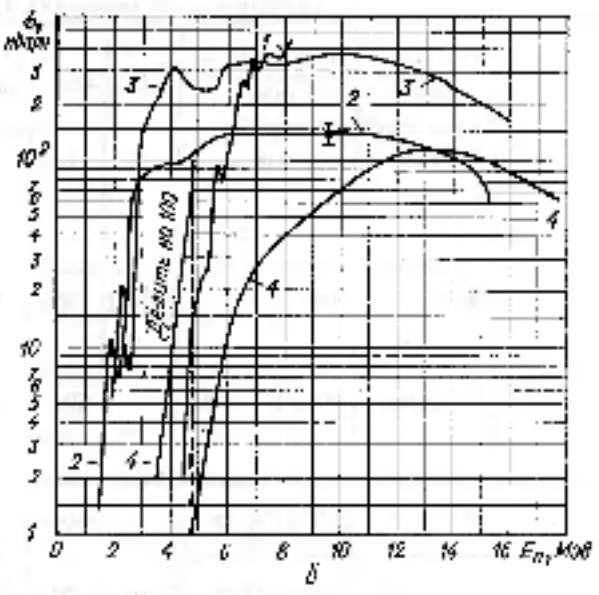
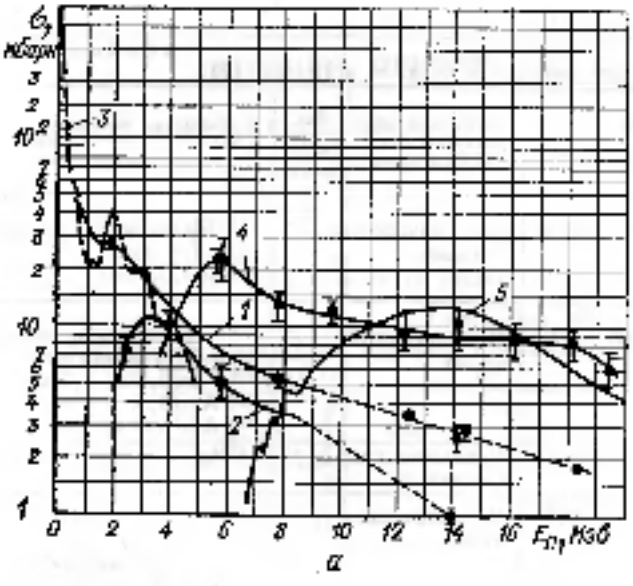


Рис. 39.3. Зависимость сечения σ реакции (n, p) для различных ядер от энергии нейтронов E_n:
а: 1 — $^{16}O(n, p)^{16}N$ [12]; 2 — $^{19}F(n, p)^{19}O$ [27]; 3 — $^{24}Mg(n, p)^{24}Na$ [25, 13]; 4 — $^{14}N(n, p)^{14}C$ [4]; 5 — $^{63}Ni(n, p)^{63}Co$ [25]; 6 — $^{27}Al(n, p)^{27}Mg$ [25];
б: 1 — $^{28}Si(n, p)^{28}Al$ [14]; 2 — $^{31}P(n, p)^{31}Si$ [25, 15]; 3 — $^{32}S(n, p)^{32}P$ [25, 16]; 4 — $^{56}Fe(n, p)^{56}Mn$ [25, 17].



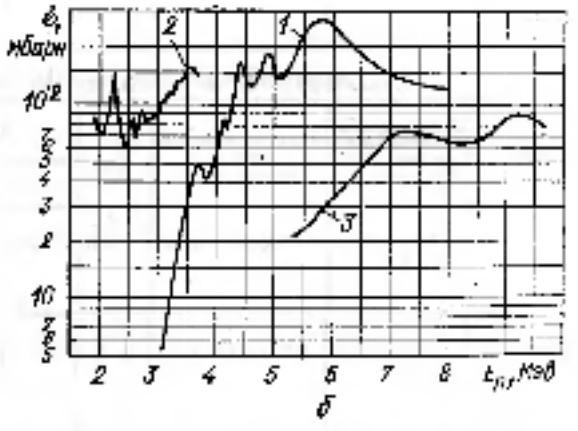


Рис. 39.4. Зависимость сечения σ для различных реакций в ядер от энергии нейтронов E_n:
а: 1 — $^{6}Li(n, p)^{6}H$ [26]; 2 — $^{9}Be(n, \alpha)^{6}He$ [18—20]; 3 — $^{10}B(n, \alpha)^{7}Li$ [24]; 4 — $^{10}B(n, 2\alpha)^{3}H$ [21, 22]; 5 — $^{27}Al(n, \alpha)^{24}Na$ [15, 23, 25];
б: 1 — $^{19}F(n, \alpha)^{16}N$ [27]; 2 — $^{14}N(n, \alpha)^{11}B$ [4]; 3 — $^{32}S(n, \alpha)^{29}Si$ [16].

39.7. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОГОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ НЕЙТРОНОВ

В табл. 39.9—39.11 приведены $E_n^{эф}$ — эффективный порог детектора нейтронов; E_n — пороговая энергия; $\bar{\sigma}$ — сечение реакции, усредненное по спектру деления $N(E)$; n_0 — сечение на кулон. Эти величины связаны соотношением:

$$\int_0^\infty N\sigma_{эф}(E)\,dE = n_0 \int_{E_n^{эф}}^\infty N(E)\,dE = \bar{\sigma}\int_0^\infty N(E)\,dE.$$

Таблица 39.9

Характеристики порогового детектора, реакция (n, p) [25]

Элемент	Ядро-мишень (содержание нуклида, %)	Продукт реакции (период полураспада)	$E_{пр}$, Мэв	σ_{0}, мбарн	σ_{0}^{Φ}, Мэв	$\bar{\tau}$, мбарн	Материал, из которого изготовлен детектор	Вид радиоактивности	Побочные активности (период полураспада, Мэв; период полураспада)
Фосфор	^{31}P (100)	^{31}Si (157 мин)	0,710	140	3,0	30	Фосфоросодержащее стекло	β^-	^{32}P (12,7; 2,6 мин) ^{28}Al (2,0; 2,3 мин) ^{29}Al (13,6; 6,6 мин) ^{32}P (тепловая энергия; 14,2 дня)
Сера	^{32}S (95)	^{32}P (14,2 дня)	0,954	250	3,2	60	Таблетки, содержащие серу	β^-	^{35}P (8,7; 25 дней) ^{31}Si (1,92; 157 мин) ^{35}S (тепловая энергия; 87 дней)
Никель	^{58}Ni (68)	^{58}Co (72 дня)	—	600	3,45	100	Металлический никель	γ, (э.з.*) β^+	^{57}Ni (12,6; 36 ч) ^{61}Co (0,5; 1,65 ч) ^{56}Ni (тепловая энергия; 2,56 ч)
Железо	^{57}Fe (5,82)	^{57}Mn (290 дней)	—	400	2,75	53	Металлическое железо	γ (э.з.)	^{51}Cr (27,8 дня) ^{56}Mn (2,95; 154,5 мин)
Алюминий	^{27}Al (100)	^{27}Mg (9,393 мин)	1,59	80	5,30	3,5	Металлический алюминий	γ, β^-	^{28}Al (тепловая энергия; 2,3 мин) ^{24}Na (3,26; 14,97 ч)
Железо	^{56}Fe (91,6)	^{56}Mn (154,5 мин)	2,95	130	7,70	0,97	Металлическое железо	γ, β^-	^{51}Cr (27,8 дня) ^{54}Mn (290 дней)
Магний	^{24}Mg (78,8)	^{24}Na 14,97 ч	4,9	200	8,00	1,2	Металлический магний	γ, β^-	—

* э.з. — электронный захват.

Таблица 39.10

Характеристики пороговых детекторов, реакции (n, n'), (n, α) и $(n, 2n)$ [25]

Элемент	Ядро-мишень (содержание нуклида, %) Тип реакции	Продукт реакции (период полураспада)	$E_{пр}$, Мэв	σ_{0}, мбарн	σ_{0}^{Φ}, Мэв	$\bar{\tau}$, мбарн	Материал, из которого изготовлен детектор	Вид радиоактивности	Побочные активности (период полураспада, Мэв; период полураспада)
Родий	^{103}Rh (100) (n, n')	^{103m}Rh (57 мин)	0,040	1500	0,9	1093	Металлический родий	γ, e^-	^{104m}Rh (тепловая энергия; 4,4 мин) ^{105}Rh (9,5; 210 дней)
Индий	^{115}In (95,8) (n, n')	^{115m}In (4,5 ч)	0,335	350	1,65	171	Металлический индий	γ, e^-	^{114m}In (тепловая энергия; 54,1 мин) ^{114m}In (0,393; 1,7 ч) ^{113}Ag (9,5; 5,3 ч) ^{112}Ag (3,4 ч)
Алюминий	^{27}Al (100) (n, α)	^{24}Na (14,97 ч)	3,25	120	8,15	0,61	Металлический алюминий	γ, e^-	^{27}Mg (1,89; 9,39 мин)
Медь	^{63}Cu (30,91) $(n, 2n)$	^{62}Cu (9,8 ч)	10,1	1000	11,7	0,31	Металлическая медь	γ, β^+, β^-	^{61}Co (10,5; 1,65 ч) ^{62}Ni (2,56 ч) ^{64}Cu (тепловая энергия; 12,8 ч)
Медь	^{63}Cu (69,09) $(n, 2n)$	^{62}Cu (9,8 мин)	10,9	800	13,2	0,073	Металлическая медь	β^-	^{60m}Co (10,5 мин) ^{64}Cu (тепловая энергия; 5,1 мин) ^{61}Co (13,9 мин) ^{62}Ni (2,56 ч) ^{61}Co (1,65 ч)
Никель	^{58}Ni (68,0) $(n, 2n)$	^{57}Ni (37 ч)	12,0	80	14	$4 \cdot 10^{-3}$	Металлический никель	γ, β^+	^{56}Ni (тепловая энергия; 2,56 ч) ^{61}Co (0,5; 1,65 ч)

Таблица 39.11

Характеристики пороговых детекторов деления [14]

Изотоп	E_n, Мэв	σ_f, барн	E_n^{Φ}, Мэв	Σ, барн
^{234}U	~0,3	1500	0,62	1200
^{237}Np	~0,4	1500	0,87	1100
^{238}U	~0,7	850	1,25	520
^{232}Th	~1,3	140	1,40	28
^{238}U	~1,3	606	1,55	310

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные формулы физики. Под ред. Д. Менцела. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1957.
2. Экспериментальная ядерная физика. Под ред. Э. Сегре. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
3. Сосновский А. И., Спивак П. Е. В кн.: «Физические исследования». М., Изд-во АН СССР, 1955, с. 235.
4. Кертис Л. Введение в нейтронную физику. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1965.
5. Гордеев И. В., Каргашев Д. А., Малышев А. В. Ядерно-физические константы. М., Госатомиздат, 1963.
6. Вейнберг А., Вигнер Е. Физическая теория ядерных реакторов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
7. Физика ядерных реакторов. Под ред. К. А. Стекольщика. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1964.
8. Raybiorn L. A. "Phys. Rev.", 1961, v. 122, p. 168.
9. Ferguson J. M., Thompson W. E. "Phys. Rev.", 1960, v. 118, p. 228.
10. Prestwood R. J., Bayhurst B. P. "Phys. Rev.", 1961, v. 121, p. 1438.
11. Schmidt J. J. Neutron Cross Sections for Fast Reactor Materials. Karlsruhe, 1962.
12. De Juren J. A., Stokesberry R. W., Wallis M. "Phys. Rev.", 1962, v. 127, p. 1229.
13. Cohen A. V., White P. H. "Nucl. Phys.", 1956, v. 1, p. 73.
14. Marion J. B., Brugger R. M., Chapman R. A. "Phys. Rev.", 1956, v. 101, p. 246.
15. Grundl J. A. e. a. "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 425.
16. Allen L. e. a. "Phys. Rev.", 1957, v. 107, p. 1303.
17. Terrell J., Holm D. M. "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 2081.
18. Stelson P. H., Campbell E. C. "Phys. Rev.", 1957, v. 106, p. 1253.
19. Bass R. e. a. "Nucl. Phys.", 1961, v. 23, p. 122.
20. Battat M. E., Ribe F. H. "Phys. Rev.", 1953, v. 89, p. 80.
21. Frye G. M., Gammel J. H. "Phys. Rev.", 1956, v. 103, p. 928.
22. Wyman M. E. e. a. "Phys. Rev.", 1958, v. 112, p. 1205.
23. Schmitt H. W., Halpern J. "Phys. Rev.", 1961, v. 121, p. 927.
24. Hichel H., Bonner T. W. "Phys. Rev.", 1957, v. 108, p. 1025.
25. Бекурц К., Вирц К. Нейтронная физика. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1968.
26. Murrey R. B., Schmidt H. W. "Phys. Rev.", 1959, v. 115, p. 1707.
27. Smith D. M., Bostrom N. A., Hockenbull E. L. "Phys. Rev.", 1960, v. 117, p. 514.

ГЛАВА 40

РЕАКЦИИ, ПРИВОДЯЩИЕ К ОБРАЗОВАНИЮ НЕЙТРОНОВ

40.1. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ НЕЙТРОНОВ

Для получения нейтронов обычно используют различные ядерные реакции, в которых участвуют ядра со слабосвязанными нейтронами. Как правило, в этих реакциях образуется сначала возбужденное промежуточное ядро с энергией возбуждения, равной сумме энергии связи и кинетической энергии (в системе центра масс) налетающей частицы, которая может быть γ-квантом, протоном или α-частицей. Если энергия возбуждения больше энергии связи «последнего нейтрона» в промежуточном ядре, то вероятность получения нейтрона достаточно велика.

Таблица 40.1

Энергии связи $E_{св}$ последнего нейтрона в легких ядрах [7]

Ядро	$E_{св}$, Мэв	Ядро	$E_{св}$, Мэв
^5H	2,225	^{13}C	18,720
^3H	6,258	^{14}C	4,947
^3He	7,719	^{14}C	9,176
^4He	20,577	^{15}N	20,326
^5He	-0,960	^{14}N	10,553
^6Li	5,663	^{15}N	10,834
^7Li	7,251	^{16}N	2,500
^8Li	2,033	^{15}O	13,229
^8Be	18,898	^{16}O	15,669
^9Be	1,665	^{17}O	4,142
^{10}Be	6,814	^{18}O	8,047
^9B	18,575	^{18}F	9,141
^{10}B	8,440	^{19}F	10,442
^{11}B	11,456	^{20}F	6,599
^{11}C	13,092		

40.2. РЕАКЦИИ (γ, n)

Фотонейтронные источники. Лишь для двух ядер, ^2H и ^9Be, можно подобрать радиоактивные излучатели γ-квантов, такие, у которых энергия γ-квантов E_γ были бы выше порога E_n реакции (γ, n). Поэтому все радиоактивные (γ, n)-источники содержат в качестве материала мишени дейтерий или бериллий [2]. Сечения реакций (γ, n) приведены на рис. 40.1. В принципе (за исключением разброса из-за различия в направлениях γ-квантов и испускаемых нейтронов) радиоактивные фотонейтронные источники позволяют получать моноэнергетические нейтроны. Энергия фотонейтронов может быть оценена из [2]:

$$E_n = \frac{A-1}{A}\left[E_\gamma - E_n - \frac{E_\gamma^2}{1862\,(A-1)}\right] + \delta,$$

где A — масса ядра мишени; E_n, E_γ и E_n, Мэв;

$$\delta = E_\gamma \cos\theta \left[\frac{2\,(A-1)\,(E_\gamma - E_n)}{931\,A^2}\right]^{1/2};$$

θ — угол между направлениями γ-кванта и испускаемого нейтрона.

Таблица 40.2

Энергии E_n порогов (γ, n) реакций [1, 4]

Мишень	A	E_n, Мэв	Мишень	A	E_n, Мэв
H	2	2,226±0,003	Zr	90	12,48±0,15
	3	6,25±0,01		91	7,2±0,4
Li	6	5,35±0,20	Nb	93	8,78±0,06
	7	7,15±0,07	Mo	92	13,26±0,15
Be	9	1,666±0,002		97	7,1±0,3
B	10	8,55±0,25	Rh	103	9,35±0,2
	11	11,50±0,25	Ag	107	9,353±0,034
C	12	18,7±0,1		109	9,196±0,026
N	14	10,54±0,1	Cd	113	6,5±0,15
O	16	16,3±0,4	In	115	9,05±0,2
F	19	10,4±0,3	Sn	118	9,10±0,2
Na	23	12,06±0,2		119	6,66±0,15
Mg	24	16,2±0,2		124	8,50±0,15
	25	7,25±0,2	Sb	121	9,31±0,06
	26	11,15±0,2		123	8,98±0,05
Al	27	12,75±0,2	Te	125	6,56±0,06
Si	28	16,9±0,4	I	127	9,135±0,022
	29	8,25±0,2	Cs	133	8,968±0,033
	30	10,6 [2]	Ba	137	6,949±0,038
P	31	12,2±0,2	La	139	8,775±0,025
S	32	14,9±0,4	Ce	140	9,00±0,2
	34	10,85±0,2		142	7,15±0,2
Cl	35	12,66±0,04[7]	Pr	141	9,381±0,023
	37	10,307±0,036	Nd	146	<6,38±0,16
Ar	40	9,9 [2]		150	7,40±0,2
K	39	13,2±0,2	Sm	149	6,46±0,10
Ca	40	15,9±0,4	Eu	151	8,04±0,11
	44	11,4 [2]		153	8,06±0,13
Sc	45	12,0 [2]	Gd	157	6,39±0,11
Ti	46	13,3±0,2	Tb	160	8,141±0,089
	49	8,7±0,3	Dy	163	6,32±0,11
V	51	11,16±0,2	Ho	165	8,16±0,08
Cr	50	13,4±0,2	Er	167	6,64±0,08
	52	11,80±0,25	Tm	169	8,11±0,05
	53	7,75±0,2	Yb	173	6,50±0,08
Mn	55	10,1±0,2	Lu	175	7,89±0,08
Fe	54	13,8±0,2	Hf	177	6,092±0,034
	56	11,15±0,25		179	6,31±0,07
	57	7,75±0,2		180	7,85±0,11
Co	59	10,25±0,2	Ta	181	7,640±0,025
Ni	58	11,7±0,2	W	183	6,29±0,05
	60	11,6 [2]		186	7,25±0,06
Cu	63	10,0±0,2	Re	187	7,18±0,08
	65	10,0±0,2	Ir	193	7,79±0,06
Zn	64	11,7±0,2	Pt	194	9,50±0,2
	66	11,15±0,2		196	6,205±0,04
	67	7,0±0,2		198	8,29±0,14
	68	10,15±0,2	Au	197	8,057±0,022
	70	9,2±0,2	Hg	199	6,59±0,09
Ga	69	10,10±0,2		201	6,21±0,07
	71	9,05±0,2		202	7,60±0,13
Ge	73	6,58±0,16 [6]	Tl	203	8,80±0,2
As	75	10,259±0,031		205	7,515±0,029
Se	82	9,8±0,5	Pb	206	8,09±0,07
Br	79	10,65±0,2		207	6,790±0,023
	81	10,136±0,035		208	7,404±0,028
Rb	85	10,65±0,08	Bi	209	7,432±0,010
	87	9,91±0,07	Th	232	6,85±0,04
Sr	86	9,50±0,2	U	238	6,97±0,10
	87	8,40±0,2			
	88	11,15±0,2			
Y	89	<11,59±0,08			

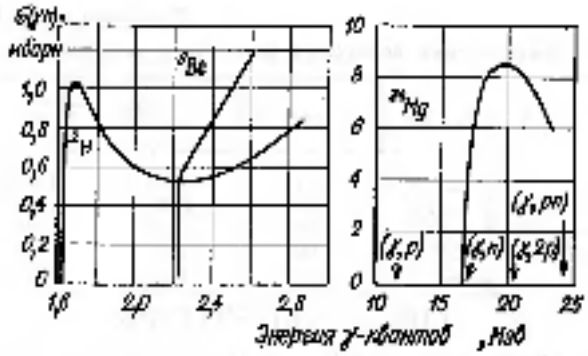


Рис. 40.1. Зависимость сечений реакции σ (γ, n) для дейтерия, бериллия и ^{24}Mg [2]. Стрелками показано расположение порогов для различных фотоядерных реакций на ^{24}Mg.

Таблица 40.3

Характеристики фотонейтронных источников [2, 6]

Обозначения: $T_{1/2}$ — период полураспада; E_γ — энергия γ-квантов; E_n — средняя энергия нейтронов; I — стандартный выход из мишени массой 1 г, находящейся на расстоянии 1 см от источника γ-квантов с активностью 1 кюри

Источник	$T_{1/2}$	E_γ, Мэв	E_n, Мэв	I, нейтронов/сек·г·кюри
^{24}Na + Be	14,8 ч	2,76	0,83	14
^{27}Mg + D_2O	14,5 ч	2,76	0,22	29
^{56}Mn + D_2O	2,59 ч	2,7	0,22	0,31
^{56}Mn + Be	2,59 ч	1,81; 2,13; 2,7	0,15; 0,30	2,9
^{72}Ga + Be	14,1 ч	1,87; 2,21; 2,51	0,2	5,9
^{72}Ga + D_2O	14,1 ч	2,51	0,13	5,9
^{88}Y + Be	87 дней	1,9; 2,8	0,158	10
^{88}Y + D	87 дней	2,8	0,31	6,3
^{116}In + Be	54 мин	1,5; 2,1	0,30	0,82
^{122}Sb + Be	60 дней	1,7	0,024	19
^{140}La + Be	40 дней	2,50	0,62	0,3
^{140}La + D_2O	40 дней	2,50	0,151	0,8
^{226}Ra + D_2O	6,7 лет	2,62	0,197	9,5
^{226}Ra + Be	6,7 лет	1,50; 2,62	0,827	3,5
Ra + Be	1620 лет	1,69; 1,75; 1,82; 2,00; 2,20; 2,42		3,0
Ra + D_2O	1620 лет	2,42	0,12	0,1

Таблица 40.4

Максимальное сечение $\sigma_{макс}$ реакции (γ, n) и положение пика $E_{макс}$ [2]

Мишень	$E_{макс}$, *Мэв*	$\sigma_{макс}$, *мбарн*
Li	17,5	4
^{12}C	22,5	8,3
^{16}O	24,2	11,4
^{14}N	24,2	2,8
^{25}Mg	20	8,5
^{26}Mg	20	16
^{28}Si	15	23
^{31}P	19	16,6
Cl	19	39
^{40}Ar	20	58
^{40}Ca	19,6	15
^{51}V	17,7	100
Cr	19,7	105
Ni	16,5	60
Br	16,0	175
^{88}Sr	16,0	155
^{89}Sr	16,8	200
^{89}Y	16,3	190
^{90}Zr	16,4	180
^{91}Zr	16,3	200
Ta	15	630
Pb	13,7	810
Bi	14,2	920

Таблица 40.5

Образование фотонейтронов в D_2O под действием долгоживущих продуктов деления ^{235}U [8]

Период полураспада	Число фотонейтронов на один нейтрон деления, 10^{-4}
53 *ч*	0,0106
4,4 *ч*	0,033
1,66 *ч*	0,241
27 *мин*	0,214
7,7 *мин*	0,246
2,4 *мин*	0,728
41 *сек*	2,11
2,5 *сек*	6,73
Полное количество фотонейтронов на один нейтрон деления	10,41

Источники нейтронов на основе тормозного излучения электронных ускорителей. При соударении быстрых электронов с ядрами мишени возникает интенсивное тормозное излучение. Если энергия γ-квантов E_γ тормозного излучения превосходит энергию связи нейтронов в ядрах веществ мишени, то могут быть получены нейтроны в результате реакции (γ, n). Выход нейтронов быстро растет с увеличением энергии электронов. При бомбардировке толстой урановой мишени электронами с энергией 40 *Мэв* выход нейтронов составляет $\sim 10^{13}$ *нейтрон/сек* при токе электронов 1 *ма* [7].

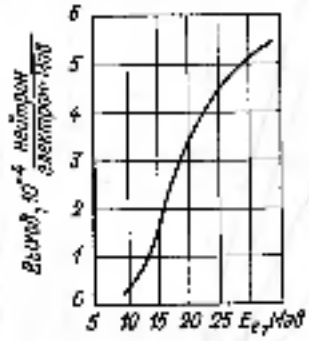


Рис. 40.2. Зависимость выхода нейтронов из толстой урановой мишени от энергии бомбардирующих электронов E_e [7].

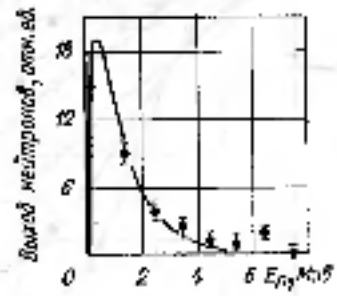


Рис. 40.3. Спектр фотонейтронов, испускаемых висмутом при облучении γ-квантами тормозного излучения с E_γ = 22 *Мэв* [2]. Сплошная кривая — расчет, точки — эксперимент.

40.8. РЕАКЦИИ (p, n)

Реакции (p, n) широко используются для получения моноэнергетических нейтронов. Этому способствуют низкие значения порога реакции E_n и большие выходы нейтронов. Наиболее распространенные реакции (p, n) [7]:

$$^3H + p \to {}^3He + n - 0{,}764\ Мэв,$$

$$^7Li + p \to {}^7Be + n - 1{,}646\ Мэв.$$

При энергиях протонов $E_p > 2{,}378$ *Мэв* возможна реакция

$$^7Li + p \to {}^{7*}Be + n - 2{,}076\ Мэв;$$
$$\downarrow$$
$$^7Be + \gamma + 430\ кэв.$$

Доля реакции $^7Li + p \to {}^{7*}Be$ составляет $\sim 10\%$ основной реакции:

$$^{45}Sc + p \to {}^{45}Ti + n - 2{,}840\ Мэв;$$

$$^{51}V + p \to {}^{51}Cr + n - 1{,}536\ Мэв$$

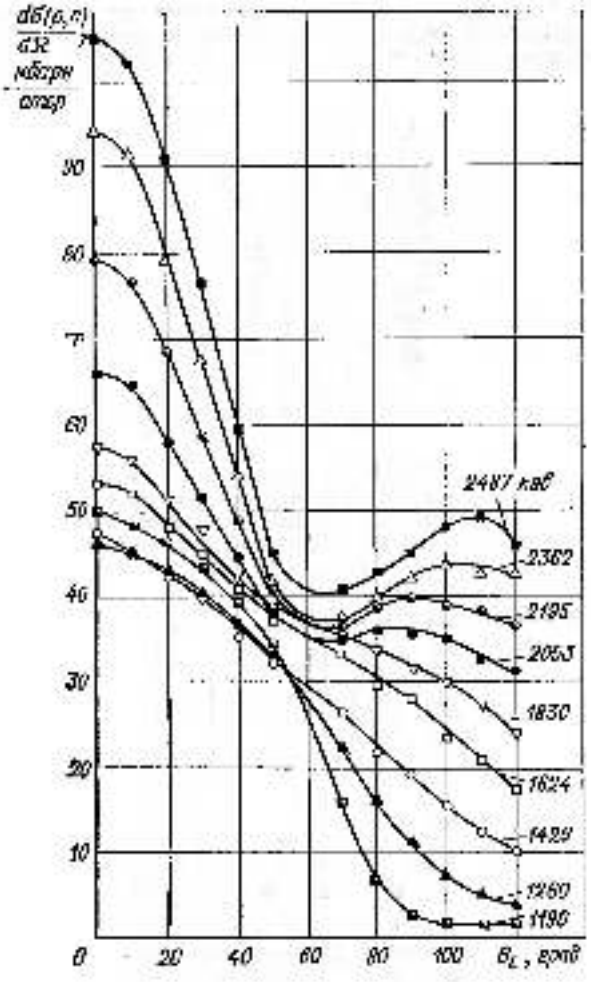


Рис. 40.4. Зависимость дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ реакции $T(p, n)^3He$ в лабораторной системе координат [24, 27]. Угол разлета нейтронов θ_L и энергия протонов (кэв) относятся к лабораторной системе координат.

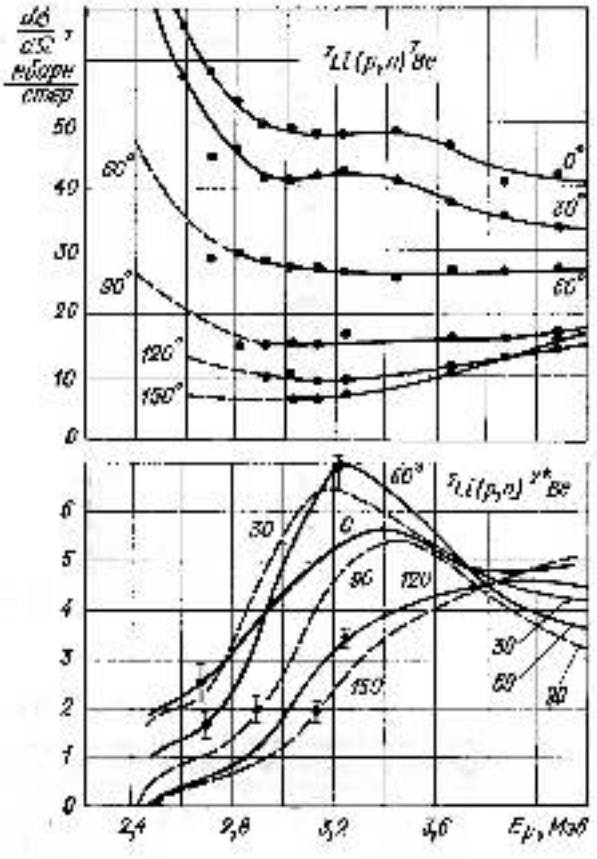


Рис. 40.5. Зависимость дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ реакций $^7Li(p, n)^7Be$ [21] и $^7Li(p, n)^{7*}Be$ E^* — 430 кэв [21]. Угол разлета нейтронов θ_L и энергия протонов E_p относятся к лабораторной системе координат.

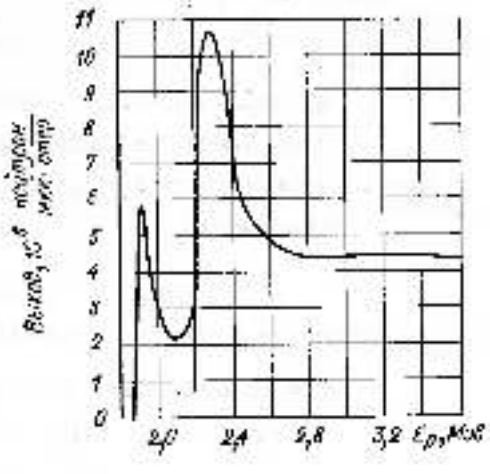


Рис. 40.6. Зависимость выхода нейтронов в реакции $^7Li(p, n)^7Be$ в направлении вперед от энергии протонов E_p [2].

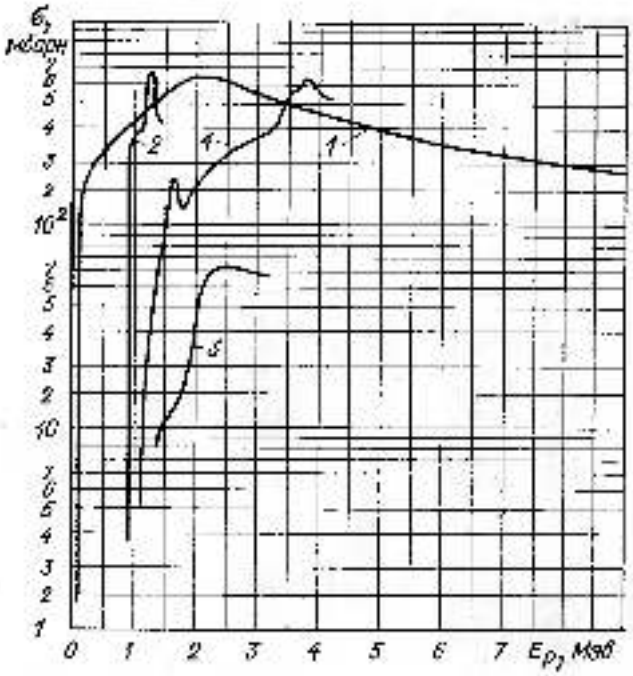


Рис. 40.7. Зависимость сечения σ от энергии протонов E_p для реакций:
1 — $^7Li(p, n)^7Be$ [20, 24];
2 — $^7Li(p, \alpha)^4He$ [2, 20];
3 — $^7Li(p, \alpha)^4He$ (E^* = 430 кэв) [21];
4 — $^9Be(p, n)^9B$ [22].

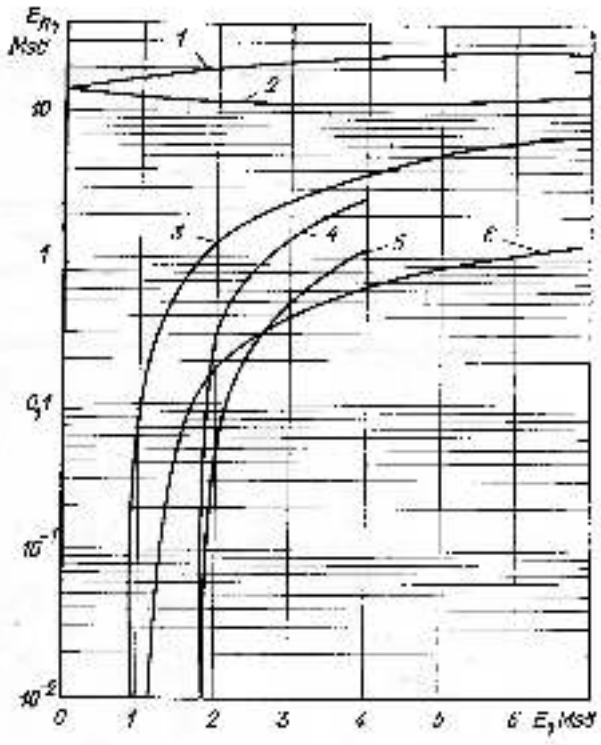


Рис. 40.8. Зависимость энергии E_n нейтронов, испускаемых под углом θ_L [2], от энергии бомбардирующей частицы E в различных реакциях:
1 — $^3H(d, n)^4He$, θ_L = 0°;
2 — $^3H(d, n)^4He$, θ_L = 180°;
3 — $^7Li(p, n)^7Be$, θ_L = 0°;
4 — $^7Li(p, n)^7Be$, θ_L = 180°;
5 — $^3H(p, n)^3He$, θ_L = 0°;
6 — $^3H(p, n)^3He$, θ_L = 180°.

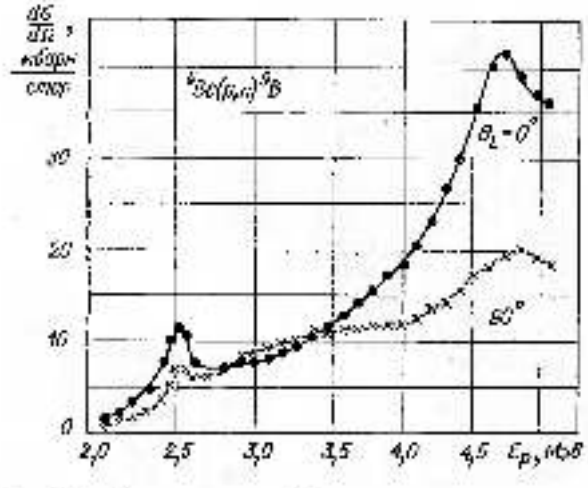


Рис. 40.9. Зависимость дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ реакции $^9Be(p, n)^9B$ для различных углов вылета нейтронов θ_L в лабораторной системе координат от энергии протонов E_p [18].

Таблица 40.6

Значения пороговой энергии $E_п$ реакции (p, n)

Мишень	A	$E_п$, Мэв	Литература	Мишень	A	$E_п$, Мэв	Литература
H	2	3,335±0,010	[1]	Co	59	5,450±0,010	[12]
	3	1,019±0,100	[1]		59	1,816±0,105	[16]
He	3	1,858±0,002	[1]	Ni	62	9,8	[2]
	4	2,025±0,002	[1]		61	2,8	[2]
B	10	4,004±0,005	[2]		64	2,4	[2]
	11	3,012±0,003	[1]	Cu	63	4,195±0,008	[11]
C	12	2,1±0,3	[1]		65	2,170±0,006	[11]
	13	3,095±0,003	[1]	Zn	66	5,8	[2]
	14	0,156±0,006	[1]		67	1,005±0,005	[15]
N	15	8,7958±0,0001	[16]		68	3,785±0,015	[15]
O	18	9,640±0,001	[1]		70	1,457±0,002	[15]
F	19	1,288±0,002	[16]	Ga	69	1,0	[3]
Ne	25	6,658±0,010	[11]	Ge	70	1,646±0,002	[13]
Mg	25	5,938±0,025	[11]	Se	77	5,175±0,004	[17]
Al	27	6,800±0,008	[19]	Br	79	2,7	[2]
Cl	37	1,640±0,004	[1]	Rb	87	9,0	[2]
Ar	40	2,350±0,010	[13]	Sr	88	4,457±0,010	[21]
Sc	45	2,968±0,004	[14]	Y	89	3,6	[2]
Ti	46	4,916±0,140	[12]	Zr	90	7,0	[2]
V	51	1,350±0,006	[1]	Ru	99	2,4	[2]
Cr	52	5,4	[2]		101	1,4	[2]
Mn	55	1,034±0,002	[15]	Cd	111	1,6	[3]
					114	8,0	[3]
				Sn	123	1,0	[2]
				Se	125	3,5	[2]

Таблица 40.7

Энергия нейтронов, образующихся в реакции T (p, n) ^{3}He

Энергия нейтронов E_n, *Мэв*, представлена в зависимости от энергии падающих протонов E_p и угла вылета нейтронов θ_L в лабораторной системе координат.

Массы покоя участвующих в реакции частиц равны соответственно: T — 3,0170050 *а. е. м.*; p — 1,0081450 *а. е. м.*; ^{3}He — 3,0169860 *а. е. м.*; n — 1,0089861 *а. е. м.*

θ_L, *град*	Энергия протонов E_p, *Мэв*											
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2
0	0,2238	0,3497	0,4643	0,5741	0,6814	0,7869	0,8914	0,9951	1,0982	1,2008	1,3030	1,4050
5	0,2217	0,3474	0,4617	0,5713	0,6783	0,7836	0,8878	0,9912	1,0941	1,1964	1,2983	1,4001
10	0,2154	0,3406	0,4542	0,5630	0,6692	0,7737	0,8772	0,9798	1,0818	1,1835	1,2846	1,3856
15	0,2051	0,3294	0,4418	0,5498	0,6543	0,7575	0,8597	0,9610	1,0618	1,1622	1,2620	1,3617
20	0,1910	0,3143	0,4250	0,5308	0,6339	0,7364	0,8358	0,9354	1,0344	1,1330	1,2312	1,3291
30	0,1536	0,2730	0,3799	0,4809	0,5792	0,6759	0,7715	0,8663	0,9605	1,0543	1,1477	1,2409
40	0,1067	0,2242	0,3241	0,4188	0,5107	0,6010	0,6900	0,7789	0,8666	0,9545	0,1417	1,1287
50	0,0628	0,1710	0,2658	0,3504	0,4348	0,5177	0,5997	0,6809	0,7616	0,8421	0,9221	1,0020
60	—	0,1203	0,2039	0,2823	0,3584	0,4331	0,5070	0,5804	0,6533	0,7259	0,7982	0,6704
70	—	0,0773	0,1508	0,2199	0,2871	0,3534	0,4190	0,4843	0,5492	0,6139	0,6784	0,7427
80	—	0,0454	0,1074	0,1669	0,2252	0,2831	0,3408	0,3979	0,4550	0,5120	0,5689	0,6267
90	—	0,0251	0,0749	0,1248	0,1746	0,2245	0,2744	0,3243	0,3740	0,4240	0,4738	0,5236
100	—	0,0139	0,0522	0,0934	0,1354	0,1781	0,2210	0,2642	0,3075	0,3511	0,3946	0,4382
110	—	0,0082	0,0372	0,0706	0,1062	0,1427	0,1796	0,2171	0,2548	0,2928	0,3309	0,3691
120	—	0,0053	0,0275	0,0552	0,0861	0,1164	0,1485	0,1812	0,2142	0,2476	0,2812	0,3150
130	—	0,0037	0,0213	0,0446	0,0702	0,0974	0,1266	0,1544	0,1837	0,2135	0,2435	0,2737
140	—	0,0026	0,0173	0,0372	0,0597	0,0839	0,1091	0,1350	0,1614	0,1864	0,2155	0,2429
150	—	0,0023	0,0148	0,0324	0,0527	0,0746	0,0970	0,1214	0,1457	0,1705	0,1956	0,2210
160	—	0,0020	0,0132	0,0294	0,0481	0,0686	0,0901	0,1124	0,1353	0,1587	0,1824	0,2063
170	—	0,0019	0,0124	0,0277	0,0455	0,0652	0,0859	0,1073	0,1294	0,1519	0,1749	0,1979
180	—	0,0018	0,0121	0,0272	0,0448	0,0641	0,0845	0,1067	0,1274	0,1497	0,1723	0,1952

θ_L, *град*	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4
0	1,5067	1,6082	1,7095	1,8109	1,9119	2,0131	2,1139	2,2146	2,3155	2,4164	2,5170	2,6177
5	1,5015	1,6028	1,7039	1,8050	1,9058	2,0066	2,1072	2,2079	2,3083	2,4089	2,5092	2,6097
10	1,4862	1,5868	1,6871	1,7874	1,8874	1,9870	2,0873	2,1872	2,2860	2,3867	2,4863	2,5860
15	1,4611	1,5604	1,6595	1,7587	1,8579	1,9561	2,0547	2,1533	2,2517	2,3505	2,4486	2,5470
20	1,4268	1,5243	1,6217	1,7190	1,8160	1,9131	2,0100	2,1068	2,2036	2,3004	2,3970	2,4937
30	1,3339	1,4266	1,5193	1,6118	1,7041	1,7965	1,8886	1,9808	2,0725	2,1649	2,2568	2,3488
40	1,2155	1,3022	1,3887	1,4751	1,5613	1,6476	1,7336	1,8196	1,9056	1,9916	2,0774	2,1633
50	1,0817	1,1612	1,2406	1,3199	1,3991	1,4783	1,5573	1,6363	1,7152	1,7942	1,8730	1,9516
60	0,9425	1,0143	1,0861	1,1578	1,2295	1,3011	1,3725	1,4440	1,5154	1,5868	1,6581	1,7295
70	0,8070	0,8712	0,9353	0,9993	1,0631	1,1273	1,1911	1,2549	1,3188	1,3826	1,4463	1,5101
80	0,6926	0,7392	0,7859	0,8525	0,9092	0,9658	1,0223	1,0780	1,1354	1,1920	1,2484	1,3050
90	0,5735	0,6233	0,6732	0,7230	0,7725	0,8297	0,8725	0,9223	0,9721	1,0219	1,0717	1,1216
100	0,4819	0,5255	0,5693	0,6131	0,6569	0,7007	0,7445	0,7884	0,8323	0,8762	0,9201	0,9640
110	0,4075	0,4450	0,4845	0,5231	0,5617	0,6004	0,6391	0,6778	0,7166	0,7554	0,7942	0,8331
120	0,3490	0,3880	0,4172	0,4515	0,4858	0,5202	0,5546	0,5891	0,6237	0,6582	0,6928	0,7274
130	0,3041	0,3346	0,3653	0,3961	0,4269	0,4579	0,4889	0,5199	0,5510	0,5822	0,6134	0,6446
140	0,2703	0,2984	0,3264	0,3544	0,3826	0,4109	0,4392	0,4676	0,4960	0,5245	0,5531	0,5816
150	0,2466	0,2724	0,2983	0,3244	0,3506	0,3768	0,4032	0,4296	0,4560	0,4826	0,5091	0,5358
160	0,2306	0,2549	0,2785	0,3042	0,3290	0,3539	0,3789	0,4039	0,4290	0,4542	0,4794	0,5047
170	0,2214	0,2449	0,2687	0,2925	0,3166	0,3408	0,3648	0,3891	0,4134	0,4378	0,4622	0,4867
180	0,2184	0,2416	0,2651	0,2887	0,3125	0,3362	0,3602	0,3842	0,4083	0,4324	0,4566	0,4808

α_Z, град	Значения прогиба f_Z, Мм											
	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6
0	2,7151	2,8188	2,9192	3,0198	3,1201	3,2206	3,3209	3,4214	3,5216	3,6220	3,7223	3,8227
5	2,7000	2,8103	2,9105	3,0108	3,1109	3,2111	3,3112	3,4114	3,5114	3,6115	3,7115	3,8117
10	2,6854	2,7850	2,8845	2,9840	3,0833	3,1828	3,2821	3,3816	3,4808	3,5802	3,6794	3,7788
15	2,6652	2,7436	2,8416	2,9400	3,0381	3,1363	3,2344	3,3326	3,4305	3,5287	3,6266	3,7249
20	2,5902	2,6868	2,7833	2,8799	2,9762	3,0727	3,1690	3,2655	3,3617	3,4581	3,5544	3,6508
30	2,4406	2,5325	2,6243	2,7161	2,8078	2,8995	2,9912	3,0830	3,1745	3,2662	3,3578	3,4496
40	2,2491	2,3349	2,4206	2,5063	2,5920	2,6777	2,7632	2,8489	2,9344	3,0201	3,1056	3,1912
50	2,0305	2,1093	2,1881	2,2668	2,3454	2,4241	2,5027	2,5814	2,6599	2,7385	2,8170	2,8967
60	1,8007	1,8720	1,9432	2,0144	2,0856	2,1568	2,2279	2,2991	2,3702	2,4413	2,5124	2,5835
70	1,5738	1,6375	1,7012	1,7649	1,8285	1,8922	1,9558	2,0194	2,0830	2,1466	2,2102	2,2738
80	1,3614	1,4179	1,4743	1,5306	1,5872	1,6438	1,7000	1,7565	1,8129	1,8692	1,9256	1,9820
90	1,1714	1,2212	1,2710	1,3208	1,3705	1,4204	1,4702	1,5200	1,5698	1,6195	1,6692	1,7191
100	1,0079	1,0518	1,0957	1,1397	1,1836	1,2275	1,2714	1,3154	1,3593	1,4032	1,4472	1,4912
110	0,8719	0,9108	0,9497	0,9888	1,0274	1,0663	1,1052	1,1442	1,1831	1,2220	1,2609	1,2999
120	0,7621	0,7967	0,8315	0,8661	0,9008	0,9356	0,9703	1,0051	1,0398	1,0746	1,1094	1,1441
130	0,6759	0,7071	0,7385	0,7698	0,8011	0,8325	0,8638	0,8952	0,9266	0,9580	0,9895	1,0209
140	0,6103	0,6389	0,6676	0,6963	0,7250	0,7537	0,7825	0,8113	0,8400	0,8688	0,8976	0,9265
150	0,5624	0,5891	0,6158	0,6426	0,6693	0,6961	0,7229	0,7497	0,7766	0,8034	0,8303	0,8572
160	0,5308	0,5553	0,5807	0,6061	0,6315	0,6569	0,6824	0,7079	0,7334	0,7589	0,7844	0,8100
170	0,5112	0,5357	0,5603	0,5840	0,6086	0,6342	0,6599	0,6836	0,7083	0,7330	0,7578	0,7826
180	0,5051	0,5293	0,5537	0,5780	0,6024	0,6268	0,6512	0,6757	0,7001	0,7246	0,7491	0,7736

α_Z, град	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8
0	3,9229	4,0233	4,1234	4,2237	4,3240	4,4242	4,5245	4,6246	4,7248	4,8249	4,9252	5,0254
5	3,9116	4,0117	4,1116	4,2116	4,3117	4,4116	4,5116	4,6116	4,7115	4,8114	4,9113	5,0113
10	3,8780	3,9773	4,0765	4,1757	4,2750	4,3741	4,4734	4,5725	4,6716	4,7709	4,8701	4,9693
15	3,8227	3,9208	4,0187	4,1167	4,2147	4,3126	4,4106	4,5085	4,6065	4,7043	4,8023	4,9002
20	3,7470	3,8434	3,9396	4,0358	4,1321	4,2283	4,3246	4,4207	4,5170	4,6131	4,7094	4,8056
30	3,6410	3,7327	3,8242	3,9157	3,9074	4,0988	4,0904	4,1819	4,2734	4,3649	4,4564	4,5479
40	3,2767	3,3623	3,4477	3,5332	3,6188	3,7042	3,7897	3,8751	3,9606	4,0460	4,1315	4,2169
50	2,9742	3,0526	3,1312	3,2097	3,2883	3,3667	3,4453	3,5237	3,6022	3,6806	3,7591	3,8375
60	2,6546	2,7257	2,7967	2,8677	2,9388	3,0098	3,0808	3,1518	3,2229	3,2938	3,3648	3,4358
70	2,3373	2,4009	2,4645	2,5280	2,5915	2,6550	2,7186	2,7821	2,8456	2,9091	2,9726	3,0361
80	2,0384	2,0948	2,1512	2,2075	2,2638	2,3202	2,3766	2,4329	2,4892	2,5456	2,6019	2,6582
90	1,7689	1,8187	1,8685	1,9182	1,9680	2,0178	2,0675	2,1173	2,1670	2,2168	2,2665	2,3163
100	1,5351	1,5790	1,6230	1,6669	1,7108	1,7548	1,7987	1,8427	1,8866	1,9305	1,9745	2,0184
110	1,3369	1,3778	1,4188	1,4596	1,4946	1,5336	1,5725	1,6115	1,6504	1,6894	1,7283	1,7673
120	1,1790	1,2137	1,2485	1,2833	1,3181	1,3529	1,3877	1,4226	1,4574	1,4922	1,5270	1,5618
130	1,0524	1,0838	1,1153	1,1467	1,1781	1,2096	1,2411	1,2726	1,3041	1,3356	1,3670	1,3985
140	0,9553	0,9841	1,0130	1,0418	1,0707	1,0996	1,1284	1,1573	1,1862	1,2151	1,2440	1,2729
150	0,8841	0,9110	0,9379	0,9648	0,9917	1,0187	1,0456	1,0726	1,0995	1,1265	1,1534	1,1804
160	0,8356	0,8611	0,8867	0,9123	0,9378	0,9635	0,9891	1,0147	1,0403	1,0660	1,0916	1,1172
170	0,8074	0,8322	0,8570	0,8817	0,9066	0,9314	0,9562	0,9811	1,0059	1,0308	1,0556	1,0805
180	0,7982	0,8227	0,8472	0,8717	0,8963	0,9209	0,9455	0,9701	0,9946	1,0193	1,0438	1,0684

α_Z, град	5,8	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4
0	5,1256	5,2257	5,3258	5,4260	5,5262	5,6263	5,7265	5,8265	6,0269	6,2271	6,4273	6,6275
5	5,1111	5,2111	5,3109	5,4109	5,5108	5,6107	5,7106	5,8104	6,0103	6,2099	6,4096	6,6093
10	5,0684	5,1670	5,2666	5,3608	5,4660	5,5640	5,6633	5,7623	5,9606	6,1587	6,3569	6,5550
15	4,9980	5,0960	5,1938	5,2917	5,3897	5,4875	5,5854	5,6832	5,8790	6,0746	6,2703	6,4659
20	4,9017	4,9979	5,0940	5,1902	5,2864	5,3825	5,4787	5,5748	5,7671	5,9595	6,1515	6,3437
30	4,6394	4,7309	4,8223	4,9138	5,0053	5,0967	5,1882	5,2796	5,4625	5,6453	5,8281	6,0109
40	4,3023	4,3878	4,4731	4,5586	4,6440	4,7294	4,8148	4,9001	5,0709	5,2416	5,4123	5,5830
50	3,9159	3,9944	4,0728	4,1512	4,2297	4,3080	4,3865	4,4646	4,6217	4,7784	4,9351	5,0918

θ_L, град	Значения параметра λ_{ρ}, для											
	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4
10	3,5065	3,5776	3,6487	3,7197	3,7907	3,8616	3,9326	4,0035	4,1454	4,2873	4,4291	4,5709
70	3,0086	3,1631	3,2260	3,2900	3,3535	3,4170	3,4805	3,5439	3,6708	3,7977	3,9245	4,0514
80	2,7145	2,7708	2,8272	2,8835	2,9398	2,9961	3,0524	3,1087	3,2213	3,3338	3,4464	3,5589
90	2,3960	2,4158	2,4656	2,5102	2,5600	2,6147	2,6646	2,7142	2,8106	2,9131	3,0125	3,1119
100	2,0523	2,1062	2,1502	2,1941	2,2380	2,2820	2,3259	2,3698	2,4577	2,5456	2,6333	2,7212
110	1,8063	1,8472	1,8842	1,9231	1,9621	2,0010	2,0400	2,0790	2,1569	2,2348	2,3127	2,3906
120	1,5867	1,6315	1,6663	1,7011	1,7360	1,7708	1,8057	1,8405	1,9101	1,9798	2,0495	2,1191
130	1,4300	1,4615	1,4930	1,5245	1,5560	1,5876	1,6191	1,6506	1,7136	1,7766	1,8396	1,9027
140	1,3018	1,3307	1,3595	1,3885	1,4174	1,4463	1,4753	1,5042	1,5620	1,6199	1,6777	1,7356
150	1,2074	1,2343	1,2613	1,2883	1,3153	1,3423	1,3693	1,3963	1,4502	1,5042	1,5583	1,6123
160	1,1429	1,1685	1,1942	1,2198	1,2455	1,2712	1,2968	1,3225	1,3738	1,4252	1,4765	1,5279
170	1,1054	1,1302	1,1551	1,1800	1,2048	1,2299	1,2547	1,2796	1,3293	1,3791	1,4289	1,4788
180	1,0931	1,1177	1,1423	1,1669	1,1915	1,2162	1,2408	1,2655	1,3147	1,3640	1,4133	1,4626

θ_L, град	7,6	7,8	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5
0	6,8278	7,0279	7,2281	7,7286	8,2289	8,7292	9,2295	9,7297	10,2300	10,7303	11,2305	11,7306
5	6,5091	7,0087	7,2083	7,7076	8,2065	8,7056	9,2046	9,7036	10,2026	10,7015	11,2004	11,6993
10	6,7533	6,9614	7,1494	7,6449	8,1401	8,6352	9,1305	9,6256	10,1208	10,6159	11,1110	11,6061
15	6,6617	6,8572	7,0528	7,5420	8,0308	8,5198	9,0088	9,4975	9,9864	10,4752	10,9640	11,4527
20	6,5960	6,7382	6,9363	7,4009	7,8611	8,3214	8,7817	9,2419	9,7021	10,2623	10,7625	11,2225
30	6,1958	6,3766	6,5593	7,0163	7,4731	7,9299	8,3866	8,8433	9,3000	9,7566	10,2131	10,6696
40	5,7938	5,9244	6,0960	6,5217	6,9481	7,3745	7,8010	8,2273	8,6533	9,0799	9,5050	9,9321
50	5,2486	4,4053	5,5619	5,9537	6,3451	6,7367	7,1281	7,5194	7,9108	8,3020	8,6933	9,0843
60	4,7128	4,8445	4,9963	5,3508	5,7050	6,0592	6,4134	6,7675	7,1215	7,4754	7,8293	8,1821
70	4,1782	4,3050	4,4318	4,7480	5,0657	5,3835	5,7003	6,0159	6,3321	6,6490	6,9655	7,2818
80	3,6715	3,7839	3,8964	4,1777	4,4588	4,7398	5,0208	5,3017	5,5825	5,8633	6,1440	6,4246
90	3,2113	3,3107	3,4101	3,6586	3,9060	4,1531	4,4094	4,6515	4,8996	5,1476	5,3956	5,6434
100	2,8090	2,8967	2,9846	3,2040	3,4234	3,6427	3,8621	4,0813	4,3004	4,5195	4,7386	4,9575
110	2,4685	2,5463	2,6242	2,6189	3,0135	3,2081	3,4027	3,5972	3,7916	3,9860	4,1803	4,3746
120	2,1888	2,2584	2,3281	2,5022	2,6763	2,8503	3,0244	3,1983	3,3722	3,5461	3,7199	3,8936
130	1,9657	2,0287	2,0917	2,2403	2,4087	2,5642	2,7217	2,8791	3,0365	3,1938	3,3511	3,5083
140	1,7934	1,8512	1,9091	2,0537	2,1983	2,3429	2,4875	2,6320	2,7765	2,9210	3,0654	3,2096
150	1,6663	1,7203	1,7743	1,9063	2,0383	2,1703	2,3113	2,4491	2,5842	2,7191	2,8539	2,9887
160	1,5792	1,6303	1,6820	1,8104	1,9388	2,0672	2,1956	2,3239	2,4523	2,5806	2,7088	2,8370
170	1,5286	1,5784	1,6282	1,7528	1,8773	2,0018	2,1264	2,2509	2,3754	2,4998	2,6242	2,7486
180	1,5119	1,5612	1,6106	1,7339	1,8571	1,9804	2,1037	2,2269	2,3501	2,4733	2,5964	2,7196

θ_L, град	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0	22,0	23,0	24,0	25,0
0	12,2807	12,7809	13,2811	13,7812	14,2812	15,2816	16,2816	17,2815	18,2813	19,2811	20,2808	21,2804	22,2800	23,2795	24,2790
5	12,1982	12,6970	13,1959	13,6947	14,1934	15,1902	16,1867	17,1833	18,1798	19,1765	20,1730	21,1704	22,1740	23,1714	24,1689
10	12,1010	12,5959	13,0911	13,5861	14,0810	15,0710	16,0608	17,0507	18,0406	19,0304	20,0202	21,0099	21,9997	22,9894	23,9791
15	11,9414	12,4301	12,9189	13,4075	13,8961	14,8735	15,8506	16,8279	17,8050	18,7820	19,7590	20,7360	21,7130	22,6901	23,6671
20	11,7825	12,2386	12,6947	13,1507	13,6125	14,5027	15,3929	16,2829	17,1721	18,0613	18,9505	19,8396	20,7286	21,6176	22,5065
30	11,1263	11,5826	12,0380	12,4934	12,9487	13,8594	14,7700	15,6804	16,5907	17,5142	18,4350	19,3551	20,2751	21,1950	22,0149
40	10,3588	10,7842	11,2102	11,6352	12,0597	12,9080	13,7553	14,5998	15,4350	16,3191	17,1710	18,0209	18,8716	19,7221	20,5726
50	9,4793	9,8654	10,2515	10,6369	11,0219	11,8296	12,6369	13,4431	14,2481	15,0514	15,8544	16,6570	17,4591	18,2611	19,0629
60	8,5338	8,8406	9,2442	9,5578	9,9715	10,8000	11,6247	12,4471	13,2668	14,0838	14,8996	15,7136	16,5264	17,3384	18,1494
70	7,5981	7,9104	8,2226	8,5348	8,8427	9,4917	10,1258	10,7577	11,3859	12,0105	12,6304	13,2465	13,8610	14,4729	15,0835
80	6,7051	6,9857	7,2661	7,5465	7,8269	8,3871	8,9472	9,5071	10,0667	10,6261	11,1854	11,7429	12,4985	12,8527	13,4055
90	5,8912	6,1394	6,3867	6,6344	6,8819	7,3768	7,8715	8,3659	8,8600	9,3539	9,8475	10,3415	10,8350	11,3267	11,8183
100	5,1709	5,3903	5,6101	5,8288	6,0466	6,4825	6,9176	7,3522	7,7866	8,2207	8,6545	9,1062	9,5416	9,9767	10,4115
110	4,5388	4,7280	4,9170	5,1051	5,2931	5,6689	6,0441	6,4189	6,7933	7,1675	7,5416	7,9155	8,4406	8,8944	9,3480
120	4,0703	4,2410	4,4106	4,5802	4,7515	5,1005	5,4501	5,8000	6,1477	6,4956	6,4302	7,1847	7,5390	7,8749	8,2107
130	3,7255	3,8257	3,9759	4,1260	4,2759	4,5757	4,8755	5,1746	5,4736	5,7719	6,0704	6,3684	6,7447	7,1108	7,4768
140	3,3641	3,4948	3,6248	3,7546	3,8841	4,1428	4,4012	4,6589	4,9160	5,1730	5,4291	5,6849	5,9401	6,2300	6,5174
150	3,1235	3,2363	3,3488	3,4611	3,5732	3,8018	4,0302	4,2580	4,4853	4,7122	4,9386	5,1649	5,3904	5,6159	5,8405
160	2,9652	3,0935	3,2215	3,3496	3,4777	3,7335	3,9894	4,2444	4,5000	4,7557	5,0107	5,2655	5,5197	5,7742	6,0280
170	2,8729	2,9971	3,1215	3,2458	3,3700	3,6182	3,8664	4,1148	4,3621	4,6096	4,8570	5,1042	5,3512	5,5980	5,8447
180	2,8428	2,9659	3,0887	3,2117	3,3346	3,5808	3,8266	4,0714	4,3166	4,5616	4,8063	5,0512	5,2957	5,5400	5,7841

40.4 РЕАКЦИИ (d, n)

Почти все реакции (d, n), используемые для получения нейтронов, сильно экзотермичны. Реакции не имеют порогов, и нейтроны могут быть получены при энергиях дейтонов, приближающихся к нулю. Исключение составляет реакция $^{12}C(d, n)^{13}N$, которая эндотермична с $Q = -0,282$ *Мэв* и порогом $E_{пор} = 0,33$ *Мэв* [2]. Для получения моноэнергетических нейтронов наиболее пригодны реакции $D(d, n)^3He$ и $T(d, n)^3He$. Например, в последней реакции можно получить 10^{12} *нейтронов/сек* при бомбардировке ^3H — Ti мишени дейтонами с энергией 300 *кэв* и током 0,5 *ма* [7]. Наиболее распространенные реакции (d, n) [7]:

$$^2H + {}^2H \rightarrow {}^3He + n + 3,265\ Мэв;$$

$$^2H + {}^3H \rightarrow {}^4He + n + 17,586\ Мэв;$$

$$^2H + {}^9Be \rightarrow {}^{10}B + n + 4,362\ Мэв;$$

$$^2H + {}^7Li \rightarrow {}^8Be + n + 15,029\ Мэв;$$

$$^2H + {}^6Li \rightarrow {}^8He + n + 15,123\ Мэв;$$

$$^2H + {}^5Li \rightarrow {}^6He + {}^1He + 14,105\ Мэв;$$

$$^3He + n + 0,958\ Мэв.$$

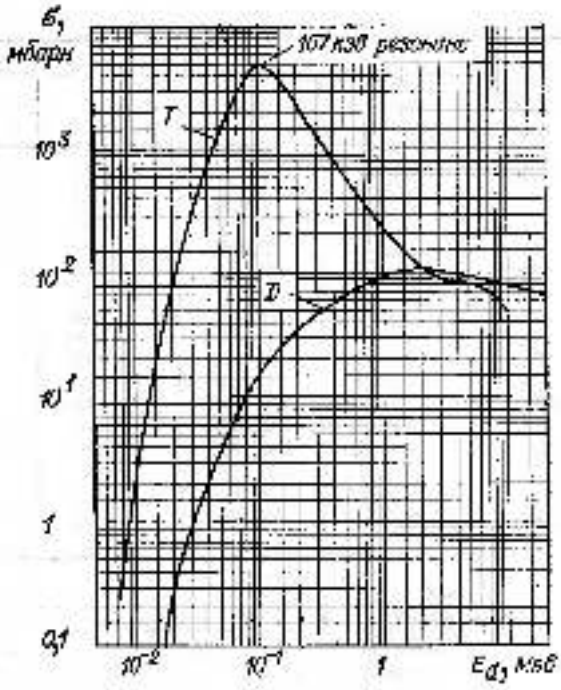


Рис. 40.10. Зависимость сечения σ реакций $D(d, n)^3He$ [2, 7, 24, 26] и $T(d, n)^3He$ [7, 24, 25, 28] от энергии дейтонов E_d.

Таблица 40.8

Нормированное к единице при $\theta = 0°$ угловое распределение нейтронов [26] в реакции $T(d, n)^4He$. В скобках даны истинные значения $\sigma(0 - 17°)$, *мбарн/стер*.

θ, *град*	Энергия дейтонов E_d, *Мэв*							
	0,20	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
0	(218)	(57,9)	(35,7)	(25,8)	(19,4)	(17,1)	(15,6)	(14,7)
	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
15	0,999	0,996	0,997	0,996	0,993	0,989	0,990	0,986
30	0,989	0,986	0,969	0,982	0,974	0,958	0,927	0,892
45	0,980	0,972	0,974	0,958	0,941	0,910	0,861	0,805
60	0,967	0,950	0,948	0,922	0,899	0,853	0,793	0,722
75	0,951	0,923	0,913	0,877	0,844	0,791	0,730	0,658
90	0,934	0,890	0,870	0,825	0,786	0,730	0,671	0,597
105	0,918	0,856	0,824	0,769	0,727	0,673	0,618	0,548
120	0,903	0,823	0,777	0,717	0,673	0,624	0,570	0,511
135	0,890	0,792	0,737	0,671	0,629	0,586	0,535	0,485
150	0,880	0,770	0,705	0,635	0,591	0,558	0,510	0,464
165	0,876	0,757	0,683	0,613	0,572	0,541	0,496	0,450
180	0,873	0,750	0,677	0,606	0,564	0,535	0,492	0,445

θ_{γ}, град	Энергия дейтонов E_d, Мэв							
	2,30	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	6,00	7,00
0	(15,0)	(16,4)	(18,4)	(20,7)	(22,9)	(24,6)	(25,8)	(25,7)
	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
7,5	0,981	0,976	0,966	0,980	0,956	0,950	0,937	0,923
15	0,931	0,910	0,876	0,859	0,842	0,821	0,781	0,737
22,5	0,860	0,821	0,760	0,726	0,698	0,661	0,591	0,509
30	0,790	0,733	0,650	0,603	0,564	0,518	0,440	0,344
45	0,678	0,602	0,504	0,443	0,390	0,361	0,317	0,297
60	0,604	0,517	0,418	0,355	0,314	0,289	0,253	0,264
75	0,536	0,459	0,338	0,274	0,230	0,206	0,197	0,201
90	0,479	0,379	0,286	0,222	0,182	0,156	0,137	0,125
105	0,443	0,366	0,284	0,225	0,194	0,171	0,143	0,128
120	0,427	0,358	0,302	0,251	0,231	0,208	0,176	0,156
135	0,415	0,355	0,315	0,271	0,255	0,227	0,167	0,167
150	0,404	0,351	0,317	0,281	0,262	0,229	0,166	0,167
165	0,396	0,346	0,318	0,286	0,263	0,226	0,166	0,168
180	0,391	0,346	0,319	0,288	0,263	0,224	0,165	0,169

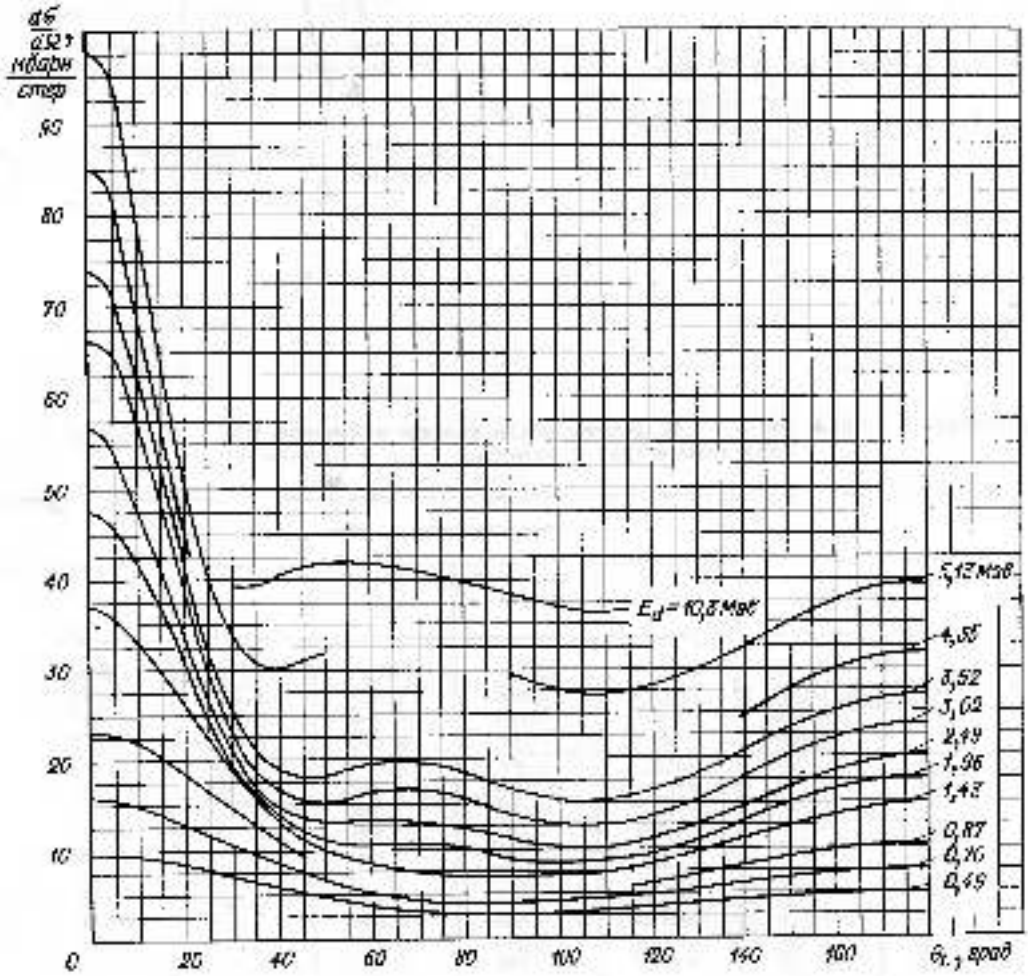


Рис. 40.11. Зависимость дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ реакции $D(d, \gamma)^3He$ от угла разлета нейтронов θ_γ в лабораторной системе координат [24].

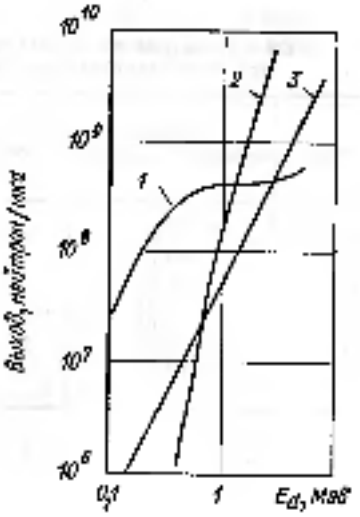


Рис. 40.12. Зависимость выхода нейтронов из толстых мишеней для реакции (d, n) от энергии дейтона E_d [7]: 1 — мишень ^{6}H — Zr; 2 — мишень ^{9}Be; 3 — мишень D_2O (лед).

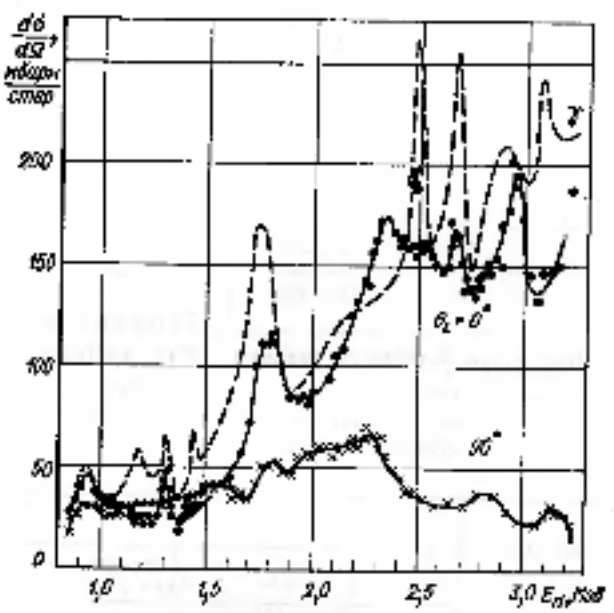


Рис. 40.13. Зависимость дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ реакции $^{12}C(d, n)^{13}N$ при углах вылета нейтронов 0 и 90° в лабораторной системе координат от энергии дейтона [19]. Штриховой линией показана кривая выхода γ квантов в относительных единицах.

40.5. РЕАКЦИИ (α, n)

Реакции (α, n) часто используются для получения нейтронов с энергиями порядка нескольких мегаэлектронвольт. Источником нейтронов обычно служит смесь α-излучателя и какого-либо легкого элемента: Be, B, F и т. п. Источники имеют размеры ~1—3 см и содержат до нескольких десятков кюри α-радиоактивного препарата [2]. Источники, содержащие ^{210}Po и ^{226}Ra, характерны тем, что имеют низкую мощность γ-излучения, приблизительно в 1000 раз меньшую, чем у источников на основе Ra с эквивалентной интенсивностью нейтронов [2].

Для α-частиц ^{210}Po реакция образования нейтронов с мишенью из бериллия происходит согласно уравнению

$$^{9}Be + \alpha \rightarrow {}^{12}C + n + 5{,}7\ Мэв.$$

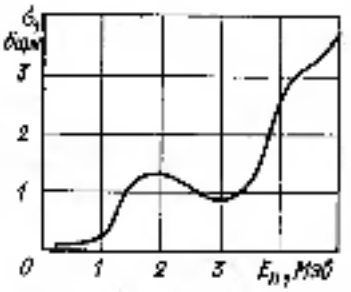


Рис. 40.14. Зависимость сечения реакции $^{9}Be(\alpha, n)^{12}C$ от энергии α-частиц [7].

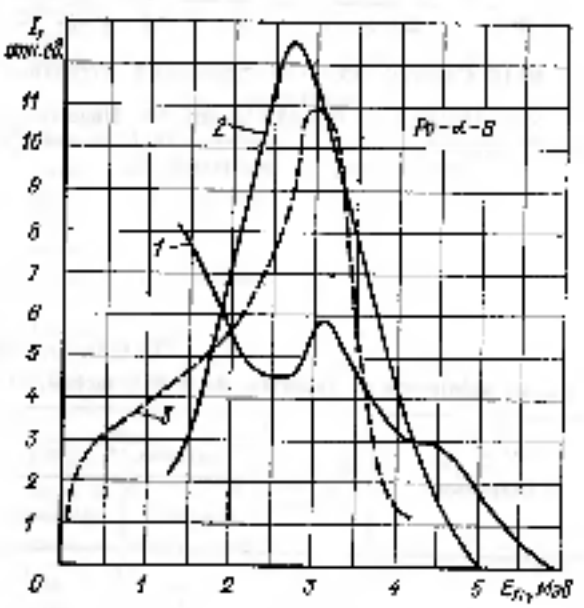


Рис. 40.15. Спектр Po-α-B-источника нейтронов [6]: 1 — Po-α-^{10}B; 2 — Po-α-^{11}B; 3 — естественная смесь изотопов. По оси ординат отложена интенсивность I; по оси абсцисс — энергия нейтронов.

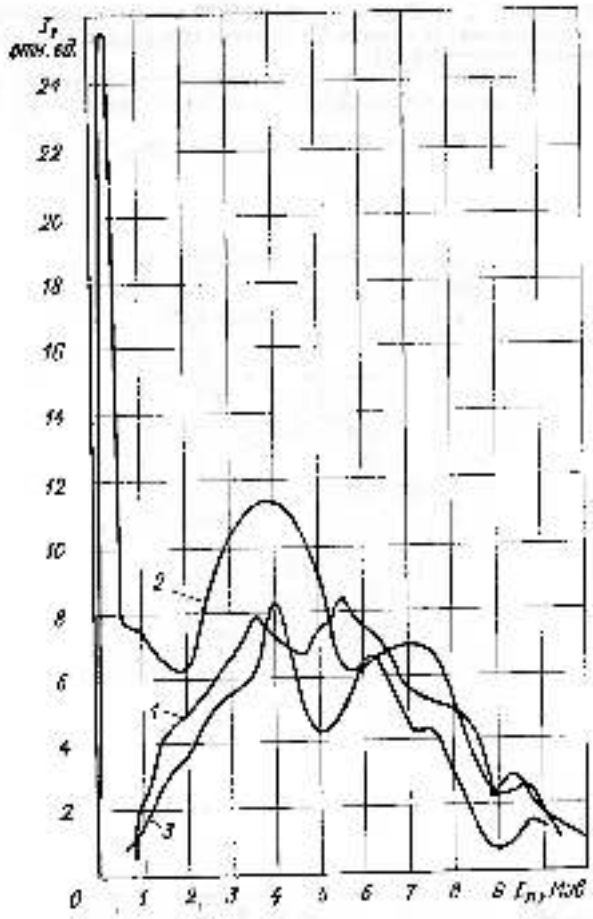


Рис. 40.16. Спектры Po-α-Be различных источников нейтронов:
1 — Po-α-Be [2]; 2 — Pu-α-Be [2, 26]; 3 — Ra-α-Be [2].
По оси ординат отложена интенсивность J; по оси абсцисс — энергия нейтронов E_n.

Таблица 40.10

Выход нейтронов из толстых Po-мишеней при бомбардировке их α-частицами [6]

Мишень	Выход, нейтрон/10⁶ α-частиц	Мишень	Выход, нейтрон/10⁶ α-частиц
Li	2,6	Na	1,00
Be	80,0	Mg	1,20
B	24,0	Al	0,25
C	0,11	Si	0,16
N	0,01	Cl	0,11
O	0,07	Ar	0,36
F	12,0		

Таблица 40.11

Параметры резонансов реакции $^{13}C(\alpha, n)^{16}O$ [30]

E_α — энергия α-частиц, при которой имеет место резонанс; Γ — ширина резонанса; $\sigma(\theta_L)$ — дифференциальное сечение рассеяния в лабораторной системе координат.

E_α, Мэв	Γ, кэв	$\sigma(\theta_L)$, мбарн/стер	
		$0° < \theta_L < 10°$	$80° < \theta_L < 100°$
2,09	100	2,7	4,6
2,25	100	6,7	6,2
2,42	80	14	6,8
2,605	≤6	≥12	≥15
2,69	10	24	10
2,775	10	10	7,5
2,825	≤7	≥36	≥20
3,09	90	9,1	4,3
3,35	150	20	7,6
3,42	90	17	7,4
3,67	≤6	≥3,5	≥2,1
3,73	≤5	≥17	≥8
4,125	15	7,4	2,9
4,42	25	28	5,7
4,50	70	6	—
4,63	15	38	9,1
4,75	200	6,6	3,5
5,05	65	30	9,5

Таблица 40.9

Выход нейтронов из толстых Be и B мишеней [6]

α-Источник	Энергия α-частиц, E_α, Мэв	Выход, нейтрон/(10⁶ α-частиц)	
		Be-мишень	B-мишень
U	4,18	—	40
Ra	4,781	16	65
RaM(^{216}Po)	5,998	40	120
RaC'(^{214}Po)	7,690	100	200
RaF(^{210}Po)	5,298	24	80
Rn	5,485	30	90
^{239}Pu [2]	5,1	—	40
^{241}Am [2]	5,4	—	50 ÷ 70

40.6 РЕПЕРНЫЕ ТОЧКИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ПУЧКОВ УСКОРИТЕЛЕЙ

Таблица 40.12

Энергия резонанса или порога E_r, используемые для калибровки пучков ускорителей [10]

Реакция	E_r, кэв	Ширина резонанса Γ, кэв
$^{11}B(p, \gamma)^{12}O$	163,1±0,5	6,3±1,0
$^{19}F(p, \alpha\gamma)^{16}O$	340,5±0,2	2,7±0,4
$^{27}Al(p, \gamma)^{28}Si$	992,0±0,6	0,08±0,04
$^{19}F(p, \alpha\gamma)^{16}O$	872,4±0,4	4,5±0,3
$^{7}Li(p, n)^{7}Be$	1880,7±0,4	—
$^{7}Li(p, \gamma)^{8}Be$	441,2±0,3	12,2±0,5
$^{8}Be(p, \gamma)^{12}B$	1089,9±0,6	3,6±0,5
$^{19}F(p, \alpha\gamma)^{16}O$	1346,6±1,1	5±1
$^{19}F(p, \alpha\gamma)^{16}O$	1373,5±0,6	11±1
$^{13}C(p, \gamma)^{14}N$	1746,6±0,6	0,077±0,012
$^{59}Ni(p, \gamma)^{60}Co$	1815,2±0,5	0,1±0,05
$^{9}Be(p, \alpha\gamma)^{6}Li$	2764,6±1,8	38±2
$^{13}C(p, n)^{13}N$	3235,8±1,1	—
$^{7}Li(p, n)^{7}Be$	1019,7±0,5	—
$^{58}Ni(p, \gamma)^{59}Co$	1224,1±0,7	0,06±0,05
$^{16}O(d, n)^{17}F$	1829,2±0,6	—
$^{18}O(p, n)^{18}F$	2573,4±0,8	—
$^{18}O(p, n)^{18}O$	281,0±3	4
$^{27}Si(p, p'\gamma)^{28}Si$	3105±6	12
$^{28}Si(p, p'\gamma)^{28}Si$	3340±7	12
$^{23}Na(\alpha, n)^{26}Al$	3492±3	1
$^{19}N(p, n)^{19}Ne$	1791,9±1,5	—
$^{19}F(p, n)^{19}Ne$	4233±2	—
$^{28}Si(p, p'\gamma)^{28}Si$	4240±8	16
$^{29}Si(p, p'\gamma)^{29}Si$	4887±10	12

Таблица 40.13

Энергии γ-квантов, используемые для калибровки гамма-спектрометров

Источник	Энергия резонанса, кэв	E_γ, Мэв	Литература
$^{11}B(p, p'\gamma)^{11}B$	—	2,14	[29]
$^{13}C(p, \gamma)^{14}N$	456	2,37	[29]
$^{13}C(d, p)^{14}C$	—	3,097	[30]
$^{9}Be(p, \alpha\gamma)^{6}Li$	2565	3,57	[30]
$^{15}N(p, \alpha\gamma)^{12}C$	1600	4,43	[31]
$^{11}B(p, \gamma)^{12}C$	163	4,43	[32]
$^{19}F(p, \alpha\gamma)^{16}O$	340; 1346	6,13	[33]
$^{9}Be(p, \gamma)^{10}B$	1680	6,84	[37]
$^{13}C(p, \gamma)^{14}N$	554	8,06	[34]
$^{19}F(p, \gamma)^{20}Ne$	669	11,67	[35]
$^{15}N(p, \gamma)^{16}O$	1050	13,13	[36]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальная ядерная физика. Под ред. Э. Сегре. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
2. Кёрнс Д. Введение в нейтронную физику. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1965.
3. Bendel W. L. e. a. "Phys. Rev.", 1958, v. 111, p. 1297.
4. Geller R. N. e. a. "Phys. Rev.", 1960, v. 118, p. 1302.
5. Reinhardt G. C., Whitehead W. D. "Nucl. Phys.", 1962, v. 30, p. 201.
6. Физика ядерных реакторов. Под ред. П. А. Стендбака. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1964.
7. Бекурц К., Вирц К. Нейтронная физика. Пер. с нем. М., Атомиздат, 1968.
8. Вейнберг А., Вигнер Е. Физическая теория ядерных реакторов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
9. Takayanagi S. "Nucl. Phys.", 1964, v. 26, p. 494.
10. Marion J. B. "Revs Mod. Phys.", 1961, v. 33, p. 139; 1961, v. 33, p. 623.
11. Kington J. D. e. a. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1393.
12. Nelson J. W. e. a. "Phys. Rev.", 1962, v. 125, p. 2006.
13. Holland R. E., Lynch F. J. "Phys. Rev.", 1959, v. 113, p. 503.
14. Bragger R. M. e. a. "Phys. Rev.", 1955, v. 100, p. 84.
15. Gissell C. R., Butler J. W. "Phys. Rev.", 1960, v. 113, p. 246.
16. Chapman R. A., Slattery J. C. "Phys. Rev.", 1957, v. 105, p. 633.
17. Johnson C. H. "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 1243.
18. Marion J. B. "Phys. Rev.", 1956, v. 103, p. 713.
19. Bailey C. L. e. a. "Phys. Rev.", 1948, v. 73, p. 274.
20. MacKlin R. L., Gibbons J. H. "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 105.
21. Bevington P. "Phys. Rev.", 1961, v. 121, p. 871.
22. Gibbons J. "Phys. Rev.", 1959, v. 114, p. 571.
23. Jones K. W. e. a. "Phys. Rev.", 1958, v. 112, p. 1252.
24. Fowler J. L., Brolley J. E. "Revs Mod. Phys", 1956, v. 28, p. 103.
25. Hume S. J. e. a. "Phys. Rev.", 1967, v. 107, p. 1616.
26. Frank A. L., Arakawa E. T., Birkhoff R. D. "Phys. Rev.", 1962, v. 126, p. 1794.
27. Jarvis G. "Phys. Rev.", 1950, v. 79, p. 929.
28. Arnold W. R. e. a. "Phys. Rev.", 1954, v. 93, p. 483.
29. Woodbury H. H. e. a. "Phys. Rev.", 1954, v. 93, p. 1311.
30. Mockin R. J. "Phys. Rev.", 1954, v. 94, p. 648.
31. Kraus A. A. "Phys. Rev.", 1954, v. 94, p. 975.
32. Segel R. E., Bina M. J. "Phys. Rev.", 1961, v. 124, p. 814.
33. Hornyak W. F., Cooper T. "Phys. Rev.", 1955, v. 92, p. 676; Hunt S. E., Pope R. A., Evans W. W. "Phys. Rev.", 1957, v. 106, p. 1012.
34. Hird B. e. a. "Phys. Rev.", 1954, v. 96, p. 702.
35. Hanc J. V. e. a. "Phys. Rev.", 1960, v. 120, p. 962.
36. Bashkin S., Carlson R. R. "Phys. Rev.", 1957, v. 106, p. 261.
37. Spenkel E. L., Daughtry J. W. "Phys. Rev.", 1961, v. 124, p. 854.

ГЛАВА 41

ПРОХОЖДЕНИЕ НЕЙТРОНОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

41.1. СЕЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРОНОВ С ВЕЩЕСТВОМ ДЛЯ НЕЙТРОНОВ ТЕПЛОВЫХ ЭНЕРГИЙ

Радиационный захват нейтронов — реакция, в которой ядро $^{A}_{Z}N$, захватывая нейтрон, превращается в ядро $^{A+1}_{Z}N$, а высвобождающаяся энергия испускается в виде γ-квантов. При малых энергиях снятие возбуждения ядра может происходить путем передачи возбуждения одному из внутренних электронов оболочки атома (электроны внутренней конверсии), а при энергиях возбуждения $E^* \geq 2m_e c^2$ ($m_e c^2 = 511$ *кэв*) возможно образование пары электрон — позитрон.

Ядро $^{A+1}_{Z}N$ образуется в возбужденном состоянии, причем энергия возбуждения равна

$$E^* = \frac{M_A}{M_A + M_n} E_n + B_n,$$

где M_A и M_n — массы ядра $^{A}_{Z}N$ и нейтрона; E_n — кинетическая энергия нейтрона; B_n — энергия связи последнего нейтрона в ядре $^{A+1}_{Z}N$. Энергия связи нейтронов B_n обычно равна 7—8 *Мэв*.

Радиационный захват нейтронов — реакция экзотермическая, поэтому принципиально она возможна при любых энергиях нейтронов и практически на всех ядрах. Для тепловых нейтронов энергия испускаемых γ-квантов E_γ может достигать 10—12 *Мэв*.

Возбужденное состояние ядра имеет конечное время жизни τ, определяющее время распада данного состояния, и связанную с ним парциальную ширину энергетического уровня $\Gamma = \hbar/\tau$. Для медленных нейтронов $\Gamma_\gamma \approx 0{,}1$ *эв* и, следовательно, $\tau \approx 10^{-14}$ *сек*.

Для тепловых нейтронов сечение радиационного захвата $\sigma(n, \gamma)$ в большинстве случаев $\sim 1/\sqrt{E_n}$. В резонансной области сечение $\sigma(n, \gamma)$ определяется формулой Брейта — Вигнера и в максимуме может значительно превышать геометрические размеры ядра. Сечение радиационного захвата быстрых нейтронов $\sigma(n, \gamma) \approx \pi a^2 \Gamma_\gamma / \Gamma$, где a — величина, характеризующая радиус ядра. Радиационный захват медленных нейтронов ядрами известен как реакция, благодаря которой стало доступным большое число радиоактивных изотопов.

Упругое рассеяние нейтронов в общем случае есть результат интерференции потенциального и резонансного рассеяний. При потенциальном рассеянии процесс происходит без образования составного ядра. Резонансное рассеяние происходит через стадию промежуточного ядра.

Для медленных нейтронов длина волны нейтрона λ много больше радиуса ядра a, и преобладает рассеяние нейтронов с орбитальным квантовым числом $l = 0$ (S-рассеяние), сферически-симметричное в системе центра масс. Для более высоких энергий нейтронов становятся возможными рассеяние с $l = 1$ (P-рассеяние).

Для большинства наблюдаемых резонансов кинетическая энергия нейтрона не велика и рассеиваются нейтроны с $l = 0$; кроме того, в этой области существенное значение имеют лишь реакции (n, n) и (n, γ), поэтому $\Gamma = \Gamma_n + \Gamma_\gamma$. Выражение для сечения реакции (n, n) в этом случае имеет вид

$$\sigma(n, n) = \pi \lambda^2 g \left| \frac{\Gamma_n}{(E - E_0) + i\Gamma/2} + \frac{2a}{\lambda} \right|^2 + 4\pi a^2 (1 - g),$$

где g — статистический вес, $g = [1 \pm 1/(2I + 1)]/2$, I — спин ядра мишени; a — радиус ядра; $2\pi\lambda$ — длина волны падающего нейтрона.

При очень больших энергиях нейтрона ($\lambda \ll a$) интерференционные явления исчезают, и сечение реакции $\sigma(n, n) \approx \pi (a + \lambda)^2$.

В табл. 41.1 представлены экспериментальные данные по сечениям поглощения для нейтронов со скоростью $v = 2200$ *м/сек*. Значения, отмеченные звездочкой, получены в измерениях с реакторными нейтронами, имеющими спектр, близкий к распределению Максвелла.

В четвертой колонке даны сечения захвата σ_γ. Рядом со значением сечения указан тип реакции (n, α) или (n, p). Обозначения отсутствуют в случае радиационного захвата — реакции (n, γ), преобладающей для ядер с массовым числом $A \geq 35$. Для ядер с порядковым номером $Z \geq 68$ в этой колонке приведены полные сечения поглощения $\sigma(n, a)$, которые кроме указанных выше процессов могут включать еще сечение реакции деления $\sigma(n, f)$.

Сечения активации σ_{act} определялись по радиоактивности облученного образца с последующим β-распадом. Иногда сечения активации указаны для отдельных изомерных состояний, причем первым в таблице помещено значение σ_{act}, наиболее возбужденного состояния. Там же указаны периоды полураспада образующихся β-активностей.

Если энергия нейтрона мала по сравнению с энергией первого резонансного уровня, то сечение реакции (n, α) обычно меняется по закону $\propto 1/v$: $\sigma(v) = \sigma_0 v_0/v$, где σ_0 — некоторая константа. В этом случае усреднение сечения по максвелловскому спектру $n(v)$ приводит к

$$\bar{\sigma} = \frac{\int \sigma(v)\, n(v)\, v\, dv}{\int n(v)\, v\, dv} = \frac{\sigma_0}{\bar{v}},$$

где $\bar{v}$ — среднее значение скорости; $\bar{v} = \left(\frac{8kT}{\pi m}\right)^{1/2}$.

(Следует отметить, что усреднение сечения по спектру делается по потоку $n(v) \cdot v$. Однако получаемое значение $\bar{\sigma}$ используется в подавляющем большинстве расчетов.)

Усредненное сечение $\bar{\sigma}$ можно связать со значением сечения $\sigma_{н.в}$ при наиболее вероятной скорости $v_{н.в} = \sqrt{\pi}\, \bar{v}/2$. Поскольку $\sigma_{н.в} \cdot v_{н.в} = \sigma_0 v_0$, то

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_{н.в}\, v_{н.в}}{\bar{v}} = \frac{\sigma_{н.в}}{1{,}128} = \frac{\sigma(kT)}{1{,}128} = \frac{\sigma_{2200}}{1{,}128},$$

где kT — энергия, соответствующая наиболее вероятной скорости. При $T = 293$ °К $v_{н.в} = 2200$ *м/сек*.

Для сечений, не подчиняющихся закону $1/v$, указан f-фактор отклонения от этого закона: $\bar{\sigma} = \frac{\sigma(kT)}{1{,}128} f(kT)$.

В шестой колонке приведены средние сечения рассеяния $\bar{\sigma}_{рас}$, полученные экспериментально, для максвелловского спектра нейтронов. Отметим, что на величину $\bar{\sigma}_{рас}$ влияет кристаллическая структура образца (и даже размеры кристаллических зерен), с которыми проводились измерения.

Сечения поглощения, активации и рассеяния для нейтронов тепловых энергий [1,2]

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_a, барн	σ_{act}, барн; период полураспада образующихся β-излучателя	$\bar{\sigma}_{рас}$, барн
$_1H$	1	99,985	(332±2) 10^{-3}	—	38±4 (газ)
	2	0,015	(0,46±0,10) 10^{-3}	(0,57±0,01) 10^{-3}; 12,4 лет	7±1
$_2He$		Естеств.	—	—	0,8±0,2
	3	0,00013	5400±200 (n,p)	—	1,0±0,7
	4	100	0	0	—
$_3Li$		Естеств.	71±1,0	—	1,4±0,3
	6	7,52	945 (n, α)	(28±8) 10^{-3}	—
	7	92,48	—	36±4; 0,89 сек	—
$_4Be$	7	54 дня	54 000±8000 (n, p);	—	—
	9	100	<1(n,α) (10±1) 10^{-3}	(9±3) 10^{-3}; 2,7·10^6 лет	7±1
$_5B$		Естеств.	757,7±3,06	—	4±1
	10	19,8	3838±16; (n, p)<0,2	0,5±0,2	—
	11	80,2		(5±3) 10^{-3}; 0,03 сек	—
$_6C$		Естеств.	(3,80±0,04) 10^{-3}	—	4,8±0,2
	12	98,89	—	(3,3±0,2) 10^{-3}	—
	13	1,11	(0,5±0,2) 10^{-3}	(0,9±0,3) 10^{-3}; 5570 лет	—
	14	5570 лет	<200	<10^{-3}; 2,4 сек	—
$_7N$		Естеств.	1,88±0,05	—	10±1
	14	99,63	0,08±0,02;	—	—
			1,75±0,05 (n, p)		
	15	0,37	—	(24±8) 10^{-3}; 7,4 сек	—
$_8O$		Естеств.	<0,0002	—	4,2±0,3
	16	99,76	—	—	—
	17	0,037	0,25±0,15 (n, α)	0,4±0,1; 5570 лет ^{14}C	—
	18	0,204	—	(0,21±0,04) 10^{-3}; 29 сек	—
$_9F$	19	100	<10^{-1}	(9±2) 10^{-3}; 11 сек	3,9±0,2
$_{10}Ne$		Естеств.	(32±9) 10^{-3}	—	2,38±0,04
	20	90,92	—	—	—
	21	0,26	—	—	—
	22	8,82	—	(36±15) 10^{-3}; 40 сек	—
$_{11}Na$	23	100	(525±10) 10^{-3}	0,534±0,007; 14,95 ч	4,0±0,5
$_{12}Mg$		Естеств.	0,059±0,002	—	3,6±0,4
	24	78,60	0,034±0,010	—	—
	25	10,11	0,280±0,090	—	—
	26	11,29	(60±60) 10^{-3}	(27±5) 10^{-3}; 9 мин	—
	27	9,5 мин		3·10^{-3}; 21 ч	—
$_{13}Al$	27	100	(241±3) 10^{-3}	(0,21±0,02) 10^{-3}; 2,3 мин	1,4±0,1
$_{14}Si$		Естеств.	0,16±0,02	—	1,7±0,3
	28	92,27	(80±30) 10^{-3}	—	—
	29	4,69	0,28±0,09	—	—
	30	3,05	0,4±0,4	(110±10) 10^{-3}; 2,62 ч	—
$_{15}P$	31	100	0,20±0,02	0,19±0,010	5±1

Элемент	Массовое число	Содержание, % природной смеси	σ_a, барн	σ_{act}, барн; период полураспада образующегося радиоактивного	$\bar{\sigma}_{рас}$, барн
$_{16}S$		Естеств.	0,52 ± 0,02	—	1,1 ± 0,2
	32	95,018	(1,8 ± 1,4) 10^{-3} (n, α)		—
	33	0,76	0,12 ± 0,106 (n, p); (n, γ) < 3	(15 ± 10) · 10^{-3}; 25,1 дня ^{32}P	—
	34	4,215		0,26 ± 0,05; 87 дней	—
	36	0,017	—	0,14 ± 0,04; 5 мин	—
$_{17}Cl$		Естеств.	31,0 ± 2,0	—	16 ± 3
	35	75,4	< 5 · 10^{-5} (n, α)	30 ± 20; 3,08 · 10^5 лет	—
			0,30 ± 0,10 (n, p)	< 5 · 10^{-5}; 14,3 дня ^{35}P	
				0,19 ± 0,05; 87 дней ^{35}S	
	36	3,08 · 10^5 лет	—	90 ± 30	—
	37	24,6	—	(5 ± 3) · 10^{-3}; 1,0 сек	—
				(0,66 ± 0,12) 10^{-3}; 37,5 мин	
$_{18}Ar$		Естеств.	0,61 ± 0,03		1,5 ± 0,5
	36	0,34		0 ± 2; 35 дней	—
	38	0,063	—	0,8 ± 0,2; 265 лет	—
	40	99,60		0,53 ± 0,02; 109 мин	—
	41	109 мин	—	> 0,03; 3,5 года	—
$_{19}K$		Естеств.	2,07 ± 0,06		1,5 ± 3
	39	93,08	1,94 ± 0,15	3 ± 2*; 1,3 · 10^9 лет	—
	40	0,012	3,8 ± 0,7; 70 ± 20 (n, p)	—	—
	41	6,91	1,24 ± 0,10	1,30 ± 0,1; 12,46 ч	—
$_{20}Ca$		Естеств.	0,44 ± 0,02		—
	40	96,97	0,22 ± 0,04	—	—
	42	0,64	42 ± 3	—	—
	43	0,145		—	—
	44	2,06	—	0,72 ± 0,10; 164 дня	—
	46	0,0033	—	0,26 ± 0,10; 4,8 дня	—
	48	0,185	—	1,1 ± 0,1; 8,5 мин	—
$_{21}Sc$	45	100	28,3 ± 0,7	10 ± 4; 20 сек	24 ± 2
				22,3 ± 2,2; 85 дней	
$_{22}Ti$		Естеств.	6,9 ± 0,13	—	4 ± 1
	46	7,95	0,6 ± 0,2	—	2 ± 2
	47	7,75	1,7 ± 0,3		4 ± 1
	48	73,45	8,3 ± 0,6	—	4 ± 2
	49	5,51	1,9 ± 0,5	—	1 ± 1
	50	5,34	< 0,2	0,44 ± 0,03; 5,8 мин	3 ± 1
$_{23}V$		Естеств.	5,00 ± 0,01	—	5 ± 1
	50	0,24	250 ± 250		—
	51	99,76	—	4,6 ± 0,9; 3,76 мин	—
$_{24}Cr$		Естеств.	3,1 ± 0,2		3,0 ± 0,5
	50	4,31	17,0 ± 1,4	15,9 ± 1,6; 27,7 дня	—
	52	83,76	0,76 ± 0,06		—
	53	9,55	18,2 ± 1,5	—	—
	54	2,38	< 0,3	0,38 ± 0,04; 3,6 мин	—
$_{25}Mn$	55	100	13,2 ± 0,4	13,17 ± 0,1; 2,58 ч	2,3 ± 0,3
$_{26}Fe$		Естеств.	2,62 ± 0,06; < 5 · 10^{-4} (n, α)	—	11 ± 1
	54	5,84	2,3 ± 0,2	2,8 ± 0,4; 2,94 года	—
	56	91,68	2,7 ± 0,2		—
	57	2,17	2,5 ± 0,2	—	—
	58	0,31	2,5 ± 2,0	1,01 ± 0,1; 44,3 дня	—
			(n, α) < 1,5 · 10^{-3}	< 1,5 · 10^{-3}; 0,5 дня ^{56}Cr	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_γ, барн	σ_{act}, барн; период полураспада образующегося β-излучателя	$\bar{\sigma}_{act}$, барн
$_{27}$Co	59	100	36,0±0,5	16±3; 10,4 мин 20±3; 5,28 года	7±1
	60	10,4 мин	—	100±50; 1,25 ч	—
	60	5,28 года	—	6±2; 1,75 ч	—
$_{28}$Ni		Естеств.	4,6±0,2	—	17,5±1,0
	58	67,76	4,4±0,3	—	—
	60	26,16	2,6±0,2	—	—
	61	1,25	2,0±1,0	—	—
	62	3,66	15±2	—	—
	64	1,16	—	1,62±0,14; 2,57 ч	—
	65	2,57 ч		20±2; 56 ч	—
$_{29}$Cu		Естеств.	3,85±0,06		7,2±0,7
	63	69,1	4,5±0,1	4,5±0,2; 12,9 ч	—
	65	30,9	2,2±0,2	1,6±0,4; 5,15 мин	—
	66	5,51 мин		130±40*; 59 ч	—
$_{30}$Zn		Естеств.	1,10±0,02		3,0±0,4
	64	48,89	(1,5±1) 10^{-3} (n, α)	0,47±0,05; 245 дней $<10^{-3}$; 12,8 ч ^{64}Cu	—
	66	27,81	$<2\cdot10^{-4}$ (n, α)	$2\cdot10^{-4}$; 93 лет ^{66}Ni	—
	67	4,11	(6±4)10^{-4} (n, α)		—
	68	18,56	$<2\cdot10^{-3}$ (n, α)	(9,9±4) 10^{-2}; 13,8 ч 1,0±0,2; 52 мин	—
	70	0,62	—	8±1,20; 2,2 мин	—
$_{31}$Ga		Естеств.	2,80±0,13	—	4±1
	69	60,2	2,1±0,2	1,4±0,3; 20,2 мин	—
	71	39,8	3,1±0,4	5,0±0,5; 14,2 ч	
$_{32}$Ge		Естеств.	2,46±0,20	—	3±1
	70	20,55	3,4±0,3	3,42±0,33; 12 дней	—
	72	27,37	0,96±0,09	—	—
	73	7,67	14±1		
	74	36,74	0,62±0,06	0,04±0,006; 46 сек 0,21±0,06; 62 мин	—
	76	7,67	0,36±0,07	(8,0±2,4) 10^{-3}; 57 сек 50±10; 12 ч	—
$_{33}$As	75	100	4,3±0,2	5,4±1,0; 27 ч	6±1
$_{34}$Se		Естеств.	11,7±0,1	—	11±2
	74	0,87	50±7	26±6; 123 дня	—
	76	9,02	85±7	7±3; 18 сек	—
	77	7,58	42±4	—	—
	78	23,52	0,4±0,4	—	—
	80	49,82	0,61±0,06	(3,0±1,0) 10^{-2}; 57 мин 0,5±0,1; 18 мин	—
	82	9,19	2,1±1,6	(6,0±2,5) 10^{-2}; 67 сек (4±2) 10^{-0}; 25 мин	—
$_{35}$Br		Естеств.	6,82±0,06	—	6±1
	79	50,52	10,4±1,0	2,9±0,5; 4,6 ч 5,5±1,4; 18 мин	—
	81	49,48	2,6±0,4	3,3±0,4; 35,9 ч	—
$_{36}$Kr		Естеств.	31±2	—	7,2±0,7
	78	0,36	—	2,0±0,5; 34,5 ч	—
	80	2,27	96±16; 13 сек → 2·10⁵ лет	—	—
	82	11,56	45±15		
	83	11,55	205±30	—	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_γ, барн	σ_{act}, барн; период полураспада сбрасываемого γ-излучателя	$\bar{\sigma}_{fpg}$, барн
$_{36}$Kr	84	56,9	<2	0,10±0,03; 4,4 ч (60±20) 10^{-3}; 9,4 года	—
	85	9,4 года	<15	—	—
	86	17,37	<2	(60±20) 10^{-3}; 77 мин	—
	87	77 мин	—	$<0,6$; 2,8 ч	—
$_{37}$Rb		Естеств.	0,73±0,07	—	12±2
	85	72,15	—	0,91±0,09; 18,7 дня	—
	87	27,85	—	0,12±0,03; 17,8 мин	—
	88	17,8 мин	—	1,0±0,2; 15,4 мин	—
$_{38}$Sr		Естеств.	1,21±0,06		10±1
	84	0,56	<3	<1; 70 мин; 1,4±0,3; 65 дней	—
	86	9,86	—	1,65±0,16; 2,80 ч	—
	87	7,02	—	—	—
	88	82,56	—	(5±1) 10^{-3}; 53 дня	—
	89	51 день	—	0,5±0,1*; 28 лет	—
	90	19,9 года	—	1,0±0,6; 64 ч	—
$_{39}$Y	89	100	1,31±0,08	1,26±0,09; 63 ч	3±2
	90	63 ч	—	<7; 61 день	—
	94	58 дней	—	1,07±0,09; 3,5 ч	—
$_{40}$Zr		Естеств.	0,185±0,004	—	8±1
	90	51,46	0,10±0,07	—	—
	91	11,23	1,58±0,12	—	—
	92	17,11	0,25±0,12	—	
	93	$1,1\cdot10^6$ лет	$<0,4$	—	—
	94	17,40	0,08±0,06	0,036±0,008; 62 дня	—
	96	2,80	0,1±0,1	0,053±0,005; 17 ч	—
$_{41}$Nb	93	100	1,16±0,02	1,0±0,6; 6,6 мин	5±1
	94	$2,2\cdot10^4$ лет	—	15±4; 36 дней	—
$_{42}$Mo		Естеств.	2,7±0,4	—	7±1
	92	15,86	$<0,3$	$6\cdot10^{-3}$; 6,9 ч	—
	94	9,12	—	—	—
	95	15,70	13,9±1,4	—	—
	96	16,50	1,2±0,6	—	—
	97	9,45	2,2±0,7	—	—
	98	23,75	0,4±0,4	0,51±0,06; 67 ч	—
	100	9,62	0,5±0,5	0,20±0,05; 14,3 мин	—
$_{43}$Tc	99	$2,1\cdot10^5$ лет	22±3	2,6±1,3; 6 ч	—
$_{44}$Ru		Естеств.	2,56±0,12	—	8±1
	96	5,7	—	0,21±0,02; 2,8 дня	—
	102	31,3	—	1,44±0,16; 41 день	—
	104	18,3	—	0,7±0,2; 4,6 ч	—
	105	4,5 ч	—	0,2±0,02; 1 год	—
$_{45}$Rh	103	100	149±4	12±2; 4,4 мин 140±30; 42 сек	5±1
	104	4,4 мин	—	880±100; 36 ч	—
	104	42 сек	—	40±10*; 36 ч	—
$_{46}$Pd		Естеств.	8,0±1,5	—	3,6±0,6
	102	0,8	—	4,8±1,5; 17 дней	—
	108	26,7	—	0,26±0,04; 4,8 мин 10,4±0,8; 13,6 ч	—
	110	13,5	—	0,21±0,03; 23,6 мин $<0,05$; 5,5 ч	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_γ, барн	σ_{act}, барн; период полураспада образующихся β-излучателей	σ_{proc}, барн
$_{47}$Ag		Естеств.	64,8±0,4	—	5±1
	107	51,35	31±2	45±4; 2,3 мин	—
	109	48,65	87±7	3,2±0,4; 270 дней	—
				113±13; 24,2 сек	
$_{48}$Cd		Естеств.	2537±9 $f=1,3$	—	7±1
	106	1,22	—	1,0±0,6; 6,7 ч	—
	110	12,39	—	0,2±0,1; 49 мин	—
	112	24,07	—	(30±15) 10^{-3}; 5,1 года	—
	113	12,26	20000 $f=1,3$	—	—
	114	28,86	—	0,14±0,03; 43 дня	—
				1,1±0,3; 53 ч	
	116	7,58	—	1,5±0,3; 2,9 ч	—
$_{49}$In		Естеств.	194±2	—	2,2±0,5
	113	4,23		56±12; 49 дней	—
			—	2,0±0,6; 72 сек	
	115	95,77		155±10; 54,2 мин	—
			—	52±6; 13 сек	
$_{50}$Sn		Естеств.	(625±15) 10^{-3}	—	4±1
	112	0,95	—	1,3±0,3; 112 дней	—
	116	14,24	—	(6±2) 10^{-3}; 14,5 дня	—
	117	7,57	—	—	—
	118	24,01	—	(10±6) 10^{-3}; 250 дней	—
	120	32,97	—	(1±1) 10^{-3}; $\geq$ 400 дней	—
				0,14±0,03; 27,5 ч	
	122	4,71	—	(1±0,5) 10^{-3}; 130 дней	—
				0,16±0,04; 40 мин	
	124	5,98	—	0,2±0,1; 10 мин	—
				(4±2) 10^{-3}; 10 дней	—
$_{51}$Sb	121	Естеств.	5,7±1,0	—	4,3±0,5
		57,25	5,9±0,5	8,8±1,5; 2,8 дня	—
				0,19±0,03; 13,3 мин	
	123	42,75	4,1±0,3	(30±15) 10^{-3}; 21 мин	—
				(30±15) 10^{-3}; 1,3 мин	
				2,5±1,5; 60 дней	
$_{52}$Te		Естеств.	4,7±0,1	—	6±1
	120	0,089	70±70	—	—
	121	17 дней	24±1,0	—	—
	121	154 дня	<1	—	—
	122	2,46	2,8±0,9	1,1±0,5; 110 дней	—
	123	0,87	410±30	—	—
	124	4,61	6,8±1,3	5±3; 58 дней	
	125	6,99	1,66±0,16	0,8±0,2; 9,3 ч	—
	126	18,71	0,8±0,2	(90±25) 10^{-3}; 110 дней	
				0,8±0,2; 19,3 ч	—
	128	31,79	0,3±0,3	(15±5) 10^{-3}; 33 дня	
				0,13±0,03; 72 мин	—
	130	34,49	0,5±0,3	<8·10^{-3}; 30 ч	
				0,22±0,05; 26 мин	
$_{53}$I	127	100	6,22±0,15	(5,6±0,3) 10^{-3}; 25 мин	3,6±0,5
	129	1,7·10^7 лет	32±3	24±3; 12,6 ч	—
	130	12,6 ч	—	18±3; 8,05 дня	—
	131	8,1 дня	—	50±40; 2,4 ч	—
$_{54}$Xe		Естеств.	35±5	—	4,3±0,4
	124	0,096	74±1*	—	—
	128	1,92	<5	—	—
	129	26,44	45±15	—	—
	130	4,08	<5	—	—
	131	21,18	120±15	—	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_γ, барн	$\sigma_{\text{хвост}}$, барн; период полураспада образующегося β-излучателя	$\bar{\sigma}_{\text{рез.}}$, барн
$_{54}$Xe	132	26,89	<5	0,2±0,1; 5,3 дня	—
	133	5,3 дня	—	190±90	—
	134	10,44	<5	0,2±0,1; 9,13 ч	—
	135	9,13 ч	$(2,72\pm0,14)\cdot10^6$ $f=1,16$	—	—
	136	8,87	<5	0,15±0,08; 3,9 мин	—
$_{55}$Cs	133	100	28,0±1,0	$(2,44\pm0,15)\cdot10^{-3}$; 3,1 ч	20±10
				30±1; 2,3 года	
	134		41,6±0,9	134±12*; $2,6\cdot10^4$ лет	—
	134^m		2,82±0,07	—	—
	135	$2,6\cdot10^6$ лет	—	8,7±0,5; 13,7 года	—
	137	30 года	—	$(110\pm53)\cdot10^{-3}$; 35 мин	—
$_{56}$Ba		Естеств.	1,2±0,1	—	8±1
	130	0,101	—	10,0±1,0; 12 дней	
	132	0,097	—	7±2; 7,2 года	—
	134	2,42	2±2	—	
	135	6,59	5,8±0,9	—	—
	136	7,81	0,4±0,4	—	—
	137	11,32	5,1±0,4	—	—
	138	71,60	0,70±0,10	0,5±0,1; 80 мин	—
	139	85 мин	—	4±1; 12,8 дня	—
	140	12,8 дня	—	<20*; 18 мин	—
$_{57}$La		Естеств.	8,9±0,2	—	15±5
	139	99,911	—	6,2±0,8; 40 ч	
	140	40 ч	—	3,1±1,0; 5,7 ч	—
$_{58}$Ce		Естеств.	0,73±0,08	—	9±6
	136	0,19	25±25	0,6±0,2; 34,5 ч	—
				6,3±1,5; 8,7 ч	
	138	0,26	9±6	$(7\pm5)\cdot10^{-3}$; 55 сек	—
				0,6±0,3; 140 дней	
	140	88,48	0,66±0,05	0,31±0,10; 32 дня	—
	142	11,07	1,0±0,2	0,94±0,05; 32 ч	
	143	32 ч	—	0,0±0,7; 290 дней	—
$_{59}$Pr	141	100	11,3±0,6	10,6±1,0; 19,2 ч	—
	142	19,2 ч	—	18±3*; 13,8 дня	
	143	13,8 дня		89±10; 17 мин	—
$_{60}$Nd		Естеств.	19,9±0,3	—	—
	142	27,13	18±2	—	—
	143	12,32	324±10	240±50	—
	144	23,87	5,0±0,6	—	
	145	8,29	60±6	—	—
	146	17,1	10±1	1,8±0,6; 11,3 дня	—
	148	5,72	3,4±1,0	3,7±1,2; 1,6 ч	—
	150	5,60	3,0±1,5	1,5±0,2; 15 мин	—
$_{61}$Pm	147	2,5 года	150±50*	60±20; 5,3 дня	—
	148		124±12		
$_{62}$Sm		Естеств.	5828±30 $f=1,5$	—	—
	144	3,16	—	<2; 400 дней	—
	147	15,07	87±60	—	
	149	13,84	40800±3000	—	—
	151	73 года	12400±400*		
	152	26,63	216±6	140±40; 47 ч	—
	154	22,53		5,5±1,1; 21 мин	—

Элемент	Массовое число	Содержание, % первоначального элемента	σ_i, барн	σ_{act}, барн, период полураспада образующихся β-радиоактивных	$\sigma_{рас}$, барн
$_{63}$Eu		Естеств.	4400±30 $\gamma = 0,95$	—	8±1
	151	47,77	7800±200	1400±300; 9,2 ч	
	152	13 лет	3600±1500	—	—
	153	52,23	440±25	420±100*, 16 лет	
	154	16 лет		1500±400 *; 1,7 года	—
	155	1,7 года	—	14000±4000*; 15,4 дня	—
$_{64}$Gd		Естеств.	46017±150 $\gamma = 0,85$	—	—
	152	0,20	—	<≤125; 230 дней	
	154	2,15		—	
	155	14,73	56200±1000	70000±20000*	—
	157	15,68	242000±4000	160000±60000*	—
	158	24,87	—	3,9±0,4; 18 ч	—
	160	21,90	—	0,8±0,3; 3,6 мин	—
$_{65}$Tb	159	100	46±4	>22; 73 дня	—
	160	73 дня		525±100*; 7 дней	
$_{66}$Dy		Естеств.	936±20	—	100±20
	158	0,090	—	96±20; 136 дней	—
	164	28,18	—	9000±200; 1,3 мин	—
				800±100; 140 мин	
	165	139 мин	—	5000±2000*; 82 ч	—
$_{67}$Ho	165		65±3	60±19; 27,3 ч	
$_{68}$Er		Естеств.	173±17	—	15±4
	162	0,136	—	2,05±0,20; 75 мин	—
	164	1,56	—	1,65±0,17; 10 ч	—
	168	27,1	—	2,0±0,4; 9,4 дня	—
	170	14,9	—	9±2; 2,5 сек	7,5 ч
$_{69}$Tm	169	100	127±4	130±30; 129 дней	7±3
	170	129 дней		150±90*; 1,9 года	—
$_{70}$Yb		Естеств.	37±4	—	12±5
	168	0,140	—	11000±3000*; 32 дня	—
	174	31,84	—	60±40; 101 дня	—
	176	12,73	—	5,5±1,0; 1,8 ч	—
$_{71}$Lu		Естеств.	119±6	—	—
	175	97,40	—	35±15; 3,7 ч	—
	176	2,60	—	4000±800; 6,8 дня	
$_{72}$Hf		Естеств.	102±3	—	8±2
	174	0,16	1500±1000	350±55	—
	176	5,15	15±15	—	
	177	18,39	380±30	—	—
	178	27,08	73±10	—	
	179	13,78	65±15	—	—
	180	35,44	14±5	10±3; 46 дней	—
	181		—	40*	
$_{73}$Ta	181	100	210±1	(30±10)·10⁻³; 16,4 мин	5±1
				19±7; 111 дней	
	182	111 дней	—	(1,7±0,2)·10⁻³; 5,5 дня	—
$_{74}$W		Естеств.	19,2±1,0		5±1
	180	0,14	60±60	10±10; 140 дней	—
	182	26,4	20±2	—	—
	183	14,4	11±1	—	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_a, барн	σ_{act}, барн; период полураспада образующегося β-излучателя	$\sigma_{рес}$, барн
$_{74}W$	184	30,6	2,4±0,22	2,1±0,6; 73 дня	—
	186	28,4	35±3	31±7; 24 ч	—
	187	24 ч	—	90±40; 65 дней	—
$_{75}Re$		Естеств.	86±4	—	14±4
	185	37,07	104±8	120±12; 92 ч	—
	187	62,93	66±5	65±7; 17 ч	—
	188	17 ч		<2; 160 дней	—
$_{76}Os$		Естеств.	15,3±0,7	—	11±1
	184	0,018	—	<200; 97 дней	—
	190	26,4	—	8±3; 16,8 дня	—
	192	41,0	—	1,6±0,4; 31 ч	—
	193	31 ч	—	600±200; 700 дней	—
$_{77}Ir$		Естеств.	440±20	—	—
	191	38,5	—	260±100; 1,4 мин	—
				700±200; 74 дня	
	192	74 дня	—	700±200	—
	193	61,5	—	130±30; 19 ч	—
$_{78}Pt$		Естеств.	8,8±0,4	—	10±1
	190	0,012	150±150	0,70±0,10; 18 ч	—
	192	0,78	8±8	90±40; 4,3 дня	—
	194	32,8	1,2±0,9	—	—
	195	33,7	27±2	—	—
	196	25,4	0,7±0,7	0,87±0,09; 18 ч	—
	198	7,2	4,0±0,5	3,9±0,8; 31 мин	—
	199	31 мин	—	15±10; 11,5 ч	—
$_{79}Au$	197	100	98,8±0,3	96±10; 2,7 дня	9,3±1,0
	198	2,7 дня	—	29000±1200; 3,15 дня	—
	199	3,15 дня	—	30±15*; 48 мин	—
$_{80}Hg$		Естеств.	374±6 f — 0,95	—	20±6
	196	0,146	3100±1000*	420±80; 24 ч	—
				880±175; 65 ч	
	198	10,02	—	0,018±0,004; 46,6 ч	—
	199	16,84	2500±800*	—	—
	200	23,13	<60*	—	—
	201	13,22	<60*	—	—
	202	29,80	<60*	3,8±0,8; 47 дней	—
	204	6,85	<60*	0,43±0,10; 5,5 мин	—
$_{81}Tl$		Естеств.	3,4±0,5	—	14±2
	203	29,50	11,4±0,9	8±3; 2,7 года	—
	205	70,50	0,80±0,08	0,10±0,03; 4,2 мин	—
$_{82}Pb$		Естеств.	(170±10) 10^{-3}	—	11±1
	204	1,48	0,8±0,6	0,7±0,2*; $5\cdot10^{3}$ лет	—
	206	23,6	(25±5) 10^{-3}	—	—
	207	22,6	0,70±0,03	—	—
	208	52,3	<30·10^{-3}	(0,6±0,2) 10^{-3}; 3,2 ч	—
$_{83}Bi$	209	100	(34±2) 10^{-3}	(19±2) 10^{-3}; 5 дней	9±1
$_{86}Rn$	220	54 сек	—	<0,2*; 25 мин	—
	222	3,80 дня	—	0,19±0,07*; 11,7 дня ^{226}Ra	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	$\sigma(n, \alpha)$, барн	σ_{act}, барн	$\bar{\sigma}_{act}$, барн
$_{88}Ra$	223	11,2 дня	—	130±20*; 3,64 дня	—
	224	3,64 дня	—	12±0,5*; 14,8 дня	—
	225	1620 лет	—	20±3*; 41,2 дня	—
	226	6,7 года	—	35±5*; <10 мин	—
$_{89}Ac$	227	22 года	510±50	700±20; 6,13 ч	
$_{90}Th$	227	18,6 дня	—	—	—
	228	1,9 года	—	125±15*; $7,3 \cdot 10^5$ лет	—
	230	$7,5 \cdot 10^4$ лет	22,7±0,6	21,4±0,3; 25,5 ч	—
	232	100%; $1,45 \cdot 10^{10}$ лет	7,58±0,11	7,33±0,12; 23,3 мин	12,5±0,3
	233	23,3 мин	—	1450; 24,1 дня	
	234	24,1 дня	—	1,6±0,5*; <10 мин	—
$_{91}Pa$	231	$3,248 \cdot 10^4$ лет	200±20	200±15; 1,31 дня	—
	232	1,31 дня	—	760±100*; 27,4 года	—
	233	27,4 дня	—	20±4; 1,18 мин	—
	233	27,4 дня		19±3; 6,7 ч	—
$_{92}U$		Естеств.	7,68±0,07	—	6,3±0,2
	232	73 года	—	300±200*; $1,62 \cdot 10^5$ лет	—
	233	$1,61 \cdot 10^5$ лет	578±4	49±2; $2,52 \cdot 10^5$ лет	12,4±1,4
	234	0,0057%; $2,52 \cdot 10^5$ лет	97±6	106±4; $7,1 \cdot 10^5$ лет	—
	235	0,714%; $7,1 \cdot 10^8$ лет	688±3	107±5; $2,4 \cdot 10^7$ лет	15,2±2,3
	236	$2,4 \cdot 10^7$ лет	5,5±0,3	8±1,0; 6,7 дня	—
	238	99,3%; $4,5 \cdot 10^9$ лет	2,71±0,02	2,74±0,06; 23,5 мин	—
	240	23,5 мин		22±6; 17 ч	6,4±1,2
$_{93}Np$	237	$2,2 \cdot 10^6$ лет	170±5	169±6; 2,1 дня	—
	239	2,3 дня	—	31±6*; 7,6 мин	—
				18±18*; 60 мин	—
$_{94}Pu$	238	89,6 года	403±10	308±10; $2,44 \cdot 10^4$ лет	—
	239	$2,44 \cdot 10^4$ лет	1026±13	316±16; $6,6 \cdot 10^3$ лет	12,1±1,7
	240	$6,6 \cdot 10^3$ лет	287±7	250±40; 13,2 года	—
	241	13,2 года	1400±80	390±50; $3,7 \cdot 10^5$ лет	—
	242	$3,7 \cdot 10^5$ лет	18,6±0,8	19±1; 4,96 ч	—
	243	4,96 ч	—	170±90*; $7,6 \cdot 10^3$ лет	—
	244	$7,6 \cdot 10^7$ лет	—	1,8±0,3*; 10 ч	—
	245	10,6 ч	—	265±145; 11,2 дня	—
$_{95}Am$	241	461 год	630±35	750±80*; 16 ч	—
	242	100 лет	6000±1000*	190±40*; 100 лет	—
	243	$7,6 \cdot 10^3$ лет	115*	74,1±4; 28 мин	—
$_{96}Cm$	242	16,5 дня	—	20±10; 35 лет	—
	243	35 лет	700±300*	250±150*; 18 лет	—
	244	18 лет	—	15±10*; $2 \cdot 10^3$ лет	—
	245	$2 \cdot 10^4$ лет	—	200±100*; $6,6 \cdot 10^3$ лет	—
	246	$6,6 \cdot 10^3$ лет	—	15±10*; >10^4 лет	—
	248	$4,2 \cdot 10^5$ лет	—	6±4; 85 мин	
$_{97}Bk$	249	250 дней	—	500±200; 3,1 ч	—
$_{98}Cf$	249	470 лет	900±400*	270±100*; 10 лет	—
	250	10 лет	—	1500±1000*; 700 лет	—
	251	700 лет	—	3000±2000*; 2,2 года	—
	252	2,2 года	—	28±7; 16 дней	—
	254	55 дней	—	<2*	—
$_{99}Es$	253	20 дней	—	300±150*; 38 ч	—
	254	480 дней	2700±600*	<40*; 24 дня	—

41.2. ГРАФИКИ ПОЛНЫХ НЕЙТРОННЫХ СЕЧЕНИЙ В ИНТЕРВАЛЕ ЭНЕРГИЙ 0,01—10⁷ эв

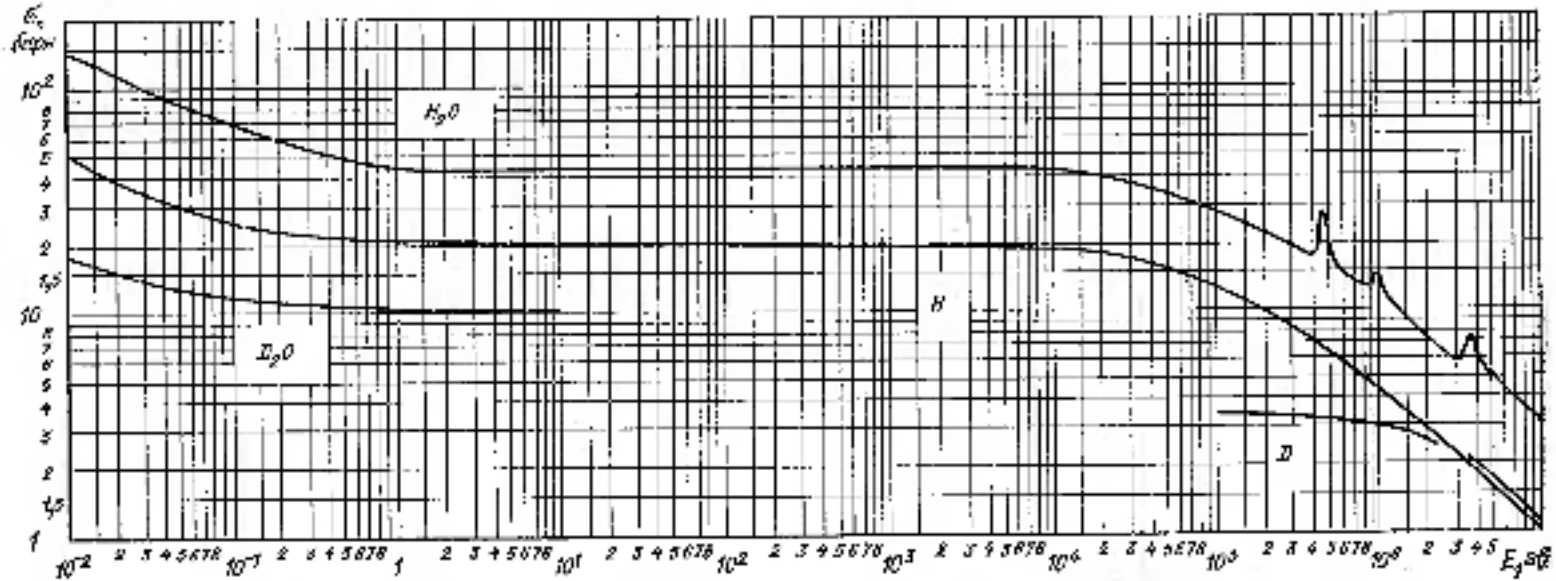


Рис. 41.1. Зависимость полных нейтронных сечений σ от энергии E для ¹H [3], ²D[2], H_2O [1, 2] и D_2O [2].

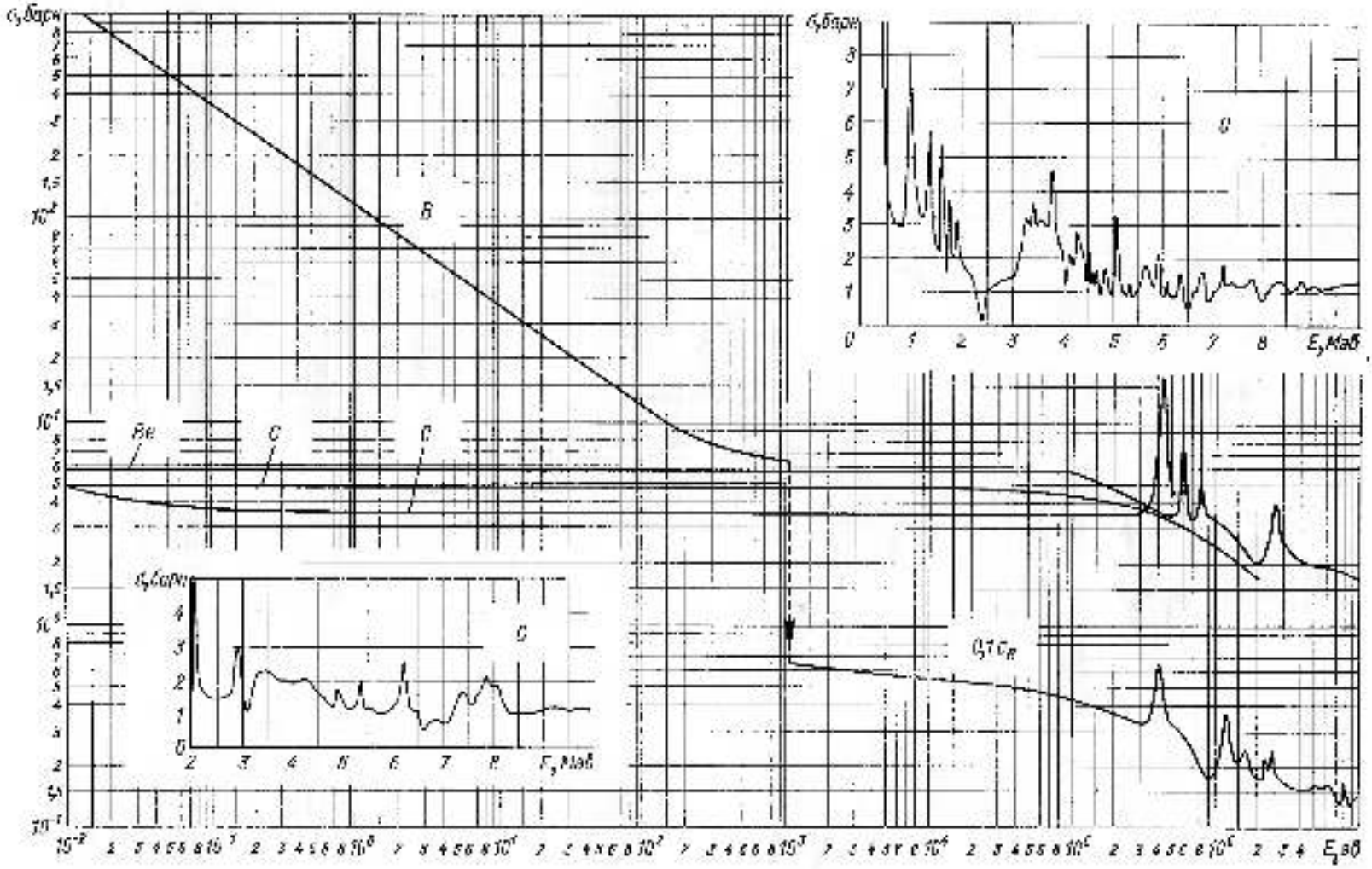


Рис. 61.2. Зависимость полных нейтронных сечений σ от энергии E для Be и B [2], C и O [3].

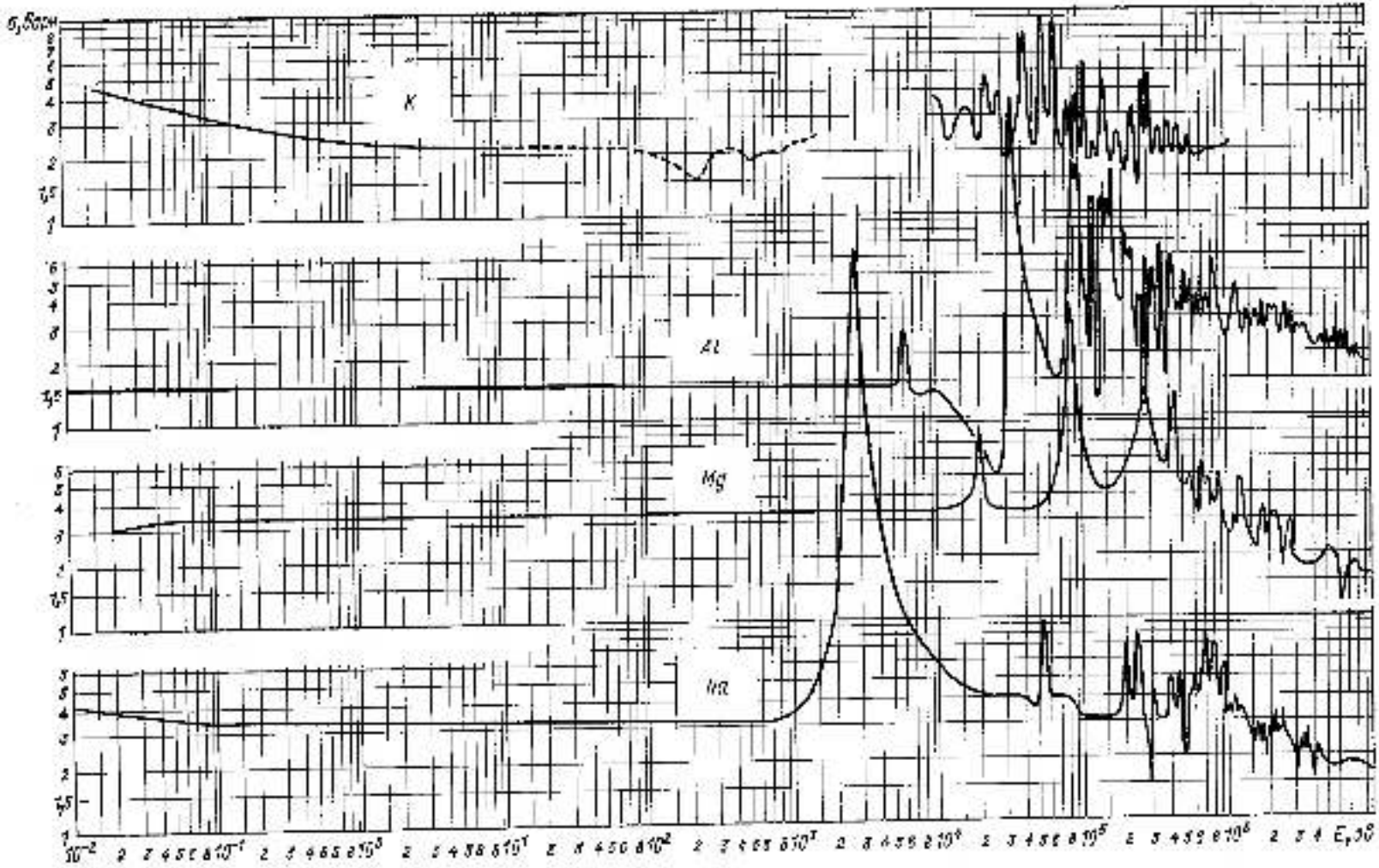


Рис. 41.3. Зависимость полных нейтронных сечений σ от энергии E для Na, Mg, Al и K [2]. Штриховая линия — сечение $\sigma_{рж}$ для K [1].

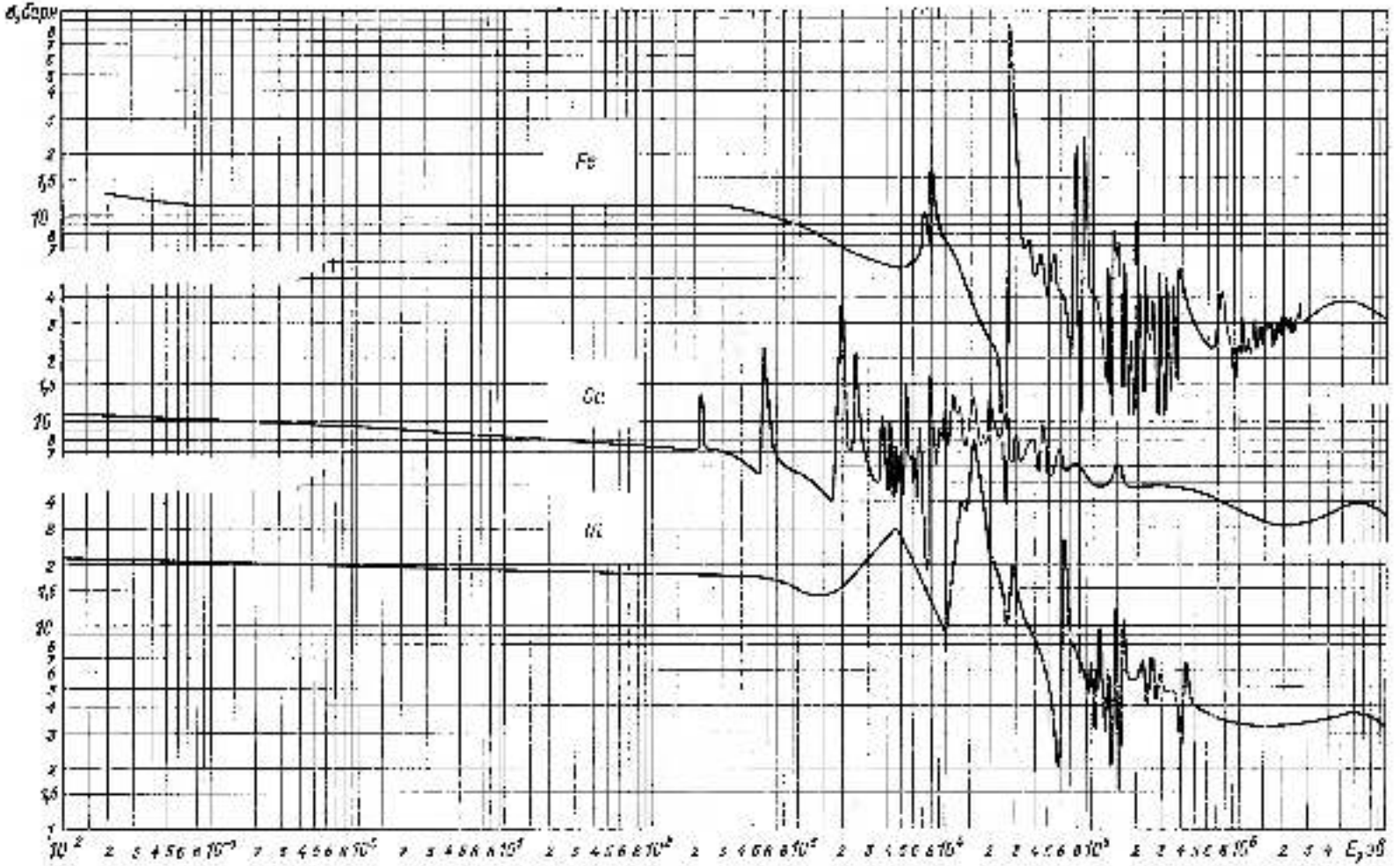
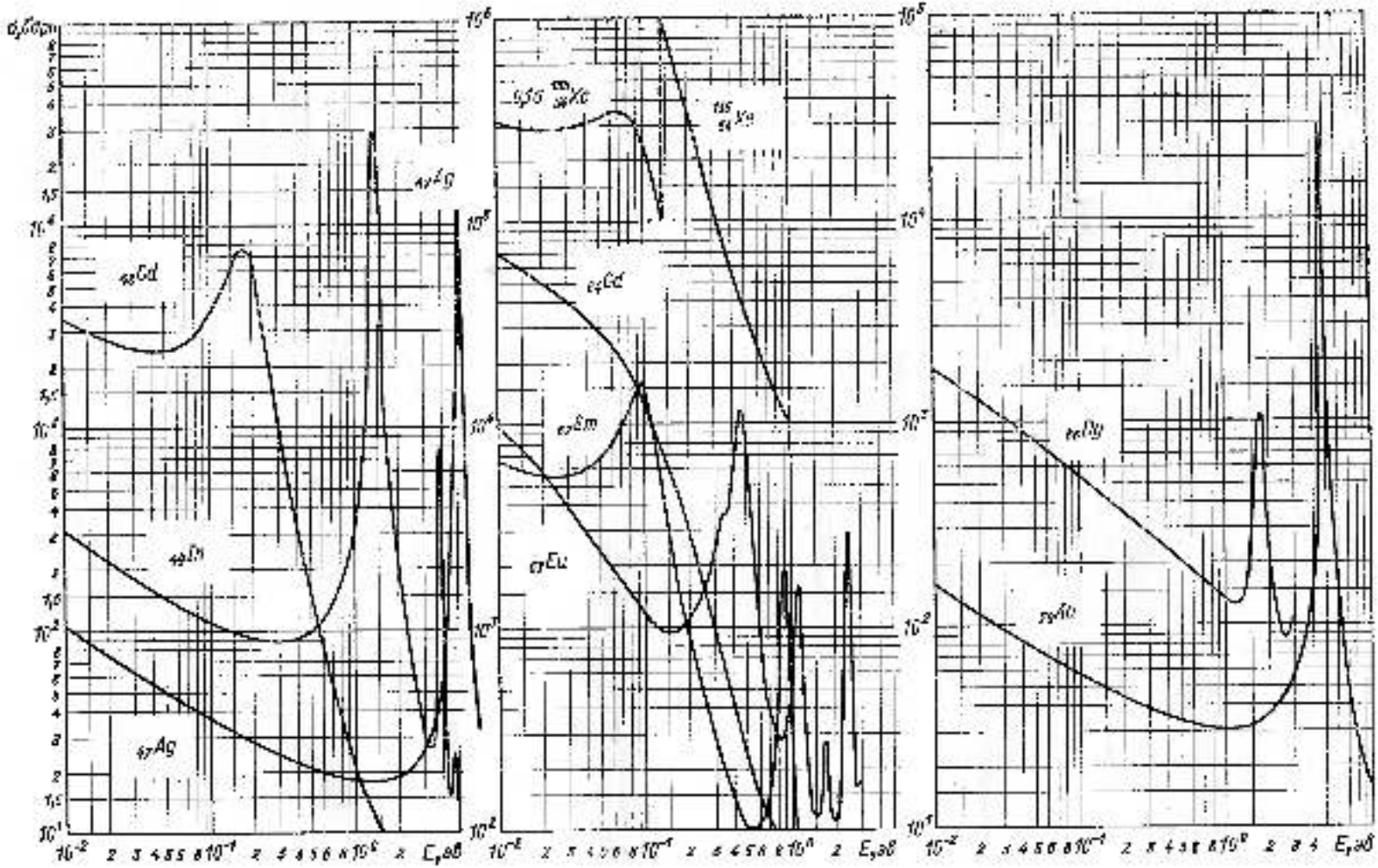


Рис. 41.А. Зависимость полных нейтронных сечений σ от энергии E для Fe, Ni и Co [9].



Сечения поглощения нейтронов σ от энергии E для Ag, Cd, In, Xe, Sm, Eu, Gd, Dy и Au [2].

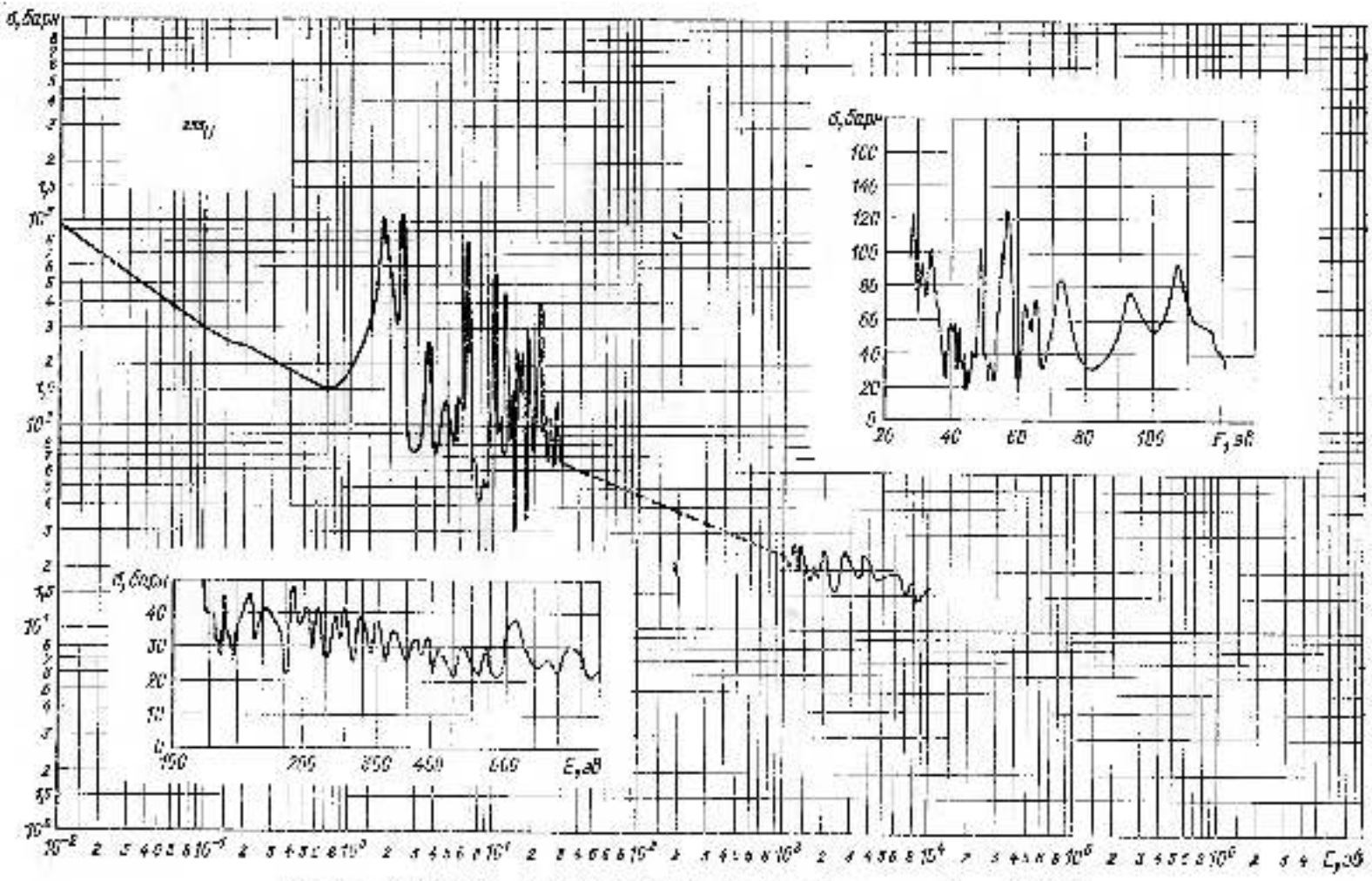


Рис. 41.5. Зависимость полного нейтронного сечения σ от энергии E для ^{235}U [Т. 12].

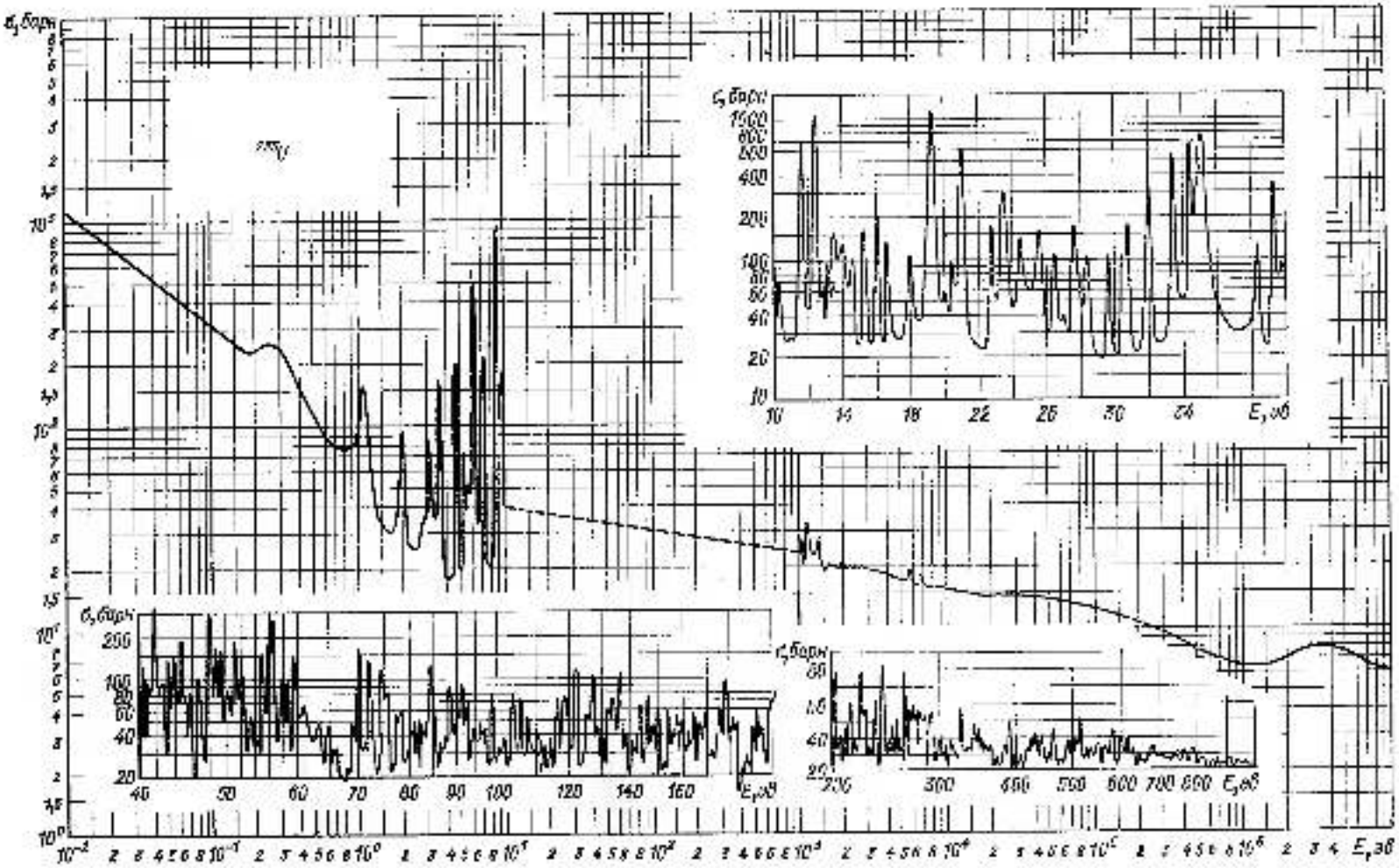


Рис. 41.7. Зависимость полного нейтронного сечения σ от энергии E для ^{235}U [3].

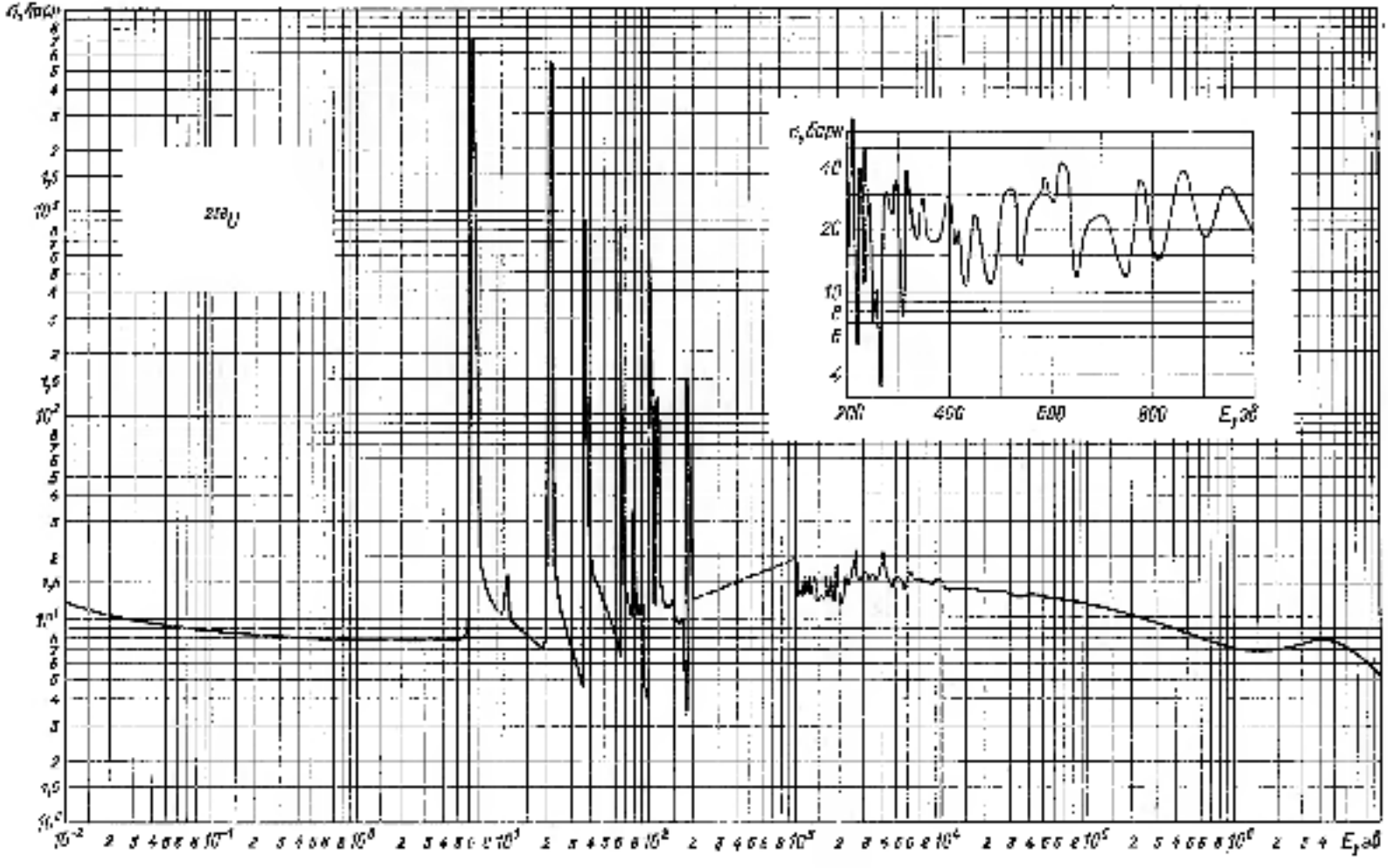


Рис. 41.8. Зависимость полного нейтронного сечения σ от энергии E для ^{235}U: 0,01—1 эв [3], 1—1000 эв [2] и 10^3—10^6 эв [3].

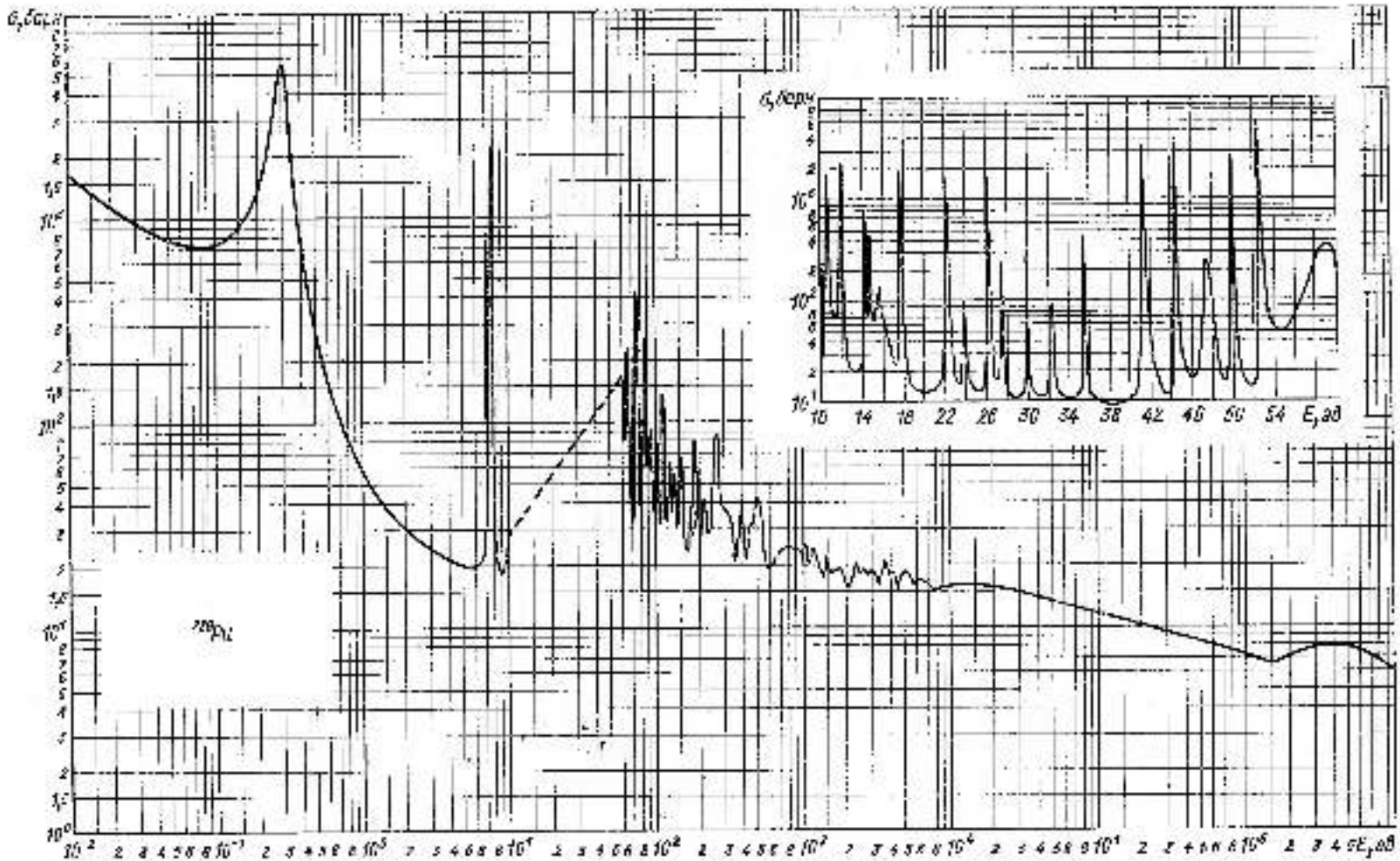


Рис. 41.9. Зависимость полного нейтронного сечения σ от энергии E для ^{239}Pu [3].

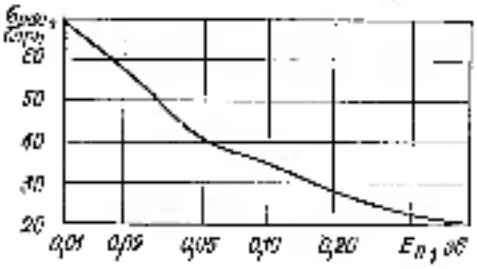


Рис. 41.10. Зависимость сечения рассеяния $\sigma_{рас}$ от энергии нейтронов E_n в H_2O [14].

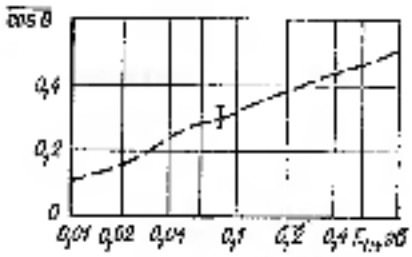


Рис. 41.11. Зависимость среднего косинуса угла рассеяния нейтронов в H_2O от их энергий E_n [14]. Пунктирная кривая дает представление о разбросе экспериментальных данных.

41.3. РЕЗОНАНСНЫЕ ИНТЕГРАЛЫ ЗАХВАТА

Резонансный захват нейтронов. В том случае, если сумма энергии падающего нейтрона и энергии связи его в образующемся промежуточном ядре равна энергии одного из квазистационарных уровней этого ядра, вероятность резонансного захвата нейтрона сильно возрастает. Время жизни квазистационарного уровня τ связано с энергетической шириной Γ соотношением: $\tau = \hbar/\Gamma$; $\hbar = h/(2\pi)$, h — постоянная Планка. Вблизи резонансного уровня сечение реакции описывается формулой Брейта — Вигнера. Если скорость нейтронов не велика, то в реакцию вступают главным образом нейтроны с орбитальным квантовым числом $l = 0$. В этом случае формула Брейта — Вигнера для отдельного изолированного резонанса имеет вид

$$\sigma(n, x) = \pi\bar{\lambda}^2 \frac{2J+1}{2(2I+1)} \cdot \frac{\Gamma_n \Gamma_x}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2/4}.$$

Здесь $\bar{\lambda} = \lambda/(2\pi)$; λ — длина волны нейтрона; I — спин ядра-мишени; J — спин промежуточного ядра ($J = I + 1/2$); Γ_n — нейтронная ширина уровня; Γ_x — ширина для испускания частицы x; $\Gamma = \sum_i \Gamma_i$; E_0 — энергия резонансного уровня. Вероятность эмиссии частицы x: $W_x = \Gamma_x/\Gamma$. В качестве процесса x могут выступать процессы эмиссии нейтрона, γ-кванта, α-частицы, протона и т. п.

Резонансный интеграл захвата. Резонансным интегралом захвата называется величина

$$I = \int_{E_{Cd}}^{\infty} \sigma(E) \frac{dE}{E},$$

Таблица 41.2

Резонансные интегралы захвата [1]

Если в соответствии с экспериментом нижняя граница резонансного интеграла была не 0,4 эв, то в скобках указана нижняя граница, например (0,10).

Изотоп	I, барн. Изотопы по отношению	по сечению	Сечение $\sigma(0,0)$, барн
Li	—	28	31
B	—	280±40	342
N	—	2,8±2,4	0,89
^{19}F	0,30±0,02	2,5±0,5 [14]	0,23
^{23}Na	~0,24	0,27	.
Mg	—	0,077±0,022	0,03
^{27}Al	~0,16	0,15	0,11
Si	—	0,5	0,07
P	~0,052	2	0,00
S	—	0,6	0,23
Cl	—	12,8±1,7	14,8
K	—	3,5±1,1 [14]	0,91
Ca	—	2	0,19
^{45}Sc	~10,7	—	10,5
Ti	—	3,0	2,6
^{51}V	~2,2	3,3±0,8	2,2
Cr	—	2,6±1,1 [14]	1,2
^{55}Mn	14,0±0,6	14,0±0,3	5,82
Fe	—	1,9±0,4	1,15
^{59}Co	70±5	<87	17,1
Ni	—	<3,1	2,0
Cu	4,26±0,15	3,7±0,8	1,7
^{63}Cu	5,04±0,15	—	1,36
^{65}Cu	2,30±0,23	—	0,92
Zn	—	1,66±0,16	0,44
Ga	—	11,7±2,7	1,23
^{85}Br	0,1	—	0,02
^{71}Ga	15	—	1,76
Ge	—	3,5±2,9	1,1
^{75}As	36,8	33	1,9
Se	—	9,6±1,2	5,4
Br	—	118±14	2,9
^{79}Br	147	—	4,8
Rb	9,0±2,8	—	0,32
Sr	—	10,0±2,0	0,33
^{89}Y	0,91	—	0,26
Zr	—	0,06±0,15	0,08
^{93}Nb	5,86	13,5±5,0	0,51
Mo	—	30,2±2,5	1,2
^{95}Mo	—	106±20	6,1
^{94}Mo	10,6±2,5	—	0,08
^{100}Mo	5,73±0,20	—	0,09
^{99}Tc	—	67±20	7,0
^{103}Rh	658	575	69
Pd	—	23	3,0
Ag	—	658±50	28
^{107}Ag	74	—	10
^{109}Ag	1160	5910±200	50
In	—	3586±350	86
^{115}In	1160	—	26
^{116}In	2539±133	—	~91
Sn	—	5,7±0,7	0,27
Sb	—	715±32	2,5
^{121}Sb	162		2,6
^{123}Sb	~138	—	1,1
Te	—	~74	2,1
^{123}I	120	183±30	3,1

Продолжение таблицы 41.2

Нуклид	I, барн. Измерено по замедлению	I, барн. Измерено по поглощению	Вклад $I(1/v)$, барн
^{128}I	55±22	—	4,8
^{133}Cs	370±50	500±80	12
^{135}Cs	96±3	—	3,8
Ba	—	7,5	0,53
La	—	11	4,1
Ce	—	3,7±1,7	0,52
^{141}Pr	11,3	7±3	0,1
^{143}Pr	—	190±25	39
Nd	—	40±6	20
^{143}Nd	—	190	140
^{145}Nd	—	146±15	23
^{147}Pm	1700±170	—	56
^{147}Sm	—	<1350	38
^{149}Sm	—	4400	—
^{152}Sm	—	3100±200	98
^{151}Eu	901±138	<3000	—
^{153}Eu	950	1420±100	140
Gd	—	67±8,0	—
^{164}Dy	982±33	—	—
Lu	—	720±70	50
^{176}Lu	465±15	—	5,8
^{177}Lu	867±60	—	—
Hf	1750	2900±330	46
^{180}Hf	21,8	—	5,5
^{181}Ta	580	1110±400	0,2
W	—	348±60	8,5
^{186}W	355	396±50	15,0
^{185}Re	1100	—	46
^{187}Re	305	—	30
Os	—	180±20	6,7
Ir	—	2000±490	193
^{191}Ir	2500	—	490
^{193}Ir	1370	—	57
Pt	—	190	3,2
^{197}Au	1558	—	43
Hg	—	73±5	—
^{200}Hg	129	—	4,8
^{205}Tl	0,5	—	0,04
Pb	—	0,125±0,030	0,075
^{209}Bi	0,085±0,009	—	0,008
^{232}Th	85	96±10	3,2
^{233}Pa	900±150	400±100	
^{232}Pa	470±70	1200±400	8,8
U	—	224±40	3,1
^{233}U	—	300±100	—
^{234}U	—	700±100	42
^{235}U	271±25 (γ)	150±50	—
^{236}U	350±40	400±100	2,6
^{238}U	280±15	286±27	1,2
^{237}Np	—	145±130	75
^{239}Np	—	3200±200	160
^{239}Pu	—	327±22 (γ)	—
		1000±300 (0,15)	—
^{240}Pu		8800±1300	130
^{241}Pu	—	1000±300 (0,15)	—
^{242}Pu	—	1300±200	13
^{244}Am	—	2200±50	—

где $E_{Cd} = 0{,}4$ эв — эффективная граница кадмиевого среза. Обычно предполагается, что с достаточной степенью точности полный резонансный интеграл имеет вид

$$I = \sum_i I_i^{(0)} + I^{(1/v)},$$

где суммирование производится по всем резонансам, а $I^{(1/v)} = (1/v)\sigma(2200\ м/сек)$ учитывает суммарный вклад сечения, подчиняющийся закону $1/v$.

В качестве эталона при измерениях использовались интегралы обычно используется ^{197}Au, для которого при толщине образца 0,016 *г/см²* и толщине кадмиевого фильтра 0,44 *г/см²* принимаются значения $I = (1569 \pm 62)$ *барн* и $I(1/v) = 45$ *барн*.

41.4. ДИФФУЗИОННЫЕ ПОСТОЯННЫЕ ВЕЩЕСТВ

Замедление нейтронов

Если нейтроны с высокими скоростями ввести в среду с малым сечением поглощения нейтронов, то они начнут терять свою энергию в результате столкновений с ядрами. При соответствующих условиях процесс замедления продолжается до тех пор, пока нейтроны не приобретут скорости, отвечающие их тепловому равновесию с ядрами среды.

При энергиях нейтронов $\gtrsim 0{,}1$ *Мэв* наиболее существенным процессом является упругое рассеяние нейтронов с нулевым орбитальным квантовым числом $l = 0$. В этом случае рассеяние изотропно в системе центра масс.

В элементарной теории замедления предполагается, что замедление нейтронов обусловлено исключительно упругими соударениями, в ядре, с которыми сталкивался нейтрон в процессе замедления, до столкновения находились в покое. Эти предположения удовлетворительно выполняются в диапазоне энергий нейтронов от 0,1 *эв* до 0,1 *Мэв*. После соударения с ядром среды нейтрон в лабораторной системе координат отклоняется на угол ψ, определяемый из соотношения

$$\cos\psi = \frac{A\cos\theta + 1}{\sqrt{A^2 + 2A\cos\theta + 1}},$$

где A — масса ядра-мишени и θ — угол рассеяния в системе координат, связанной с центром масс. Среднее значение $\overline{\cos\psi} = 2/(3A)$. Энергия рассеянного нейтрона

$$E_к = \frac{A^2 + 2A\cos\theta + 1}{(A+1)^2} E_н,$$

где $E_н$ — энергия нейтрона до столкновения; $E_к$ — энергия нейтрона после столкновения. Максимальная потеря энергии

$$\max(E_н - E_к) = E_н(1-\alpha) \quad \text{при} \quad \alpha = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2.$$

Средняя логарифмическая потеря энергии на одно столкновение

$$\xi = \overline{(\ln E_н - \ln E_к)} = \overline{\ln\frac{E_н}{E_к}} = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A}\ln\frac{A-1}{A+1}.$$

Среднее число столкновений при замедлении от энергии $E_н$ до энергии $E_к$:

$$N = \frac{1}{\xi}\ln\frac{E_н}{E_к}.$$

Таблица 41.3

Свойства некоторых замедлителей [4, 5]

n — среднее число столкновений при замедлении от 2 *Мэв* до тепловой энергии.

Замедлитель	$1-\alpha$	ξ	$\overline{\cos\psi}$	n
^1H	1,00	1,00	0,67	18
^2D	0,889	0,725	0,33	25
^4He	0,640	0,425	0,167	43
^7Li	0,438	0,268	0,095	67
^9Be	0,360	0,209	0,074	86
^{12}C	0,284	0,158	0,056	114
^{16}O	0,222	0,120	0,042	150
Один с большим A	$4/(A+2)$	$2/(A+2/3)$	$2/(3A)$	$9A/16$
H_2O	—	0,948	0,323	—
D_2O		0,570	0,136	—
BeO		0,173	0,061	—

Время замедления нейтронов. Время t, в течение которого нейтрон с начальной энергией $E_н$ замедляется до $E_к$, называют временем замедления, или хронологическим возрастом нейтрона:

$$t = \frac{2}{\xi}\lambda_{рас}\left(\frac{1}{v_к} - \frac{1}{v_н}\right),$$

где $\overline{\lambda}_{рас}$ — длина свободного пробега нейтрона по отношению к рассеянию; v — скорость нейтрона.

Таблица 41.4

Время замедления t нейтронов от $E_н = 2$ *Мэв* до энергии $E_к = 0{,}025$ *эв* [1, 6]

Замедлитель	$\overline{\lambda}_{рас}$, *см*	t, 10^{-6} *сек*
Вода	1,1	1,0
Тяжелая вода	2,6	4,6
Бериллий	1,6	6,7
Окись бериллия	1,5	7,6
Графит	2,6	15,0

Возраст нейтронов. Дифференциальное уравнение теории замедления в среде без поглощения (уравнение возраста Ферми) имеет вид

$$\nabla^2 q(\mathbf{r}, \tau) = \frac{\partial q(\mathbf{r}, \tau)}{\partial \tau},$$

где q — плотность замедления, или число нейтронов в 1 *см*³, пересекающих за 1 *сек* данное значение энергии E при делении по энергетической шкале. Символический возраст нейтронов

$$\tau(E_н) = \int_{E_к}^{E_н} \frac{D}{\xi \Sigma_{рас} E} dE = \int_0^t D v dt;$$

D — коэффициент диффузии; $\Sigma_{рас}$ — макроскопическое сечение рассеяния; v — скорость нейтрона; t — время замедления до энергии $E_к$.

Возраст нейтронов τ равен 1/6 среднего квадрата смещения нейтрона (по прямой) при замедлении от энергии $E_н$ до энергии $E_к$: $\tau = (E_н \to E_к) = \overline{r^2}/6$.

Таблица 41.5

Возраст нейтронов для некоторых замедлителей

В скобках в первой колонке указана энергия моноэнергетических нейтронов в мегаэлектронвольтах. Для смесей указано объемное отношение компонент, например 60% H_2O, 50% Zr. $E_к$ — значение граничной энергии, до которой производилось измерение возраста.

Источник нейтронов	Замедлитель (плотность, *г/см*³)	Детектор ($E_к$, *эв*)	Возраст τ, *см*²	Литература
Sb-γ-Be (0,025)	H_2O	In	5,48±0,15	[14]
Na-γ-Be (0,970)	H_2O	In	15,9±0,2	[14]
Спектр деления	H_2O	In	27,96±0,1	[14]
Реакция D(d, n) (2,6)	H_2O	In	34,6±2,2	[14]
Ra-α-Be	H_2O	In	48,5	[7]
Po-α-Be	H_2O	In	57,3±2,0	[14]
Реакция T(d, n) (14,1)	H_2O	In	150±6	[14]
Спектр деления	H_2O	(0,020)	70,2±1,5	[1]
Ra-α-Be	H_2O	Dy	55	[7]
Po-α-Be	H_2O	(0,025)	62±5	[9]
Спектр деления	50% H_2O; 50% Al	In	76,8	[7]
» »	50% H_2O; 50% Zr	(0,025)	81,7	[7]
Ra-α-Be	50% H_2O; 50% Pb	In	72,8	[7]
Ra-α-Be	50% H_2O; 50% Fe	In	57,9	[7]
Po-α-Be	50% H_2O; 50% Zr	(0,025)	~92	[7]
Спектр деления	D_2O	In	109±3	[14]
» »	D_2O	(0,025)	190	[1]
Спектр деления	Be (1,85)	In	80,2±0,2	[14]
Ra-α-Be	Be (1,78)	In	120±23	[14]

Источник нейтронов	Замедлитель (плотность, г/см³)	Детектор (E_{th}, эв)	Возраст τ, см²	Литература
Спектр деления	Be (1,84)	(0,025)	97,2	[1]
» »	BeO (2,96)	In	93,4±4,7	[14]
» »	BeO	(0,025)	106±10	[7]
Sb-γ-Be (0,025)	Графит	In	142—147	[14, 7]
Спектр деления	»	In	312,5±0,5	[14]
Ra-α-Be	»	In	~380	[12]
Po-α-Be	»	In	~416	[14]
Po-α-Be	»	In	614	[8]
Спектр деления	»	(0,025)	350	[1]
» »	Дифенил	In	54,2±2,4	[10]
Po-α-Be	»	In	106,3±6,8	[10]

Таблица 41.6

Возраст нейтронов спектра деления в смеси D_2O-H_2O до энергии резонанса индия [1]

Отношение объемов $\frac{V(D_2O)}{V(H_2O)}$	Возраст τ, см²
99,8	101±3
99,0	107±6
96,4	106±3
95,3	93±3
94,0	86±3
91,8	78±3

Диффузия нейтронов

Элементарное уравнение диффузии нейтронов (диффузионное уравнение) имеет вид

$$\frac{1}{v}\frac{\partial\Phi}{\partial t} = \operatorname{div}(D\operatorname{grad}\Phi) - (\Sigma_{поглощ}\Phi + S),$$

где Φ — плотность потока нейтронов, см⁻²·сек⁻¹; S — плотность источников, см⁻³; $D = \Sigma_{рас}/[3\Sigma_{tr}(\Sigma_{погл} + \Sigma_{рас})]$ — коэффициент диффузии, см (при $\Sigma_{погл} \ll \Sigma_{рас}$ $D = 1/(3\Sigma_{tr})$); $\Sigma_{погл}$ — макроскопическое сечение поглощения; Σ_{tr} — транспортное сечение, связанное с транспортной длиной свободного пробега соотношением

$$l_{tr} = \frac{1}{\Sigma_{tr}} = \frac{l_{рас}}{1-\overline{\cos\theta}} = \frac{1}{\Sigma_{рас}(1-\overline{\cos\theta})}.$$

$L = \sqrt{D/\Sigma_{погл}}$ — длина диффузии ($L^2 = \bar{r}^2/6$, где r — расстояние по прямой линии от точки возникновения нейтрона до захвата); $\tau = l_{погл}/v = D/(v\Sigma_{погл})$ — время диффузии, или время жизни теплового нейтрона.

В непоглощающей среде, имеющей температуру T, нейтроны, находящиеся в тепловом равновесии со средой, имеют максвелловское распределение по скоростям, причем T называют температурой нейтронов.

Таблица 41.7

Максвелловское распределение и средние величины [7]

Обозначения: m — масса нейтрона; v — скорость; k — постоянная Больцмана; T — температура, °К.

Величина	Формула или значение
Нормированное распределение по скоростям	$n(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}}\left(\frac{m}{2kT}\right)^{3/2} v^2 e^{-mv^2/(2kT)}$
Наиболее вероятная скорость	$v_{в.в} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = 123,4\sqrt{T}$ м/сек
Средняя скорость	$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = 1,128v_{в.в}$
Энергия, соответствующая наиболее вероятной скорости	$mv_{в.в}^2/2 = kT = 8,61\cdot10^{-5}\,T$ эв
Нормированное распределение по энергии	$n(E) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}(kT)^{-3/2}\sqrt{E}\,e^{-E/kT}$
Наиболее вероятная энергия	$kT/2$
Средняя энергия	$m\bar{v}^2/2 = 3kT/2$
Энергия, при которой плотность потока $n(E)\cdot v(E)$ максимальна	kT

Таблица 41.8

Время жизни тепловых нейтронов τ в некоторых замедлителях [14]

Замедлитель	Плотность, г/см³	$\Sigma_{поглощ}$, см⁻¹	τ, мсек
H_2O	1,0	52,8	0,213
D_2O	1,1	32 900	120
D_2O (99,8 вес. %)	1,1	14 300	57,6
Графит	1,6	3210	12,9
Be	1,85	910	3,65
BeO	2,96	1 890	7,6
Парафин	0,87	41	0,176
Плексиглас	1,18	67,7	0,232
Дауторм А*	1,06	87	0,348
Гидрид циркония	3,48	65,7	0,260

* Дифенил и окиси фенила в отношении 0,26:1.

Таблица 41.9

Тепловые диффузионные постоянные веществ [1.5]

Вещество	Плотность, г/см³	$\Sigma_{поглощ}$, см⁻¹	$\Sigma_{рас}$, см⁻¹	L, см	D, см
H	$8,99\cdot10^{-5}$	$1,78\cdot10^{-4}$	$2,04\cdot10^{-1}$	5200	162
H_2O	1,00	0,022	3,45	2,767 ± ±0,008 [14]	0,164
D_2O	1,10	$3,06\cdot10^{-4}$	0,149	116±4	0,68
He	$1,78\cdot10^{-4}$	$1,88\cdot10^{-3}$	$2,14\cdot10^{-4}$	10^5	$1,87\cdot10^5$
Li	0,534	2,29	0,0649	1,31	5,68
Be	1,84	$1,23\cdot10^{-2}$	0,861	20,8±0,5	0,552
BeO	2,8	$6,2\cdot10^{-4}$	0,760	32,7±0,6 [14]	0,75
B	2,45	108	0,546	0,077	0,650
C	1,60	$2,99\cdot10^{-4}$	0,385	51±3	0,886
N	$1,25\cdot10^{-3}$	$1,01\cdot10^{-4}$	$0,78\cdot10^{-4}$	2500	651
O	$1,43\cdot10^{-3}$	$1,04\cdot10^{-3}$	$2,26\cdot10^{-1}$	$3,78\cdot10^5$	1540
F	$1,70\cdot10^{-3}$	$5,39\cdot10^{-4}$	$2,1\cdot10^{-4}$	$5,51\cdot10^4$	1640
Ne	$0,90\cdot10^{-3}$	$7,52\cdot10^{-4}$	$6,45\cdot10^{-4}$	8430	5350
Na	0,971	0,0194	0,102	15,9	3,37
Mg	1,74	$2,97\cdot10^{-2}$	0,156	27,3	2,21
Al	2,70	0,0145	0,0844	16,7	4,06
Si	2,35	$8,07\cdot10^{-3}$	0,0847	29,2	3,98
P	1,83	$7,12\cdot10^{-2}$	0,178	16,4	1,91
S	2,1	0,0206	0,0434	19,5	7,64
Cl	$3,21\cdot10^{-3}$	$1,86\cdot10^{-2}$	$8,73\cdot10^{-1}$	469	369
Ar	$1,78\cdot10^{-3}$	$1,77\cdot10^{-4}$	$4,03\cdot10^{-5}$	$2,17\cdot10^4$	8400
K	0,87	0,0278	0,0201	24,7	16,9
Ca	1,54	0,0102	0,0696	21,8	4,67
Sc	2,5	0,604	0,804	0,724	0,421
Ti	4,5	0,328	0,226	2,13	1,49
V	5,96	0,352	0,352	1,15	0,969
Cr	6,92	0,248	0,240	2,37	1,40
Mn	7,42	1,07	0,187	1,30	1,80
Fe	7,86	0,222	0,933	1,28	0,762

Продолжение табл. 41.9

Вещество	Плотность, г/см³	$\Sigma_{поглощ}$, см⁻¹	$\Sigma_{рас}$, см⁻¹	L, см	D, см
Co	8,71	3,38	0,623	0,20	0,541
Ni	8,75	0,413	1,57	0,228	0,215
Cu	8,94	0,196	0,610	1,30	0,562
Zn	7,14	0,0724	0,275	4,45	1,42
Ga	5,90	0,143	0,204	3,40	1,66
Ge	5,36	0,111	0,136	4,72	2,48
As	5,70	0,126	0,179	3,84	1,89
Se	4,5	0,492	0,376	1,25	0,860
Br	3,12	0,158	0,141	3,88	2,38
Kr	$3,71\cdot10^{-3}$	$8,27\cdot10^{-4}$	$1,97\cdot10^{-3}$	1460	1750
Rb	1,53	$7,87\cdot10^{-3}$	0,120	16,3	2,55
Sr	2,54	0,0211	0,175	9,04	1,92
Y	5,51	0,0499	0,112	7,57	2,75
Zr	6,44	0,03787	0,340	11,2	0,967
Nb	8,4	0,0652	0,272	4,42	1,23
Mo	10,2	0,173	0,448	2,09	0,749
Tc	11,5	1,64	—	—	—
Ru	12,1	0,185	0,453	2,05	0,776
Rh	12,4	10,8	0,363	0,292	0,924
Pd	12,2	0,551	0,248	1,57	1,57
Ag	10,5	3,69	0,352	0,508	0,955
Cd	8,65	114	0,325	0,0949	1,03
In	7,28	7,50	0,0840	0,739	3,99
Sn	7,29	0,0211	0,146	9,99	2,27
Sb	6,22	0,175	0,132	3,60	2,53
Te	6,02	0,131	0,142	4,50	2,26
I	4,94	0,164	0,0644	4,92	3,97
Xe	$5,85\cdot10^{-3}$	$9,3\cdot10^{-4}$	$1,15\cdot10^{-3}$	1770	2890
Cs	1,87	0,238	0,170	2,02	1,96
Ba	3,5	0,0184	0,123	12,2	2,73
La	6,15	0,237	0,403	1,86	0,695
Ce	6,9	0,0217	0,266	7,6	1,25
Pr	6,49	0,313	0,111	3,1	3,0
Nd	6,95	1,34	0,464	0,73	0,72
Sm	7,75	174	0,155	0,112	2,15
Eu	5,22	89	0,166	0,151	2,02
Gd	7,95	1410	—	—	—
Tb	8,33	1,45	—	—	—
Dy	8,56	30,1	3,17	0,187	0,185
Ho	8,76	2,08	—	—	—
Er	9,16	5,7	0,400	0,344	0,67
Tu	9,36	4,23	0,233	0,382	1,45
Yb	7,01	0,303	0,292	1,19	1,14
Lu	9,74	5,76	—	—	—
Hf	13,3	4,71	0,369	0,444	0,931
Ta	16,6	1,16	0,276	1,02	1,21
W	18,8	1,19	0,310	0,963	1,08
Re	21,0	0,84	0,95	0,175	0,252
Os	22,6	1,12	—	—	—
Ir	22,4	20,9	—	—	—
Pt	21,4	0,582	0,604	0,932	0,506
Au	19,3	5,83	0,549	0,323	0,809
Hg	13,6	16,6	0,817	0,163	0,410
Tl	11,9	0,119	0,491	2,39	0,661
Pb	11,3	$0,09\cdot10^{-3}$	0,561	12,9	0,695
Bi	9,7	$9,5\cdot10^{-3}$	0,252	57,2	1,33
Rn	$9,75\cdot10^{-3}$	$6,28\cdot10^{-3}$	—	—	—
^{227}Ac	10,0	15,2	—	—	—
Th	11,6	0,226	0,374	2,7	1,65
Pa	15,4	—	—	—	—
U	18,7	0,303	0,393	1,55	3,08
UO_2	10	0,169	0,372	1,9	0,615
^{239}Pu	19,74	67,0	0,478	0,0708	0,286

Таблица 41.10

Диффузионные постоянные D_2O с примесью H_2O при температуре $T = 300°K$ [11]

Примесь H_2O к D_2O, %	$\nu^{-1}_{\text{сорб}}$, см (при $v = 220$ м/сек)	$\nu^{-1}_{\text{диф}}$, см	D, см²
0	28500	2,88	25400
0,1	16800	2,87	16400
0,2	12300	2,85	11700
0,3	9670	2,84	9150
0,4	7960	2,82	7500
0,5	6800	2,81	6350
0,6	5920	2,80	5600
0,7	5240	2,78	4850
0,8	4700	2,77	4350
0,9	4270	2,76	3930
1,0	3900	2,74	3660

Таблица 41.11

Значение альбедо тепловых нейтронов для плоских отражателей из различных рассеивающих материалов [14]

Материал	Толщина отражателя			
	20 см	40 см	80 см	∞
H_2O	0,811	0,811	0,811	0,811
D_2O	0,853	0,922	0,947	0,951
Be	0,891	0,907	0,910	0,911
Графит	0,834	0,903	0,923	0,936

41.5. КОГЕРЕНТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ НЕЙТРОНОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

Когерентное рассеяние нейтронов. В сечении рассеяния нейтронов с энергиями $\leq 0{,}1$ эв принято выделять когерентную σ_k и некогерентную $\sigma_{\text{нек}}$ части. Упорядоченное расположение ядер рассеивателя приводит к постоянству фазовых соотношений рассеянных от разных ядер нейтронных волн, т. е. приводит к когерентному (интерференционному) рассеянию. Случайное положение спинов нейтронов и рассеивающих ядер, а также хаотическое расположение изотопов в атомах рассеивателя приводит к спиновой и изотопической некогерентным составляющим в $\sigma_{\text{нек}}$. Когерентная и некогерентная составляющие сечения характеризуются средними амплитудами рассеяния b_k и $b_{\text{нек}}$:

$$b_k = \frac{I+1}{2I+1} b_+ + \frac{I}{2I+1} b_-;$$

$$b_{\text{нек}} = \frac{\sqrt{I(I+1)}}{2I+1}(b_+ - b_-),$$

где I — спин рассеивающего ядра, амплитуды b_+ и b_- характеризуют рассеяние в состояниях, когда полный спин ядра и нейтрона соответственно равны $J = I + 1/2$ и $J = I - 1/2$. Сечения процессов находятся умножением квадрата амплитуд на 4π, например: $\sigma_k = 4\pi |b_k|^2$. Температурные колебания атомов в решетке изменяют величину σ_k. Этот эффект учитывается множителем Дебая — Уоллера, см., например, [12].

Таблица 41.12

Сечения когерентного рассеяния σ_k (со знаком) [12]

Ядро	σ_k, барн	Ядро	σ_k, барн
^{1}H	1,79 ± 0,02 (−)	Ge	8,8 ± 0,5 (+)
^{2}D	5,4 ± 0,3 (+)	^{75}As	5,0 ± 0,3 (+)
He	1,1 ± 0,2 (+)	Se	10 ± 0,6 (+)
Li	0,40 ± 0,03 (−)	Br	5,7 ± 0,4 (+)
^{6}Li	6 ± 3 (+)	Kr	7,2 ± 0,4
^{7}Li	0,89 ± 0,05 (−)	Rb	3,8 ± 0,3 (+)
^{9}Be	7,53 ± 0,07 (+)	Sr	4,1 ± 0,3 (+)
C	6,50 ± 0,04	^{89}Y	8,05 ± 0,25 (+)
^{13}C	4,5 ± 0,6 (+)	Zr	6,2 ± 0,3 (+)
N	11,0 ± 0,5 (+)	Nb	6,9 ± 0,2 (+)
O	4,2 ± 0,3 (+)	Mo	5,6 ± 0,2 (+)
^{19}F	3,8 ± 0,3 (+)	Rh	4,5 ± 0,5 (+)
Na	1,55 ± 0,06 (+)	Pd	5,0 ± 0,3 (+)
Mg	3,60 ± 0,10 (+)	Ag	4,6 ± 0,3 (+)
^{27}Al	1,50 ± 0,10 (+)	^{107}Ag	8,7 ± 0,5 (+)
Si	2,0 ± 0,20 (+)	^{109}Ag	2,3 ± 0,2 (+)
^{31}P	3,10 ± 0,10 (+)	Sn	4,6 ± 0,3 (+)
S	1,10 ± 0,08 (+)	Sb	3,7 ± 0,3 (+)
Cl	1,21 ± 0,80 (+)	Te	4,0 ± 0,3 (+)
Ar	0,5 ± 0,10 (+)	^{120}Te	3,5 ± 0,7
^{39}Ar	72 ± 5 (+)	^{125}Te	4,2 ± 0,5
K	1,5 ± 0,1 (+)	^{130}Te	4,1 ± 0,4
Ca	3,0 ± 0,1 (+)	^{127}I	3,4 ± 0,2 (+)
^{40}Ca	3,0 ± 0,1 (+)	Xe	5,0 ± 0,2 (+)
^{44}Ca	0,4 ± 0,03 (+)	^{133}Cs	3,0 ± 0,2 (+)
^{45}Sc	17,5 ± 1,5	Ba	3,6 ± 0,2 (+)
Ti	1,4 ± 0,3 (−)	La	8,7 ± 0,3 (+)
^{46}Ti	2,9 ± 0,1 (+)	Ce	2,7 ± 0,2 (+)
^{47}Ti	1,4 ± 0,1 (+)	^{136}Ce	2,8 ± 0,11 (+)
^{48}Ti	4,2 ± 0,2 (−)	^{142}Ce	2,6 ± 0,2 (+)
^{49}Ti	0,08 ± 0,02 (+)	^{141}Pr	2,4 ± 0,2 (+)
^{50}Ti	3,8 ± 0,2 (+)	Nd	6,5 ± 0,4 (+)
V	0,032 ± 0,008 (−)	^{143}Nd	7,5 ± 0,6 (+)
Cr	1,56 ± 0,09 (+)	^{144}Nd	1,6 ± 0,2 (+)
Mn	1,7 ± 0,1 (−)	^{146}Nd	9,5 ± 0,4 (+)
Fe	11,37 ± 0,06 (+)	^{122}Sm	3 ± 1 (−)
^{54}Fe	2,20 ± 0,13 (+)	^{124}Sm	8 ± 2 (+)
^{57}Fe	12,8 ± 0,2 (+)	Er	7,8 ± 0,4 (+)
^{58}Fe	0,64 ± 0,04 (+)	^{162}Ta	6,1 ± 0,4 (+)
^{59}Co	1,00 ± 0,06 (+)	W	2,74 ± 0,05 (+)
Ni	13,2 ± 0,2 (+)	Os	10,2 ± 1,5
^{58}Ni	26,9 ± 0,3 (+)	Pt	11,2 ± 0,7 (+)
^{60}Ni	1,1 ± 0,1 (+)	Au	7,3 ± 0,1 (+)
^{62}Ni	9,5 ± 0,1 (+)	Hg	22 ± 2 (+)
Cu	7,5 ± 0,2 (+)	Tl	10 ± 1 (+)
^{63}Cu	5,7 ± 0,3	Pb	11,6 ± 2 (+)
^{65}Cu	15,6 ± 0,6	^{209}Bi	9,35 ± 0,04 (+)
Zn	4,3 ± 0,5 (+)		

Дифракция нейтронов. При прохождении пучка медленных нейтронов через кристалл возникают вторичные, дифрагированные (т. е. отраженные) кристаллическими плоскостями пучки нейтронов. Направления пучков, дифрагированных кристаллом, определяются условием Вульфа — Брэгга: $\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta$, где d_{hkl} — межплоскостное расстояние для плоскостей с индексами h, k, l; θ — угол отражения.

Преломление и отражение нейтронов. При пересечении границы двух сред нейтронный пучок ведет себя, как и луч света, отражается и преломляется. Показатель преломления n рассчитывается по формуле $n^2 = 1 - \lambda^2 N b_k / \pi$, где N — число атомов в 1 см³, b_k — амплитуда когерентного рассеяния и λ — длина волны падающих

нейтронов. Влияние поглощения среды на показатель преломления незначительно. Например, для кадмия при учете поглощения показатель преломления меняется на 0,5% для нейтронов с $\lambda = 2$ Å.

Рассеяние нейтронов в среде, магнитные моменты ядер которой имеют упорядоченную ориентацию (ферро-, ферри-, антиферромагнетики), является когерентным. Показатель преломления в этом случае определяется из выражения $n^2 - 1 = -\lambda^2 N b_k/\pi \pm \mu N/E$, где μ — магнитный момент нейтрона; E — его энергия и B — магнитная индукция насыщения.

Предельный угол скольжения θ_c для полного отражения нейтронов от зеркала равен

$$\theta_c = \lambda \sqrt{N b_k/\pi}.$$

Таблица 41.13

Предельные углы полного отражения нейтронов с $\lambda = 1{,}873$ Å [12]

Зеркало	θ_c	Зеркало	θ_c
Be	12,0′	Ni	11,5′
C	10,5′	Zn	7,1′
Fe	10,7′	Cu	9,5′

Кристаллические нейтронные фильтры. Для системы беспорядочно ориентированных кристаллитов в поликристаллическом нейтронном фильтре условие Вульфа — Брегга удовлетворяется только для нейтронов с длиной волны $\lambda \leq 2d_m$, где d_m — максимальное межплоскостное расстояние кристаллической решетки. При прохождении пучка нейтронов через такой фильтр за пучком вследствие когерентного рассеяния будут выходиться нейтроны с $\lambda \leq 2d_m$. Ослабление нейтронов с $\lambda > 2d_m$ происходит за счет процессов некогерентного упругого рассеяния, теплового неупругого рассеяния и поглощения. Для многих веществ сечения последних трех процессов много меньше, чем сечение когерентного рассеяния, поэтому в пучке, прошедшем через фильтр, практически отсутствуют нейтроны с $\lambda \leq 2d_m$.

Таблица 41.14

Граничные длины волн для кристаллических нейтронных фильтров [13]

Вещество	$\lambda_{гр}$, Å	$E_{гр}$, эв
Be	3,95	0,00520
BeO	4,40	0,00420
Pb	5,70	0,00250
Графит	6,69	0,00183
Ni	8,00	0,00128

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гордеев И. В., Кардашев Д. А., Малышев А. В.** Ядерно-физические константы. М., Госатомиздат, 1963.
2. **Юз Д., Шелрис Р.** Атлас нейтронных сечений. М., Атомиздат, 1959.
3. Schmidt J. J. Neutron cross section for fast reactor materials. Karlsruhe, 1962.
4. **Вейнберг А., Вигнер Е.** Физическая теория ядерных реакторов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
5. «Атомная энергия», 1956, т. 5, вып. 1, с. 62.
6. **Гласстон С., Эдлунд М.** Основы теории ядерных реакторов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1954.
7. Физика ядерных реакторов. Пер. с англ. Под ред. Степанова К. А. М., Атомиздат, 1964.
8. **Шадиев Ю. П.** «Атомная энергия», 1965, т. 18, вып. 3, с. 282.
9. **Григорьев И. С.** «Атомная энергия», 1967, т. 23, вып. 4, с. 352.
10. **Юрова Л. Н.** и др. В кн.: «Нейтронная физика». М., Атомиздат, 1961, с. 192.
11. **Галанин А. Д.** Теория ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М., Атомиздат, 1959.
12. **Кёртис Л.** Введение в нейтронную физику. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1965.
13. **Гуревич И. И., Тарасов Л. В.** Физика нейтронов низких энергий. М., «Наука», 1965.
14. **Бекурц К., Вирц К.** Нейтронная физика. Пер. с нем. М., Атомиздат, 1968.

ГЛАВА 42

ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР

42.1. ВВЕДЕНИЕ

Деление атомного ядра — это процесс распада возбужденного ядра на 2 (реже 3 и 4) примерно равных по массе ядра-осколка деления. Деление ядер сопровождается испусканием вторичных нейтронов, γ-квантов и выделением энергии. Делению подвержены ядра всех тяжелых элементов, если только они находятся в достаточно высоких возбужденных состояниях. Процесс деления — это один из возможных путей снятия возбуждения ядра; другие конкурирующие процессы: испускание γ-квантов, испускание нейтронов и т. п.

Энергию возбуждения можно сообщить ядру облучением его γ-квантами или бомбардировкой его частицами высокой энергии. При неупругом соударении частица может передать ядру часть своей энергии, которая пойдет на возбуждение ядра. Еще один путь получения возбужденного ядра — это образование составного ядра при столкновении с частицей. Особо важное значение имеет процесс образования составных ядер при захвате нейтронов.

Порог деления, вызванного γ-квантами (т. е. энергия наиболее мягких γ-квантов, еще способных вызвать деление), является непосредственной мерой минимальной энергии возбуждения ядра, необходимой для деления. Порог реакции деления под действием нейтронов меньше порога фотоделения составного ядра на величину энергии связи нейтрона с ядром мишени. Поэтому

некоторые из порогов реакции деления ядер под действием нейтронов отрицательны. Это означает, что процесс деления возможен при захвате ядрами тепловых и холодных нейтронов. Такие ядра называются делящимися.

Кроме указанных механизмов возбуждения ядер, которые приводят к делению, возможен процесс деления ядер без каких-либо видимых внешних воздействий на ядро. Такой процесс называется спонтанным делением. Вероятность спонтанного деления несоизмеримо меньше вероятности распада тех же ядер, находящихся в возбужденном состоянии. Например, константа распада $(\Gamma_\gamma/\hbar)$ для спонтанного деления ^{235}U приблизительно равна 10^{-26} *сек*$^{-1}$, а для возбужденного состояния с энергией возбуждения выше порога деления $\Gamma_\gamma/\hbar \sim 10^{14}$ *сек*$^{-1}$.

После захвата нейтрона образуется составное ядро. Время жизни составного ядра по отношению к делению $\tau = \hbar/\Gamma_\gamma \approx 10^{-14}$ *сек*, это время значительно превышает время, в течение которого нейтрон с энергией 1 *Мэв* пролетает поперечник ядра ($\sim 10^{-21}$ *сек*).

Образующиеся при распаде ядра осколки в большинстве случаев имеют разные массы, например при делении ядер урана масса легкого осколка 90—100 *а. е. м.*, а тяжелого 130—140 *а. е. м.* Скорости осколков $\sim 10^9$ *см/сек*. Импульсы осколков равны и противоположны по знаку. Скорость осколков достигает 90% конечного значения уже при расстоянии между ними $\sim 10^{-11}$ *см*, т. е. когда они еще находятся внутри внешней электронной оболочки атома. Осколки деления первоначально находятся в возбужденных состояниях. Их суммарная энергия возбуждения ~ 20 *Мэв*. Возбужденные осколки деления ведут себя так же, как и другие возбужденные ядра: они распадаются с испусканием частиц и γ-квантов. Поскольку осколки имеют большие заряды и перебогащены нейтронами, то испускание нейтронов наиболее вероятно. Время жизни осколков по отношению к испусканию нейтронов $\sim 10^{-15}$ *сек*. Эти нейтроны, испускаемые при делении ядер возбужденными осколками, называются «мгновенными нейтронами деления». Средняя энергия возбуждения осколка после испускания нейтронов равна половине энергии связи нейтрона и равна для обеих осколков 6—7 *Мэв*. Эта энергия излучается в виде γ-квантов за время, характерное для испускания γ-квантов, т. е. около 10^{-14} *сек*.

В начале своего пути осколки имеют положительный заряд от 10 до 20 электронных зарядов, так как некоторые из орбитальных электронов составного ядра отрываются при делении. Проходя через вещество, осколки теряют свою энергию в основном на ионизацию среды. Вдоль пути двух осколков образуется $\sim 5 \cdot 10^4$ пар ионов. Замедляющиеся осколки захватывают электроны и к моменту, когда их энергия уменьшается до тепловой энергии среды, становятся электрически нейтральными. Время замедления осколков в воздухе $\sim 10^{-9}$ *сек*, в плотных средах $\sim 10^{-14}$ - 10^{-19} *сек*. За это время они пробегают в воздухе расстояние ~ 2 *см*, в плотных средах $\sim 10^{-3}$ *см*.

Заряд замедлившихся осколков (называемых обычно продуктами деления) сильно отличается от заряда стабильных атомов с той же массой. Это различие уменьшается в результате серии β-распадов (обычно трех или четырех для каждого осколка).

В отдельных случаях β-распад продуктов деления приводит к высоковозбужденным состояниям дочернего ядра, для которых возможен выброс нейтрона. Так как константа распада по отношению к испусканию «запаздывающего» нейтрона намного превышает константу β-распада, то испускание нейтронов будет следовать за β-распадом материнского ядра почти мгновенно и приведенная зависимость интенсивности запаздывающих нейтронов будет такая же, как у β-распада материнского ядра.

12.2. СПОНТАННОЕ ДЕЛЕНИЕ

При спонтанном делении наблюдается самопроизвольный распад ядра на осколки (обычно 2) и некоторое количество свободных нейтронов. Кинетическая энергия осколков составляет около 150 *Мэв*. Процесс деления сопровождается эмиссией нескольких γ-квантов. Усредненное по достаточно большому количеству распадов, число нейтронов, появляющихся в результате деления ядра, называется средним числом нейтронов на акт деления $\bar{\nu}$.

Таблица 12.1

Периоды полураспада по отношению к спонтанному делению и средние числа нейтронов $\bar{\nu}$, испускаемых на акт деления

Ядро	$T_{1/2}$, годы	$\bar{\nu}$	Литература
^{230}Th	$1,5 \cdot 10^{13}$	$1,24 \pm 0,10$*	[2, 3]
^{232}Th	$1,4 \cdot 10^{16}$	—	[4]
^{232}Th	—	$1,36 \pm 0,15$*	[3]
^{231}Pa	$>10^{16}$	—	[4]
^{233}Pa	10^{19}	—	[3]
^{233}U	$8 \cdot 10^{15}$	—	[2]
^{235}U	$>3 \cdot 10^{17}$	—	[3]
^{234}U	$2 \cdot 10^{16}$	$1,63 \pm 0,15$*	[2, 3]
^{236}U	$1,9 \cdot 10^{17}$	—	[2]
^{238}U	$2 \cdot 10^{16}$	$1,58 \pm 0,15$*	[2, 3]
^{238}U	$8 \cdot 10^{16}$	$2,30 \pm 0,20$	[2]
^{238}U	—	$1,71 \pm 0,15$*	[3]
^{237}Np	$>4 \cdot 10^{16}$	—	[3]
^{238}Np	—	$1,67 \pm 0,15$	[2]
^{239}Np	$>6 \cdot 10^{16}$	—	[2]
^{238}Pu	$3,5 \cdot 10^{8}$	$2,17 \pm 0,20$	[2]
^{239}Pu	$4,9 \cdot 10^{10}$	$2,28 \pm 0,10$	[2]
^{240}Pu	$5,5 \cdot 10^{10}$	—	[2]
^{240}Pu	$1,2 \cdot 10^{11}$	$2,23 \pm 0,05$	[2]
^{242}Pu	$6,8 \cdot 10^{10}$	$2,28 \pm 0,13$	[2]
^{244}Pu	$2,5 \cdot 10^{10}$	—	[2]
^{243}Am	$>1,4 \cdot 10^{13}$	—	[3]
^{243}Am	—	$2,42 \pm 0,16$*	[3]
^{240}Cm	$7,0 \cdot 10^{6}$	—	[1]
^{242}Cm	$7,2 \cdot 10^{6}$	$2,59 \pm 0,11$	[2]
^{244}Cm	$1,4 \cdot 10^{7}$	$2,62 \pm 0,09$	[2]
^{246}Cm	$1,7 \cdot 10^{7}$	—	[1]
^{248}Cm	$4,6 \cdot 10^{6}$	—	[2]
^{250}Cm	$1,7 \cdot 10^{5}$	—	[1]
^{249}Bk	$6 \cdot 10^{6}$	$3,72 \pm 0,16$	[2, 3]
^{249}Cf	$2,1 \cdot 10^{6}$	$2,92 \pm 0,9$	[2]
^{250}Cf	$7 \cdot 10^{6}$	—	[2]
^{251}Cf	$1,5 \cdot 10^{6}$	—	[3]
^{252}Cf	$1,5 \cdot 10^{6}$	—	[2]
^{252}Cf	85	$3,76 \pm 0,04$	[1, 2, 4]
^{252}Cf	55,6 дня	$3,90 \pm 0,14$	[2]
^{253}Es	$6,4 \cdot 10^{6}$	—	[1]
^{254}Es	$1,5 \cdot 10^{6}$	—	[2]
^{255}Fm	>6	—	[1]
^{254}Fm	0,675	$4,05 \pm 0,19$	[1, 2]
^{255}Fm	10^{5}	—	[1]
^{256}Fm	2,7 ч	—	[1]
^{257}Fm	100	—	[1]
^{256}Md	3,5 ч	—	[2]
^{257}Ku	0,3 *сек*	—	[1]

* Значения экстраполированы от полученного при нагревании и холодных или быстрых нейтронах.

42.3. СЕЧЕНИЯ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

На рис. 42.1—42.4 представлены графики зависимостей сечения деления некоторых ядер от энергии нейтрона.

Таблица 42.2

Сечения деления σ_f ядер под действием тепловых нейтронов ($v = 2200$ м/сек) [4]

$\bar{\nu}$ — число вторичных нейтронов, испускаемых на акт деления. Значения, отмеченные звездочкой, получены для распределения нейтронов в реакторе.

Ядро	σ_f, барн	$\bar{\nu}$	Ядро	σ_f, барн	$\bar{\nu}$	Ядро	σ_f, барн	$\bar{\nu}$
^{228}Ra	≤ 100	—	^{229}Pa	≤ 500	—	^{236}Pu	150 ± 35	—
^{230}Ra	$\leq 10^{-1}$	—	^{230}U	25 ± 10	—	^{237}Pu	2500 ± 200	—
^{232}Ra	≤ 2	—	^{231}U	400 ± 300	—	^{238}Pu	16,6 ± 0,3	—
^{227}Ac	≤ 2	—	^{232}U	80 ± 20	—	^{239}Pu	742 ± 4	2,89 ± 0,04
^{232}Th	1500 ± 1000	—	^{233}U	520 ± 4	2,51 ± 0,02	^{240}Pu	0,060 ± 0,045	—
^{229}Th	$\leq 0,3$	—	^{234}U	$\leq 0,65$	—	^{241}Pu	1025 ± 10	2,96 ± 0,08
^{230}Th	30,5 ± 3	2,13 ± 0,03	^{235}U	582 ± 4	2,44 ± 0,02	^{242}Pu	0,3	—
^{232}Th	$\leq 10^{-3}$	2,13 ± 0,03	^{236}U	$6 \cdot 10^{-4}$	—	^{241}Am	3,1 ± 0,2	3,37 ± 0,04 [5]
^{229}Th	$(6 \pm 2)\ 10^{-6}$	—	^{238}U	14 ± 2*	—	^{242}Am	2500 ± 1100	3,30 ± 0,04 [5]
^{232}Th	15 ± 2*	—	^{234}Np	900 ± 300	—	^{243}Am	6400 ± 1500*	—
^{230}Th	$\leq 10^{-2}$	—	^{235}Np	2800 ± 800	—	^{244}Am	$\leq 7,5 \cdot 10^{-6}$	—
^{231}Pa	1000 ± 250	—	^{237}Np	19 ± 3	2,86 ± 0,5	^{243}Cm	≤ 5*	—
^{232}Pa	$(10 \pm 6)\ 10^{-3}$	—	^{238}Np	1600 ± 100	—	^{244}Cm	700 ± 50	—
^{233}Pa	700 ± 100	—	^{239}Np	≤ 1	—	^{245}Cm	1900 ± 200	3,39 ± 0,05 [5]
^{234}Pa	$\leq 0,1$	—				^{247}Cf	600 ± 400*	—

42.4. НЕЙТРОНЫ ДЕЛЕНИЯ

Энергетические спектры мгновенных нейтронов деления. Спектры деления различных ядер весьма сложны. В простейшем виде, в пределах ошибок эксперимента, спектры нейтронов деления могут быть представлены максвелловским распределением [9, 14]:

$$N(E) = \frac{2}{\sqrt{\pi b^3}} \sqrt{E}\, e^{-E/b},$$

где E — энергия нейтрона в лабораторной системе координат, а параметр b связан со средней энергией спектра $\bar{E}$:

$$\bar{E} = 3b/2.$$

Таблица 42.3

Средние энергии энергетических распределений мгновенных нейтронов для различных изотопов

Ядро	Вид деления	$\bar{E}$, Мэв	Литература
^{233}U	Тепловыми нейтронами	1,96 ± 0,16	[14]
^{235}U	» »	1,935 ± 0,16	[14]
^{239}Pu	» »	2,00 ± 0,05	[14]
^{240}Pu	Спонтанное	1,86	[10]
^{241}Pu	Тепловыми нейтронами	2,002 ± 0,051	[4]
^{252}Cf	Спонтанное	2,2 ± 0,1	[14]

Среднее число вторичных нейтронов $\bar{\nu}$, возникающих при делении ядра, имеет тенденцию увеличиваться с возрастанием энергии нейтронов E_n, вызывающих деление. Эта зависимость может быть представлена выражением

$$\bar{\nu}(E_n) = \bar{\nu}_0 + aE_n,$$

где E_n — энергия нейтронов, вызывающих деление, а $\bar{\nu}_0$ — среднее число вторичных нейтронов при делении тепловыми нейтронами. Параметр a слабо зависит от энергии нейтрона.

Таблица 42.4

Среднее число вторичных нейтронов [4]

Ядро	E_n, Мэв	$\bar{\nu}$
^{232}Th	1,40	2,35 ± 0,08
	1,45	2,4
	2,3	2,26 ± 0,10 [11]
	3,5	2,70 ± 0,07
	3,6	2,42 ± 0,10
	3,75	2,43 ± 0,9 [11]
	4,6	2,70 ± 0,10
	14	4,64 ± 0,2
	14,3	3,68 ± 0,25 [12]
	14,9	4,43 ± 0,12
	15,7	4,26 ± 0,13 [11]
^{233}U	Тепловые	2,51 ± 0,02
	0,08	2,58 ± 0,05 [15]
	1,8	2,71 ± 0,04
	4,0	3,06 ± 0,12
	14,0	4,23 ± 0,24 [13]
	14,0	4,4 ± 0,2
	14,3	4,28 ± 0,30 [12]
	14,5	4,06 ± 0,25
	14,8	4,4 ± 0,45 [2]
	15,6	4,42 ± 0,17
^{235}U	Тепловые	2,44 ± 0,02
	0,08	2,43 ± 0,02
	0,25	2,47 ± 0,02
	0,40	2,38 ± 0,018
	0,50	2,47 ± 0,02
	0,70	2,52 ± 0,0
	0,740	2,48 ± 0,05 [15]
	0,75	2,45 ± 0,01
	1,0	2,48 ± 0,018
	1,2	2,60 ± 0,06

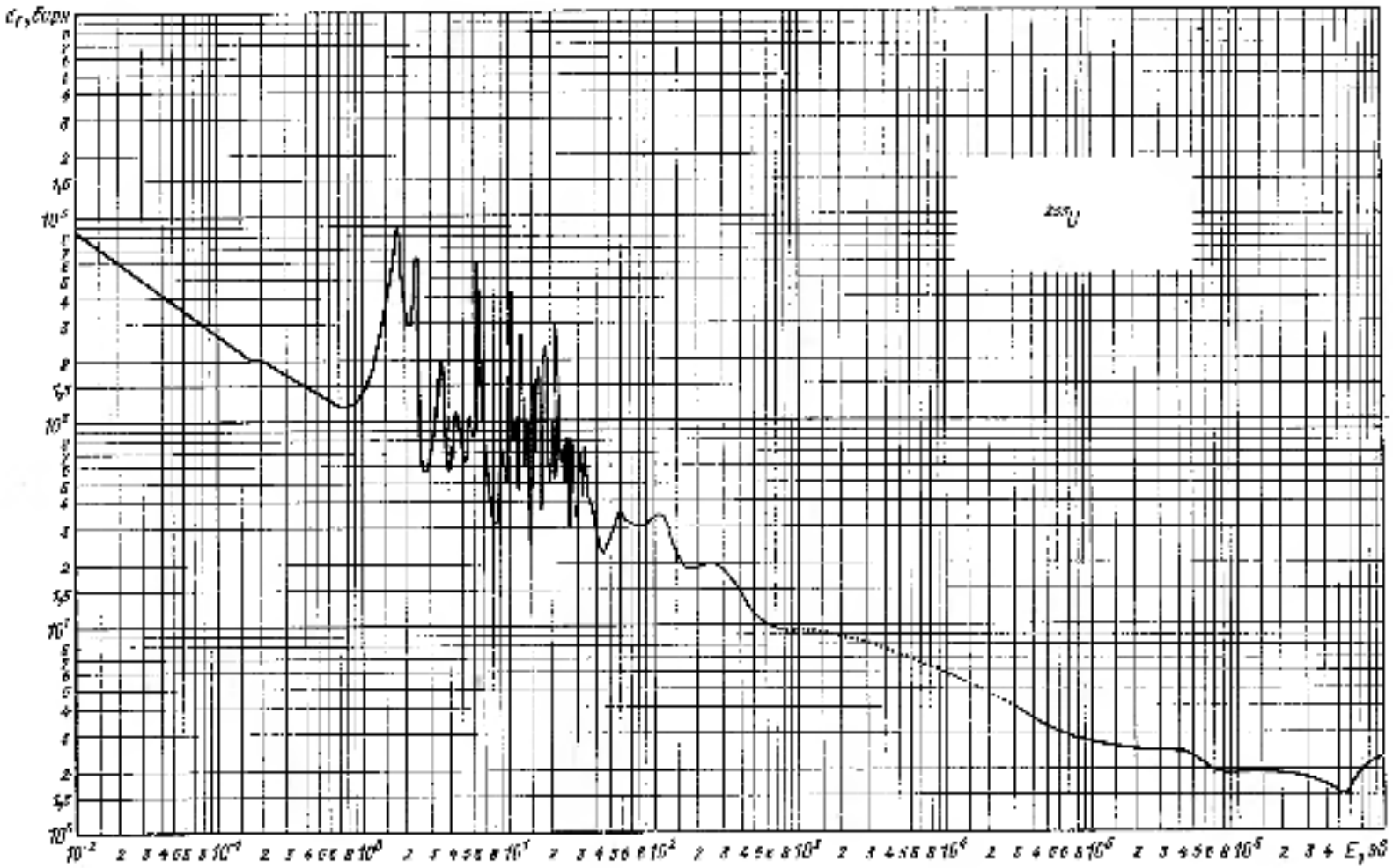


Рис. 42. 1. Зависимость сечения деления ^{235}U от энергии нейтронов [6].

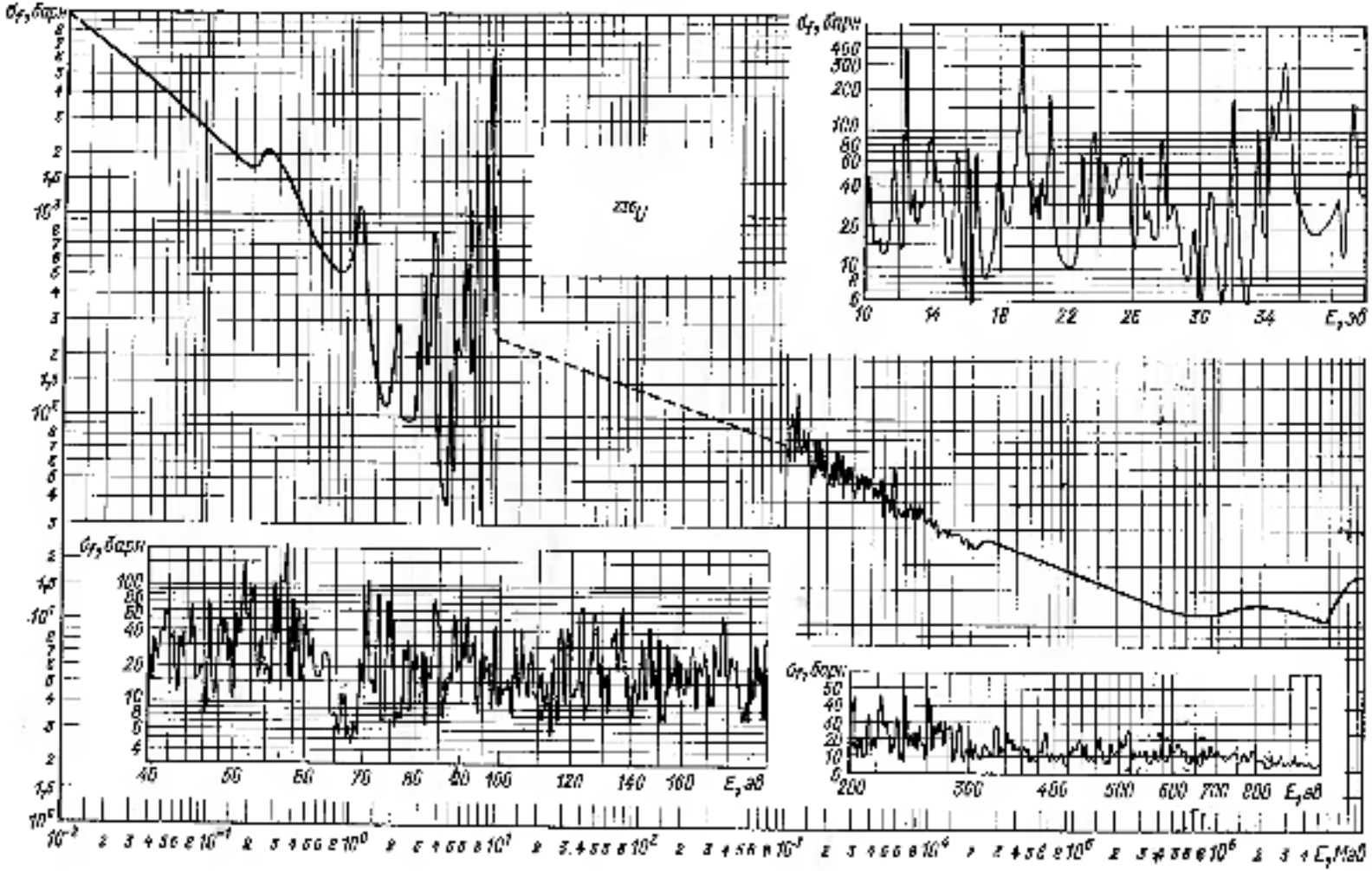


Рис. 12.2. Зависимость сечения деления ^{235}U от энергии нейтронов [7].

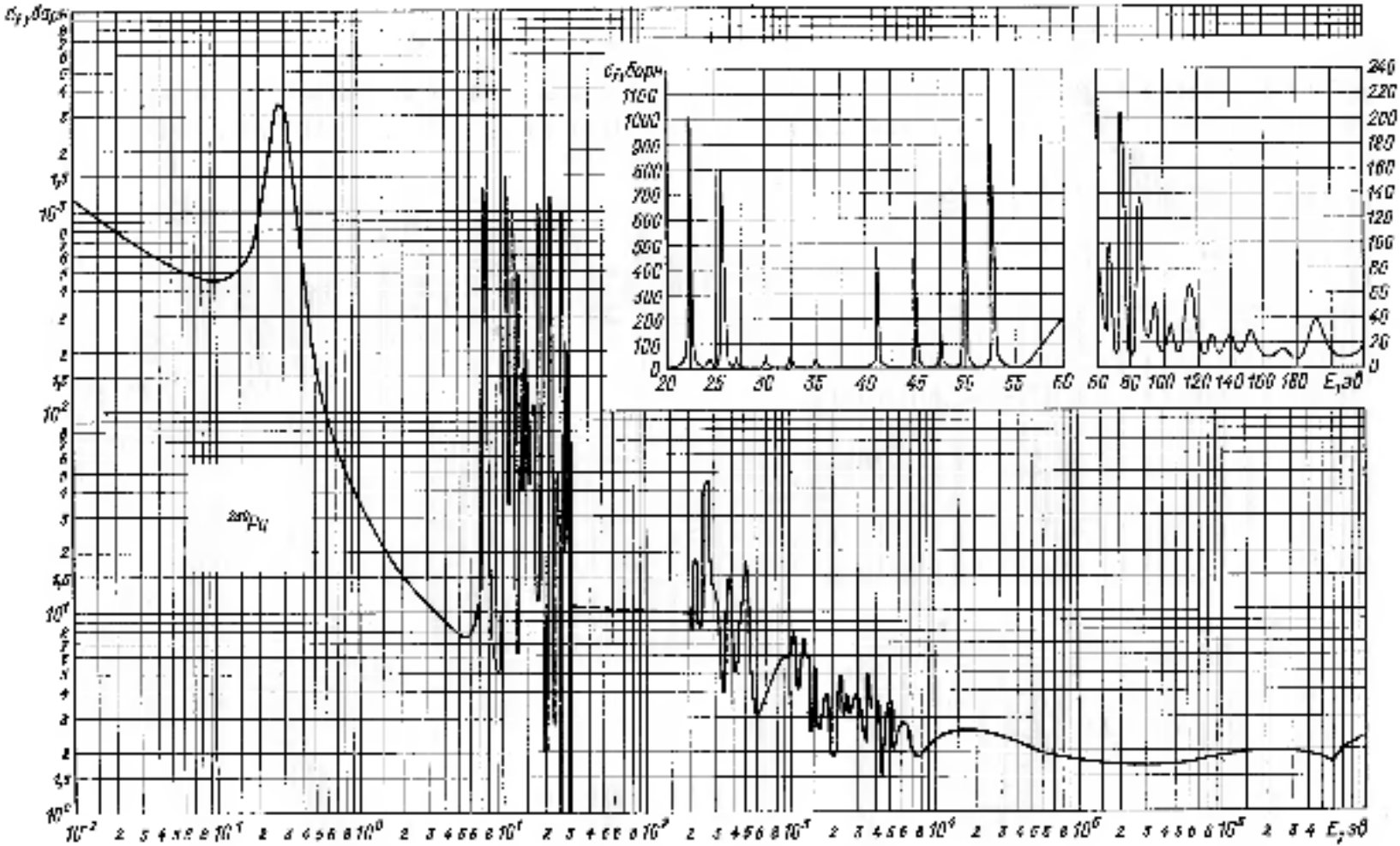


Рис. 42.3. Зависимость сечения деления ^{240}Pu от энергии нейтронов [7].

Продолжение табл. 42.4

Ядро	E_n, Мэв	$\bar{\nu}$
^{235}U	1,25	2,54±0,019 [15]
	1,50	2,57±0,019 [15]
	1,8	2,74±0,05
	1,9	3,04±0,35 [15]
	2,0	2,63±0,017
	2,5	2,66±0,017
	3,0	2,72±0,02
	4,0	3,11±0,35 [15]
	4,5	3,25±0,09
	5,0	3,24±0,24
	4,8	3,20±0,25
	14,0	4,13±0,06
	14,0	4,4±0,24
	14,1	4,52±0,32 [15]
	14,5	4,25±0,25
	14,6	4,7±0,5 [19]
	15,0	4,51±0,19
^{238}U	1,5	2,65±0,07
	2,3	2,72±0,08 [11]
	2,5	2,72±0,10
	3,1	2,86±0,06
	3,2	2,90±0,06
	3,6	2,79±0,09
	3,75	3,02±0,10 [11]
	4,0	3,11±0,10
	4,25	3,10±0,40 [15]
	14,0	4,36±0,14
	14,1	4,13±0,25 [15]
	14,2	4,35±0,15
	14,5	4,3±0,2
	14,9	4,75±0,12
^{237}Np	2,5	2,72±0,15
^{239}Pu	Тепловые	2,89±0,03
	0,08	3,05±0,08
	1,3	3,08±0,05 [10]
	1,75	3,14±0,09
	1,6	3,21±0,06
	1,8	3,01±0,15 [15]
	2,1	3,21±0,12
	4,0	3,43±0,11
	4,25	3,66±0,40 [15]
	14,0	4,62±0,28 [13]
	14,1	4,85±0,50 [15]
	14,5	4,71±0,20
	15,0	4,71±0,20
^{240}Pu	Спектр деления	3,42±0,2 [15]
	3,6	3,25±0,10 [15]
	15,0	4,4±0,2 [15]
^{241}Pu	Тепловые	2,96±0,08
	Спектр деления	3,42±0,2

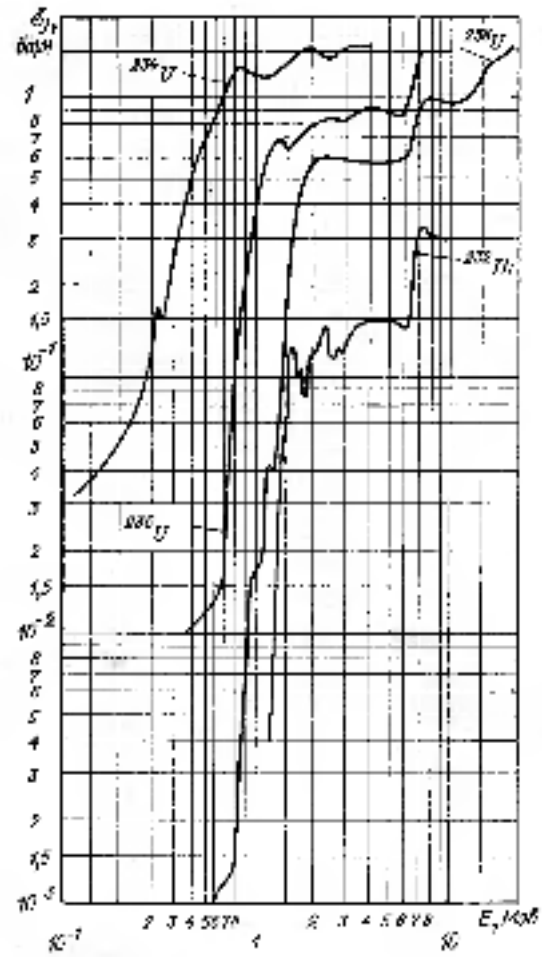


Рис. 42.4. Зависимость сечения деления ядер урана и тория от энергии нейтронов [8].

42.5. МГНОВЕННОЕ γ-ИЗЛУЧЕНИЕ, СОПРОВОЖДАЮЩЕЕ ДЕЛЕНИЕ

Энергия возбуждения осколков деления, остающаяся после эмиссии «мгновенных» нейтронов, обычно равна 3—4 *Мэв/осколок*. Это возбуждение осколков снимается испусканием «мгновенных» γ-квантов. Процесс испускания происходит за времени порядка 10^{-14} *сек* вслед за испусканием нейтронов.

Полная эффективная энергия мгновенного γ-излучения на 1 деление = 7,5 *Мэв*. Средняя энергия мгновенного γ-излучения = 0,9 *Мэв*. Среднее число γ-квантов на 1 деление $\bar{N}_\gamma = 8,3$. Среднее число γ-квантов $\bar{N}_\gamma$ обнаруживает слабую зависимость от суммарной кинетической энергии осколков деления T. Значение $\bar{N}_\gamma$ падает линейно с ростом T [2].

В табл. 42.5 представлено энергетическое распределение γ-квантов, сопровождающих деление ^{235}U.

$N(E_\gamma)$ — число γ-квантов, испускаемых при делении внутри энергетического интервала шириной 0,1 *Мэв*; $E_{\gamma\phi} = E_\gamma N(E_\gamma)$ *Мэв/деление*.

Таблица 42.5

Спектр мгновенных γ-квантов, сопровождающих деление ^{235}U тепловыми нейтронами [20].

E_γ, *Мэв*	$N(E_\gamma)$	$E_{\gamma\,\text{пр}}$	E_γ, *Мэв*	$N(E_\gamma)$	$E_{\gamma(i)}$
0,1	0,176	0,0176	3,9	0,0126	0,0491
0,2	0,815	0,1630	4,0	0,0116	0,0464
0,3	0,697	0,2091	4,1	0,0106	0,0435
0,4	0,661	0,2644	4,2	0,00985	0,0414
0,5	0,662	0,3110	4,3	0,00908	0,0391
0,6	0,553	0,3318	4,4	0,00930	0,0365
0,7	0,454	0,3318	4,5	0,00764	0,0344
0,8	0,406	0,2464	4,6	0,00704	0,0324
0,9	0,353	0,3177	4,7	0,00649	0,0305
1,0	0,310	0,3100	4,8	0,00604	0,0290
1,1	0,272	0,2992	4,9	0,00556	0,0272
1,2	0,240	0,2880	5,0	0,00519	0,0260
1,3	0,205	0,2665	5,1	0,00470	0,0240
1,4	0,180	0,2520	5,2	0,00430	0,0224
1,5	0,158	0,2370	5,3	0,00399	0,0217
1,6	0,139	0,2224	5,4	0,00371	0,0200
1,7	0,125	0,2125	5,5	0,00341	0,0188
1,8	0,113	0,2034	5,6	0,00314	0,0176
1,9	0,102	0,1939	5,7	0,00290	0,0165
2,0	0,113	0,2260	5,8	0,00264	0,0153
2,1	0,0818	0,1718	5,9	0,00243	0,0143
2,2	0,0726	0,1597	6,0	0,00223	0,0134
2,3	0,0651	0,1497	6,1	0,00204	0,0124
2,4	0,0579	0,1390	6,2	0,00188	0,0117
2,5	0,0512	0,1280	6,3	0,00172	0,0109
2,6	0,0457	0,1188	6,4	0,00157	0,0100
2,7	0,0409	0,1104	6,5	0,00130	0,0090
2,8	0,0369	0,1033	6,6	0,00128	0,0084
2,9	0,0330	0,0957	6,7	0,00116	0,0077
3,0	0,0298	0,0894	6,8	0,00103	0,0070
3,1	0,0269	0,0841	6,9	0,000918	0,0063
3,2	0,0234	0,0781	7,0	0,000823	0,0058
3,3	0,0219	0,0723	7,1	0,000731	0,0052
3,4	0,0198	0,0673	7,2	0,000629	0,0045
3,5	0,0181	0,0634	7,3	0,000547	0,0040
3,6	0,0165	0,0594	7,4	0,000467	0,0034
3,7	0,0150	0,0555	7,5	0,000389	0,0029
3,8	0,0136	0,0517	7,6	0,000308	0,0023

Таблица 42.6

Полная энергия мгновенных γ-квантов, образующихся при делении некоторых ядер [2]

E_n — энергия нейтронов, вызывающих деление; $E_{\gamma\,\text{полн}}$ — полная энергия γ-излучения.

Ядро	E_n, *Мэв*	$\bar{n}_T$	$E_{\gamma\,\text{полн}}$, *Мэв*
^{235}U	Тепловые 2,8 14,7	7,4 ± 0,8 — —	7,2 ± 0,8 7,5 ± 1,1 7,6 ± 1,1
^{238}U	2,8 14,7	— —	7,5 ± 1,1 7,5 ± 1,1
^{239}Pu	Спонтанно	10,3	8,2

42.6. ЭНЕРГИЯ, ВЫДЕЛЯЕМАЯ ПРИ ДЕЛЕНИИ

Суммарная энергия, выделяемая при делении ядер, складывается из:

кинетической энергии осколков деления . . . $T_{\text{оск}}$

энергии:

мгновенных γ-квантов . . . . . $E_{\gamma\text{м}}$

нейтронов деления . . . . . E_n

β-частиц продуктов деления . . . . . E_β

γ-излучения продуктов деления . . . . $E_{\gamma\text{п.д.}}$

γ-излучения, возникающего вследствие захвата нейтронов . . . . . $E_{\gamma\text{з}}$

утекшей нейтрино . . . . . E_ν

Уносимая нейтрино энергия не выделяется в виде тепловой энергии, поэтому на один акт деления ^{235}U тепловыми нейтронами приходится ~ 200 *Мэв*, т. е. при мощности 1 *вт* происходит $3{,}1 \cdot 10^{10}$ *делений/сек*.

Таблица 42.7

Распределение энергии, выделяемой при делении

Ядро	$T_{\text{оск}}$, *Мэв*		$E_{\gamma\text{м}}$, *Мэв*	E_n, *Мэв*	E_β, *Мэв*	$E_{\gamma\text{п.д.}}$, *Мэв*	$E_{\gamma\text{з}}$, *Мэв*	E_ν, *Мэв*	$E_{\text{полн}}$, *Мэв*
	Легкий	Тяжелый							
^{233}U	97	66	7	6,0	9	7	—	—	191
^{235}U	98	67	7,8	4,9	9	7,2	7—10	10	214
^{238}U	99,3	67,4	—	5,2	—	—	—	—	.
^{239}Pu	100	72	7	5,8	9	7	—	—	201

Средняя кинетическая энергия $T_{\text{оск}}$ деления может быть приближенно представлена в зависимость от атомного номера Z и массового числа A делящегося изотопа [2]:

$$T_{\text{оск}} = 0{,}121\ Z^2 A^{-1/3}\ \text{Мэв}.$$

Таблица 42.8

Средняя кинетическая энергия осколков деления

Ядро	Условия реакции	$T_{\text{оск}}$, *Мэв*	Литература
^{209}Bi	Нейтроны с энергией 90 *Мэв*	142 ± 4	[3]
^{209}At	Ионы ^{12}C с энергией 93 *Мэв*	142 ± 6	[5]
^{209}At	Ионы ^{22}C с энергией 123 *Мэв*	146 ± 6	[5]
^{208}Pb	Ионы ^{16}O с энергией 100 *Мэв*	150 ± 10	[5]
^{232}Th	Тепловые нейтроны	160 ± 3	[9]
^{232}Th	Нейтроны с энергией 14,9 *Мэв*	167 ± 4	[5]
^{232}Th	Нейтроны с энергией 45 *Мэв*	168 ± 6	[3]
^{232}Th	Нейтроны с энергией 90 *Мэв*	164 ± 4	[5]
^{233}U	Тепловые нейтроны	163 ± 2	[9]
^{233}U	» »	165 ± 2	[3]
^{238}U	Нейтроны с энергией 90 *Мэв*	166 ± 3	[5]
^{238}U	Нейтроны с энергией 46 *Мэв*	158 ± 6	[3]
^{238}U	Нейтроны с энергией 90 *Мэв*	160 ± 4	[3]

Продолжение табл. 42.8

Ядро	Условия реакции	$\nu_{осн}$, Мэв	Литература
^{239}U	Тормозное излучение $E_{макс} = 70$ Мэв	170±2	[5]
^{239}Pu	Тепловые нейтроны	172±2	[9]
^{240}Pu	Спонтанное деление	175±2	[3]
^{241}Pu	Тепловые нейтроны	174±3	[3]
^{242}Pu	Спонтанное деление	174±3	[3]
^{248}Cm	» »	180±10	[9]
^{244}Cm	» »	185±5	[9]
^{252}Cf	» »	181±3	[9]
^{254}Fm	» »	176±6	[9]

42.7. ЗАПАЗДЫВАЮЩИЕ НЕЙТРОНЫ

Запаздывающие нейтроны, испускаемые возбужденными осколками деления, в соответствии с периодами полураспада родоначальников запаздывающих нейтронов делятся на шесть групп. Периоды полураспада и выходы нейтронов для одного и того же делящегося ядра слабо зависят от энергии нейтрона, вызывающего деление.

В табл. 42.9–42.12 приняты обозначения: $T_{1/2}$ — период полураспада; $I_{отн}$ — относительная доля нейтронов в группе; $I_{абс}$ — абсолютное число нейтронов в группе на один акт деления.

Таблица 42.9

Данные по запаздывающим нейтронам при делении изотопов U и Pu тепловыми нейтронами [4]

Изотоп	Номер группы	$T_{1/2}$, сек	$I_{отн}$	$I_{абс}$
^{235}U	1	55,00±0,54	0,086	0,00037±0,00003
	2	20,57±0,36	0,299	0,00197±0,00009
	3	5,00±0,21	0,252	0,00166±0,00027
	4	2,00±0,20	0,278	0,00184±0,00016
	5	0,615±0,242	0,051	0,00034±0,00016
	6	0,277±0,037	0,034	0,00022±0,00009
	Полный выход		1,000	0,0056±0,0003
^{238}U	1	55,72±1,28	0,033	0,00052±0,00005
	2	22,72±0,71	0,219	0,00346±0,00018
	3	6,22±0,29	0,196	0,00310±0,00016
	4	2,30±0,09	0,395	0,00624±0,00026
	5	0,610±0,083	0,115	0,00182±0,00015
	6	0,230±0,025	0,042	0,00066±0,00009
	Полный выход		1,000	0,0158±0,0006
^{239}Pu	1	54,28±2,34	0,035	0,00021±0,00005
	2	23,04±1,67	0,298	0,00182±0,00023
	3	5,60±0,40	0,211	0,00129±0,00030
	4	2,13±0,21	0,326	0,00199±0,00022
	5	0,616±0,213	0,086	0,00052±0,00018
	6	0,257±0,045	0,044	0,00027±0,00010
	Полный выход		1,000	0,0061±0,0009

Продолжение табл. 42.9

Изотоп	Номер группы	$T_{1/2}$, сек	$I_{отн}$	$I_{абс}$
^{241}Pu	1	54,0±1,0	—	0,000154±0,00004
	2	23,2±0,5	—	0,00365±0,0001
	3	5,6±0,6	—	0,00270±0,0004
	4	1,97±0,1	—	0,00620±0,0008
	5	0,45±0,04	—	0,00290±0,0003
	6	—	—	—
	Полный выход			0,0154±0,0015

Таблица 42.10

Данные по запаздывающим нейтронам при делении изотопов Th, U и Pu нейтронами спектра деления [4]

Изотоп	Номер группы	$T_{1/2}$, сек	$I_{отн}$	$I_{абс}$
^{232}Th	1	56,03±0,95	0,034	0,00169±0,00012
	2	20,75±0,66	0,150	0,00744±0,00037
	3	6,74±0,24	0,155	0,00769±0,00108
	4	2,16±0,08	0,446	0,02212±0,00110
	5	0,571±0,042	0,172	0,00858±0,00071
	6	0,211±0,019	0,043	0,00213±0,00031
	Полный выход		1,000	0,0496±0,0020
^{235}U	1	55,11±1,86	0,086	0,00060±0,00005
	2	20,74±0,86	0,274	0,00192±0,00009
	3	5,30±0,19	0,277	0,00159±0,00025
	4	2,29±0,01	0,317	0,00222±0,00012
	5	0,546±0,042	0,073	0,00051±0,00010
	6	0,221±0,042	0,023	0,00016±0,00005
	Полный выход		1,000	0,00700±0,0004
^{238}U	1	54,51±0,94	0,038	0,00063±0,00005
	2	21,84±0,54	0,213	0,00351±0,00011
	3	6,02±0,17	0,188	0,00310±0,00028
	4	2,23±0,06	0,467	0,00572±0,00023
	5	0,436±0,020	0,125	0,00211±0,00015
	6	0,179±0,017	0,026	0,00043±0,00005
	Полный выход		1,000	0,0165±0,0005
^{239}Pu	1	52,38±1,29	0,013	0,00006±0,00005
	2	21,58±0,39	0,137	0,00064±0,00025
	3	6,00±0,19	0,162	0,00067±0,00017
	4	1,83±0,07	0,388	0,01601±0,00077
	5	0,490±0,023	0,225	0,00927±0,00037
	6	0,172±0,009	0,075	0,00309±0,00035
	Полный выход		1,000	0,0412±0,0027

Продолжение табл. 42.10

Изотоп	Номер группы	$T_{1/2}$, сек	$i_{нов}$	$i_{вых}$
^{239}Pu	1	53,75 ± 0,95	0,038	0,00024 ± 0,00002
	2	22,29 ± 0,36	0,280	0,00176 ± 0,00002
	3	5,19 ± 0,12	0,216	0,00136 ± 0,00013
	4	2,09 ± 0,08	0,328	0,00207 ± 0,00012
	5	0,549 ± 0,049	0,103	0,00065 ± 0,00007
	6	0,216 ± 0,017	0,035	0,00022 ± 0,00003
	Полный выход		1,000	0,0063 ± 0,0003
^{240}Pu	1	53,56 ± 1,21	0,028	0,00022 ± 0,00003
	2	22,14 ± 0,38	0,273	0,00219 ± 0,00016
	3	5,14 ± 0,42	0,199	0,00162 ± 0,00014
	4	2,08 ± 0,19	0,350	0,00315 ± 0,00027
	5	0,511 ± 0,077	0,128	0,0019 ± 0,00018
	6	0,172 ± 0,033	0,029	0,00024 ± 0,00005
	Полный выход		1,000	0,0098 ± 0,0006

Таблица 42.11

Средние энергии $E_{ср}$ групп запаздывающих нейтронов для ^{235}U

Номер группы	$T_{1/2}$, сек	$E_{ср}$, кэв	Литература
1	54	250 ± 20	[16]
2	22	460 ± 10	[16]
3	5,9	400 ± 20	[16]
4	2,2	450 ± 20	[16]
5	0,46	420 ± 50	[16]

Таблица 42.12

Родоначальники запаздывающих нейтронов [16—18]

Согласно терминологии, предложенной в работе [17], родоначальниками запаздывающих нейтронов называются первые β-активные осколки деления, а продукты распада осколков называются получателями запаздывающих нейтронов.

Номер группы	$T_{1/2}$, сек	Наиболее вероятные родоначальники
1	55	^{87}Kr (54 сек) + ^{139}Cs (~ 1 мин)
2	22	^{137}I (24,2 сек) + ^{87}Br (15,5 сек) + ^{138}Te (20 сек)
3	6	^{138}I (5,9 сек) + ^{88}Br (3,9 сек)
4	2,2	^{139}I (2,7 сек) + ^{89}Kr (1,7 сек) + ^{139}Cs
5	0,6	^{140}I
6	0,18	^{90}Br + ^{140}Cs

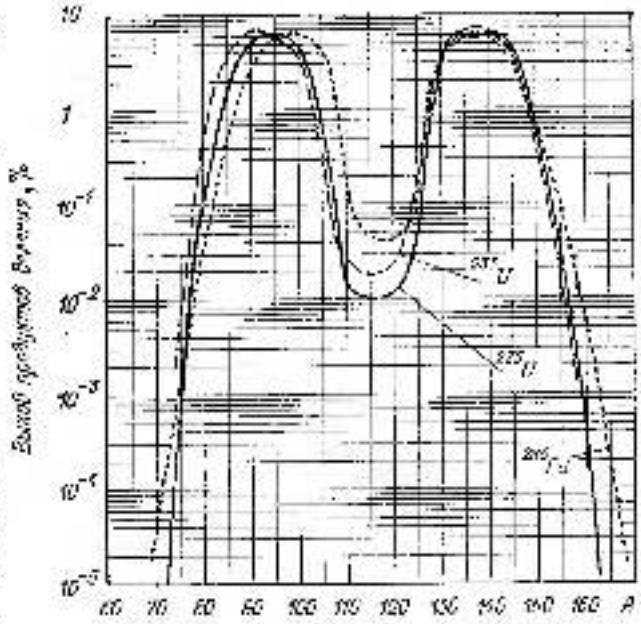


Рис. 42.5. Зависимость выходов продуктов деления ^{233}U, ^{235}U и ^{239}Pu под действием тепловых нейтронов от массового числа A [14, 22]. Для ^{235}U и ^{239}Pu приведены независимые выходы. Для ^{233}U дан полный выход.

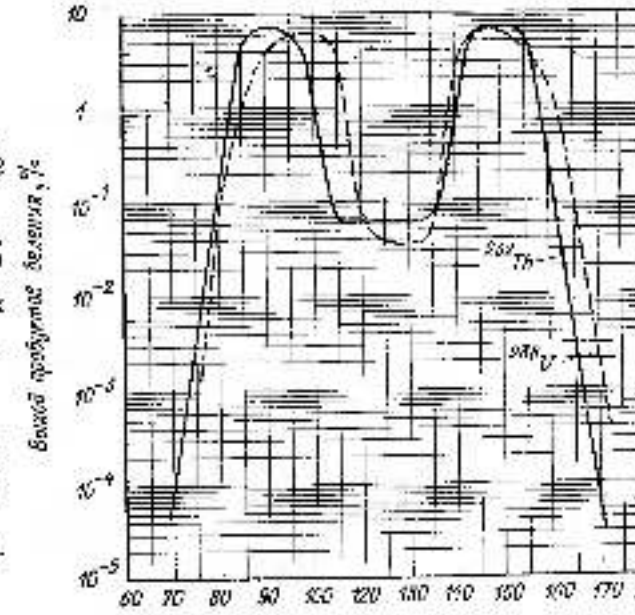


Рис. 42.6. Независимые выходы продуктов деления ^{232}Th и ^{238}U под действием нейтронов спектра деления как функция массового числа A [22].

42.8. ПРОДУКТЫ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

Выходы продуктов деления. На рис. 42.5 и 42.6 приведены выходы (в процентах при нормировке всей кривой на 200%) продуктов деления, образующихся при делении ^{233}U, ^{235}U и ^{239}Pu тепловыми нейтронами, а также ^{232}Th и ^{238}U при делении нейтронами спектра деления. Независимые выходы называют непосредственный выход осколков при делении ядра. Полный выход какого-либо изотопа складывается из независимого выхода и той

доли, которая образуется в результате цепочки β-распадов.

Излучение продуктов деления. В создании β- и γ-излучения продуктов деления участвуют более 100 радиоактивных изотопов, поэтому часто рассматривают суммарное β- или γ-излучение в момент времени t после деления, усредненное по многим актам деления.

Зависимость интенсивности β- и γ-излучений продуктов деления: $[A_\beta(t)$ и $A_\gamma(t)]$ от времени может быть представлена приближенно выражениями:

$$A_\beta(t) = 1{,}4\, t^{-1.2}\ \text{Мэв} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{деление}^{-1}\ [22];$$

$$A_\gamma(t) = 2t^{-1.2}\ \text{Мэв} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{деление}^{-1}\ [21].$$

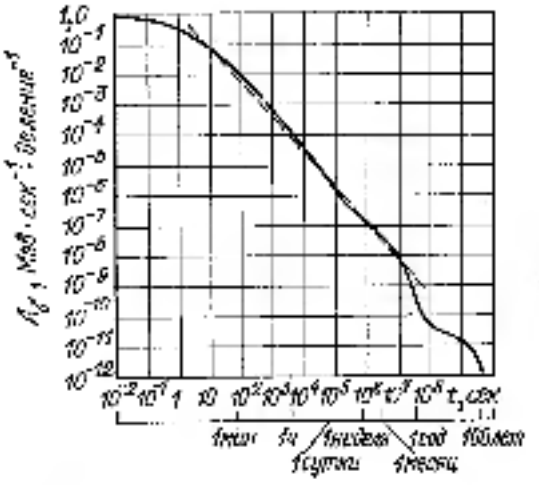


Рис. 42-7. Зависимость мощности γ-излучения A_γ продуктов деления ^{235}U от времени [21]. Пунктиром проведена кривая $2t^{-1.2}$.

которые справедливы для интервала 10 сек $\leq t \leq$ 100 суток с погрешностью ±20%.

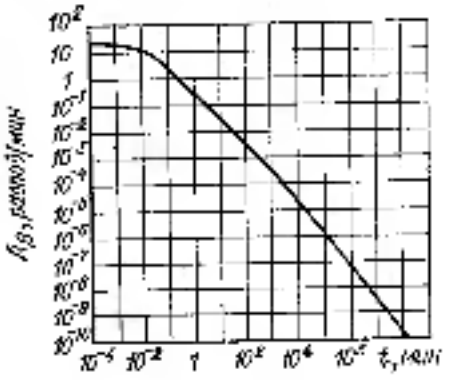


Рис. 42.8. Зависимость полной β-активности A_β продуктов деления ^{235}U от времени. Кривая получена усреднением экспериментальных и теоретических данных, собранных в работе [22].

42.9. ФОТОДЕЛЕНИЕ И ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Процесс деления ядер становится возможным, если энергия возбуждения ядра U превышает пороговую энергию возбуждения составного ядра (перед делением) U_A. При делении ядер под действием γ-квантов деление порога совпадает с минимальной (пороговой) энергией E_γ^* γ-кванта, еще способного вызвать реакцию деления. В случае деления ядер под действием нейтронов $E^*_n = U_A - B_n$, поэтому значения E^*_n могут быть и отрицательными.

Таблица 42.15

Мощность источников γ-излучения продуктов деления их активной зоны реактора, работавшего в течение времени T [20]

Мощность γ-источников (Мэв/сек) отнесена к 1 вт мощности реактора.

Время после остановки, сек	Время работы T					
	1 ч	1 сутки	1 неделя	1 месяц	3 месяца	6 месяцев
10^5	$1{,}82\cdot10^{10}$	$7{,}20\cdot10^{11}$	$7{,}91\cdot10^{12}$	$8{,}29\cdot10^{19}$	$8{,}50\cdot10^{20}$	$8{,}61\cdot10^{20}$
10^6	$1{,}83\cdot10^{10}$	$3{,}99\cdot10^{11}$	$4{,}70\cdot10^{12}$	$5{,}07\cdot10^{20}$	$5{,}28\cdot10^{20}$	$5{,}39\cdot10^{20}$
10^7	$2{,}54\cdot10^{9}$	$1{,}43\cdot10^{11}$	$2{,}09\cdot10^{12}$	$2{,}46\cdot10^{20}$	$2{,}67\cdot10^{20}$	$2{,}78\cdot10^{20}$
10^8	$1{,}65\cdot10^{9}$	$2{,}62\cdot10^{10}$	$6{,}89\cdot10^{11}$	$1{,}03\cdot10^{20}$	$1{,}23\cdot10^{20}$	$1{,}34\cdot10^{20}$
$2\cdot10^8$	$6{,}51\cdot10^{8}$	$1{,}24\cdot10^{9}$	$4{,}39\cdot10^{10}$	$7{,}47\cdot10^{19}$	$9{,}44\cdot10^{19}$	$1{,}05\cdot10^{20}$
$5\cdot10^8$	$2{,}16\cdot10^{8}$	$4{,}77\cdot10^{8}$	$2{,}28\cdot10^{9}$	$4{,}70\cdot10^{19}$	$6{,}51\cdot10^{19}$	$7{,}55\cdot10^{19}$
10^9	$9{,}81\cdot10^{7}$	$2{,}24\cdot10^{8}$	$1{,}22\cdot10^{9}$	$3{,}00\cdot10^{19}$	$4{,}00\cdot10^{19}$	$5{,}57\cdot10^{19}$
$2\cdot10^9$	$4{,}14\cdot10^{7}$	$9{,}70\cdot10^{7}$	$5{,}92\cdot10^{8}$	$1{,}74\cdot10^{19}$	$3{,}04\cdot10^{19}$	$3{,}90\cdot10^{19}$
$5\cdot10^9$	$1{,}31\cdot10^{7}$	$3{,}12\cdot10^{7}$	$2{,}05\cdot10^{8}$	$7{,}27\cdot10^{18}$	$1{,}56\cdot10^{19}$	$2{,}38\cdot10^{19}$
10^{10}	$5{,}87\cdot10^{6}$	$1{,}39\cdot10^{7}$	$9{,}42\cdot10^{7}$	$3{,}61\cdot10^{18}$	$8{,}34\cdot10^{18}$	$1{,}18\cdot10^{19}$
$2\cdot10^{10}$	$1{,}88\cdot10^{6}$	$4{,}49\cdot10^{6}$	$3{,}05\cdot10^{7}$	$1{,}17\cdot10^{18}$	$2{,}70\cdot10^{18}$	$3{,}85\cdot10^{18}$
$5\cdot10^{10}$	$1{,}02\cdot10^{6}$	$2{,}45\cdot10^{6}$	$1{,}69\cdot10^{7}$	$6{,}81\cdot10^{17}$	$1{,}80\cdot10^{18}$	$3{,}10\cdot10^{18}$
10^{11}	$3{,}55\cdot10^{5}$	$8{,}62\cdot10^{5}$	$5{,}96\cdot10^{6}$	$2{,}54\cdot10^{17}$	$7{,}51\cdot10^{17}$	$1{,}48\cdot10^{18}$
$2\cdot10^{11}$	$2{,}60\cdot10^{5}$	$6{,}47\cdot10^{5}$	$4{,}53\cdot10^{6}$	$1{,}91\cdot10^{17}$	$5{,}80\cdot10^{17}$	$1{,}16\cdot10^{18}$
$5\cdot10^{11}$	$2{,}10\cdot10^{5}$	$5{,}04\cdot10^{5}$	$3{,}53\cdot10^{6}$	$1{,}51\cdot10^{17}$	$4{,}52\cdot10^{17}$	$9{,}04\cdot10^{17}$
10^{12}	$1{,}44\cdot10^{5}$	$3{,}45\cdot10^{5}$	$2{,}42\cdot10^{6}$	$1{,}03\cdot10^{17}$	$3{,}10\cdot10^{17}$	$6{,}19\cdot10^{17}$
$2\cdot10^{12}$	$6{,}75\cdot10^{4}$	$1{,}62\cdot10^{5}$	$1{,}13\cdot10^{6}$	$7{,}85\cdot10^{16}$	$1{,}45\cdot10^{17}$	$2{,}91\cdot10^{17}$
10^{13}	$1{,}79$	$4{,}32$	$3{,}02\cdot10^{3}$	$1{,}21\cdot10^{16}$	$3{,}89\cdot10^{16}$	$7{,}76\cdot10^{16}$

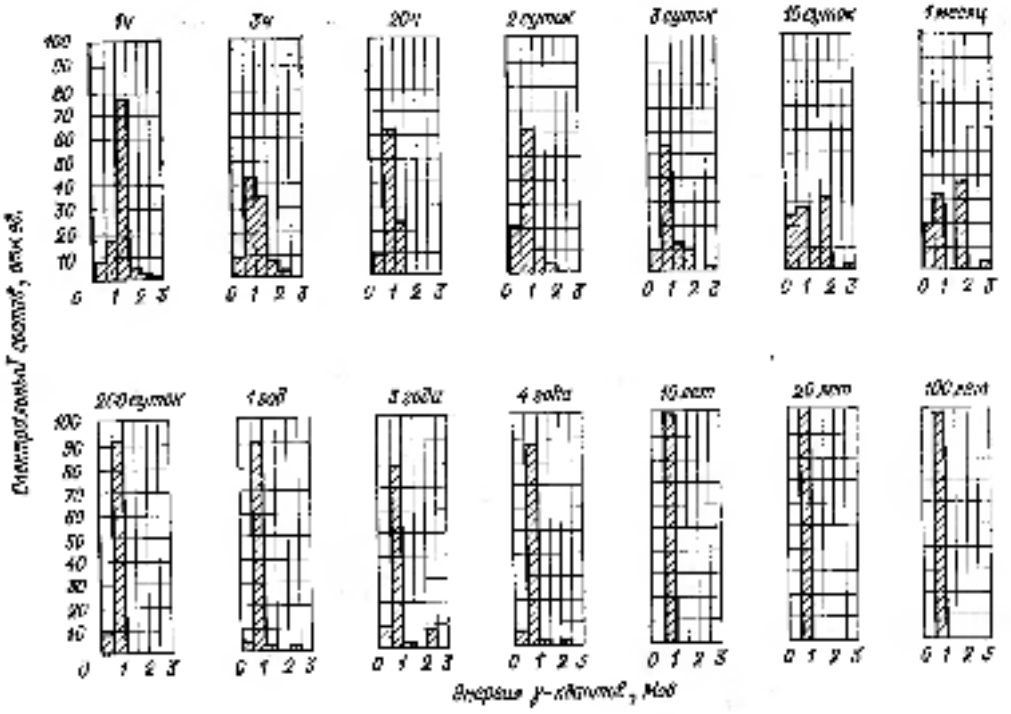


Рис. 42.9. Зависимость спектрального состава γ-излучения продуктов деления ^{235}U от времени [2].

Отметим, что вследствие туннельного эффекта барьер может разделиться и при $U < U_A$, поэтому значения Γ_n^* и U_A принципиально не могут быть точно определены в опыте.

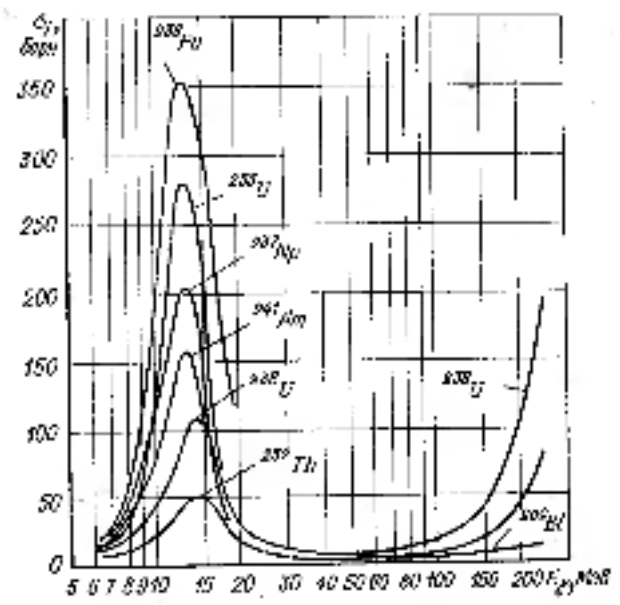


Рис. 42.10. Зависимость сечения деления некоторых ядер от энергии фотонов [2].

Таблица 42.14

Пороги деления некоторых ядер [2]

Состояние ядра	Изучаемая реакция	U_A, Мэв	U_{Γ}, Мэв	E_γ^* или E_n^*, Мэв
^{232}Th	(γ, f)	6,8		5,8
^{232}Th	(n, f)	6,64	5,69	1,65
^{232}Th	(α, f)	6,50	6,65	0,65
^{233}U	(γ, f)	5,6	—	5,6
^{233}U	(d, pf)	5,4	6,77	—1,4
^{233}U	(γ, f)	6,0	—	6,0
^{233}U	(n, f)	6,86	5,76	0,61
^{235}U	(d, pf)	5,9	6,44	—0,5
^{235}U	(n, f)	6,47	5,32	1,15
^{235}U	(γ, f)	5,75	—	5,75
^{235}U	(d, pf)	6,28	4,76	1,50
^{235}U	(n, f)	6,28	4,76	1,50
^{237}Np	(γ, f)	6,7	—	5,7
^{237}Np	(n, f)	6,04	5,42	0,62
^{239}Pu	(n, f)	6	—	6
^{240}Pu	(d, pf)	4,9	6,43	—1,5
^{241}Pu	(n, f)	6,10	5,44	0,66
^{241}Am	(γ, f)	6,0	-	6,0
^{242}Am	(n, f)	6,48	5,55	0,93

Таблица 42.15

Сечение деления σ_f (*барн*) некоторых ядер-мишеней под действием протонов*

Энергия протонов, *Мэв*	^{209}Bi	^{197}Au	^{99}Ru, ^{97}Tc	^{209}Au	^{209}Bi	^{232}Th	^{232}U	^{238}U
100	—	—	—	—	—	0,67±0,15	1,6±0,5	1,35±0,2
200	—	—	—	0,26±0,05	1,6±0,15	0,83±0,1	1,3±0,1	1,3±0,1
300	—	—	—	0,49±0,7	2,0±0,15	0,79±0,1	1,3±0,1	1,37±0,1
450 [26]	0,002	0,005	0,019	0,061	0,21	0,67	—	—

* Значения взяты путем пересчета с графиков, приведенных в работе [25].

Таблица 42.16

Зависимость сечения деления ^{209}U от энергии E_α бомбардирующих α-частиц [24]

E_α, *Мэв*	σ_f, *барн*	E_α, *Мэв*	σ_f, *барн*
23,6	0,184	35,3	1,27
26,2	0,4	41,0	1,43
30,7	1,06	44,3	1,99

Таблица 42.18

Характеристики деления различных ядер под действием мезонов [2]

Ядро-мишень	Мезоны	Энергия частиц, *Мэв*	Вероятность деления $\frac{\sigma_f}{\sigma_{неупр}}$	Сечение деления σ_f, *барн*
^{209}Bi	π^-	Медленные	0,02	—
Hg	π^-	122	0,005	—
^{232}U	π^-	Медленные	0,07±0,16	—
^{238}U	π^+	260	—	1,0±0,2
^{232}Th	π^-	Медленные	0,19—0,87	—
W	π^-	»	0,002	—

Таблица 42.17

Зависимость сечения деления ^{238}U от энергии E_α бомбардирующих α-частиц [23, 24]

E_α, *Мэв*	σ_f, *барн*	E_α, *Мэв*	σ_f, *барн*
19,7	0,0056	32,8	0,79
20,5	0,010	33,8	1,03
21,9	0,058	34,1	1,29
23,1	0,097	37,1	1,49
25,9	0,31	39,9	1,38
26,8	0,42	42,8	1,76
28,9	0,580	45	1,84

Таблица 42.19

Сечения деления (*мбарн*) различных ядер под действием ионов ^{14}N [27, 28]

Ядро-мишень	Энергия ионов, *Мэв*				
	70	80	90	100	110
^{197}Au	—	220±50	500±100	1000±150	1200±150
^{209}Bi	64±20	550±150	1300±300	1750±150	2150±200
Re	—	38±8	250±60	410±60	
^{232}Th	—	65±20	220±30	630±70	—
^{238}U	6,5	130±30	460±100	1300±250	1500

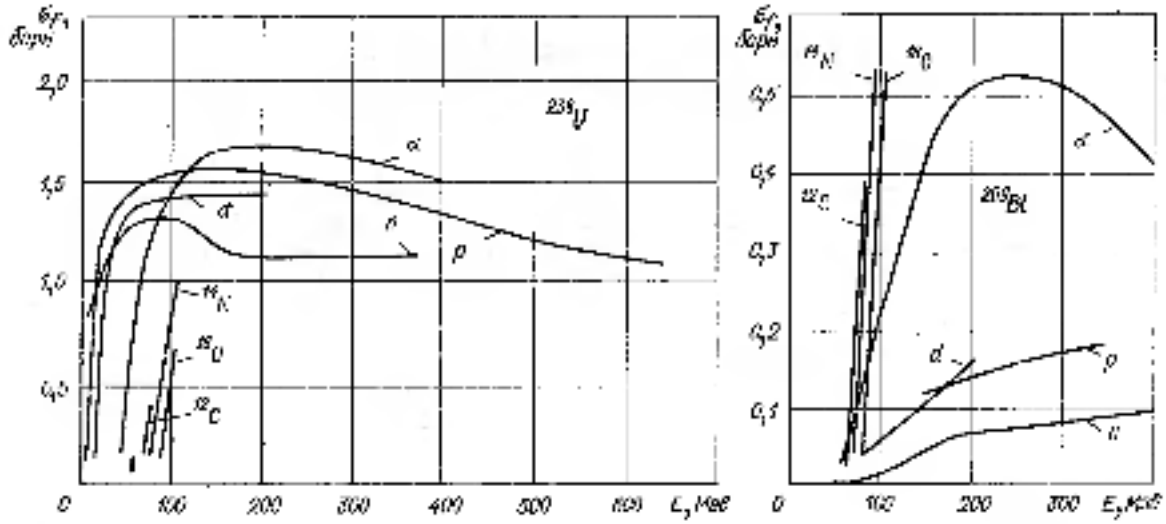


Рис. 42.11. Зависимость сечения деления ядер ^{238}U и ^{209}Bi от энергии различных бомбардирующих частиц [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lederer C. M., Hollander J. M., Perlman I.** Table of Isotopes. ed. New York — London — Sidney. John Wiley and Sons, Inc., 1967.
2. **Краус А.** Достижения физики деления ядер. — В кн.: «Физика деления ядер». Пер. с англ. М., Госатомиздат, 1964.
3. **Халперн И.** Деление ядер. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1962.
4. **Гордеев И. В. и др.** Ядерно-физические константы. М., Госатомиздат, 1963.
5. **Ядерные реакции.** Под ред. П. М. Эндта, М. Демеря, П. Б. Смитта. Пер. с англ. Т. 1, 2. М., Атомиздат, 1962, 1964.
6. **Юз Д., Шварц Р.** Атлас нейтронных сечений. М., Атомиздат, 1959.
7. **Schmidt J. J.** Neutron cross section for fast reactor materials. Karlsruhe, 1962.
8. **Бейнберг А., Вигнер Е.** Физическая теория ядерных реакторов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
9. **Терролт Дж.** Распределение числа нейтронов деления. Спектры нейтронов деления. — В кн.: «Физика деления ядер». Пер. с англ. М., Госатомиздат, 1963, с. 351, 365.
10. **Бодаков В. Н.** и др. В кн.: «Физика делящихся атомных ядер». М., Госатомиздат, 1962, с. 127.
11. **Кумаников Б. Д.** В кн.: «Нейтронная физика», М., Госатомиздат, 1961, с. 241, 246.
12. **Васильев Ю. А.** В кн.: «Физика деления атомных ядер». М., Госатомиздат, 1962, с. 121.
13. **Флеров Н. Н., Тальзин В. Н.** «Атомная энергия», 1961, т. 10, вып. 1, с. 68.
14. **Кёртис Л.** Введение в нейтронную физику. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1965.
15. **Личнер Р. Б.** В кн.: «Труды Второй междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии. Докл. иностр. ученых», т. 2, М., Атомиздат, 1959, с. 262.
16. **Кинсин Г. Р.** Запаздывающие нейтроны. — В кн.: «Успехи в области ядерной энергии». Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1958, с. 216.
17. **Кинсин Г. Р.** «Атомная энергия», 1958, т. 4, вып. 2, с. 250.
18. **Пашпас А.** В кн.: «Труды Второй междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии. Докл. иностр. ученых», т. 2. М., Атомиздат, 1959, с. 308.
19. **Протопопов А. П., Бляхин М. В.** «Атомная энергия», 1958, т. 1, с. 71.
20. **Бродер Д. Л., Попков К. К., Рубинов С. М.** Малогабаритная защита реакторов. М., Атомиздат, 1967.
21. **Лейпунский О. И.** Термоядерный взрыв. М., Атомиздат, 1964.
22. **Физика ядерных реакторов.** Пер. с англ. Под ред. И. А. Сенгбуша. М., Атомиздат, 1964.
23. **Gunthink R., Cobble J. W.** "Phys. Rev.", 1951, v. 116, p. 1247.
24. **Vandenbosch R.** e. a. "Phys. Rev.", 1958, v. 111, p. 1368.
25. **Jungerman J. A.** «Phys. Rev.», 1956, v. 101, c. 607.
26. **Kruger P., Sugarman N.** «Phys. Rev.», 1955, v. 99, p. 1460.
27. **Поликанов С. М., Друин В. А.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1959, т. 36, с. 744.
28. **Друин В. А., Поликанов С. М., Флеров Г. Н.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1957, т. 32, с. 1296.

ГЛАВА 43

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

43.1. ФОРМУЛА ГАМОВА

Термоядерными реакциями называют реакции слияния легких ядер, сопровождающиеся выделением энергии. Сечения и термоядерных реакций при малых значениях энергии ($E \lesssim 200$ кэв) участвующих в реакции частиц могут быть оценены по формуле Гамова:

$$\sigma(E) = (A/E)\exp(-B/\sqrt{E}). \qquad (43.1)$$

Здесь σ — сечение реакции, см²; E — энергия бомбардирующей частицы в лабораторной системе координат; эв; A и B — константы Гамова. Константа A имеет размерность энергии, а размерность константы B: $[B] = [E^{1/2}]$. Константы Гамова обычно вычисляются для каждой конкретной реакции из имеющейся экспериментальной зависимости сечения от энергии. Формула Гамова позволяет производить экстраполяцию экспериментальной зависимости $\sigma(E)$ в область энергий, для которых отсутствуют экспериментальные данные. Для грубой оценки может быть использовано теоретически вычисленное значение произведения

$$BE^{-0,5} = 2\pi Z_1 Z_2 e^2/(\hbar v),$$

где Z_1 и Z_2 — заряды реагирующих частиц; v — скорость бомбардирующей частицы в лабораторной системе координат; e — заряд электрона и $\hbar$ — постоянная Планка.

43.2 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВЫХОДЫ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Ниже приведены энергетические выходы термоядерных реакций, рассчитанные по массам изотопов [1—3]. Все энергетические выходы даны в мегаэлектронвольтах. В общем балансе энергий необходимо учитывать энергию, выделяющуюся при распаде некоторых короткоживущих продуктов реакций, таких, как ^{5}He, ^{8}Li, ^{8}Be (имеющих время жизни $\sim 10^{-10}$ сек):

$$^5\mathrm{He} \to {}^4\mathrm{He} + n + 0,956;$$

$$^8\mathrm{Li} \to {}^8\mathrm{Be} + \beta^- + 1,665;$$

$$^8\mathrm{Be} \to 2\,{}^4\mathrm{He} + 0,094,$$

а также энергию, выделяющуюся при распаде ^{6}He:

$$^6\mathrm{He} \to {}^6\mathrm{Li} + \beta^- + \tilde{\nu} + 3,510 \text{ Мэв}$$

с периодом полураспада $T_{1/2} = 0,802$ сек.

Принятые обозначения: β^- — электрон; β^+ — позитрон; ν — нейтрино; $\tilde{\nu}$ — антинейтрино.

1. $^2\mathrm{H} + {}^1\mathrm{H} \to {}^3\mathrm{He} + \beta^+ + \nu + 0,620$
2. $^2\mathrm{H} + {}^1\mathrm{H} \to {}^3\mathrm{He} + \gamma + 5,494$
3. $^2\mathrm{H} + {}^2\mathrm{H} \to {}^3\mathrm{H} + {}^1\mathrm{H} + 4,033$
   $\to {}^3\mathrm{He} + n + 3,270$
4. $^3\mathrm{H} + {}^1\mathrm{H} \to {}^4\mathrm{He} + \gamma + 19,814$
5. $^3\mathrm{H} + {}^2\mathrm{H} \to {}^4\mathrm{He} + n + 17,590$
   $\to {}^5\mathrm{He} + \gamma + 16,632$
6. $^6\mathrm{Li} + {}^1\mathrm{H} \to {}^4\mathrm{He} + 2\alpha + 11,339$
   $\to {}^3\mathrm{He} + \alpha + 10,374$
7. $^6\mathrm{Li} + {}^2\mathrm{H} \to {}^4\mathrm{He} + {}^3\mathrm{He} + 16,394$
   $\to {}^5\mathrm{Li} + \gamma + 16,386$
8. $^6\mathrm{He} + {}^2\mathrm{H} \to {}^5\mathrm{He} + {}^3\mathrm{H} + 14,321$
   $\to {}^4\mathrm{He} + {}^4\mathrm{H} + n + 12,100$
   $\to {}^5\mathrm{He} + {}^3\mathrm{H} + 11,136$
   $\to {}^5\mathrm{Li} + n + 10,131$
   $\to {}^6\mathrm{Li} + \gamma + 15,793$
9. $^6\mathrm{He} + {}^3\mathrm{He} \to {}^4\mathrm{He} + 2\,{}^3\mathrm{H} + 12,860$
   $\to {}^6\mathrm{Li} + {}^1\mathrm{H} + 10,835$
10. $^3\mathrm{He} + {}^3\mathrm{H} \to {}^6\mathrm{Li} + \gamma + 1,472$
11. $^3\mathrm{He} + {}^1\mathrm{H} \to {}^4\mathrm{He} + \gamma + 2,467$
12. $^3\mathrm{He} + {}^3\mathrm{He} \to {}^6\mathrm{Be} + \gamma + 1,587$
13. $^6\mathrm{Li} + {}^1\mathrm{H} \to {}^4\mathrm{He} + {}^3\mathrm{He} + 4,021$
    $\to {}^7\mathrm{Be} + \gamma + 5,606$
14. $^6\mathrm{Li} + {}^2\mathrm{H} \to {}^4\mathrm{He} + {}^3\mathrm{H} + {}^1\mathrm{H} + 2,561$
    $\to {}^4\mathrm{He} + {}^3\mathrm{He} + n + 1,797$
    $\to 2\,{}^4\mathrm{He} + 22,375$
    $\to {}^3\mathrm{He} + {}^5\mathrm{He} + 0,839$
    $\to {}^6\mathrm{Li} + {}^2\mathrm{H} + 5,028$
    $\to {}^7\mathrm{Li} + {}^1\mathrm{H} + 5,029$
    $\to {}^7\mathrm{Be} + n + 3,384$
    $\to {}^8\mathrm{Be} + \gamma + 22,289$
15. $^6\mathrm{Li} + {}^3\mathrm{H} \to 2\,{}^4\mathrm{He} + n + 16,117$
    $\to {}^5\mathrm{He} + {}^5\mathrm{He} + 15,100$
    $\to {}^5\mathrm{Li} + {}^4\mathrm{H} + 0,595$
    $\to {}^7\mathrm{Li} + {}^1\mathrm{H} + 10,503$
    $\to {}^7\mathrm{Be} + n + 10,025$
16. $^6\mathrm{Li} + {}^3\mathrm{He} \to {}^7\mathrm{Li} + {}^4\mathrm{He} + 14,916$
    $\to {}^8\mathrm{Be} + {}^1\mathrm{H} + 16,597$
17. $^6\mathrm{Li} + {}^4\mathrm{He} \to {}^{10}\mathrm{B} + \gamma + 4,461$
18. $^6\mathrm{Li} + {}^6\mathrm{Li} \to {}^7\mathrm{Li} + {}^4\mathrm{He} + {}^1\mathrm{H} + 3,156$
    $\to {}^7\mathrm{Be} + {}^4\mathrm{He} + n + 1,912$
    $\to {}^8\mathrm{Be} + {}^4\mathrm{He} + 20,806$
    $\to {}^9\mathrm{Be} + {}^3\mathrm{He} + 1,695$
    $\to {}^9\mathrm{B} + {}^2\mathrm{H} + 0,808$
    $\to {}^{10}\mathrm{B} + {}^1\mathrm{H} + 2,989$
    $\to {}^{11}\mathrm{B} + {}^1\mathrm{H} + 19,220$
    $\to {}^{11}\mathrm{C} + n + 1,893$
19. $^7\mathrm{Li} + {}^1\mathrm{H} \to 2\,{}^4\mathrm{He} + 17,347$
    $\to {}^8\mathrm{Be} + \gamma + 17,252$
20. $^7\mathrm{Li} + {}^2\mathrm{H} \to 2\,{}^4\mathrm{He} + n + 15,122$
    $\to {}^5\mathrm{He} + {}^4\mathrm{He} + 14,167$
    $\to {}^8\mathrm{Be} + n + 15,028$
    $\to {}^9\mathrm{Be} + \gamma + 16,699$
21. $^7\mathrm{Li} + {}^3\mathrm{H} \to {}^6\mathrm{He} + {}^4\mathrm{He} + n + 7,037$
    $\to {}^6\mathrm{He} + {}^4\mathrm{He} + 9,834$
    $\to {}^8\mathrm{Be} + 2n + 8,770$
    $\to {}^9\mathrm{Be} + n + 10,435$

22. $^{7}Li + {}^{3}He \rightarrow {}^{8}Li + {}^{4}He + 13,325$

$\rightarrow {}^{8}Be + {}^{2}H + 11,739$

$\rightarrow {}^{9}Be + {}^{1}H + 11,199$

$\rightarrow {}^{9}B + n + 9,349$

$\rightarrow {}^{10}B + \gamma + 17,780$

23. $^{7}Li + {}^{4}He \rightarrow {}^{11}B + \gamma + 8,664$

24. $^{7}Li + {}^{6}Li \rightarrow {}^{9}Be + {}^{4}He + 15,920$

$\rightarrow {}^{10}B + {}^{3}H + 1,994$

$\rightarrow {}^{10}B + {}^{2}H + 7,192$

$\rightarrow {}^{10}B + {}^{1}H + 8,387$

$\rightarrow {}^{11}C + 2n + 2,204$

$\rightarrow {}^{12}C + n + 20,924$

25. $^{7}Li + {}^{7}Li \rightarrow {}^{8}Be + {}^{4}He + 7,272$

$\rightarrow {}^{10}Be + {}^{4}He + 14,783$

$\rightarrow {}^{11}B + {}^{3}H + 6,197$

$\rightarrow {}^{10}B + {}^{3}H + 3,309$

$\rightarrow {}^{10}B + {}^{2}H + 5,561$

$\rightarrow {}^{12}C + 2n + 13,672$

$\rightarrow {}^{13}C + n + 18,619$

26. $^{9}Be + {}^{1}H \rightarrow {}^{6}Li + {}^{4}He + 2,126$

$\rightarrow {}^{8}Be + {}^{2}H + 0,559$

$\rightarrow {}^{10}B + \gamma + 6,587$

27. $^{9}Be + {}^{2}H \rightarrow 2\,{}^{4}He + {}^{3}H + 4,667$

$\rightarrow {}^{7}Li + {}^{4}He + 7,154$

$\rightarrow {}^{8}Be + {}^{3}H + 4,592$

$\rightarrow {}^{10}Be + {}^{2}H + 4,590$

$\rightarrow {}^{10}B + n + 4,363$

$\rightarrow {}^{11}B + \gamma + 6,197$

28. $^{9}Be + {}^{3}H \rightarrow {}^{6}Li + {}^{4}He + 2,930$

$\rightarrow {}^{10}B + n + 9,061$

$\rightarrow {}^{12}B + \gamma + 10,483$

29. $^{9}Be + {}^{3}He \rightarrow {}^{9}Be + {}^{4}He + 18,913$

$\rightarrow {}^{10}B + {}^{2}H + 1,094$

$\rightarrow {}^{11}B + {}^{1}H + 10,325$

$\rightarrow {}^{11}C + n + 7,502$

30. $^{9}Be + {}^{4}He \rightarrow {}^{12}C + n + 5,704$

$\rightarrow {}^{13}C + \gamma + 10,650$

$\rightarrow {}^{10}C + {}^{2}H + 9,176$

$\rightarrow {}^{13}C + {}^{1}H + 16,130$

$\rightarrow {}^{12}N + 2n + 3,951$

$\rightarrow {}^{13}N + n + 14,504$

31. $^{9}Be + {}^{6}Li \rightarrow {}^{8}Be + {}^{7}Li + 5,587$

$\rightarrow {}^{10}B + {}^{6}He + 1,933$

$\rightarrow {}^{11}B + {}^{4}He + 14,347$

32. $^{9}Be + {}^{7}Li \rightarrow {}^{8}Be + {}^{8}Li + 0,367$

$\rightarrow {}^{12}B + {}^{4}He + 10,463$

$\rightarrow {}^{12}C + {}^{3}H + 8,183$

$\rightarrow {}^{13}C + {}^{2}H + 10,102$

$\rightarrow {}^{14}C + {}^{1}H + 9,006$

$\rightarrow {}^{14}N + 2n + 7,251$

$\rightarrow {}^{15}N + n + 18,086$

33. $^{10}B + {}^{1}H \rightarrow {}^{7}Be + {}^{4}He + 1,148$

$\rightarrow {}^{11}C + \gamma + 8,683$

34. $^{10}B + {}^{2}H \rightarrow 3\,{}^{4}He + 17,014$

$\rightarrow {}^{8}Be + {}^{6}He + 17,819$

$\rightarrow {}^{12}B + {}^{1}H + 9,331$

$\rightarrow {}^{13}C + n + 6,468$

$\rightarrow {}^{13}C + \gamma + 25,182$

35. $^{10}B + {}^{3}H \rightarrow {}^{8}Be + {}^{4}He + 13,227$

$\rightarrow {}^{11}B + {}^{2}H + 5,190$

$\rightarrow {}^{12}B + {}^{1}H + 6,343$

$\rightarrow {}^{12}C + n + 18,931$

36. $^{10}B + {}^{3}He \rightarrow 3\,{}^{4}He + {}^{1}H + 12,420$

$\rightarrow {}^{8}Be + {}^{6}He + {}^{1}H + 12,326$

$\rightarrow {}^{9}B + {}^{4}He + 12,140$

$\rightarrow {}^{12}C + {}^{2}H + 3,199$

$\rightarrow {}^{12}C + {}^{1}H + 19,096$

$\rightarrow {}^{13}N + n + 1,6$

37. $^{10}B + {}^{4}He \rightarrow {}^{13}C + {}^{1}H + 1,341$

$\rightarrow {}^{13}C + {}^{2}H + 4,053$

$\rightarrow {}^{13}N + n + 1,060$

38. $^{10}B + {}^{6}Li \rightarrow {}^{12}C + {}^{6}He + 4,098$

$\rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He + 23,716$

$\rightarrow {}^{13}C + {}^{3}He + 6,085$

$\rightarrow {}^{13}N + {}^{2}H + 5,845$

$\rightarrow {}^{14}N + {}^{1}H + 10,141$

$\rightarrow {}^{10}N + {}^{3}H + 18,751$

$\rightarrow {}^{14}O + 2n + 1,900$

$\rightarrow {}^{15}O + n + 15,209$

39. $^{10}B + {}^{7}Li \rightarrow {}^{8}C + {}^{9}Be + n + 16,463$

$\rightarrow {}^{13}C + {}^{4}He + 21,410$

$\rightarrow {}^{12}N + {}^{3}H + 9,146$

$\rightarrow {}^{10}N + {}^{3}H + 13,723$

$\rightarrow {}^{10}N + {}^{2}H + 13,985$

$\rightarrow {}^{10}O + 2n + 7,957$

40. $^{11}B + {}^{1}H \rightarrow {}^{8}Be + {}^{4}He + 8,588$

$\rightarrow {}^{11}C + \gamma + 15,957$

41. $^{11}B + {}^{2}H \rightarrow {}^{8}Be + {}^{4}He + n + 6,363$

$\rightarrow {}^{9}Be + {}^{4}He + 8,028$

$\rightarrow {}^{12}B + {}^{1}H + 1,144$

$\rightarrow {}^{12}C + n + 6,303$

$\rightarrow {}^{13}C + \gamma + 18,679$

42. $^{11}B + {}^{3}H \rightarrow {}^{10}Be + {}^{4}He + 8,580$

$\rightarrow {}^{13}C + n + 12,422$

43. $^{11}B + {}^{3}He \rightarrow {}^{9}Be + {}^{6}Li + 4,566$

$\rightarrow {}^{10}B + {}^{4}He + 9,122$

$\rightarrow {}^{12}C + {}^{2}H + 10,463$

$\rightarrow {}^{13}C + {}^{1}H + 13,186$

$\rightarrow {}^{13}N + n + 10,182$

$\rightarrow {}^{14}N + \gamma + 20,735$

44. $^{11}B + {}^{4}He \rightarrow {}^{14}C + {}^{1}H + 0,784$

$\rightarrow {}^{14}N + n + 0,157$

45. $^{11}B + {}^{6}Li \rightarrow {}^{9}C + {}^{4}He + n + 12,200$

$\rightarrow {}^{13}C + {}^{4}He + 17,207$

$\rightarrow {}^{14}N + {}^{3}H + 4,942$

$\rightarrow {}^{13}N + {}^{2}H + 9,520$

$\rightarrow {}^{13}N + {}^{1}H + 9,782$

$\rightarrow {}^{13}O + 2n + 3,757$

46. $^{11}B + {}^{7}Li \rightarrow {}^{9}C + {}^{4}He + n + 9,964$

$\rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He + 18,131$

$\rightarrow {}^{13}N + {}^{3}H + 8,525$

$\rightarrow {}^{13}N + {}^{2}H + 4,758$

$\rightarrow {}^{13}N + {}^{1}H + 8,415$

$\rightarrow {}^{13}O + 2n + 12,169$

47. $^{12}C + {}^{1}H \rightarrow {}^{13}N + \gamma + 1,944$

48. $^{12}C + {}^{2}H \rightarrow {}^{11}B + {}^{3}He + 5,168$

$\rightarrow {}^{13}C + {}^{3}H + 2,722$

$\rightarrow {}^{14}N + \gamma + 10,272$

49. $^{12}C + {}^{3}H \rightarrow {}^{11}B + {}^{4}He + 3,858$

$\rightarrow {}^{13}C + {}^{2}H + 4,641$

$\rightarrow {}^{14}N + n + 4,015$

50. $^{12}C + {}^{3}He \rightarrow {}^{14}C + {}^{1}H + 1,858$

$\rightarrow {}^{14}N + {}^{2}H + 4,779$

$\rightarrow {}^{15}O + \gamma + 22,793$

51. $^{12}C + {}^{4}He \rightarrow {}^{16}O + \gamma + 7,161$

52. $^{12}C + {}^{6}Li \rightarrow {}^{14}N + {}^{3}He + 8,799$

$\rightarrow {}^{16}O + {}^{2}H + 5,680$

$\rightarrow {}^{15}O + {}^{3}H + 7,607$

$\rightarrow {}^{17}F + n + 4,064$

53. $^{12}C + {}^{7}Li \rightarrow {}^{15}N + {}^{4}He + 12,382$

$\rightarrow {}^{16}O + {}^{3}H + 4,685$

$\rightarrow {}^{15}O + {}^{4}H + 2,580$

$\rightarrow {}^{18}O + {}^{1}H + 8,402$

$\rightarrow {}^{18}F + n + 5,964$

54. $^{13}C + {}^{1}H \rightarrow {}^{14}N + \gamma + 7,550$

55. $^{13}C + {}^{2}H \rightarrow {}^{11}B + {}^{4}He + 5,168$

$\rightarrow {}^{12}C + {}^{3}H + 1,311$

$\rightarrow {}^{14}C + {}^{1}H + 6,062$

$\rightarrow {}^{14}N + n + 5,325$

56. $^{13}C + {}^{3}H \rightarrow {}^{12}B + {}^{4}He + 2,280$

$\rightarrow {}^{14}C + {}^{2}H + 1,919$

$\rightarrow {}^{15}C + {}^{1}H + 0,912$

$\rightarrow {}^{15}N + n + 0,909$

57. $^{13}C + {}^{3}He \rightarrow {}^{9}Be + 8,168$

$\rightarrow {}^{9}C + {}^{4}He + 10,631$

$\rightarrow {}^{14}N + {}^{2}H + 2,056$

$\rightarrow {}^{15}N + {}^{1}H + 10,667$

$\rightarrow {}^{15}O + n + 7,125$

58. $^{13}C + {}^{4}He \rightarrow {}^{16}O + n + 2,215$

59. $^{13}C + {}^{6}Li \rightarrow {}^{18}O + {}^{2}H + 7,000$

$\rightarrow {}^{17}O + {}^{2}H + 4,885$

60. $^{13}C + {}^{7}Li \rightarrow {}^{17}O + {}^{3}H + 7,000$

$\rightarrow {}^{18}O + {}^{2}H + 5,681$

61. $^{14}N + {}^{1}H \rightarrow {}^{15}O + \gamma + 7,293$

62. $^{14}N + {}^{2}H \rightarrow {}^{16}O + 6,330$

$\rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He + 13,575$

$\rightarrow {}^{15}N + {}^{3}H + 8,610$

$\rightarrow {}^{15}O + n + 5,058$

$\rightarrow {}^{16}O + \gamma + 20,736$

63. $^{14}N + {}^{3}H \rightarrow {}^{13}C + {}^{4}He + 12,367$

$\rightarrow {}^{15}N + {}^{2}H + 4,577$

$\rightarrow {}^{15}N + {}^{1}H + n + 2,362$

$\rightarrow {}^{16}N + {}^{1}H + 4,852$

$\rightarrow {}^{16}O + n + 14,478$

64. $^{14}N + {}^{3}He \to {}^{17}C + {}^{1}H + 8{,}081 \to {}^{16}N + {}^{2}He +$
$+ 10{,}024$
$\to {}^{16}O + {}^{2}H + 1{,}799$
$\to {}^{13}C + {}^{4}He + 15{,}543$

65. $^{14}N + {}^{4}He \to {}^{18}F + \gamma + 4{,}416$

66. $^{14}N + {}^{6}Li \to {}^{20}O + {}^{2}He + n + 3{,}554$
$\to {}^{19}O + {}^{3}He + 19{,}263$
$\to {}^{19}F + {}^{3}H + 2{,}943$

67. $^{14}N + {}^{7}Li \to {}^{21}F + {}^{1}H + 1{,}150$
$\to {}^{19}F + {}^{3}H + 4{,}013$

68. $^{14}N + {}^{8}B \to {}^{22}C + {}^{4}He + 4{,}965$
$\to {}^{19}O + \gamma + 12{,}126$

69. $^{15}N + {}^{2}H \to {}^{13}C + {}^{4}He + 7{,}037$
$\to {}^{15}N + {}^{1}H + 0{,}262$
$\to {}^{14}O + n + 9{,}001$

70. $^{15}N + {}^{3}H \to {}^{17}O + n + 7{,}787$

71. $^{15}N + {}^{3}He \to {}^{15}N + {}^{2}He + 9{,}743$
$\to {}^{16}O + {}^{2}H + 6{,}632$
$\to {}^{16}O + {}^{3}H + 2{,}550$
$\to {}^{17}F + n + 5{,}006$

72. $^{15}N + {}^{4}He \to {}^{19}F + \gamma + 4{,}012$

73. $^{15}N + {}^{7}Li \to {}^{22}F + {}^{2}H + 1{,}546$

74. $^{16}O + {}^{1}H \to {}^{17}F + \gamma + 0{,}601$

75. $^{16}O + {}^{3}H \to {}^{19}N + {}^{4}He + 3{,}110$
$\to {}^{18}F + \gamma + 7{,}597$
$\to {}^{17}O + {}^{2}H + 1{,}918$

76. $^{16}O + {}^{2}H \to {}^{14}N + {}^{4}He + 7{,}382$
$\to {}^{16}O + {}^{1}H + 3{,}707$
$\to {}^{17}F + n + 1{,}209$

77. $^{16}O + {}^{3}He \to {}^{17}O + {}^{4}He + 4{,}909$
$\to {}^{18}F + {}^{1}H + 2{,}033$
$\to {}^{19}N + \gamma + 8{,}440$

78. $^{16}O + {}^{4}He \to {}^{20}Ne + \gamma + 4{,}730$

79. $^{16}O + {}^{6}Li \to {}^{19}F + {}^{4}He + 6{,}053$
$\to {}^{20}Ne + {}^{3}H + 3{,}267$

80. $^{16}O + {}^{7}Li \to {}^{19}F + {}^{5}He + 9{,}233$
$\to {}^{20}Ne + {}^{3}H + 2{,}264$

81. $^{17}O + {}^{1}H \to {}^{13}N + {}^{4}He + 1{,}193$
$\to {}^{18}F + \gamma + 5{,}609$

82. $^{17}O + {}^{2}H \to {}^{16}N + {}^{4}He + 9{,}809$
$\to {}^{18}O + {}^{3}H + 2{,}116$
$\to {}^{18}O + {}^{1}H + 5{,}822$
$\to {}^{18}F + n + 3{,}381$

83. $^{17}O + {}^{3}H \to {}^{19}O + {}^{1}H + 3{,}521$

84. $^{17}O + {}^{3}He \to {}^{20}O + {}^{4}He + 16{,}436$
$\to {}^{17}F + {}^{4}H + 0{,}155$
$\to {}^{19}Ne + n + 4{,}300$

85. $^{17}O + {}^{4}He \to {}^{20}Ne + n + 0{,}588$

86. $^{17}O + {}^{7}Li \to {}^{15}N + {}^{4}He + 3{,}580$
$\to {}^{19}F + \gamma + 7{,}986$

87. $^{17}O + {}^{9}B \to {}^{18}N + {}^{4}He + n + 1{,}755$
$\to {}^{14}N + {}^{4}He + 4{,}366$
$\to {}^{18}O + {}^{2}H + 1{,}732$
$\to {}^{19}F + n + 5{,}768$

88. $^{18}O + {}^{2}H \to {}^{16}N + {}^{4}He + 3{,}872$
$\to {}^{19}O + {}^{1}H + 3{,}679$
$\to {}^{20}F + n + 6{,}112$

89. $^{18}O + {}^{3}He \to {}^{19}O + {}^{4}He + 12{,}532$
$\to {}^{18}F + {}^{2}H + 2{,}499$
$\to {}^{20}F + {}^{1}H + 6{,}876$
$\to {}^{20}Ne + n + 13{,}121$

90. $^{19}O + {}^{6}Li \to {}^{19}N + {}^{4}He + 2{,}677$
$\to {}^{20}F + {}^{4}He + n + 4{,}295$
$\to {}^{22}P + {}^{4}He + 10{,}896$

91. $^{19}O + {}^{7}Li \to {}^{20}F + {}^{4}He + n + 3{,}646$

43.3. ЗВЕЗДНЫЕ ЦИКЛЫ

Предполагается, что источником энергии Солнца и звезд является термоядерные реакции, происходящие в их недрах. В результате этих реакций происходит превращение легких элементов в более тяжелые, например синтез ^{4}He из ^{1}H. Синтез более тяжелых элементов обычно осуществляется путем последовательной цепи несколько термоядерных реакций. Этот комплекс реакций носит название звездного цикла.

Ниже приведены реакции, входящие в циклы и их энергевыделение [8, 10]. Под заголовком цикла указаны исходные вещества и конечные продукты, образующиеся в цикле (элементарные частицы и фотоны опущены), а также суммарная выделяемая энергия.

Протонный цикл (*pp*-цикл)

$$4{}^{1}H \to {}^{4}He,\ E = 100{,}704\ Мэв$$

$$^{1}H + {}^{1}H \to {}^{2}H + \beta^{+} + \nu + 0{,}420$$

$$^{2}H + {}^{1}H \to {}^{3}He + \gamma + 5{,}494$$

$$^{3}He + {}^{3}He \to {}^{4}He + 2{}^{1}H + 12{,}860$$

$$^{3}He + {}^{4}He \to {}^{7}Be + \gamma + 1{,}587$$

$$^{7}Be + e^{-} \to \nu^{0} + {}^{7}Li + 0{,}862$$

$$^{7}Li + {}^{1}H \to 2{}^{4}He + 17{,}347$$

$$^{7}Be + {}^{1}H \to {}^{8}B + \gamma + 0{,}134$$

$$^{8}B \rightarrow {}^{8}Be + \beta^{+} + \nu + 17,979$$

$$^{8}Be \rightarrow 2\,^{4}He + 0,094$$

Углеродно-азотный цикл (C—N-цикл)

$$4\,^{1}H \rightarrow {}^{4}He, \quad E = 24,869 \text{ Мэв}$$

$$^{12}C + {}^{1}H \rightarrow {}^{13}N + \gamma + 1,944$$

$$^{13}N \rightarrow \beta^{+} + \nu + {}^{13}C + 1,199$$

$$^{13}C + {}^{1}H \rightarrow {}^{14}N + \gamma + 7,550$$

$$^{14}N + {}^{1}H \rightarrow {}^{15}O + \gamma + 7,293$$

$$^{15}O \rightarrow {}^{15}N + \beta^{+} + \nu + 1,738$$

$$^{15}N + {}^{1}H \rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He + 4,965$$

Двойной углеродно-азотно-кислородный цикл

(C—N—O-цикл) C—N-цикл + $3\,^{1}H + {}^{15}N \rightarrow {}^{4}He + {}^{14}N$

$E = 24,689$ Мэв $+ 15,668$ Мэв

C—N-цикл +

$$^{14}N + {}^{1}H \rightarrow {}^{15}O + \gamma + 12,126$$

$$^{15}O + {}^{1}H \rightarrow {}^{17}F + \gamma + 0,601$$

$$^{17}F \rightarrow {}^{17}O + \beta^{+} + \nu + 1,738$$

$$^{17}O + {}^{1}H \rightarrow {}^{4}He + {}^{14}N + 1,193$$

Неонно-натриевый цикл (Ne—Na-цикл)

$$4\,^{1}H \rightarrow {}^{4}He, \quad E = 24,687 \text{ Мэв}$$

$$^{20}Ne + {}^{1}H \rightarrow {}^{21}Na + \gamma + 2,433$$

$$^{21}Na \rightarrow {}^{21}Ne + \beta^{+} + \nu + 2,523$$

$$^{21}Ne + {}^{1}H \rightarrow {}^{22}Na + \gamma + 6,751$$

$$^{22}Na \rightarrow {}^{22}Ne + \beta^{+} + \nu + \gamma + 1,821$$

$$^{22}Ne + {}^{1}H \rightarrow {}^{23}Na + \gamma + 8,792$$

$$^{23}Na + {}^{1}H \rightarrow {}^{20}Ne + {}^{4}He + 2,377$$

Гелиевый цикл (He-цикл)

$$4\,^{4}He \rightarrow {}^{16}O, \quad E = 15,699 \text{ Мэв}$$

$$^{4}He + {}^{4}He \rightleftarrows {}^{8}Be$$

$$^{8}Be + {}^{4}He \rightarrow {}^{12}C + \gamma + 7,369$$

$$^{12}C + {}^{4}He \rightarrow {}^{16}O + \gamma + 7,161$$

43.4. ЭФФЕКТИВНЫЕ СЕЧЕНИЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

На рис. 43.1—43.7 приведены экспериментальные зависимости полных сечений термоядерных реакций от энергии бомбардирующей частицы. Для энергий, меньших 200 кэв, можно получить приближенное значение сечения реакции, обработав экспериментальные данные по формуле Гамова (43.1) и экстраполировав полученные кривые в область малых энергий. В тех случаях, когда авторы не конкретизировали продукты реакции, в скобках суммарное сечение для всех возможных каналов реакции, в подрисуночной подписи не указаны продукты реакции, например Li(*t*, *n*).

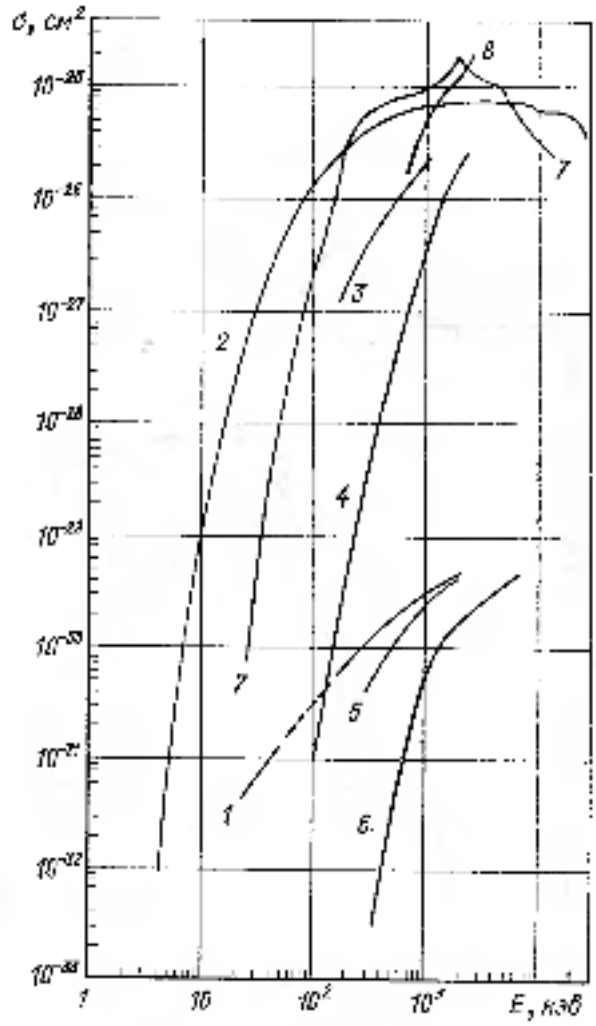


Рис. 43.1. Сечения термоядерных реакций:
1 — $^{7}Li(p,\gamma)^{8}Be$ [11, 12];
2 — $^{2}H(d, p)^{3}H$ [13—25];
3 — $^{6}Li(t, d)^{8}Be$ [43];
4 — $^{3}He(^{3}He, p)$ [44, 84];
5 — $^{7}Li(\alpha, \gamma)^{7}Li$ [45];
6 — $^{9}Be(\alpha, \gamma)^{13}Be$ [46, 82, 83];
7 — $^{6}Li(p, \alpha)^{3}He$ [47, 48, 86, 87];
8 — $^{6}Li(t, n)$ [57].

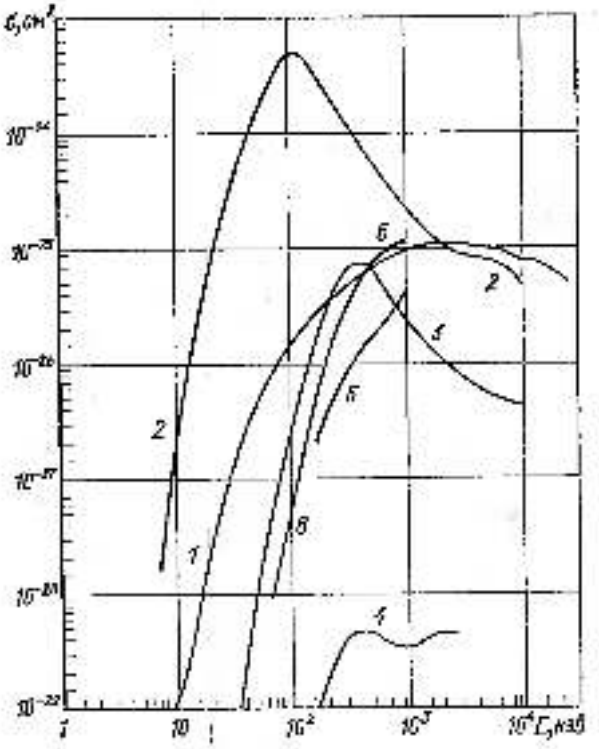


Рис. 43.2. Сечения термоядерных реакций:
1 — ^{3}H(d, n) ^{4}He [13, 14, 18, 21—27];
2 — ^{3}H(d, n) ^{4}He [13, 31—36];
3 — ^{6}He(d, p) ^{8}He [13, 38—41];
4 — ^{3}He (d, γ) ^{5}Li [42];
5 — ^{3}He(d, pn) ^{4}He [43];
6 — ^{6}Li(d, p) ^{7}Li [49—51].

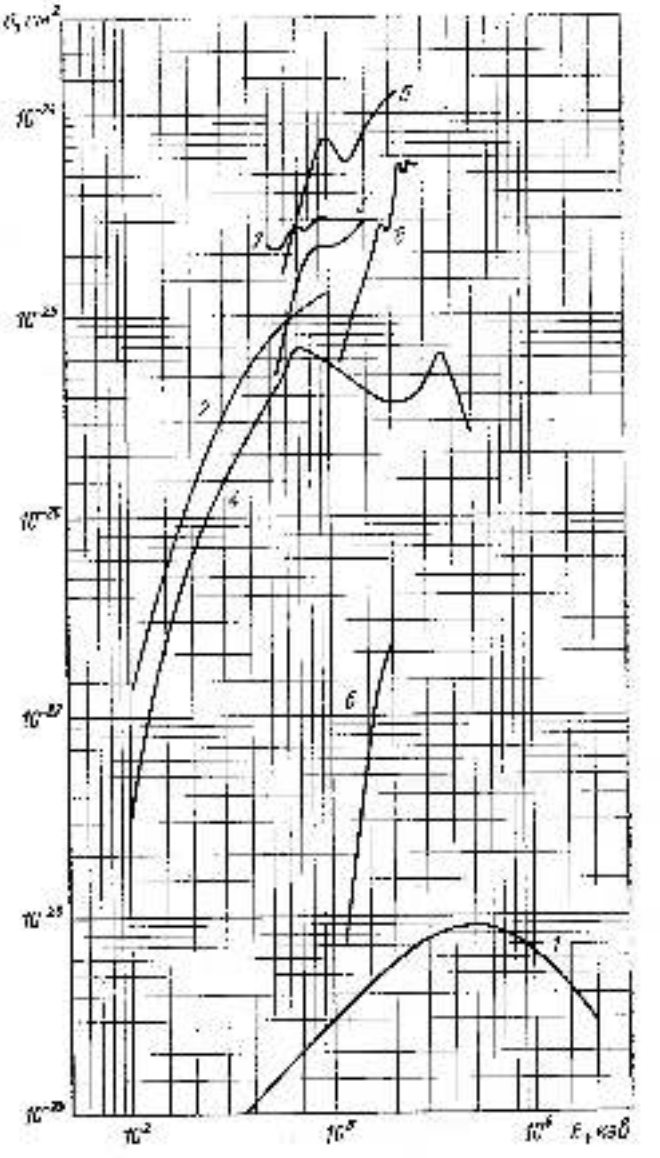


Рис. 43.3. Сечения термоядерных реакций:
1 — ^{3}H(p, γ) ^{4}He [28—30];
2 — ^{6}Li(d, n) ^{7}Be [49, 52, 53];
3 — ^{6}Li(d, t) [54];
4 — ^{6}Li(d, α) ^{4}He [53, 55, 56];
5 — ^{7}Li(t, n) [57];
6 — ^{7}Li(^{9}Li, p) ^{15}B; ^{7}Li(^{9}Li, d) ^{14}B [64];
7 — ^{9}Be (p, d) ^{8}Be [66];
8 — ^{9}Be (t, n) [68].

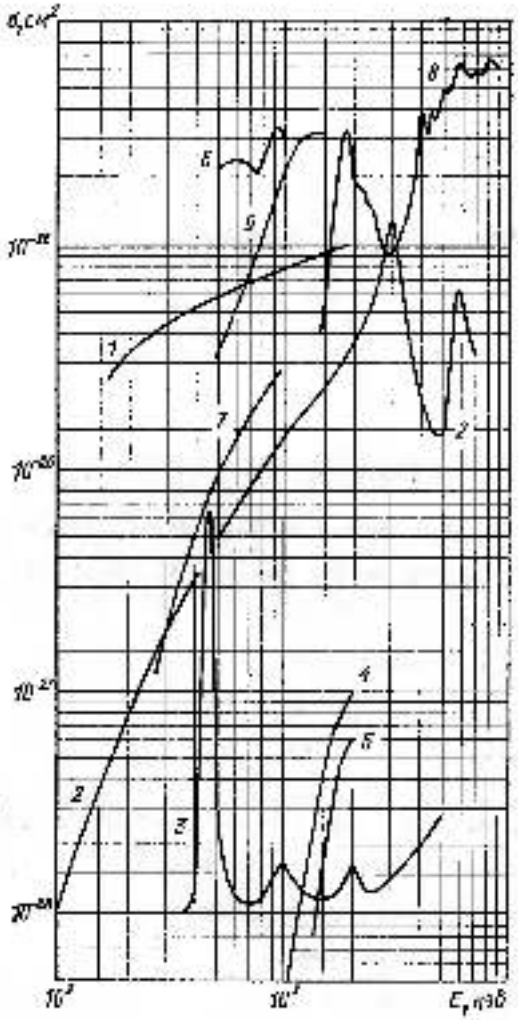


Рис. 43.4. Сечения термоядерных реакций:
1 — $^{7}Li(t, \alpha)$ [37];
2 — $^{7}Li(p, \alpha)$ ^{4}He [46, 48—50];
3 — $^{7}Li(p, \gamma)$ ^{8}Be [62—63];
4 — $^{6}Li(^{7}Li, p)$ ^{12}B [64];
5 — $^{7}Li(^{7}Li, ^{6}Be)$ ^{8}He [64];
6 — $^{9}Be(p, \alpha)$ ^{6}Li [61];
7 — $^{9}Be(d, p)$ ^{10}Be [66, 67];
8 — $^{9}Be(\alpha, n)$ ^{12}C [68, 70, 85];
9 — $^{14}N(d, n)$ [71]

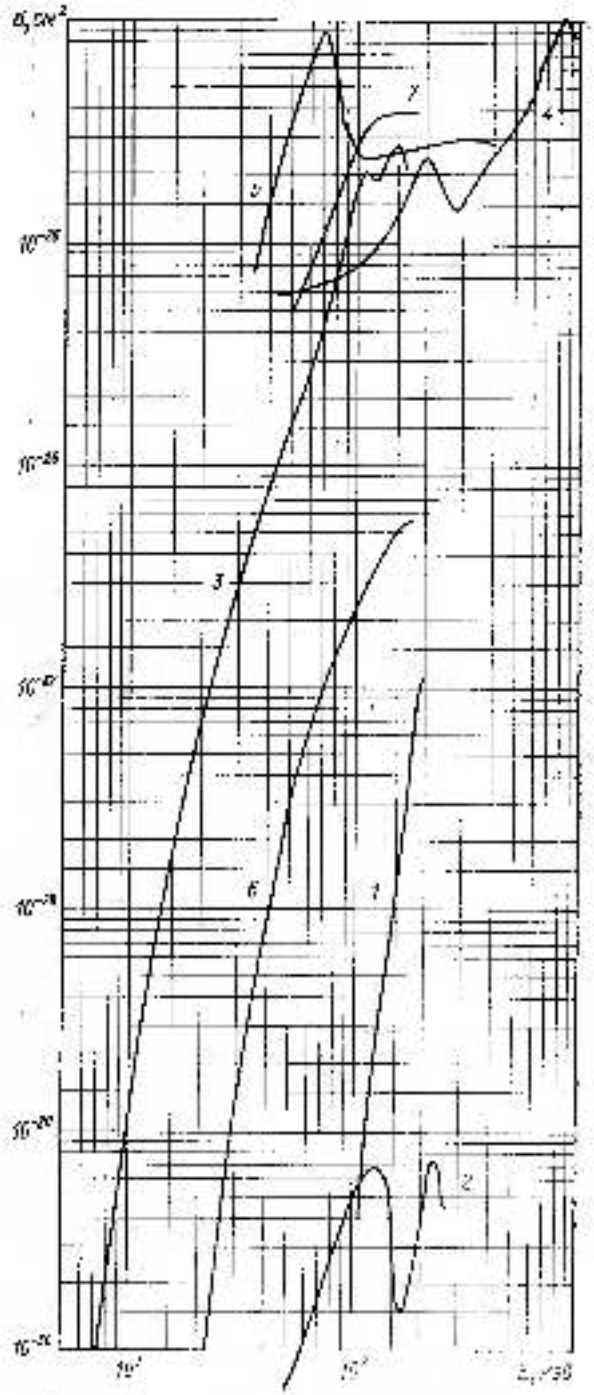


Рис. 43.5. Сечения термоядерных реакций:
1 — $^{9}Be(^{7}Li, ^{6}Li)$ ^{8}Be [67];
2 — $^{16}B(p, \gamma)$ ^{17}C [71];
3 — $^{11}B(p, \alpha)$ ^{8}Be [72—74];
4 — $^{10}B(\alpha, n)$ ^{13}N [70];
5 — $^{11}B(p, \alpha)$ ^{8}Be [76, 77];
6 — $^{11}B(d, p)$ ^{12}B [78];
7 — $^{11}B(d, \alpha)$ [75]

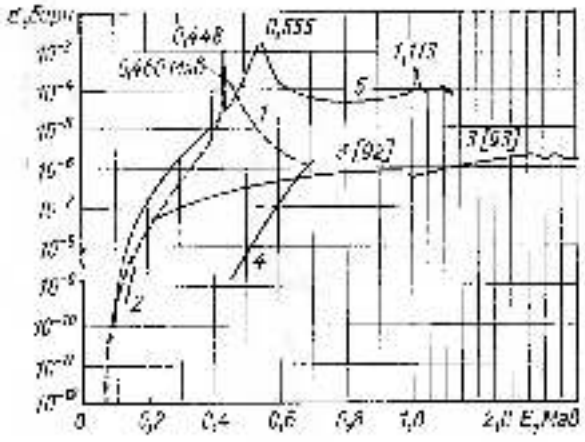


Рис. 43.6. Сечения термоядерных реакций:
1 — $^{13}C(p, \gamma)$ ^{14}N [4, 9, 79—81];
2 — $^{14}N(p, \gamma)$ ^{15}O [9, 81];
3 — $^{7}Be(p, \gamma)$ ^{8}B [92, 93];
4 — $^{12}C(\alpha, \alpha)$ ^{16}O [6];
5 — $^{12}C(p, \gamma)$ ^{13}N [5].

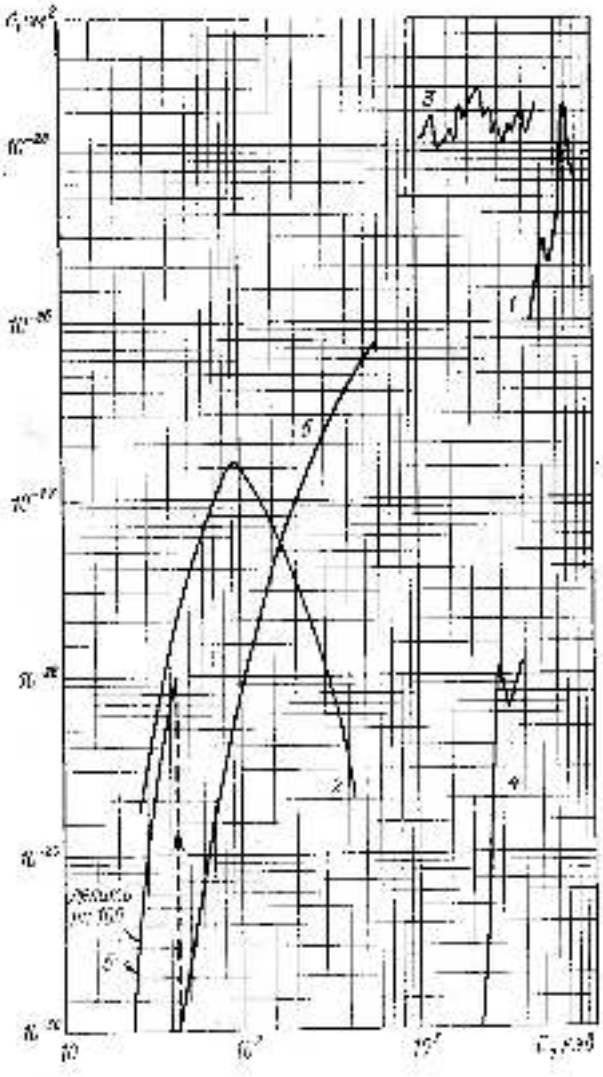


Рис. 43.7. Сечения термоядерных реакций:
1 — $^{7}Li(\alpha, \alpha)$ ^{10}B [70, 88];
2 — $T(d, \gamma)$ ^{5}He [60];
3 — $^{12}C(d, n)$ ^{13}N [90];
4 — $^{16}O(\alpha, \gamma)$ ^{20}Ne [91];
5 — $^{7}Li(p, \alpha)$ ^{4}He [7, 8, 86].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mattaugh J. H. E. e. a. "Nucl. Phys.", 1965, v. 67, p. 1.
2. Ajzenberg-Selove F., Lauritsen T. "Nucl. Phys.", 1959, v. 11, p. 1; 1966, v. 78, p. 1; "Rev. Mod. Phys.", 1955, v. 27, p. 66; "Nucl. Phys.", 1968, v. A114, p. 1.
3. Ajzenberg-Selove F. "Nucl. Phys.", 1970, v. A152, p. 1, 1971, v. A166, p. 1; 1972, v. A190, p. 1.
4. Дейнеко А. С. и др. «Журн. эксперим. и теор. физики», 1957, v. 32, с. 957.
5. Fowler W. A. e. a. "Ann. Rev. Astron. and Astrophys.", 1967, v. 5, p. 525.
6. Davis C. N. "Nucl. Phys.", 1968, v. A110, p. 619.
7. Spinka H., Tombrello T. "Nucl. Phys.", 1971, v. A164, p. 1.
8. Fiedler D., Kunze P. "Nucl. Phys.", 1967, v. A96, p. 610.
9. Burbidge F. M. e. a. "Rev. Mod. Phys.", 1957, v. 29, p. 547.
10. Holmgren H. D., Johnston R. L. "Phys. Rev.", 1959, v. 113, p. 1656.
11. Griffiths G. M. e. a. «Canad. J. Phys.», 1962, v. 40, p. 402.
12. Griffiths G. M., Lai M., Scarfe C. D. "Canad. J. Phys.", 1963, v. 41, p. 724.
13. Arnold W. R. e. a. "Phys. Rev.", 1954, v. 93, p. 483.
14. Cook C. F., Smith J. R. "Phys. Rev.", 1953, v. 89, p. 785.
15. Blair J. M. e. a. "Phys. Rev.", 1948, v. 74, p. 1599.
16. Wenzel W. A., Whaling W. "Phys. Rev.", 1952, v. 88, p. 1149.
17. Sanders J. H., Moffatt J., Roal D. "Phys. Rev.", 1951, v. 81, 003.

18. Preston G., Shaw P. F., Young S. A. "Proc. Roy. Soc.", 1954, v. A226, p. 206.
19. Allered J. C., Phillips D. D., Rosen L. "Phys. Rev.", 1951, v. 82, p. 752.
20. Magnag-Vallette D. e. a. "J. Phys. et Radium", 1960, v. 21, p. 125.
21. Von Engel A., Goodyear C. C. "Proc. Roy. Soc.", 1951, v. A204, p. 445.
22. Вонсов В. В. и др. В сб.: Ядерные реакции на легких ядрах. М., Атомиздат, 1957, с. 15.
23. Гапеев А. С. и др. Сб. [22], с. 26.
24. Brolley J. E., Putnam T. M., Rosen L. "Phys. Rev.", 1957, v. 107, p. 820.
25. Van Oers W. T. M., Brockman K. W. "Nucl. Phys.", 1963, v. 48, p. 625.
26. Даниленко В. А. и др. Сб. [22], с. 7.
27. Hunter G. F., Richards H. T. "Phys. Rev.", 1949, v. 76, p. 1445.
28. Fuller E. G. "Phys. Rev.", 1951, v. 96, p. 1630.
29. Perry J. E., Bame S. J. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1368.
30. Gonnell D. S., Jones G. A. "Nucl. Phys.", 1962, v. 33, p. 102.
31. Fowler J. L., Brolley J. E. "Revs Mod. Phys.", 1956, v. 28, p. 103.
32. Conner J. E., Bonner T. W., Smith J. R. "Phys. Rev.", 1952, v. 88, p. 468.
33. Argo H. V. e. a. "Phys. Rev.", 1952, v. 87, p. 612.
34. Bame S. J., Perry J. E. "Phys. Rev.", 1957, v. 107, p. 1046.
35. Fowler J. L., Stovall E. J. "Phys. Rev.", 1951, v. 82, p. 502.
36. Балабанов Е. М. и др. Сб. [22], с. 49, 57.
37. Гонцова А. М. и др. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1962, т. 42, с. 383.
38. Bonner T. W., Conner J. E., Little A. B. "Phys. Rev.", 1952, v. 86, p. 473.
39. Alfred J. C. "Phys. Rev.", 1951, v. 84, p. 695.
40. Yarnell J. L., Lofberg R. H., Stratton W. R. "Phys. Rev.", 1953, v. 90, p. 292.
41. Киселев А. П., Есепкина Б. Н., Вальтер А. К. «Изв. АН СССР», 1956, т. 100, с. 737.
42. Blair J. M., Hintz N. M., Van Patter D. M. "Phys. Rev.", 1954, v. 96, p. 1023.
43. Ли Га Ен и др. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1960, т. 39, с. 925.
44. Good W. M., Kunz W. E., Moak C. D. "Phys. Rev.", 1954, v. 94, p. 87.
45. Griffiths G. M. e. a. "Canad. J. Phys.", 1961, v. 39, p. 1397.
46. Holmgren H. D., Johnston R. L. "Phys. Rev.", 1959, v. 113, p. 1556.
47. Jennymo J. M. F., Mani G. S., Sadegh A. "Nucl. Phys.", 1962, v. 43, p. 417.
48. Temmer G. M. Proc. Conf. on Direct Interaction and Nucl. Reaction Mechanisms, Padua, 1962. Ed. by E. Clementel and C. Villi, N. Y.—Lond., Gordow and Breach Science Publishers, 1963, v. 1, p. 1013.
49. Whaling W., Bonner T. W. "Phys. Rev.", 1950, v. 79, p. 258.
50. Nickel W. E. "Phys. Rev.", 1954, v. 95, p. 426.
51. Роуз Д., Клаус М. Физика плазмы и управляемые термоядерные реакции. М., Госатомиздат, 1963.
52. Birk M. e. a. "Nucl. Phys.", 1963, v. 41, p. 58.
53. Hirst F., Johnston J., Pool M. J. "Philos. Mag.", 1954, v. 45, p. 762.
54. Macklin R. L., Bunta H. E. "Phys. Rev.", 1955, v. 97, p. 753.
55. Jennymo J. M. F. e. a. "Nucl. Phys.", 1962, v. 38, p. 11.
56. Heydenburg N. P. e. a. "Phys. Rev.", 1948, v. 77, p. 805.
57. Вальтер А. К. и др. «Атомная энергия», 1961, т. 10, с. 577.
58. Timm U. "Naturwissenschaften", 1957, Bd. 44, s. 279; 1958, Bd. 45, S. 204.
59. Cassoughon V. e. a. "Nucl. Phys.", 1962, v. 33, p. 449; 1963, v. 41, p. 164; 1962, v. 42, p. 353.
60. Тесков И. Б. и др. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1962, т. 42, с. 353.
61. Wilkinson D. H. "Philos. Mag.", 1954, v. 45, p. 259.
62. Hunt S. E. "Proc. Phys. Soc.", 1952, v. A65, p. 582.
63. Bonner T. W., Evans J. E. "Phys. Rev.", 1948, v. 73, p. 666.
64. Norbeck E., Littlejohn C. S. "Phys. Rev.", 1957, v. 108, p. 754.
65. Talbott F. L., Bunta A., Weissenbach G. C. "Phys. Rev.", 1951, v. 82, p. 1.
66. Resnick J., Hanna S. S. "Phys. Rev.", 1951, v. 82, p. 403.
67. Biggerstaff J. A. e. a. "Nucl. Phys.", 1962, v. 30, p. 637.
68. Вальтер А. К., Бацев П. Н. и др. «Укр. физ. журн.», 1961, т. 6, с. 437.
69. Bonner T. W. e. a. "Phys. Rev.", 1956, v. 102, p. 1348.
70. Gibbons J. H., Macklin R. L. "Phys. Rev.", 1965, v. 137, p. 1508; 1959, v. 114, p. 571.
71. Day R. B., Huus T. "Phys. Rev.", 1954, v. 95, p. 1003.
72. Bach G. G., Livesay D. J. "Philos. Mag.", 1956, v. 46, p. 824.
73. Boreham W. F., Freeman J. M. "Philos. Mag.", 1956, v. 41, p. 337.
74. Brown A. B., Snyder C. W., Fowler W. A. e. a. "Phys. Rev.", 1951, v. 82, p. 195.
75. Burke W. H., Risser J. R., Phillips G. G. "Phys. Rev.", 1954, v. 93, p. 186.
76. Symons C. D., Treacy P. B. "Nucl. Phys.", 1960, v. 46, p. 93.
77. Beckman O., Huus T., Zupancic C. "Phys. Rev.", 1953, v. 91, p. 606.
78. Hudspeth E. L., Simpson C. P. "Phys. Rev.", 1949, v. 76, p. 1150.
79. Bailey C. L., Stratton W. R. "Phys. Rev.", 1950, v. 77, p. 194.
80. Hall R. N., Fowler W. A. "Phys. Rev.", 1950, v. 77, p. 197.
81. Lamb W. A. S., Hester R. E. "Phys. Rev.", 1957, v. 107, p. 666.
82. Parker P. D., Kavanagh R. M. "Phys. Rev." 1963, v. 131, p. 2578.
83. Kagotani K. e. a. "Nucl. Phys.", 1969, v. A128, p. 325.
84. Dwarakanath M. R., Winkler H. "Phys. Rev.", 1971, v. C4, p. 1552.
85. Van der Zwan L., Geiger K. W. "Nucl. Phys.", 1970, v. A152, p. 481.
86. Haworth L. L., King L. D. P. "Phys. Rev.", 1938, v. 54, p. 86.
87. Gotthinhardt W. e. a. "Z. Phys.", 1966, Bd. 197, S. 58.
88. Macklin R. L., Gibbons J. H. "Phys. Rev.", 1968, v. 165, p. 1147.
89. Безотосный В. М. и др. «Ядерная физика», 1969, т. 10, с. 225.
90. Jaszczak R. J. e. a. "Phys. Rev.", 1969, v. 181, p. 1426.
91. Adams A. e. a. "Nucl. Phys.", 1969, v. A131, p. 630.
92. Parker P. D. "Phys. Rev.", 1966, v. 150, p. 851.
93. Vaughn E. J. e. a. "Phys. Rev.", 1970, v. C2, p. 1657.

ГЛАВА 44

ПРОХОЖДЕНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

44.1. ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

e — электрон

p — протон

d — дейтон (ядро ^2_1H)

α — α-частица (ядро ^4_2He)

f — осколок деления

γ — γ-квант

$m_{0(x)}$ — масса покоя частицы x

m_x — масса частицы x

v_x — скорость частицы x

E_x — кинетическая энергия частицы x

β — отношение скорости частицы к скорости света, v/c

μ — массовый или линейный коэффициент ослабления при экспоненциальном законе поглощения

z и Z — заряды частицы и среды (в единицах заряда электрона)

трек. — траектория частицы в поглощающей среде

R_x — пробег частицы; x — путь частицы до полной потери ионизующей способности; R_x — измеряется в направлении первоначального движения или, если это оговорено (для электронов), вдоль трека

$Hρ$ — произведение напряженности поля на радиус кривизны траектории заряженной частицы в магнитном поле

$\overline{R}$ — *пробег частиц* — средний арифметический пробег частиц данного сорта и энергии

$R_{экстр}$ — *экстраполированный пробег*, определяется экстраполяцией к нулевой интенсивности наиболее крутой части зависимости числа проходящих через слой поглотителя частиц от толщины поглотителя. Используется главным образом для описания пробега электронов в направлении первоначального движения.

$-dE/dx$ — *тормозная способность* — характеристика удельных потерь энергии в веществе частицей данного сорта отнесенных к плотности энергии.

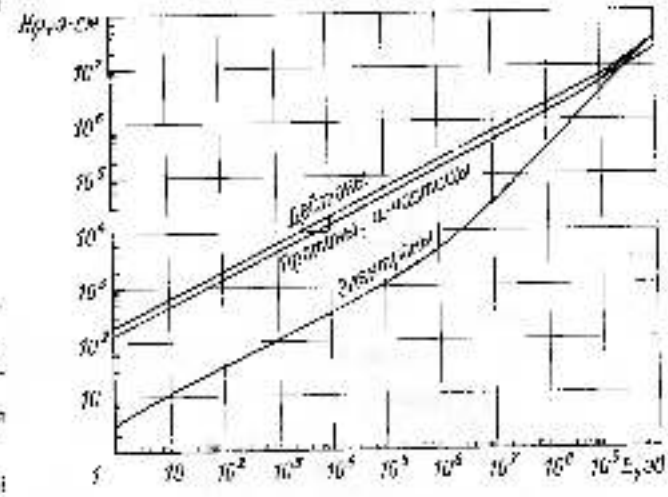


Рис. 44.1. Связь между энергией E заряженных частиц и параметром $Hρ$ [1].

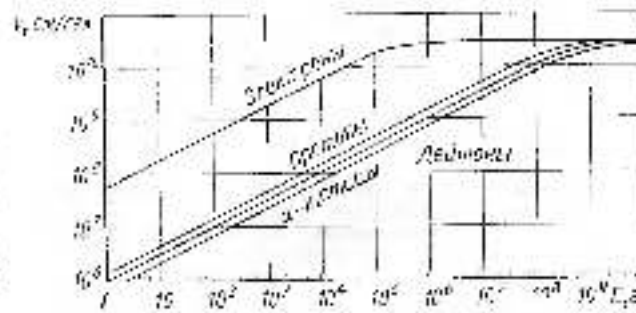


Рис. 44.2. Связь между энергией E и скоростью v заряженных частиц [1].

44.2. КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧАСТИЦ [2]

Масса движущейся частицы

$$m_x = m_0 \frac{E + m_0c^2}{m_0c^2} = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Параметр $Hρ$ (рис. 44.1) определяется формулой

$$Hρ = \frac{1}{300z}\sqrt{E^2 + 2Em_0c^2},$$

где $Hρ$, 10^6 [э·см]; E и m_0c^2 — кинетическая энергия и энергия покоя, *Мэв*.

Скорость частицы (рис. 44.2):

$$v = c\sqrt{1-\left(\frac{m_0c^2}{E + m_0c^2}\right)^2}.$$

Связь между энергией и импульсом частицы:

$$E = \sqrt{c^2p^2 + m_0^2c^4} - m_0c^2,$$

p — импульс частицы.

44.3. ПРОХОЖДЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

Тяжелые заряженные частицы ($m \gg m_e$) теряют энергию постепенно, в основном за счет ионизации и возбуждения атомов тормозящей среды. Некоторая часть выбитых со своих орбит электронов тормозящей среды (δ-электроны) имеет сравнительно высокую энергию вплоть до $4\,(m/M)E$ (где m/M — отношение массы электрона к заряженной частице) и производит вторичную ионизацию. Полная ионизация, т. е. сумма первичной и вторичной ионизаций, обычно в три раза превышает первичную. Параллельный пучок тяжелых заряженных частиц, проходя через вещество, почти не рассеивается. Так, для протонов с энергией 1 *Мэв* вероятность рассеяния на угол, превышающий 10°, равна 0,53% на 1 см пробега в атмосфере; разброс пробегов моноэнергетических частиц не превышает 1—2%.

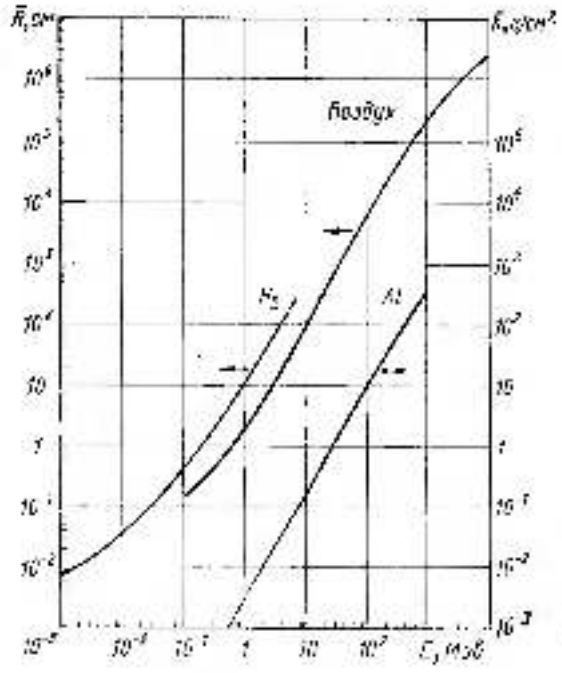


Рис. 44.3. Связь между энергией E и пробегом $\bar{R}$ протонов в H_2 [1, 3], воздухе [1] и Al [1]. Стрелками указана шкала кривых по оси ординат.

Таблица 44.1

Пробег протонов высокой энергии, г/см², в Be, C, Al, Cu, Pb и воздухе [13]

E, Мэв	Be	C	Воздух	Al	Cu	Pb
50	2,722	2,488	2,557	2,929	3,580	5,275
75	5,654	5,109	5,295	6,021	7,321	10,72
100	9,461	8,623	8,835	10,01	12,01	17,17
150	19,37	17,60	18,09	20,34	24,35	34,11
200	31,91	29,02	29,64	33,34	39,71	55,14
300	65,38	57,53	58,68	65,79	77,82	107,0
400	101,4	91,90	93,73	104,9	123,5	166,6
500	144,1	132,0	133,3	148,9	174,0	227,6
600	191,3	173,4	176,3	196,7	230,5	312,0
700	241,3	218,6	222,0	247,0	289,5	390,5
800	293,7	265,9	269,8	300,0	350,9	472,2
1000	404,0	365,3	370,6	412,0	479,4	649,2
2000	1007	907,3	916,3	1014	1168	1545
3000	1633	1469	1463	1634	1871	2445
5000	2679	2394	2540	2687	3248	4185
7000	4100	3675	3565	4046	4580	5847
10 000	5869	5270	5081	5777	6612	8234

Таблица 44.2

Относительная и максимальная тормозная способность различных веществ для протонов [1]

Чем меньше Z, тем больше относительная (по отношению к воздуху) тормозная способность вещества $(dE/dx)_{отн}$; E_0 — энергия, при которой тормозная способность вещества максимальна; $(dE/dx)_{макс}$ — максимальное значение тормозной способности.

Вещество	$-(dE/dx)_{отн}$			E_0, Мэв	$-(dE/dx)_{макс}$, Мэв·см²/г
	100 Мэв	2 Мэв	1000 Мэв		
Водород	2,4	1,53	1,16	30	1000
Воздух	1	1	1	100	630
Алюминий	0,68	0,82	0,91	72	640
Золото	0,13	0,34	0,61	160	100

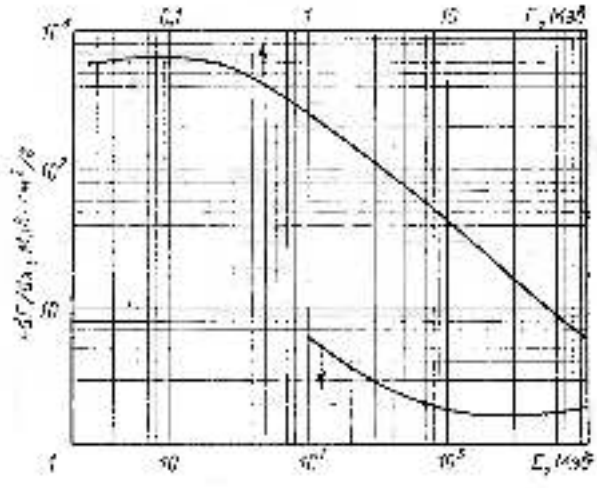


Рис. 44.4. Тормозная способность $-dE/dx$ воздуха для протонов как функция их энергии E [1].

Пробег дейтонов, α-частиц и других тяжелых заряженных частиц

Связь между пробегом протона и пробегом другой заряженной частицы другой массы (кроме электронов) дается формулой [4].

$$R_x(E) = \frac{m_x}{m_p} R_p\left(\frac{m_p}{m_x} E\right).$$

Например, пробег дейтонов может быть определен по пробегу протонов с энергией $E_d = 2E_p$.

Для частиц, заряд которых больше единицы и сохраняет постоянное значение на основном участке пробега справедливо соотношение [4]

$$R_p(v) = \frac{m_p}{m_x} z^2 R_x(v) + C,$$

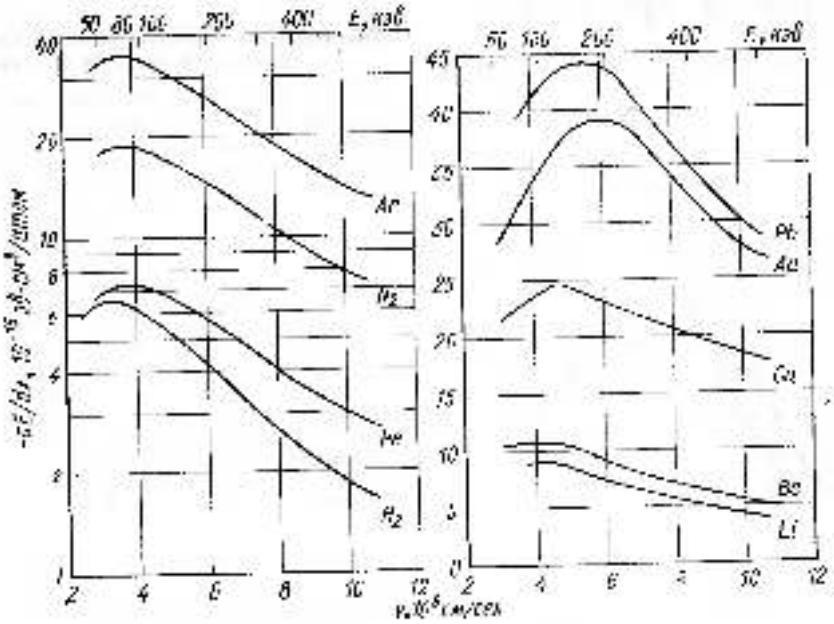


Рис. 44.5. Тормозная способность — dE/dx для протонов как функции их энергии E и скорости v в различных веществах [3].

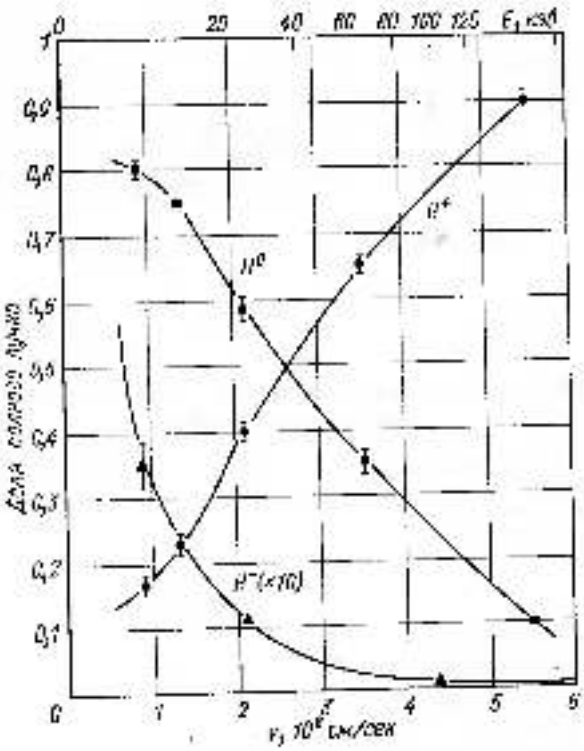


Рис. 44.6. Равновесие между H^+, H^0 и H^- в алюминиевой фольге как функция энергии E и скорости v протонов [3].

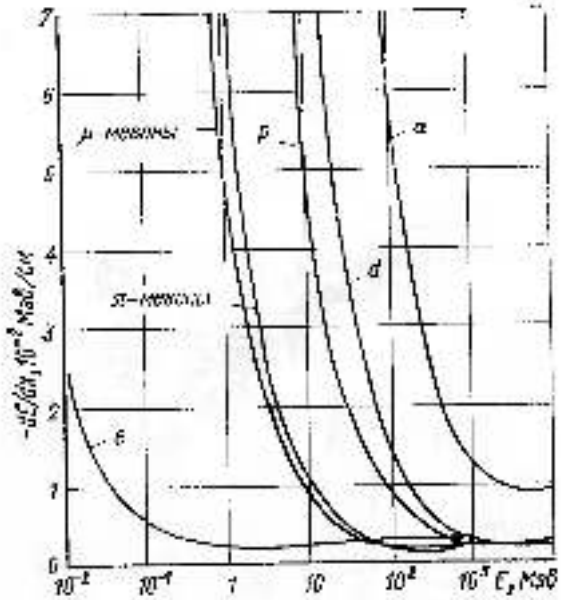


Рис. 44.7. Удельные потери энергии — dE/dx различными заряженными частицами в воздухе [4].

где постоянная C учитывает неупругость ударов и энергию электронов движущейся частицей и протоном. Для α-частиц

$$R_\alpha(E) = 1{,}00 R_0(0{,}972E) - 0{,}2, \quad E > 0{,}5 \text{ Мэв}.$$

Пробег α-частиц в различных веществах (рис. 44.8 и 44.9) может быть рассчитан по их пробегу в воздухе с помощью эмпирической формулы [4]:

$$R_{0,\,x}(E) = 0{,}56 R_{0,\,\text{возд}}(E) A^{1/3},$$

где $R_{0,\,x}$ — пробег в веществе, *мг/см²*; $R_{0,\,\text{возд}}$ — пробег в воздухе, *см* (15 °C, 760 *мм рт. ст.*); A — массовое число вещества.

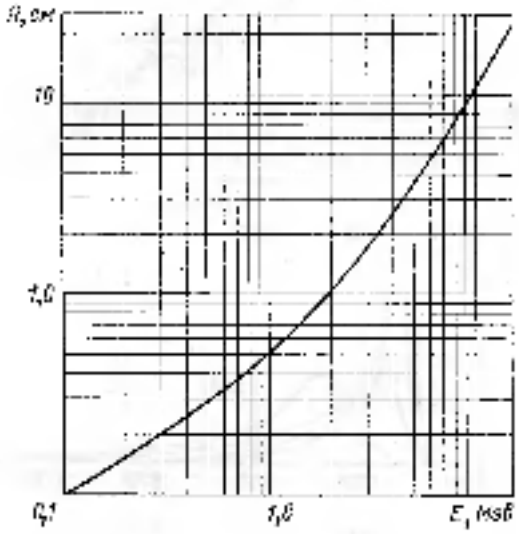


Рис. 44.8. Пробег α-частиц R в воздухе (15 °C, 760 *мм рт. ст.*) как функция энергии α-частиц [1].

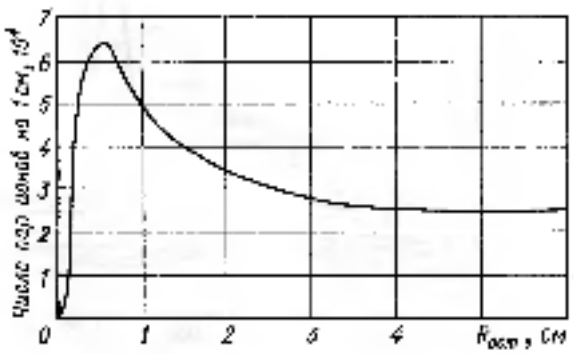


Рис. 44.9. Удельная ионизация воздуха (15 °C, 760 *мм рт. ст.*) α-частицами в зависимости от остаточного пробега $R_{ост}$, т. е. расстояния от конца пробега данной частицы [4].

Таблица 44.3

Энергия E_i, расходуемая α-частицами на образование пары ионов в различных газах [1]

Газ	E_i, Мэв	Газ	E_i, Мэв
Xe	21,4	O_2	32,3
Kr	22,3	CO_2	32,8
Ar	24,3	CO	33,9
C_2N_4	26,9	Воздух	34,7
Ne	27,1	H_2	35,0
CH_4	29,3	N_2	36,2
He	30,2		

Прохождение осколков деления через вещество

Заряд осколка деления при прохождении через вещество непрерывно уменьшается. Эффективный заряд осколка определяется приближенным соотношением [1]

$$z_{эф} \simeq Z^{1/3} k v / e^2,$$

где Z — заряд ядра осколка; e — заряд электрона, ед. СГСЭ.

Между пробегами осколков деления и α-частиц, имеющих одну и ту же скорость, существует приближенное соотношение [1] (рис. 44.10 и 44.11),

$$\frac{R_F}{R_\alpha} \simeq 7 \frac{A_F}{z_F^{1/3}} \left(\frac{e^2}{\hbar v}\right)^2.$$

Таблица 44.4

Усредненные отдельно по тяжелой и легкой группам свойства осколков деления ^{235}U [4]

Параметр	Группа	
	легкая	тяжелая
Массовое число	95	139
Атомный номер	38	54
Начальный заряд	+20	+22
Начальная энергия, Мэв	97	65
Пробег в воздухе R, *мм*	27	21

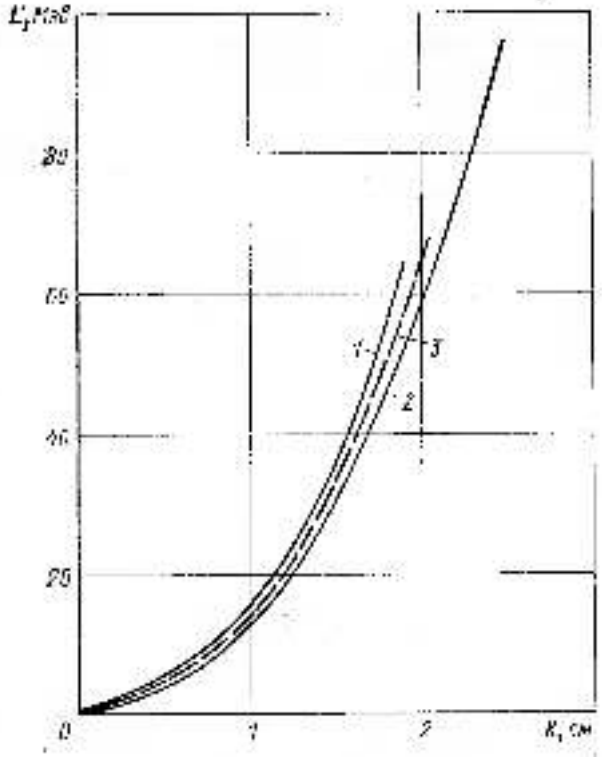


Рис. 44.10. Зависимость пробега осколка деления в воздухе R от оставшейся у него энергии E [5]: 1 — тяжелый осколок; 2 — легкий осколок; 3 — усредненная кривая.

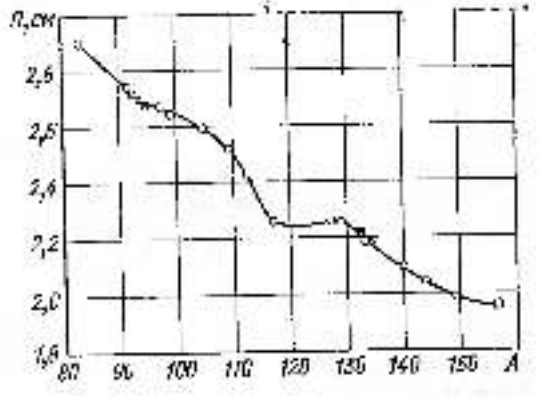


Рис. 44.11. Зависимость экстраполированного пробега R осколков деления ^{235}Pu в воздухе (15° С, 760 мм рт. ст.) от их массового числа A [4].

44.4. ПРОХОЖДЕНИЕ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

По мере торможения в веществе монознергетический параллельный пучок электронов трансформируется в диффузный поток со сложным пространственно-энергетическим распределением (рис. 44.12—44.16). Для элект-

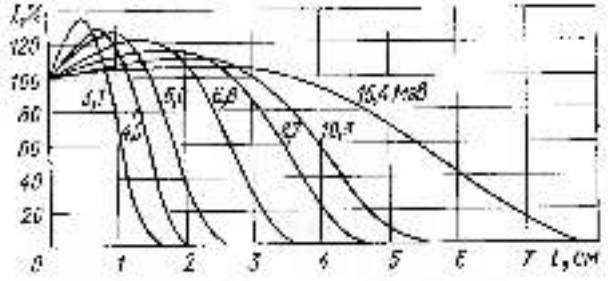


Рис. 44.12. Распределение энерговыделения по глубине при облучении мишени электронами различных энергий [6]. Все кривые нормированы к 100% на начальному участку.

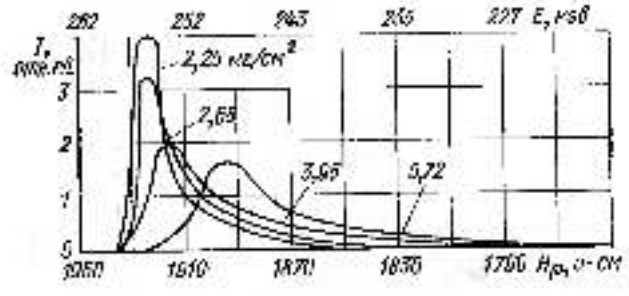


Рис. 44.13. Энергетическое распределение в пучке электронов после прохождения слоев различной толщины. Первоначальная энергия электронов 263 кэв ($H\rho$ — 1948) [1].

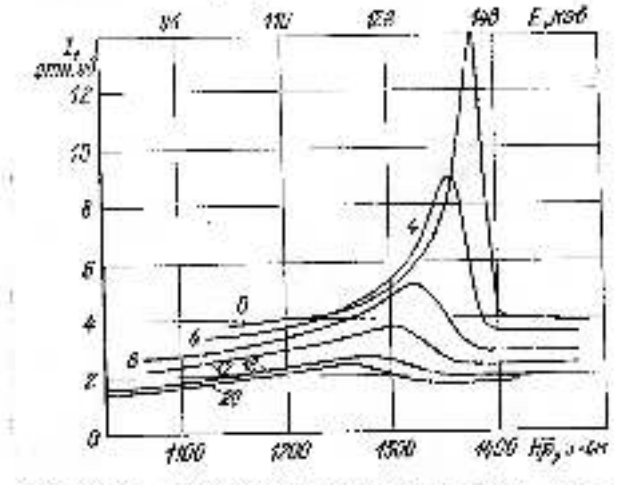


Рис. 44.14. Энергетическое распределение в пучке электронов после прохождения или стопки медных фольг [6]. Кривые соответствуют прохождению пучка через 0; 4; 8; 12; 16; 20 медных фольг по 0,09 г/см² каждая.

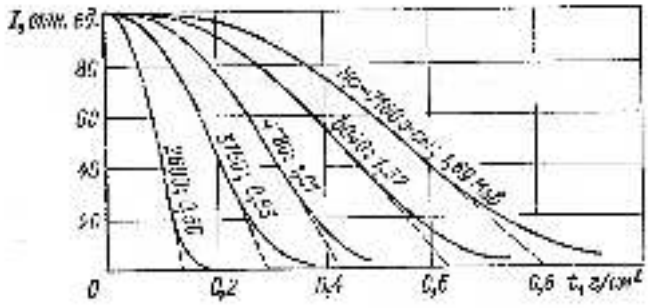


Рис. 44.15. Поглощение параллельного моноэнергетического пучка электронов различной энергии в алюминии [6].

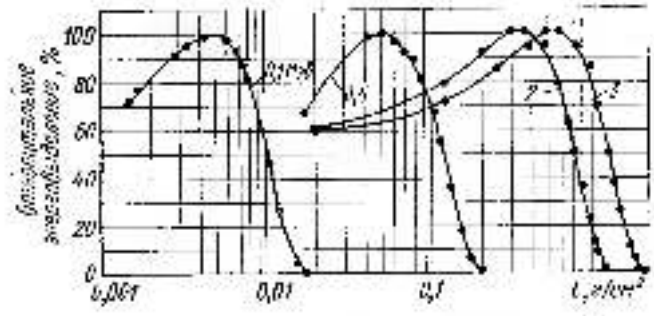


Рис. 44.16. Распределение энерговыделения по глубине t алюминия для электронов различной энергии [6].

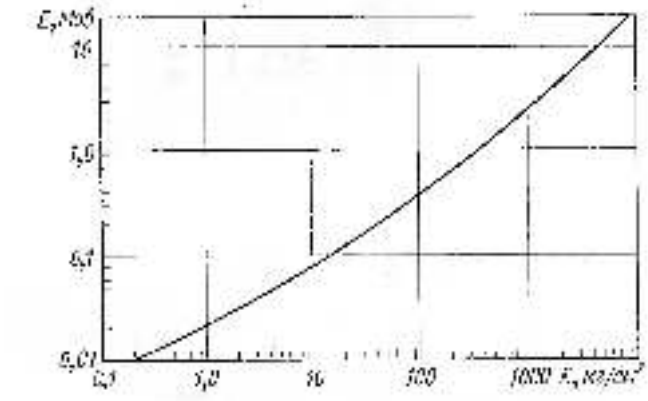


Рис. 44.17. Связь экстраполированного пробега R и энергии электронов в алюминии [4].

ренных квантов имеет смысл только понятия экстраполированного пробега и пробега вдоль трека (рис. 44.17 и 44.18). В диапазоне от 30 кэв до 3 Мэв зависимость экстраполированного пробега электронов в алюминии от энергии хорошо описывается формулой Одиммерсфилда [7]:

$$E = 1{,}92\,(R^{0} + 0{,}22R)^{1/2},$$

где E — энергия электронов, Мэв; R — пробег в алюминии, см.

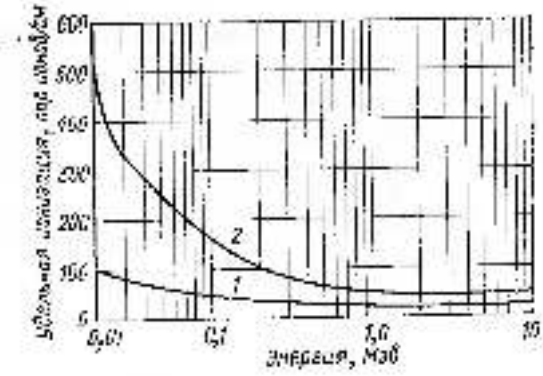


Рис. 44.18. Первичная (1) и полная (2) ионизация воздуха электронами различной энергии [4].

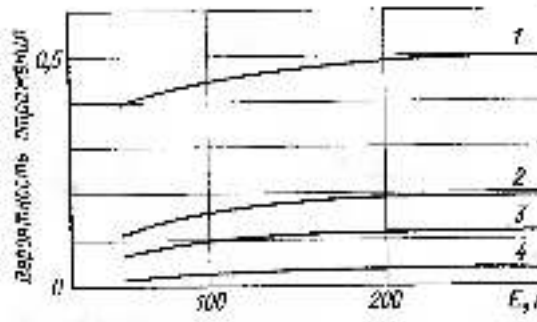


Рис. 44.19. Зависимость вероятности отражения электрона, нормально падающего на поверхность различных материалов, от энергии электрона E [7]: 1 — вольфрам; 2 — свинец; 3 — алюминий; 4 — графит.

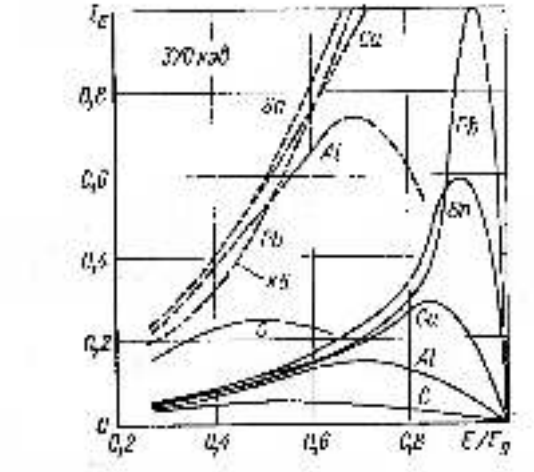


Рис. 44.20. Энергетический спектр электронов, отраженных от различных материалов [6]. E_0 = 370 кэв — энергия падающих электронов.

Значительная часть электронов отражается от мишени (рис. 44.19 и 44.20).

Если источник электронов имеет спектр, подчиняющийся закону простого β-распада, с граничной энергией $E_{макс}$, то число электронов, прошедших через слой поглотителя, убывает с увеличением толщины поглотителя приблизительно экспоненциально вплоть до коэффициента ослабления —20 (рис. 44.21).

Толщина поглотителя, необходимая для уменьшения числа электронов вдвое (этой сильнейшего ослабления) приблизительно равняется [7]:

$$d \approx 0{,}096 \frac{Z}{A} E_{макс}^{3/2},$$

где d — толщина слоя полуторного ослабления, $г/см^2$; Z и A — заряд и массовое число ядра-мишени; $E_{макс}$ — граничная энергия, $Мэв$. Формула справедлива для всех элементов от водорода до меди.

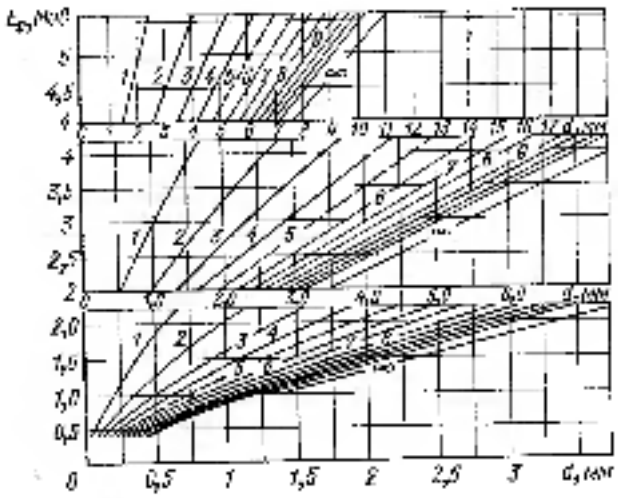


Рис. 44.21. Абсорбционные кривые для определения максимальной энергии β-спектра. E_0 — энергия; d — толщина алюминия, необходимая для уменьшения интенсивности в 2^n раз. Значение n проставлено в рамках кривых.

Если пучок электронов проходит через достаточно тонкую фольгу, так что потерями энергии можно пренебречь, то средний квадрат угла рассеяния электронов в лабораторной системе координат после прохождения фольги равен [1]:

$$\overline{\theta^2} = 0{,}157 \frac{Z(Z+1)}{A} \frac{d}{\rho\beta^2} \ln\left[4\pi Z^{1/3} N d \left(\frac{h}{mv}\right)^2\right],$$

где d — толщина фольги, $г/см^2$; ρ — импульс; m — масса и v — скорость электрона; $[pv] = [Мэв]$; N — число атомов в 1 $см^3$ вещества; A и Z — массовое число и заряд ядра вещества фольги.

Данные табл. 44.5 позволяют оценить максимальную толщину водоподобной мишени при неравномерности облучения ± 20% среднего значения.

Таблица 44.5

Максимально допустимая толщина водоподобной мишени при энергетической доле облучения на глубине не менее 60% максимальной [8]

Энергия, $Мэв$	Толщина мишени, $см$, при облучении		Энергия, $Мэв$	Толщина мишени, $см$, при облучении	
	с одной стороны	с двух сторон		с одной стороны	с двух сторон
0,5	0,15	0,35	5	1,8	4,4
1	0,3	0,7	10	3,7	8,7
2	0,7	1,7	15	5,5	13,0
3	1,1	2,6			

Таблица 44.6

Характеристики торможения электронов в воде и биологической ткани [9]

R — пробег (путь трека); $-dE/dx$ — дифференциальные потери энергии; dI/dx — удельная первичная ионизация; $\bar{x}$ — среднее расстояние между первичными ионизациями.

Энергия, $Мэв$	R, $мкм$	$-dE/dx$, $кэв/мкм$	dI/dx, пар ионов/$мкм$	$\bar{x}$, 10^{-3} $см$
1	0,053	19,3	233	4,3
1,5	0,101	9,4	163	6,1
2	0,160	7,7	127	7,9
3	0,312	5,7	88	11,3
4	0,509	4,6	68	14,7
6	1,025	3,36	47	21,2
8	1,697	2,66	36,6	27,3
10	2,52	2,20	30,1	33,2
15	5,11	1,67	21,4	47
20	8,47	1,34	16,7	60
30	17,33	0,98	11,6	86
40	29,83	0,78	9,3	108
60	58,67	0,598	6,7	149
80	96,49	0,482	5,4	185
100	141	0,417	4,6	216
150	278	0,328	3,55	282
200	444	0,284	3,12	321
300	832	0,238	2,51	398
400	1275	0,217	2,23	448
500	1740	0,205	2,11	473

Мощность тормозного излучения при прохождении быстрых электронов через тонкую мишень может быть рассчитана по формуле [9]:

$$W_{тор} = 19(E + 511) Z^2 \frac{\rho d}{A} i,$$

где $W_{тор}$ — мощность тормозного излучения, $вт$; E — энергия электронов, $кэв$; Z, A — заряд ядра и массовое число вещества; ρ — плотность мишени, $г/см^3$; d — толщина мишени, $см$; i — ток электронов, $ма$. Формула справедлива для $E \leqslant 1$ $Мэв$.

Для толстой мишени, в которой электроны полностью тормозятся, интенсивность нефильтрованного тормозного излучения приблизительно равна [9]:

$$W_{тор} = 3 \cdot 10^{-6} E^{1,75} Z i.$$

Спектральное распределение тормозного γ-излучения (исключая характеристические рентгеновские излучения) почти не зависит от атомного номера мишени, а относительное спектральное распределение $h\nu/E$ почти не зависит от энергии моноэнергетических электронов или максимальной энергии электронов β-спектра (рис. 11.23). Угловое распределение тормозного излучения сосредоточено преимущественно вперед по пути замедляющихся электронов, его диаграмма направленности тем ýже, чем больше энергия электронного пучка (рис. 11.22).

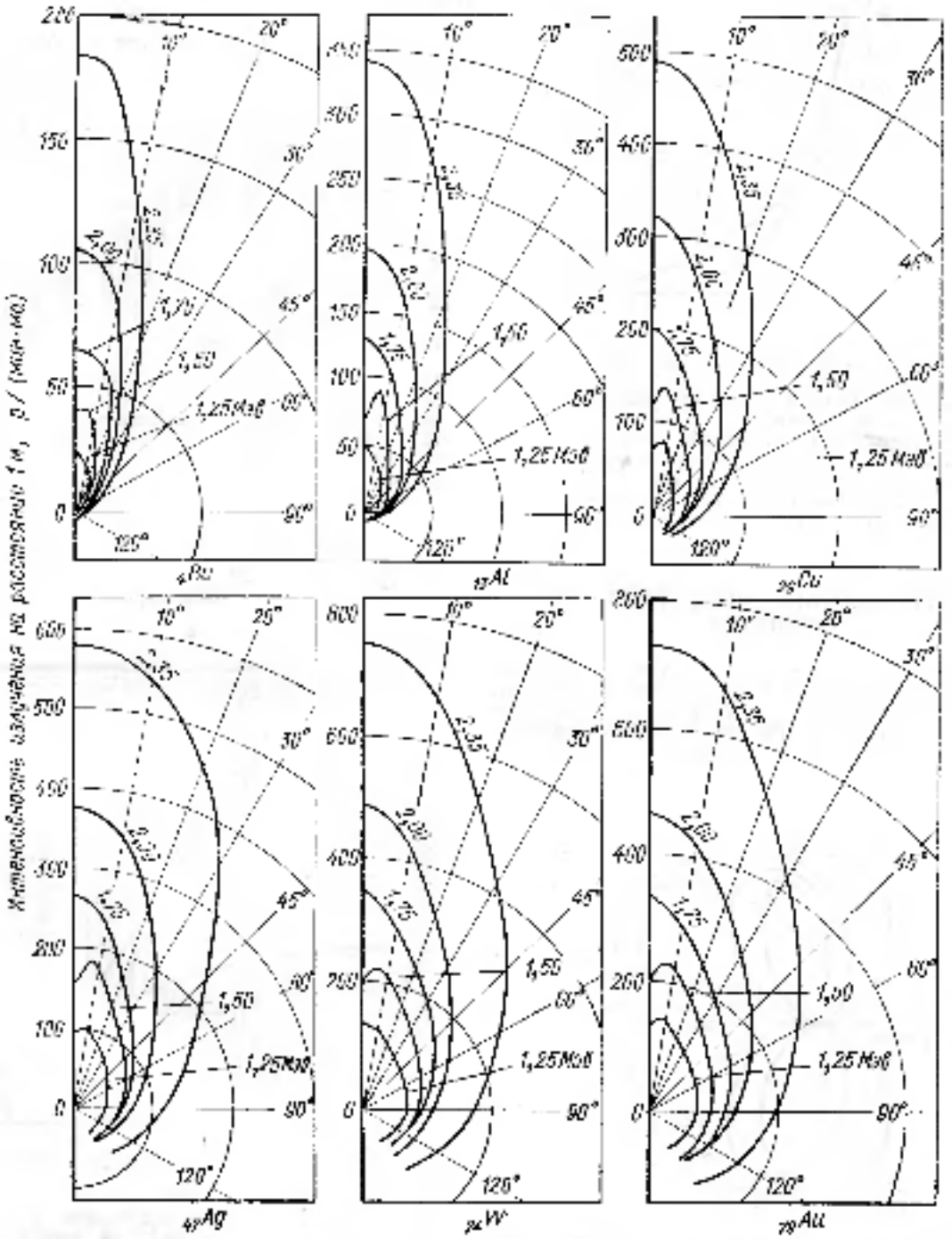


Рис. 11.22. Интенсивность и угловое распределение тормозного излучения, испускаемого моноэнергетическими электронами в мишенях, толщина которых немного больше максимальной длины свободного пробега электронов [7].

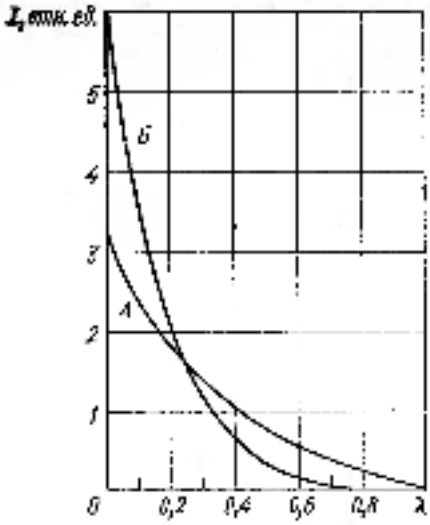


Рис. 44.23. Относительное распределение интенсивности тормозного излучения, образующегося при потере скорости электронами. А — моноэнергетические электроны энергии E_0; Б — спектр β-излучения с максимальной энергией E_0. Параметр $\lambda = h\nu/E_0$. Площади под обеими кривыми нормированы к единице [7].

44.5. ПРОХОЖДЕНИЕ γ-ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

При прохождении через вещество γ-излучение испытывает три основных типа взаимодействия: фотоэффект, комптоновское рассеяние и эффект образования электронно-позитронных пар (рис. 44.24, 44.25). При фотоэффекте γ-квант исчезает, передав всю свою энергию

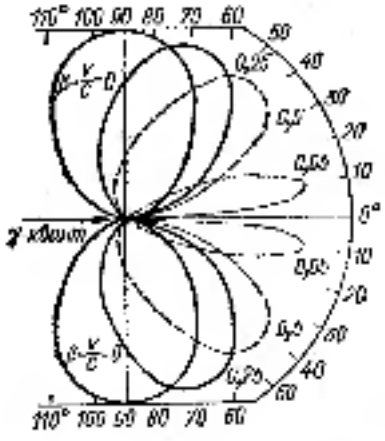
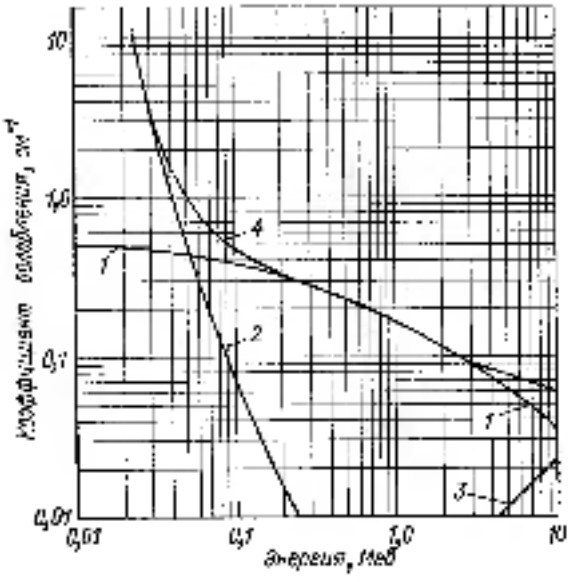


Рис. 44.24. Угловые распределения фотоэлектронов для малой (сплошные линии) и большой (прерывистые линии) энергий фотонов. Значение β около кривых соответствует энергии фотоэлектронов [14].

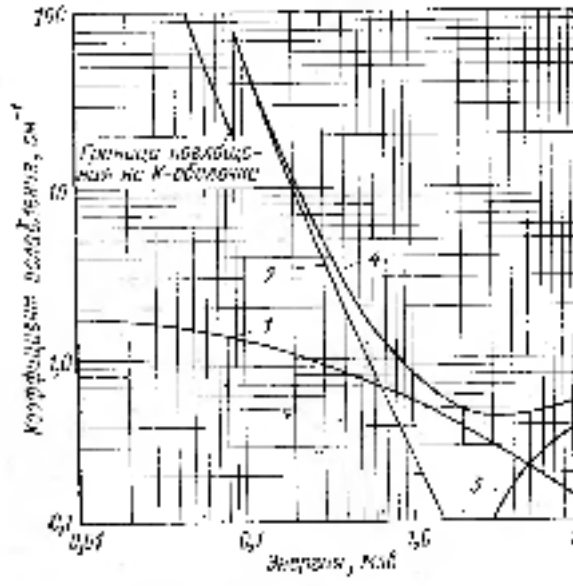
сопутствующему электрону. Эффективное сечение фотоэффекта для γ-квантов малой энергии характеризуется ступенчатой зависимостью от длины волны. Эмпирическая формула Бакторина, описывающая величину фотоэффекта для длин волн, меньших λ_K (граничная длина волны, за которой начинается поглощение на K-оболочке), имеет вид [14]:

$$\mu_\phi = \rho C Z^4 - \rho D Z^5.$$

Здесь μ_ϕ — линейный коэффициент ослабления пучка γ-квантов за счет фотоэффекта, см$^{-1}$; ρ — плотность,



а



б

Рис. 44.25. Коэффициенты ослабления γ-квантов в алюминии (а) и свинце (б) [7] за счет различных процессов: 1 — комптон-эффект; 2 — фотоэффект; 3 — образование пар; 4 — полный коэффициент ослабления.

г/см²; λ — длина волны, $\bar{\lambda}$; C и D — эмпирические константы, значения которых для ряда элементов приведены в табл. 44.7.

Таблица 44.7

Константы формулы Викторина [4]

Элемент	Z	C	D	λ_K, Å
C	6	1,211	0,0185	43,6
N	7	2,034	0,0293	31,1
O	8	3,161	0,05745	23,0
Al	13	14,65	0,8583	7,955
Fe	26	129	26,41	1,739
Cu	29	178,9	49,09	1,377
Br	35	313,7	127	0,918
Ag	47	868,8	624,6	0,4844
Pb	82	9657	13 958	0,1404
Вода	—	2,808	0,06873	(23,3)
Воздух	—	2,707	0,1017	(23,5)

Угловое распределение фотоэлектронов, вырванных из атома при фотоэлектрическом рассеянии, показано на рис. 44.25.

Длина волны γ-кванта при комптоновском рассеянии на свободном электроне увеличивается на $\Delta\lambda$ [9]:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1-\cos\psi) = 0{,}0242\,(1-\cos\psi),\ \text{Å}$$

где ψ — угол рассеяния γ-кванта.

Таблица 44.8

Сечения комптоновского рассеяния σ_K γ-квантов, рассчитанные на один электрон [7]

E, Мэв	σ_K, барн	E, Мэв	σ_K, барн	E, Мэв	σ_K, барн
0,010	0,6370	0,3	0,3535	6	0,09320
0,015	0,6370	0,4	0,3107	8	0,06850
0,020	0,6170	0,5	0,2692	10	0,05100
0,030	0,5960	0,6	0,2375	15	0,02775
0,040	0,5780	0,8	0,2550	20	0,03024
0,050	0,5610	1,0	0,2112	30	0,02190
0,060	0,5460	1,5	0,1716	40	0,01746
0,080	0,5170	2,0	0,1364	50	0,01450
0,100	0,4929	3,0	0,1151	60	0,01244
0,150	0,4450	4,0	0,0980	80	0,01088
0,200	0,4066	5,0	0,0920	100	0,00890

Максимальное значение $\Delta\lambda$ (при рассеянии назад) равно удвоенной комптоновской длине волны 0,0484 Å, что соответствует 255,5 кэв. Поэтому рассеянные γ-кванты не могут иметь большей энергии при обратном рассеянии. На рис. 44.26 представлены дифференциальные, а в табл. 44.8 — полные сечения комптоновского рассеяния в зависимости от энергии γ-квантов. В табл. 44.9 даны энергии γ-квантов, испытавших комптоновское рассеяние.

Эффективное сечение процесса образования пар $\sigma_{пар}$ равно нулю при $h\nu < 2m_0c^2$ [1, 11].

Для энергий в несколько мегаэлектронвольт $\sigma_{пар} \sim Z^2(h\nu - 2m_0c^2)$. Для больших энергий $\sigma_{пар} \sim Z^2 \ln(h\nu)$.

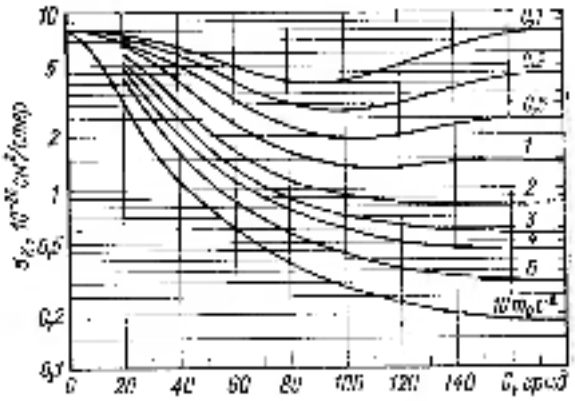


Рис. 44.26. Зависимость комптоновского дифференциального сечения рассеяния на один электрон σ_K (0) от энергии $E/E_1 = h\nu/mc^2$ (цифры у кривых) и угла рассеяния θ γ-квантов [7].

Таблица 44.9

Энергия γ-квантов, Мэв, испытавших комптоновское рассеяние [7]

Угол рассеяния, град	Энергия падающих γ-квантов, Мэв			
	0,5	1,25	3,0	5,0
0	0,4925	1,214	2,749	5,016
20	0,4715	1,066	2,297	3,481
30	0,4406	0,900	1,663	2,300
40	0,4051	0,789	1,215	1,576
60	0,3232	0,550	0,749	0,857
90	0,2501	0,357	0,428	0,461
120	0,1966	0,273	0,300	0,316
150	0,1743	0,220	0,246	0,256
180	0,1665	0,208	0,231	0,239

Прохождение узкого монохроматического пучка γ-квантов через вещество

Всякое взаимодействие γ-кванта с веществом выводит его из узкого пучка, поэтому ослабление такого пучка происходит экспоненциально по мере увеличения протяженности среды l:

$$J = J_0 \exp(-\mu l).$$

Линейный коэффициент ослабления μ, определяемый всеми парциальными коэффициентами взаимодействия:

$$1/\mu = N(\sigma_\phi + \sigma_K + \sigma_{пар}).$$

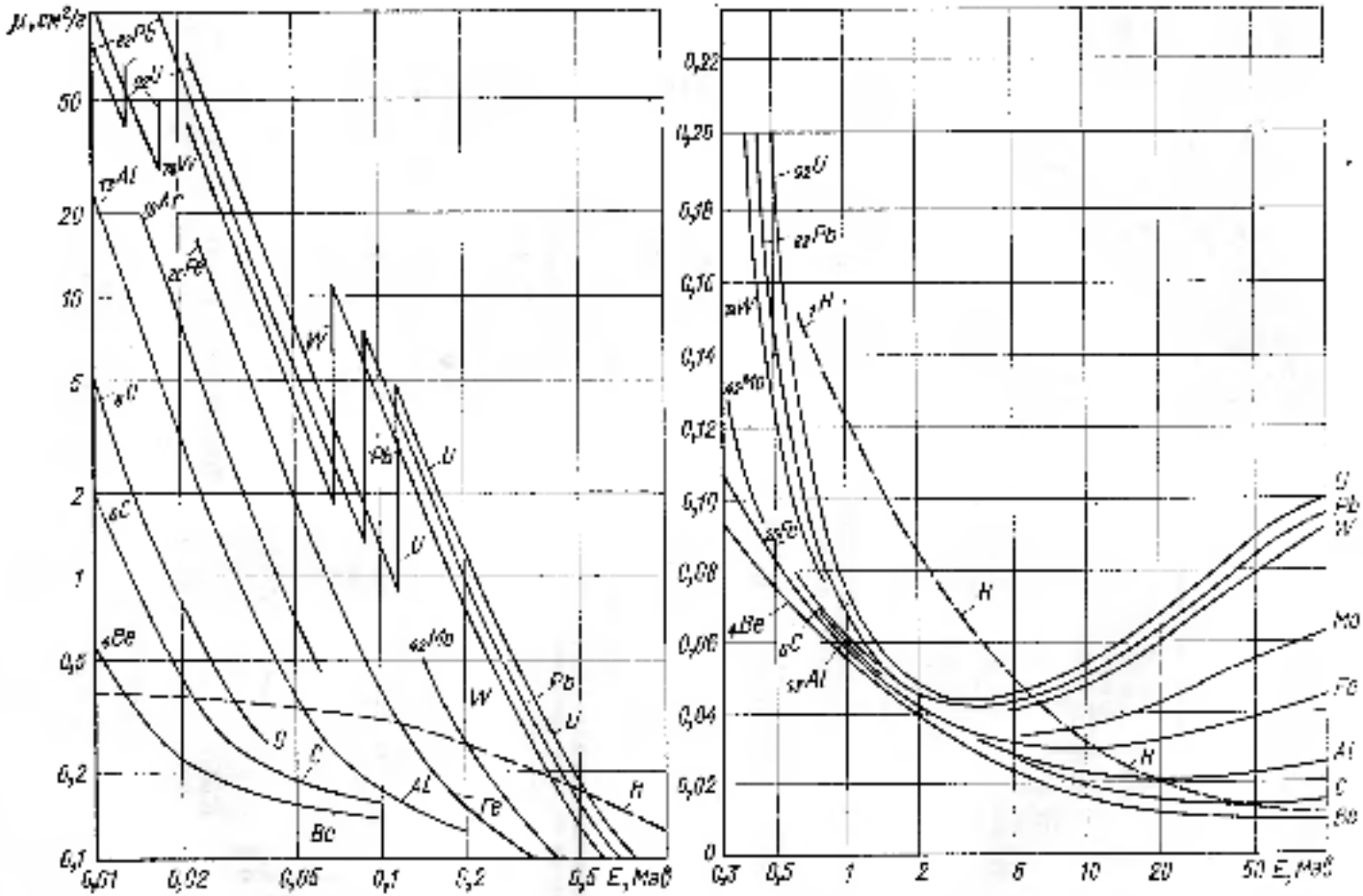
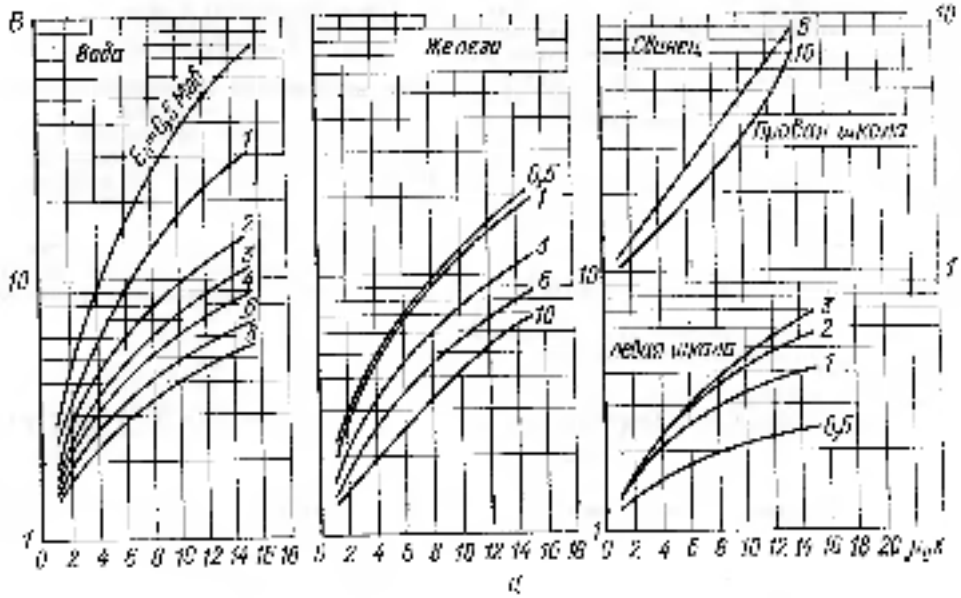


Рис. 44-27. Массовый коэффициент ослабления μ узкого пучка γ-квантов в различных веществах как функция энергии γ-квантов E [7].



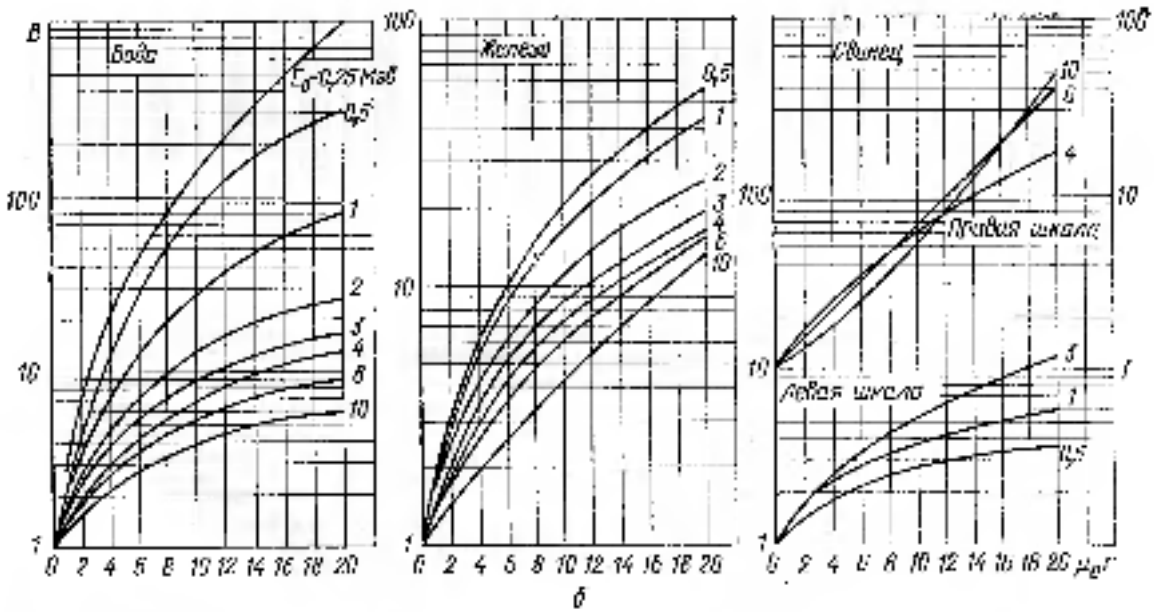


Рис. 44.28. Дозовый фактор накопления B как функция толщины защиты для точечного моноэнергетического (а) и точечного изотропного (б) источников [7].

Здесь N — число ядер среды в 1 см³; $\sigma_{ф}$, $\sigma_{к}$, $\sigma_{пар}$ — сечения фото- и комптон-эффекта и сечение образования пар в расчете на один атом. В случае весьма узкого пучка γ-квантов значительную роль может играть также их упругое рассеяние без потери энергии, происходящее в основном на малые углы, интегральный вклад которого как по сравнению с комптоновским рассеянием.

На рис. 44.27 приведены массовые коэффициенты ослабления для узкого пучка γ-квантов в зависимости от атомного номера поглотителя и энергии γ-квантов.

Ослабление широких пучков γ-квантов

Широкий пучок γ-квантов ослабляется в меньшей степени, чем узкий, из-за обратного попадания в него рассеянных квантов.

Широкий, первоначально параллельный пучок ослабляется тем, чем сферически расходящийся из точечного источника. Обычно закон ослабления широкого пучка записывают в виде

$$I = I_0 \exp(-\mu D) B(\mu I, \ \text{ко}, \ Z),$$

где μ — линейный коэффициент ослабления узкого пучка, B — фактор накопления. Для узкого пучка $B=1$. Поскольку энергия, доносимая γ-квантами до данной поверхности не всегда пропорциональна их биологическому действию, то в силу деформации энергетического спектра различают энергетический и дозовый факторы накопления.

На рис. 44.28 представлены зависимости дозового фактора накопления от толщины D материала защиты энергии первичного источника γ-квантов.

Защита от γ-излучения

Таблица 44.10

Толщина защиты из свинца, мм, в зависимости от кратности ослабления и энергии γ-излучения (широкий пучок) [11]

Кратность ослабления	Энергия γ-излучения, Мэв															
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2	3	4	6	10
2	1	2	3	4	5	7	8	10	11,5	13	17	23	28	29	16	13,5
5	2	4	6	9	11	15	19	22	25	28	38	43	46	46	39	30
10	3	5,5	9	13	16	21	26	30,5	35	38	51	59	65	64	55	42
30	3,6	7	11,5	17	23	30	35,5	43	49,5	56	73	85	93	92	80	63
100	5	10	16	23	30	38,5	47	55	63	70	95,5	113	129	121	109	87
300	6,5	14	22	31	40	51	61	72	82	92	129	150	162	161	149	119
10^3	7	15	24	33	44	57	69,5	81	92	102	141	165	180	178	165	133
$3 \cdot 10^3$	9	19	30	42	55	70	85	99	112	124	170	198	219	217	203	166
10^4	10,5	21	33	45,5	58	75	91	106	120	133	183	213	236	234	220	180
$3 \cdot 10^4$	11,5	23,5	37	52	69	87	105	125	140	156	214	247	263	272	258	215
10^5	11,5	24	38	54	72	92	111	130	148	165	227	262	289	289	276	229

Таблица 44.11

Толщина защиты из железа, см, в зависимости от кратности ослабления и энергии γ-излучения (широкий пучок) [11]

Кратность ослабления	Энергия γ-излучения, Мэв															
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0	3	4	6	10
2	0,7	1,2	1,7	2,2	2,6	2,7	2,9	3,1	3,2	3,3	3,6	3,9	4,4	4,5	4,6	3,4
5	1,4	2,5	3,4	4,1	4,6	5,1	5,5	5,7	6,1	6,4	7,4	8,1	8,9	9,4	9,6	8,0
10	1,9	3,5	4,6	5,6	6,3	6,8	7,3	7,7	8,1	8,5	10,0	11,0	12,2	12,6	13,2	11,4
30	2,4	4,5	6,2	7,5	8,5	9,2	9,8	10,4	10,9	11,4	13,6	15,1	17,0	17,7	18,8	17,0
100	3,4	6,1	8,1	9,6	10,9	11,7	12,6	13,2	13,9	14,5	17,3	19,5	22,1	23,3	25,0	23,1
300	4,4	7,7	10,1	12,0	13,7	14,9	16,0	17,0	17,9	18,7	22,3	26,0	28,8	30,6	32,7	31,2
1000	4,5	8,2	11,0	13,2	15,0	16,3	17,6	18,6	19,6	20,5	24,4	27,5	31,7	33,7	36,0	34,6
$5 \cdot 10^3$	5,6	10,1	13,4	15,8	17,7	19,3	20,7	22,0	23,2	24,3	29,4	33,1	38,9	40,7	43,2	42,2
10^4	6,8	11,5	14,7	17,1	19,0	20,7	22,3	23,6	24,9	26,0	31,3	35,5	40,9	43,7	46,5	46,2
$5 \cdot 10^4$	8,6	13,8	17,0	19,6	21,8	23,6	25,2	26,9	28,4	29,0	35,9	40,8	47,2	50,1	53,0	53,0
10^5	10,0	15,8	18,9	20,8	23,0	24,9	26,7	28,4	30,0	31,5	38,0	43,2	50,0	53,4	58,3	56,1
10^6	12,6	17,9	21,4	24,2	26,7	28,9	31,2	33,3	35,2	37,0	44,7	50,6	58,6	63,3	69,0	67,0
10^7	15,0	20,3	24,5	27,6	30,6	33,2	35,8	38,1	40,2	42,4	51,3	57,9	67,6	73,1	79,4	78,0

Таблица 44.12

Толщина защиты из бетона, см, в зависимости от кратности ослабления и энергии γ-излучения (широкий пучок) [11]

Для бетона $\rho = 2{,}3$ г/см³.

Кратность ослабления	Энергия γ-излучения, Мэв															
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0	3	4	6	10
2	4,7	7,6	8,9	11,3	19,3	12,4	12,4	19,6	19,7	12,9	13,6	14,1	15,3	16,4	18,6	18,8
5	5,6	11,0	15,5	18,8	21,1	21,8	22,3	22,0	23,0	23,5	25,6	28,2	32,9	33,2	38,7	39,9
10	8,2	14,6	19,7	23,7	25,8	26,8	27,6	28,4	28,1	29,5	34,0	37,6	43,4	47,5	51,6	54,0
20	8,5	16,4	22,8	27,7	32,0	34,8	36,4	37,8	39,2	40,5	46,5	51,6	59,9	65,7	71,6	78,1
100	11,5	21,1	28,9	35,2	39,9	43,0	45,3	47,2	48,8	50,5	58,3	66,7	77,0	84,5	95,1	105,1
500	13,3	24,6	35,2	43,9	50,5	54,6	57,3	60,8	62,5	64,0	74,6	84,5	101,0	110,4	124,4	139,7
1000	15,5	28,2	39,9	48,1	55,2	59,2	62,5	65,3	67,8	70,4	81,7	92,7	110,9	120,9	137,9	155,0
$5 \cdot 10^3$	18,8	33,1	45,6	56,4	65,7	70,6	74,0	77,0	80,2	83,8	97,4	110,9	132,7	146,8	166,7	185,7
10^4	18,6	35,2	48,5	60,3	69,3	74,7	79,1	82,5	85,2	89,2	104,5	118,6	143,2	158,7	179,0	201,3
$5 \cdot 10^4$	23,3	42,5	56,4	68,6	78,1	83,4	88,7	93,4	97,9	102,1	120,4	136,2	164,0	181,6	206,6	233,6
10^5	30,5	50,5	64,6	75,1	82,8	88,3	93,5	98,1	102,6	106,8	126,6	144,4	173,8	191,4	218,4	248,0
10^6	45,3	66,4	79,8	89,5	97,4	103,7	109,2	114,1	119,5	124,4	149,8	171,4	206,4	225,4	250,6	285,8
10^7	64,0	84,8	95,7	106,7	110,3	117,4	123,6	130,0	136,2	142,0	170,8	194,0	236,0	259,4	289,4	340,0

Таблица 44.13

Толщина защиты из воды, см, в зависимости от кратности ослабления и энергии γ-излучения (широкий пучок) [11]

Кратность ослабления	Энергия γ-излучения, Мэв															
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0	3	4	6	10
2	18	27	30	30	29	28	27	27	26	26	28	33	37	36	40	45
5	27	37	42	44	46	46	47	47	48	48	53	59	69	74	85	98
10	36	47	52	55	57	58	60	61	62	63	71	79	92	101	116	135
20	45	58	65	69	73	75	77	79	81	82	96	107	124	140	163	192
100	53	70	79	84	88	92	95	98	101	104	120	134	160	182	212	253
500	66	85	96	104	110	116	120	124	128	132	153	173	205	232	277	334
1000	72	92	104	113	118	126	129	134	138	143	167	189	226	257	306	368
$5 \cdot 10^3$	81	103	120	130	138	147	151	160	165	170	198	225	271	309	368	446
10^4	91	114	128	139	147	155	162	168	176	182	212	241	290	331	396	480
$5 \cdot 10^4$	106	128	144	156	167	175	183	190	196	205	241	276	334	385	461	564
10^5	110	135	152	164	175	184	192	201	209	216	255	292	353	404	487	597
10^6	125	156	176	192	206	216	224	233	243	253	299	342	415	479	577	706
10^7	140	178	200	217	232	243	255	265	272	268	344	393	478	554	667	817

44.6. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Единицею поглощенной дозы излучения — рад — соответствует поглощению в 1 г облучаемого вещества 100 эрг энергии излучения.

Единицей экспозиционной дозы рентгеновского и γ-излучения служит рентген (*р*) — доза рентгеновского или γ-излучения в воздухе, приводящая в 0,001293 г воздуха по 1 ед. СГСЭ ионов каждого знака. Для тех видов и энергий излучения, для которых на образование пары ионов в воздухе требуется 34 эв, 1 *р* соответствует поглощению 88 эрг в 1 г воздуха, т. е. 0,88 рад (γ-излучение и электроны при $E \geq 3$ Мэв) (рис. 44.29). Для таких видов излучения, как осколки деления, приведенные выше соотношения между рентгеном и радом неприменимы.

Относительная биологическая эффективность различных видов излучения неодинакова. Коэффициент относительной биологической эффективности (ОБЭ) различных видов излучения характеризует степень биологического воздействия данного вида излучения по сравнению с γ-излучением при равенстве поглощенных доз.

За единицу ОБЭ принято биологическое действие рентгеновского излучения с энергией 200 кэв, создающего 100 ионов на 1 мкм пути в воде. ОБЭ различных биологических реакций может по-разному зависеть от линейной передачи энергии (ЛПЭ).

В связи с тем, что действие излучения на человеческий организм в целом является объектом количественного контроля, нашедшо регламентирование значение ОБЭ для человеческого организма в целом [10, 15] — коэффициент качества излучения *КК*.

Степень облучения организма выражают в эквивалентных дозах $D_э$, т. е. энергетическая доза облучения умножается на его коэффициент качества. Единицей измерения $D_э$ является 1 *бэр* — биологический эквивалент рада.

Естественное облучение человека за счет космической радиации и природных радиоактивных изотопов составляет 0,1 *рад/год* [12]. Доза профессионального облучения не должна превышать 0,1 *бэр* в неделю

(5 бэр в год) для персонала, непосредственно занятого с источниками излучений.

Для персонала, работающего в сложных помещениях и отдельных лиц из населения соответствующая доза составляет 0,5 *бэр/год* и для всего населения 5 *бэр* за 30 лет. Более подробно допустимые уровни внешнего и внутреннего облучения приведены в специальной литературе [10, 15].

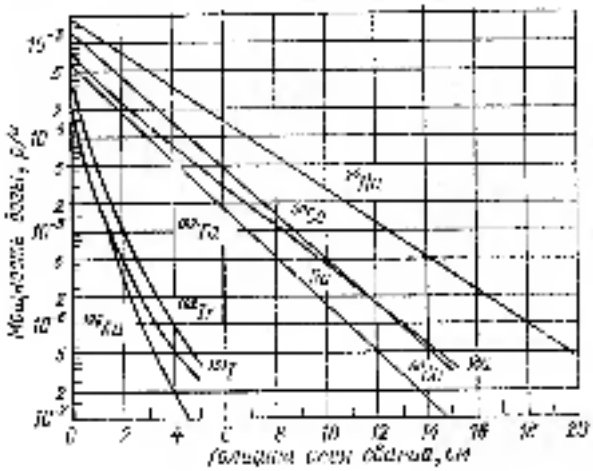


Рис. 44.29. Мощность дозы на расстоянии 1 *м* от различных источников γ-излучения интенсивностью 1 *мкюри* в зависимости от толщины свинцовой защиты [7].

Таблица 44.14

Коэффициент качества *КК* для излучений с различными значениями ЛПЭ [15]

ЛПЭ в воде, *кэв/мкм*	*КК*	ЛПЭ в воде, *кэв/мкм*	*КК*
3,5	1	23—53	5—10
3,6—7,0	1—2	53—175	10—20
7,0—23	2—5		

Таблица 44.15

Коэффициенты качества различных видов ионизирующих излучений при хроническом облучении всего тела [15]

Вид излучения	*КК*	Энергия излучения	*КК*
γ-Излучение	1	Нейтроны с энергией: 5 *кэв*	2,5
Рентгеновское излучение	1	20 *кэв*	7
Электроны и позитроны	1	100 *кэв*	8
α-Излучение (E=5 *Мэв*)	10	500 *кэв*	10
Протоны (E=5 *Мэв*)	10	1 *Мэв*	10,5
Тяжелые ядра отдачи	20	5 *Мэв*	7
Тепловые нейтроны	3	10 *Мэв*	6,5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальная ядерная физика. Под ред. Э. Сегре. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
2. **Гринберг А. П.** Методы ускорения заряженных частиц. М.—Л., Госэнергоиздат, 1950.
3. **Barnett C. F., Gaister W. B.,** Ray J. A. Atomic and Molecular Collision Cross Sections. Oak Ridge Nat. Lab., ORNL-3113.
4. **Прайс Б.** Регистрация ядерного излучения. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
5. **Росси Б., Штауб Г.** Ионизационные камеры и счетчики. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1951.
6. Handbuch der Physik, b 34. Springer-Verlag. Berlin, 1958.
7. **Прайс Б., Хортон К., Спинни К.** Защита от ядерных излучений. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
8. **Бреger А. Х.** Источники ядерных излучений и их применение в радиационно-химических процессах. М., ВИНИТИ, 1966.
9. **Етер Р.** Дозиметрия и защита от излучений. Пер. с нем. М., Госатомиздат, 1961.
10. **Нормы** радиационной безопасности НРБ—69. Изд. 2-е. М., Атомиздат, 1972.
11. **Асланян К. К., Кодонов В. М.** Прикладная дозиметрия. М., Госатомиздат, 1962.
12. **Гусев Н. Г., Ковалев Е. Е., Осанов Д. П.** Защита от ионизирующих излучений. М., Атомиздат, 1969.
13. Защита от ионизирующих излучений. Т. 2. М., Атомиздат, 1975.
14. **Горшков Г. В.** Проникающие излучения радиоактивных источников. Л., «Наука», 1967.
15. **Моисеев А. А., Иванов В. И.** Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. М., Атомиздат, 1974.

ГЛАВА 45

КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

45.1. ВВЕДЕНИЕ

К первичному космическому излучению принято относить заряженные и нейтральные частицы, входящие в верхние слои атмосферы Земли. Вступая во взаимодействие с ядрами атомов атмосферы, первичное космическое излучение может породить большое разнообразие новых элементарных частиц. Ядерно-активные частицы вызывают в атмосфере Земли смешанные электронно-ядерные ливни, состоящие из мезонов, нуклонов и

электронно-фотонной компоненты. Лавины электронного происхождения (электронно-фотонные лавины) образуют мягкую (быстро поглощающуюся веществом) компоненту космического излучения. Электронно-ядерные лавины вызываемые космическими частицами очень больших энергий, носят название широких атмосферных ливней (на уровне моря их поперечные размеры могут достигать нескольких километров). Полное количество энергии, заключенное в космическом излучении в галактическом пространстве, по порядку величины сравнимо с другими формами энергии во Вселенной.

Плотность различных форм энергии в Галактике [1]

Форма энергии	Плотность энергии, эв/см³
Космическое излучение	1
Свет звезд	1
Магнитная энергия	1
Турбулентное движение галактического газа	10—100
Вращение Галактики	1000
Энергия массы покоя в Галактике	10^6

Некоторые характеристики космического излучения [2]

Общее число частиц и γ-квантов, приходящих в атмосферу Земли	$8 \cdot 10^{17}$ сек⁻¹
Общая энергия космического излучения, входящего в верхние слои атмосферы	$9 \cdot 10^{14}$ Дж/сек = $= 1{,}4 \cdot 10^{6}$ квт
Сила тока, создаваемая частицами, если бы они все несли положительный заряд	0,13 а
Количество пар ионов, образуемых космическим излучением на уровне моря (в среднем)	1,63 пары ионов/(см³·сек)
Общая энергия космического излучения, достигающего поверхности Земли	90 квт

45.2. ПЕРВИЧНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Состав

Таблица 45.1

Распространенность элементов в космическом излучении [1]

Ядро*	Z	Доля ядер в космическом излучении: Число ядер, %	Доля ядер в космическом излучении: Отношение к числу ядер в веществе, %	Распространенность на Земле и в космосе
Протон	1	100 000	93,0	100 000
α-Частицы	2	6 800	6,3	7 700
L-группа ядер	3—5	150	0,14	$6 \cdot 10^{-4}$
M-группа ядер	6—9	440	0,4	150
H-группа ядер	≥10	150	0,14	30
Железо	26	15	0,014	1,5
Другие ядра	≥30	<1	0,001	10^{-3}

* Содержание нейтронов и фотонов с первичным космическим излучением не превышает 1 и 0,1% соответственно [1].

Таблица 45.2

Относительная распространенность внутри групп ядер L, M и H (и подгруппа VH) космического излучения [4]

L		M		H		VH	
Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %
Li	33	C	44	Ne	21,4	Ca	4,7
Be	10	N	24	Na	13,4	Sc	0,6
B	57	O	31	Mg	23,2	Ti	3,0
		F	1	Al	4,5	V	0,8
				Si	8,0	Cr	5,0
				P	0,9	Mn	6
				S	0	Fe	9,9
				Cl	0,7	Co	0
				Ar	2,4	Ni	1,3
				K	0		

Таблица 45.3

Ядерный состав солнечного и галактического космического излучения [1]

Ядро	Z	Солнечное космическое излучение	Галактическое космическое излучение
He	2	107 ± 14	49
Be, B	4; 5	<0,02	0,8
C	6	0,60 ± 0,07	1,8
N	7	0,19 ± 0,04	<0,8
O	8	1,0	1,0
F	9	<0,03	0,1
Ne	10	0,43 ± 0,02	0,30
Mg	12	0,043 ± 0,011	0,32
Si	14	0,033 ± 0,011	0,32
P—Sc	15—21	0,037 ± 0,017	0,13
Ti—Ni	22—28	<0,02	0,28

* За единицу принято содержание кислорода (Z = 8).

Плотность частиц:
- в солнечном ветре . . . . . 1—9 см⁻³
- в космическом излучении около Земли . . . . . 10^{-10} см⁻³ [3]

Таблица 45.4

Плотность потока космических частиц [3]

n — число частиц, падающих на границы земной атмосферы, на 1 м² в единице телесного угла в 1 сек

Компонента	Z	n, м⁻² сек⁻¹
Протоны	1	1300
α-Частицы	2	94
L-группа ядер	3—5	2,0
M-группа ядер	6—9	0,7
H-группа ядер	≥10	2,0
Подгруппа ядер VH	≥26	0,6
Фотоны с $E_\gamma \geq 50$ Мэв	0	5 [1]

Энергетический спектр

В широком интервале энергий ($2\cdot10^9$—10^{19} *эв/нуклон*) наблюдается плавное убывание интенсивности космического излучения с увеличением энергии частиц:

$$I_A(>E) = K_A E^{-\gamma} \quad (\gamma > 0);$$

здесь $I_A(>E)$ — интенсивность потока ядер группы A, частиц/(*м*²·*стер*·*сек*), энергии которых больше, чем E, *Гэв/нуклон*; K_A — некоторый постоянный коэффициент. В области меньших энергий показатель энергетического спектра γ зависит от солнечной активности, поскольку в космическом излучении солнечного происхождения преобладают частицы малых энергий.

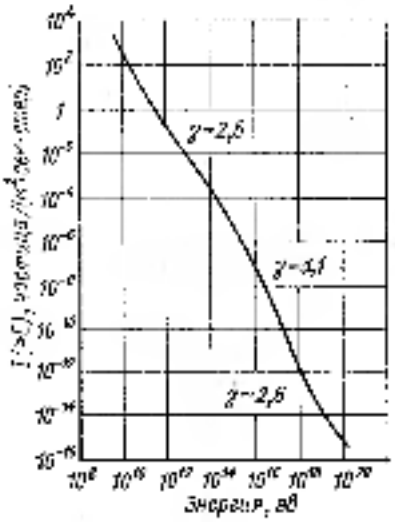


Рис. 45.1. Полная интенсивность $I(>E)$ всех групп ядер космического излучения [3].

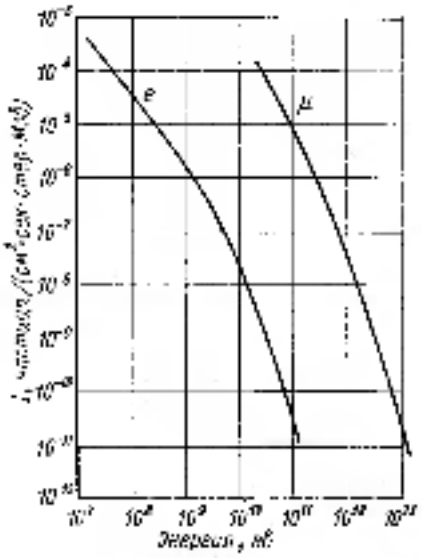


Рис. 45.2. Форма энергетического спектра электронов [3] и мюонов [13] компонент космического излучения.

45.3. ВТОРИЧНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Высотный ход интенсивности космического излучения

При углублении в атмосферу Земли меняется как состав, так и интенсивность космического излучения. На больших высотах основную роль играют процессы генерации лавин. В дальнейшем, с увеличением энергии вторичных частиц, ядерно-каскадные процессы затухают и общая интенсивность космического излучения начинает падать вследствие повышающегося торможения и поглощения медленных частиц.

Поток нейтронов на уровне моря [6]:

$$I_n = \begin{cases} (2,3 \pm 0,6)\cdot 10^{-2}\ см^{-2}\cdot сек^{-1}, & E_n \leq 0,4\ эв, \\ (4,9 \pm 1,0)\cdot 10^{-2}\ см^{-2}\cdot сек^{-1}, & E_n > 0,4\ эв. \end{cases}$$

Таблица 45.5

Интенсивность отдельных групп космического излучения [4]

Группа ядер	Интервал энергий, *Гэв/нуклон*	$\gamma - 1$	K_A
Протоны	4,7—16,6	1,40±0,10	480
α-Частицы	2,5—8,6	1,49±0,22	360
α-Частицы	2,5—8,6	1,45±0,11	300
α-Частицы	1,3—8,0	1,5	415
α-Частицы	1,2—4,6	1,45±0,12	360
Группа *M*	2,5—8,6	1,57±0,12	25,4±4,2
Группа *M*	2,5—8,6	1,6±0,15	26,0±2,2
Группа *H*	2,5—8,6	1,60±0,15	11,9±2,0

Таблица 45.6

Соотношение числа заряженных *C*- и нейтральных *N*-частиц космического излучения в зависимости от высоты над поверхностью Земли [5]

Глубина атмосферы, *г/см²*	Энергия, *Гэв*	*N/C*
5—50	>1000	0,083±0,03
516	200—2000	0,74±0,16
670	>10	0,77±0,035
700	200—1000	0,57±0,10
710	200—2000	0,65±0,107
786	200—2000	0,56±0,11
806	>60	0,40±0,12
800	20—40	0,66±0,11
1000	>27	0,62±0,08

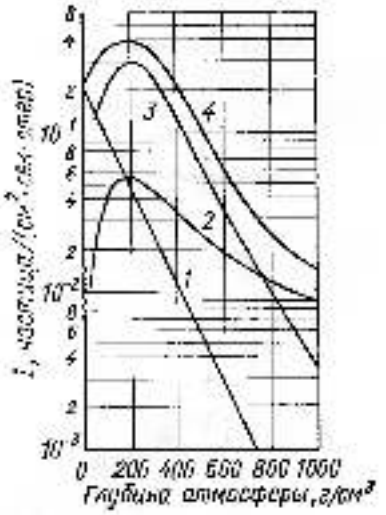


Рис. 45.3. Высотный ход интенсивности I различных компонент космического излучения для 60° с. ш. [10]: 1 — мультиплицированная; 2 — мюонная и 3 — электронная компоненты; 4 — полная интенсивность.

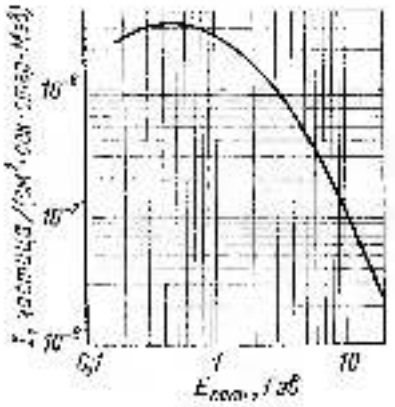


Рис. 45.4. Дифференциальный энергетический спектр μ мезонов на уровне моря для 50° с. ш. [10].

Геомагнитные явления

Вследствие влияния магнитного поля Земли на поверхности могут достигать лишь те частицы космического излучения, магнитная жесткость которых $\mathfrak{E} = A \cdot p^2/(Z \cdot e)$ больше некоторой величины, являющейся функцией географических координат и направления движения частицы (A — массовое число ядра; Z — его заряд; p — импульс частицы; e — заряд электрона). Широтный эффект составляет ~10% на уровне моря и резко возрастает при удалении от поверхности Земли.

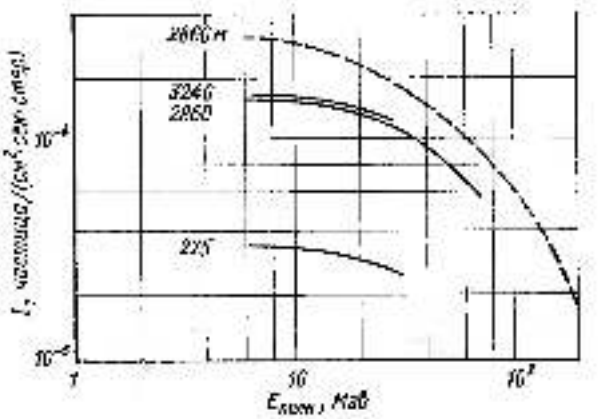


Рис. 45.5. Интегральные энергетические спектры электронов (сплошные кривые) и фотонов (штриховая кривая) в верхних слоях атмосферы [10].

Таблица 45.7

Характеристика космического излучения, входящего в атмосферу на различных широтах [2]

Характеристики излучения	Геомагнитные широты		
	8°	57°	82°
Энергия излучения, падающего на 1 см² атмосферы в 1 сек, эв	$1 \cdot 10^{8}$	$1{,}7 \cdot 10^{9}$	$3{,}2 \cdot 10^{9}$
Среднее число ионов, образуемых в 1 сек в столбе атмосферы площадью 1 см²	$3 \cdot 10^{6}$	$5{,}4 \cdot 10^{7}$	$7{,}4 \cdot 10^{7}$
Нижний предел энергии частиц, достигающих Земли, устанавливаемый магнитным полем Земли, эв	$1{,}5 \cdot 10^{10}$	$8 \cdot 10^{8}$	$2 \cdot 10^{8}$
Средняя энергия частиц, приближающихся к атмосфере, эв	$3 \cdot 10^{10}$	$1{,}6 \cdot 10^{10}$	$0{,}88 \cdot 10^{10}$
Вероятное число частиц, падающих на 1 см² внешней поверхности атмосферы в минуту	1,9	6,5	21,8

Таблица 45,8

Зависимость магнитной жесткости R_M для вертикально падающих частиц от географических координат [5]

Географическая широта, град	Восточная долгота, град								
	0	30	40	50	60	100	120	140	160
Северная									
70	0,274	0,376	0,455	0,505	0,54	0,55	0,56	0,57	0,512
60	1,12	1,28	1,42	1,54	1,70	1,82	1,87	1,93	1,76
50	3,06	3,63	3,81	3,77	3,84	3,96	4,15	4,26	4,37
40	6,7	7,20	7,60	7,80	8,2	9,4	9,6	9,0	8,5
30	11,2	11,6	12,6	13,5	14,3	14,5	14,5	13,9	13,1
20	14,4	14,9	15,5	16,1	16,5	16,8	16,4	16,0	15,6
10	15,1	15,6	16,4	17,0	17,6	17,7	17,1	16,5	16,0
Южная									
0	14,4	14,9	15,7	16,3	16,8	17,2	17,0	16,5	16,2
10	12,5	12,4	13,4	14,4	14,9	15,6	15,1	15,2	15,2
20	10,5	10,9	10,7	10,5	10,8	10,9	10,5	11,1	12,1
30	6,9	7,9	6,6	5,9	5,1	4,62	4,70	5,2	6,2
40	6,3	4,59	3,77	3,16	2,48	2,03	1,99	2,28	3,0
50	3,76	2,65	1,81	1,34	0,90	0,60	0,55	0,63	1,0
60	1,90	1,24	0,77	0,512	0,261	0,136	0,096	0,086	0,19
70	0,82	0,512	0,294	0,136	0,065	0,014	0,003	0,002	0,06

Географическая широта, град	Восточная долгота, град								
	20	40	60	80	100	120	140	160	180
Северная									
70	0,151	0,06	0,018	0,062	0,152	0,256	0,168	0,296	0,421
60	0,72	0,365	0,181	0,125	0,174	0,291	0,75	1,20	1,55
50	2,24	1,28	0,73	0,63	0,85	1,44	2,93	3,22	4,09
40	4,94	3,03	2,05	1,97	2,39	3,85	4,59	6,2	7,7
30	8,8	5,8	4,48	4,45	5,6	7,3	8,9	10,4	12,3
20	12,8	10,1	8,5	8,3	9,8	12,0	13,2	13,7	14,2
10	14,6	13,6	12,4	11,8	13,3	14,6	14,7	15,0	15,4
Южная									
0	12,2	14,1	13,6	13,5	14,6	15,1	15,4	15,6	15,0
10	13,1	13,1	13,0	14,6	14,6	14,8	14,8	15,2	15,3
20	11,1	12,2	12,8	13,6	14,0	14,0	13,8	13,3	12,6
30	9,9	11,1	11,0	12,6	13,1	12,6	11,7	9,5	7,7
40	8,0	9,3	10,2	10,4	9,7	8,3	6,7	5,9	4,03
50	5,1	6,7	7,3	6,9	5,6	4,50	3,4	2,3	1,45
60	2,81	3,85	4,15	3,9	3,05	2,19	1,49	0,82	0,458
70	1,26	1,61	1,65	1,57	1,27	0,85	0,613	0,27	0,11

Таблица 45,9

Ионизация атмосферы под действием космического излучения на уровне моря [7]

Геомагнитная широта, град	Число пар ионов, см⁻³·сек⁻¹	Геомагнитная широта, град	Число пар ионов, см⁻³·сек⁻¹
0	1,61	50	1,84
10	1,61	60	1,84
20	1,63	70	1,84
30	1,68	80	1,84
40	1,77	90	1,84

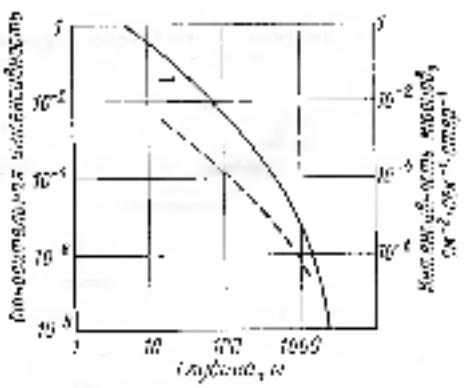


Рис. 4,1,6. Зависимость интенсивности космического излучения от глубины проникновения в Землю [12] и голощелевых ионов в воде [13] (пунктирная линия).

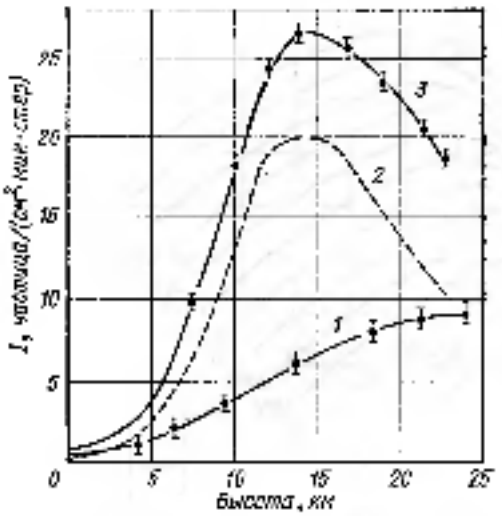


Рис. 45.7. Высотный ход интенсивности жесткой (1), мягкой (2) и всей ионизующей (3) компонент космического излучения для 60° с. ш. [10].

Электронно-фотонные каскадные ливни

Радиационные единицы длины и критические энергии. Проходя через вещество, быстрые электроны теряют энергию главным образом в процессах радиационного излучения и образования пар. Спектральная плотность потерь энергии на излучение на единице пути практически не зависит от энергии электронов. Расстояние, на которое энергия электрона уменьшается в «e» раз, представляет собой удобную масштабную единицу длины пробега быстрых электронов и носит название радиационной, или лапинской единицы длины t_0. Критическую энергию ε определяют обычно как среднюю величину потерь энергии электронов на ионизацию на t_0-единице длины [8].

Таблица 45.10

Значения радиационной единицы длины t_0 и критических энергий ε для различных веществ [8]

Вещество	t_0, г/см²	ε, Мэв: без учета плотности вещества	с учетом плотности
H	62,8	350	
He	93,1	210	—
Li	83,3	180	138
Be	68,0	141	110
B	53,0	115	91
C	43,3	97	77
N	39,0	85	—
O	34,6	75	
F	33,4	67,5	—
Ne	28,2	55,5	46,5
Al	24,3	47	40
Si	22,2	44	37,5
Cl	19,5	36	—
Ar	19,7	34	—
K	17,4	31,7	27,9
Ca	16,3	30,4	26,7
Fe	13,9	23,3	20,7
Cu	13,0	20,9	18,8
Br	11,0	17,2	15,7
Ag	9,0	12,7	11,9
J	8,5	11,3	10,7
Xe	8,5	11,0	—
W	6,8	8,3	8,1
Pb	6,4	7,5	7,4
LiH (гидрид лития)	80	207	157
C_3H_8 (пропан)	45,9	120	—
C_8H_8 (полистирол)	44,4	110	88
Воздух	37,1	81	—
Вода	36,4	90	73
$Al_2SO_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ (глина)	28,8	60,9	50,6
SiO_2 (кварц)	27,4	56,2	47,3
$CaCO_3$ (известняк)	24,2	51,2	43,4
NaCl (соль)	22,2	42,1	36,2
Эмульсия ЦИКФИ-Р	11,4	17,8	16,4

Каскадные кривые

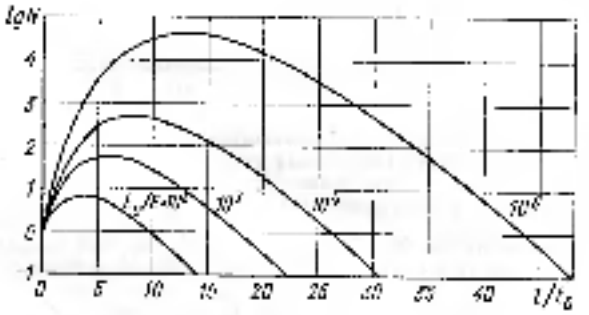


Рис. 45.8. Число электронов $N(E_0, E, t)$ с энергией, большей, чем E, в ливне, образованном электроном с энергией E_0, как функция расстояния t, выраженного в t_0-единицах [11].

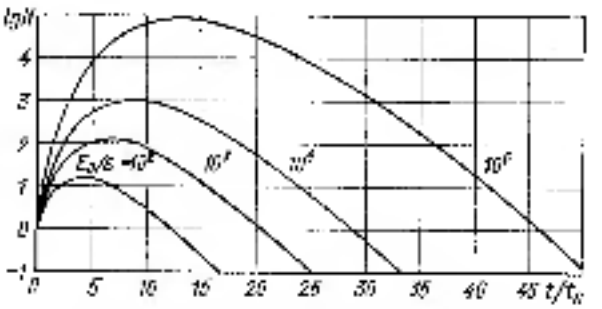


Рис. 45.9. Полное число электронов $N(E_0, 0, t)$ в ливне, образованном электроном с энергией E_0, как функция расстояния t, выраженного в t_0-единицах [11].

Результаты расчета по одномерной каскадной теории в приближении A, когда для процессов образования пар и тормозного излучения используются асимптотические формулы, а столкновения электронов пренебрегают. Эти приближения оправданы для любых энергий и для энергий выше критической ε для набранного вещества.

Результаты расчета по приближенной теории с пренебрежением A, при котором учитываются также и столкновения электронов. Пробеги электронов выражены в релятивистских единицах t_0, а энергии частиц даны в единицах критической энергии.

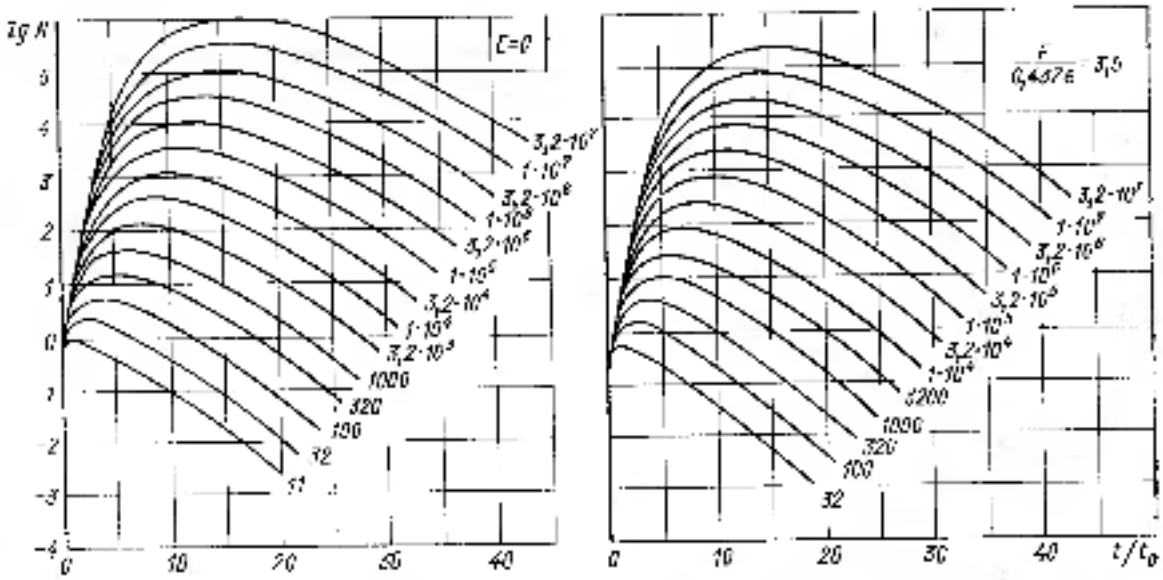


Рис. 15.10. Число электронов $N(E_0, E, t)$ с энергией, большей E, в ливне, образованном электроном с энергией E_0, как функция расстояния t, выраженного в t_0-единицах. На кривых указаны значения отношения $E_0/(0,437e)$. Вычисления проведены методом монте-карло для свинца с учетом ионизационных потерь и многократного рассеяния электронов [9].

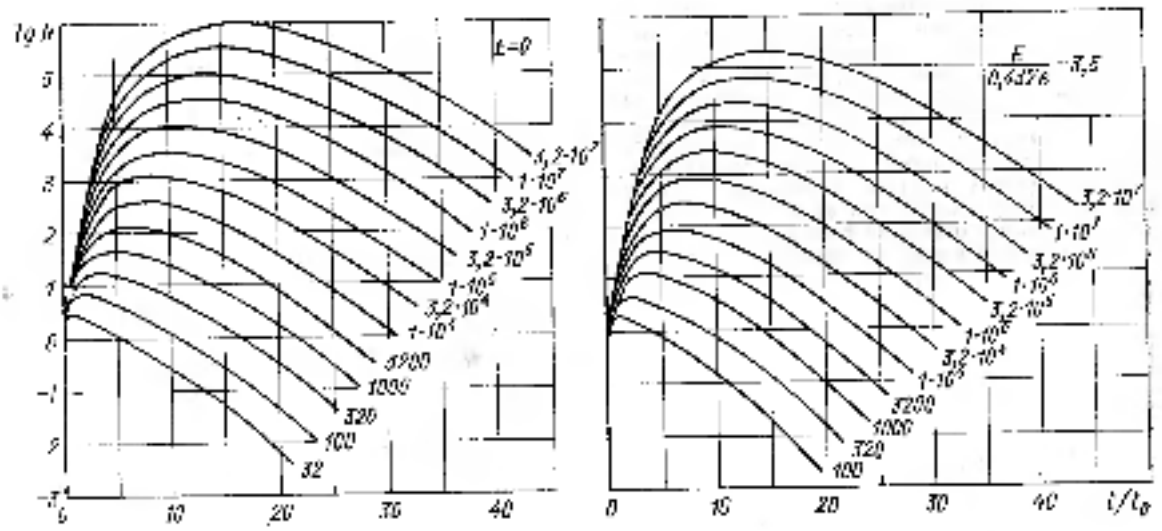


Рис. 15.11. Число электронов $N(E_0, E, t)$ с энергией больше E в ливне, образованном электроном с энергией E_0, как функция расстояния t, выраженного в t_0-единицах. На кривых указаны значения отношения $E_0/(0,437\ e)$. Вычисления проведены методом монте-карло для свинца с учетом ионизационных потерь и многократного рассеяния электронов [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рамакришнан А.** Элементарные частицы в космических лучах. Пер. с англ. М., «Мир», 1965.
2. **Проблемы радиационной гигиены.** Пер. с англ. и нем. Под ред. Ф. Т. Кроткова. М., Медгиз, 1963.
3. **Гинзбург В. Л.** «Природа», 1968, т. 7, с. 2.
4. **Гинзбург В. Л., Сыроватский С. И.** Происхождение космических лучей. М., Изд-во АН СССР, 1963.
5. **Мурзин В. С., Сарычева Л. И.** Космические лучи и их взаимодействия. М., Атомиздат, 1968.
6. Boella J. e. a. "Nuovo cimento", 1963, v. 28, p. 108.
7. **Аллен К. У.** Астрофизические величины. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
8. **Доманевский О. И., Доманевский А. А.** В сб.: Труды Физ. института им. П. Н. Лебедева. Т. 26. М., «Наука», 1964, с. 107.
9. **Иваненко И. П., Сакисян Б. С.** «Ядерная физика», 1967, т. 5, с. 182.
10. **Физика космических лучей.** Т. 3. Под ред. Дж. Вилсона. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1958.
11. **Росси Б.** Частицы больших энергий. Пер. с англ. М., ГИТТЛ, 1955.
12. **Добротин Н. А.** Космические лучи. М., Изд-во АН СССР, 1963.
13. **Хаякава С.** Физика космических лучей. Часть 1. Пер. с англ. М., «Мир», 1973.

VII. АСТРОНОМИЯ И ГЕОФИЗИКА

ГЛАВА 46

АСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

46.1. НЕКОТОРЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Астрономическая единица длины (а. е.) — среднее расстояние от Земли до Солнца. 1 *а. е.* = $(1,4960 \pm 0,0000) 10^{11}$ *м* [1]

Парсек, 1 *пк* = $(3,0856 \pm 0,0001) \cdot 10^{16}$ *м* [1]

Световой год, 1 *св. год* = $9,4605 \cdot 10^{15}$ *м* [1]

Время, за которое свет проходит расстояние в 1 *а. е.* равно 498,59 *сек* [1].

Астрономические символы

☉ Солнце	♁ Земля	♅ Уран
☾ Луна	♂ Марс	♆ Нептун
☿ Меркурий	♃ Юпитер	♇ Плутон
♀ Венера	♄ Сатурн	☄ Комета
♈ Овен 0°	♌ Лев 120°	♐ Стрелец 240°
♉ Телец 30°	♍ Дева 150°	♑ Козерог 270°
♊ Близнецы 60°	♎ Весы 180°	♒ Водолей 300°
♋ Рак 90°	♏ Скорпион 210°	♓ Рыбы 330°

46.2. СОЛНЦЕ

Характеристики Солнца [1—3]

Радиус Солнца . . . . . $R_\odot = (6,9598 \pm 0,1002) 10^5$ *км*

Масса . . . . . $\mathcal{M}_\odot = (1,989 \pm 0,002) 10^{33}$ *г*

Средняя плотность . . . . $\rho_\odot = 1,410$ *г/см³*

Период сидерического вращения (на широте $\varphi = 16°$) . . . . . 25,36 *суток*

Синодический период . . . . . 27,275 *суток*

Кинетическая энергия вращения . . $1,9 \cdot 10^{42}$ *эрг*

Наклон экватора к плоскости эклиптики . . . . . 7°15′

Скорость освобождения на поверхности . . . . . $6,177 \cdot 10^7$ *см/сек*

Работа, необходимая для рассеяния солнечного вещества в пространство $7,4 \cdot 10^{48}$ *эрг*

Ускорение силы тяжести на поверхности . . . . . (27398 ± 4) *см/сек²*

Средний экваториальный горизонтальный параллакс . . . . . $8,794'' \pm 0,002''$

Угловой диаметр Солнца:

в перигелии . . . . . 32′31″

в афелии . . . . . 31′27″

Диск Солнца — круг с погрешностью ±0″,01

Положение в Галактике [1, 2, 4]

Расстояние от галактического центра: $(8,2 \pm 0,8) 10^3$ *пк*

Расстояние от галактической плоскости . . . . . $(8 \div 12)$ *пк*

Период вращения вокруг галактического центра, галактический год . $2,2 \cdot 10^8$ *лет*

Скорость вращения вокруг галактического центра . . . . . 220 *км/сек*

Скорость движения относительно близлежащих звезд . . . . . $(20 \pm 0,5)$ *км/сек*

Солнце как звезда [2]

	Звездная величина	Солнце	Меркурий
Визуальная	$m_{вис}$	$V = -26,76$	$M_{вис} = +4,79$
Фотографическая (синяя)		$B = -26,16$	$M_B = +5,42$
Ультрафиолетовая		$U = -26,08$	$M_U = +6,51$
Болометрическая	$m_{бол}$	$-26,85$	$M_{бол} = +4,72$
Показатель цвета		$B - V = +0,62$	
Спектральный класс		$G\ 2V$	

Эффективная температура . . . . . $T_{эф} = 5800 \pm 15$ °K

Температура в центре Солнца в зависимости от принятых моделей и содержания элементов внутри Солнца колеблется от 11 до 46 миллионов градусов [5, 6].

Наиболее вероятные значения температуры, плотности и давления в центре:

$$T_c = (13,6 \pm 1,2)\ 10^6\ °K;$$

$$\rho_c = (98 \div 15)\ г/см^3;$$

$$P_c = 2,0 \cdot 10^{16}\ дин/см^2 = 2,0 \cdot 10^{11}\ атм.$$

Таблица 46.1

Содержание химических элементов в атмосфере Солнца [3, 7]

Приведены логарифмы чисел атомов, содержащихся в столбе солнечной атмосферы площадью 1 $см^2$. Единицей величины является 10^{12} атомов над 1 $см^2$ солнечной атмосферы.

Элемент	$\lg N$	Элемент	$\lg N$	Элемент	$\lg N$
H	12,0	Sc	2,82	Zr	2,23
He	11,7	Ti	4,68	Nb	1,96
Li	0,96	V	3,70	Mo	1,90
Be	2,36	Cr	5,36	Ru	1,43
C	8,72	Mn	4,90	Rh	0,78
N	7,98	Fe	6,57	Pd	1,21
O	8,96	Co	4,64	Ag	0,14
Ne	6,30	Ni	5,94	Cd	1,46
Mg	7,40	Cu	5,04	In	1,16
Al	6,20	Zn	4,40	Sn	1,04
Si	7,50	Ga	2,36	Sb	1,94
P	5,54	Ge	3,29	Ba	2,10
S	7,30	Rb	2,48	Yb	1,03
K	4,70	Sr	2,60	Hg	3,38
Ca	6,15	Y	2,25	Pb	1,33

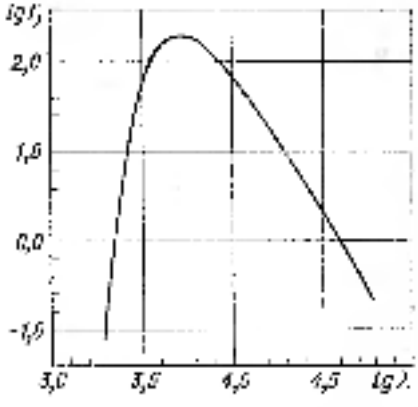


Рис. 46.1. Спектр солнечного излучения [1]: I_λ — поток солнечной энергии через единичную площадку на расстоянии в 1 *а. е.* от Солнца, отнесенный к единичному интервалу длин волн, $эрг/(см^2 \cdot Å \cdot сек)$; λ — длина волны, Å.

Излучение [2]

Полное излучение Солнца $L_\odot$ — $(3{,}90 \pm 0{,}04) \cdot 10^{33}$ *эрг/сек* — $= 3{,}90 \cdot 10^{20}$ *Тдвт*

Поток излучения фотосферы $6{,}41 \cdot 10^{10}$ $эрг/(см^2 \cdot сек)$ — $= 6{,}41$ *квт/см²*

Солнечная постоянная равна полному количеству излучения, падающего на площадку в 1 $см^2$, помещенную под прямым углом к солнечным лучам за пределами земной атмосферы на среднем расстоянии от Солнца до Земли.

Солнечная постоянная . . . $(1{,}99 \pm 0{,}02)$ $кал/(см^2 \cdot мин)$ — $= 1{,}386 \cdot 10^6$ $эрг/(см^2 \cdot сек)$

Эффективная температура Солнца $T_{эф}$ . . . . . 5800 ± 15°K

Средняя яркость поверхности солнечного диска за пределами земной атмосферы $2{,}02 \cdot 10^3$ *сб* — $6{,}33 \cdot 10^9$ *лоллбергов*

Освещенность, создаваемая Солнцем на расстоянии в 1 *а. е.* . . . . . 13,7 *ф* — 137 000 *лк*

Сила света Солнца . . . . $3{,}07 \cdot 10^{27}$ *св*

Радиоизлучение

Согласно классификации [1, 2, 8, 9], различают, по крайней мере, пять типов радиоизлучения Солнца:

1) спокойное тепловое шумы;
2) медленно меняющиеся шумы солнечных пятен;
3) шумовые бури, состоящие из коротких выбросов (ассоциируются с солнечными пятнами);
4) выбросы, связанные с солнечными вспышками;
5) шумовые неполяризованные выбросы.

В период максимума солнечных пятен шумовые бури наблюдаются около 10 раз в год. Число типичных выбросов в годы максимума пятен около 100 за год. Продолжительность выброса примерно 10 *мин*.

Поток энергии радиоизлучения Солнца F_ν измеряется в паттах и относится к единичному интервалу частот и площади 1 $м^2$ земной поверхности. Поток F_ν связан с эффективной температурой $T_{эф}$, которая равна температуре абсолютно черного тела, излучающего в радиодиапазоне столько же энергии, сколько и Солнце: $F_\nu = 2{,}089 \cdot 10^{-44}\, T_{эф}\, \nu^2$, где $[F_\nu] = [вт/(м^2 \cdot гц)]$; $T_{эф}$ — в градусах Кельвина и частота ν — в герцах.

Таблица 46.2

Характеристики радиоизлучения Солнца [2]

Длина волны λ, *см*	Частота ν, *Мгц*	F_ν, 10^{-22} $вт/(м^2 \cdot гц)$				
		Спокойное Солнце		Медленно меняющиеся компоненты	Типичные	
		максимум пятен	минимум пятен		шумовые бури	выбросы
600	50	0,49	0,36	0,0	70	500
300	100	2,3	1,8	0,0	100	500
150	200	9,4	6,9	0,2	70	400
60	500	29	18	7	5	300
30	10^3	44	27	20	0	200
10	$2 \cdot 10^3$	69	49	48	—	100
6	$5 \cdot 10^3$	155	115	52	—	70
3	10^4	340	260	45	—	20
1,5	$2 \cdot 10^4$	820	730	—	—	—
0,6	$5 \cdot 10^4$	3400	3400	—	—	—

Солнечные пятна

Диаметры пятен колеблются от 2000 до 170 км [3]. Время существования пятен колеблется от 3—4 ч до 10—15 месяцев [3].

Средняя продолжительность пятнообразовательного цикла 11,04 года [2].

Отношение интенсивности полного излучения пятна к интенсивности прилежащей фотосферы [2]: *пятно/фотосфера* ~ 0,27, *полутень/фотосфера* ~ 0,78.

Эффективная температура большого пятна [2]: *ядро*, $T_{эф} = 4400$ K; *полутень*, $T_{эф} = 5700$ K.

Изменение диаметра Солнца в течение одиннадцатилетнего периода [4] равно ±0″,03, увеличение происходит в годы максимума пятен, уменьшение — в годы минимума. Напряженность магнитного поля пятна связана с его размером [1]: $H = 140\sqrt{d}$, здесь H — гауссы; d — диаметр пятна в тысячах километров.

46.3. ПЛАНЕТЫ И СПУТНИКИ [1]

Масса Земли	$\mathcal{M}_{\oplus} = 5,977 \cdot 10^{27}$ г
Общая масса:	
планет	$347,9\ \mathcal{M}_{\oplus}$
спутников	$0,12\ \mathcal{M}_{\oplus}$
малых планет	$3 \cdot 10^{-4}\ \mathcal{M}$
метеорной материи	$5 \cdot 10^{-10}\ \mathcal{M}_{\oplus}$
планетной системы	$448\ \mathcal{M}_{\oplus} = 2,678 \cdot 10^{30}$ г
Полный угловой момент планетной системы	$3,15 \cdot 10^{50}$ г·см²/сек

Таблица 46.3

Орбиты планет [1]

Планета	Большая полуось орбиты, мил. АЕ	Период, годы: звездный	синодический	Средняя орбитальная скорость, км/сек	Эксцентриситет орбиты	Наклонение к эклиптике (на 1.1.70 г.)
Меркурий	57,91	87,969	115,88	47,90	0,2056	7°00′15″
Венера	108,21	224,701	583,92	35,05	0,006816	3°23′40″
Земля	149,60	365,256	-	29,80	0,01675	—
Марс	227,9	686,98	779,94	24,14	0,09331	1°51′00″
Юпитер	778,3	4332,6	398,88	13,06	0,04833	1°18′17″
Сатурн	1428	10759,2	378,10	9,65	0,05589	2°29′25″
Уран	2872	30687	369,66	6,80	0,0470	0°46′22″
Нептун	4498	60184	367,49	5,43	0,0087	1°46′21″
Плутон	5910	90700	366,72	4,74	0,247	17°08′30″

Таблица 46.4

Физические характеристики планет [1]

Объем Земли $V_{\oplus} = 1,08332 \cdot 10^{27}$ см³; масса Земли $\mathcal{M}_{\oplus} = (5,977 \pm 0,004) \cdot 10^{27}$ г; ρ — средняя плотность; g — ускорение силы тяжести на поверхности планеты; $a_{экв}$ — экваториальное центробежное ускорение; $v_{сек}$ — скорость освобождения; φ — наклонение экватора к плоскости орбиты

Планета	Экваториальный радиус, км	Сжатие	Объем $V_{\oplus} = 1$	Масса $\mathcal{M}_{\oplus} = 1$	ρ, г/см³	g, см/сек²	$a_{экв}$, см/сек²	$v_{сек}$ [14], км/сек	Период вращения	φ
Меркурий	2420	0,0	0,057	0,053	5,3	360	—0,00	4,15	58,7 дня [28]	7° [11]
Венера	6200	0,0	0,91	0,815	4,06	870	0,06	10,21	242,98 дня* [28]	<3 [28]
Земля	6378,39	0,00336	1,000	1,000	5,517	980,00	—3,392	11,19	23 ч 56 мин 4,1 сек	23°27′
Марс	3400	0,0052	0,150	0,107	3,96	376	1,71	5,00	24 ч 37 мин 22,6 сек	25°19′
Юпитер	71 400	0,062	1317	318,0	1,33	2600	—220	60,2	9 ч 50 мин 30 сек	3°07′
Сатурн	60 400	0,096	763	95,22	0,687	1120	176	36,2	10 ч 14 мин	26°45′
Уран	27 800	0,06	50	14,55	1,56	910	—62	21,2	0,89 дня* [28]	97°30′
Нептун	24 300	0,02	42	17,23	2,27	1090	28	23,4	0,83 дня [28]	29°
Плутон	3000 [28]		1,3	0,9	4	800	—	10	6,39 дня [28]	>50 [28]

* Вращение обратное.

Таблица 46.5

Фотометрические характеристики планет

Видимые звездные величины $m_{пл}$ для Меркурия и Венеры даны для положения наибольшей элонгации ($\alpha = 90$). Для остальных планет, кроме Земли, — для положения средней оппозиции ($\alpha = 0°$). α — угол фазы, или угловое расстояние Земли от Солнца, видимое с планеты. Значение $m_{пл}$ для Земли соответствует величине, видимой с Солнца [2, 28].

Планета	$m_{пл}$	Альбедо	Планета	$m_{пл}$	Альбедо
Меркурий	—0,2	0,06	Сатурн	+0,7	0,57
Венера	—4,22	0,77	Уран	+5,51	0,60
Земля	—3,80	0,36	Нептун	+7,87	0,71
Марс	1,98	0,9	Плутон	+14,87	0,16
Юпитер	2,50	0,46			

Таблица 46.6

Температурные условия на поверхности планет [3]

Равновесная температура рассчитана из $\sigma T_{пл}^4 = Q/R^2$, где Q — солнечная постоянная; R — расстояние до планеты; σ — постоянная Стефана — Больцмана.

Планета	Облучение Солнца на среднем расстоянии от Солнца: энергия, 10^{27} эрг/сек	температура, °К	Отношение облучения к перигелию к афелию	Температура дневной атмосферы: по инфракрасным измерениям [2], °К	по радиоизлучению [8], °К	σ
Меркурий	12,7	301	2,31	611	—	681
Венера	3,61	236	1,03	743±87	560—580	404
Земля	1,99[2]	155	1,07	295	—	391
Марс	0,81	58	1,43	270	218±36	316
Юпитер	0,070	5,0	1,21	135	145±16	173
Сатурн	0,0209	1,46	1,25	125	110	126
Уран	0,0072	0,360	1,21	103	—	89
Нептун	0,0021	0,149	1,04	108	—	72
Плутон	0,0012	0,087	2,77		—	63

— Температура после посадки станции Венера-8 [15].

Таблица 46.7

Атмосферы планет

Количество газа и химический состав определены по наиболее внешним (видимым) слоям планетных атмосфер. Количество газа выражено либо в процентах, либо в значениях толщины приведенной атмосферы из этого газа, центного при стандартных условиях (1 *атмо-см* — $= 2{,}68 \cdot 10^{19}$ *молекул/см*^{2}).

Меркурий	2000 *атмо-см*
Венера [15]	$P = (90 \pm 1{,}5)$ *атм*; CO_2—97%; $N_2 < 2\%$; $H_2O \sim 1\%$; $O_2 < 0{,}1\%$; $NH_3 \approx 0{,}1 \div 0{,}01\%$
Земля [2]	$P = 1$ *атм*. N_2 — 78%; O_2 — 21%; H_2O — $0{,}1 \div 2{,}7\%$; Ar — 0,93%; $CO_2 \approx 0{,}033\%$; $CH_4 = 1{,}5 \cdot 10^{-4}\%$; $H_2 = 0{,}5 \times 10^{-4}\%$
Марс [2]	$P = 0{,}06$ *атм*. N_2 — 96%; Ar — 1,1%; CO_2 — 0,23%; $O_2 < 0{,}1\%$; H_2O — 0,006%; $CH_4 < 0{,}006\%$; $NH_3 < 0{,}001\%$; $N_2O_4 < 0{,}0005\%$
Юпитер [28]	CH_4 — 45 000 *атмо-см*; NH_3 — 970 *атмо-см*; $H_2 = 6{,}7 \cdot 10^{5}$ *атмо-см*; He — $3{,}4 \cdot 10^{5}$ *атмо-см*
Сатурн [28]	$CH_4 = 3{,}5 \cdot 10^{4}$ *атмо-см*; NH_3 — 270 *атмо-см*; $H_2 = 1{,}4 \cdot 10^{7}$ *атмо-см*
Уран [28]	$H_2 = 4{,}8 \cdot 10^{3}$ *атмо-см*; $CH_4 = 3{,}5 \cdot 10^{4}$ *атмо-см*
Нептун [28]	$CH_4 = 6 \cdot 10^{4}$ *атмо-см*

Таблица 45.8

Спутники планет

Приведенные значения наклонений орбит приблизительны; *R* означает обратное движение по отношению к экваториальной плоскости планеты; спутники Урана имеют обратное движение по отношению к плоскости эклиптики; *E* — наклонение к эклиптике; *P* — наклонение к плоскости экватора планеты; *B* — наклонение к плоскости орбиты планеты [1, 10].

Спутник	Расстояние от планеты, 10^3 км	Синодический период, сут	ч	мин	сек	Наклонение орбиты, град	Эксцентриситет орбиты	Радиус, км	Масса, 10^{24} г	$m_{пл}$ в средней оппозиции
Земля:										
Луна	384,4	29	12	44	3	5,1 *E*	0,0549	1738	73,4	−12,7
Марс:										
1. Фобос	9,4		7	39	27	1,8 *P*	0,019	8	—	+11,5
2. Деймос	23,5	1	6	21	16	1,4 *P*	0,003	4	—	12,5
Юпитер:										
1. Ио	421,8	1	18	28	36	0 *P*	Малый и переменный	1660	79	+5,5
2. Европа	671,4	3	13	17	64	0 *P*		1440	47,8	5,7
3. Ганимед	1071	7	3	59	36	0 *P*		2470	153	5,1
4. Каллисто	1884	16	18	5	7	0 *P*		2340	50	6,3
5. Амальтея	181		11	57	28	0 *P*	0,003	80	—	13,0
6.	11 500	260	0			28,5 *B*	0,155	60	—	13,7
7.	11 250	276	10			28,0 *B*	0,207	20	—	16,2
8.	23 500	670	5			*R*30 *B*	0,38	20	—	16,2
9.	23 700	625				*R* 34	0,20	11	—	17,7
10.	11 750	276				28,3 *B*	0,140	10	—	17,9
11.	22 600	609				*R*16,6 *B*	0,207	12		17,5
12.	21 000	546				*R*	0,13	10	—	18,1
Сатурн:										
1. Мимас	186,7	0	22	37	12	1,5 *P*	0,0196	200	0,039	+12,1
2. Энцелад	238,2	1	8	53	22	0 *P*	0,0045	300	0,07	11,7
3. Тефия	294,6	1	21	18	05	1,1 *P*	0,0000	600	0,65	10,6
4. Диона	377,7	2	17	42	10	0 *P*	0,0021	650	1,03	10,7
5. Рея	527,5	4	12	27	56	0,3 *P*	0,0009	900	2,3	10,0
6. Титан	1223	15	23	15	25	0,3 *P*	0,0289	2500	137	8,3
7. Гиперион	1484	21	7	39	6	0,6 *P*	0,110	200	0,11	14
8. Янет	3563	79	22	4	56	14,7 *P*	0,029	600	5	11
9. Феба	12950	636	16			*R* 30 *P*	0,166	150	—	14,6
Уран:										
1. Ариэль	191,8	2	12	29	40	0 *P*	0,007	500	—	+15,5
2. Умбриэль	267,3	4	3	28	25	0 *P*	0,005	200	—	16
3. Титания	438,7	8	17	0	0	0 *P*	0,023	500	—	14,0
4. Оберон	586,6	13	11	15	36	0 *P*	0,010	400	—	14,2
5. Миранда	130,1									17
Нептун:										
1. Тритон	353,6	5	21	3	27	*R* 20 *P*	0,000	2000	150	+13,6
2. Нереида	6000		—			—	0,7	150	0,06	19,5

Система колец Сатурна [2]

Масса колец . . . . . $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ масс Сатурна
Толщина колец . . . . . ≤ 10 км
Радиус колец, км:
внешнее кольцо (умеренная яркость) . . . . . 137 000—120 000
щель Кассини (темная) . . 120 000—116 000
кольцо *B* (очень яркое) . . 116 000—90 000
щель между кольцами *B* и *C* (темная) . . . . . 90 000—89 000
кольцо *C* (слабое) . . . . 89 000—72 000
Экваториальный радиус планеты 60 400

Луна [2]

Расстояние от Земли
среднее . . . . . (384 401 ± 2) км
при наибольшем удалении . . . . 406 700 км
при наибольшей близости . . . . 356 400 км
Радиус . . . . . 1737,9 км
Масса . . . . . (7,349 ± 0,007) × $\times 10^{24}$ г — $M_Z/81,33$
Средняя плотность . . . . . 3,34 г/см³
Ускорение силы тяжести на поверхности Луны . . . . . 162,6 см/сек²

Синодический период (период полной смены фаз) . . . . . 29,53029 *суток*
Скорость остывания . . . . . 2,35 *км/сек* [14]
Эксцентриситет лунной орбиты . . . 0,5449
Наклонение орбиты к эклиптике . . . . 1°8′43″
Период осцилляции наклонения орбиты к эклиптике . . . . . 173 дня
Величина осцилляции наклонения орбиты к эклиптике . . . . . ±9′
Видимый угловой радиус на среднем расстоянии от Земли . . . . . 15′32,6″

Площадь видимой с Земли поверхности 3956
Средняя орбитальная скорость . . . . 1,02 *км/сек*
Давление лунной атмосферы [1] . . . <20,1 *дин/см²*
Температура поверхности
полная луна, центр диска из инфракрасных измерений . . . . . 390 °К
по данным радионаблюдений . . . . 380 °К
новая Луна, центр диска . . . . 120 °К
равномерная, расчетное значение . . 384 °К
Освещенность от полной Луны над границей земной атмосферы [1] . . . . (0,322±0,014) *лк*

Таблица 46.9

Малые планеты [2]

Номер	Название	Радиус, *км*	Масса, 10^{21} *г*	Видимая звездная величина m_{pg}	Период обращения вокруг оси		Характеристики орбиты			
					ч	*мин*	Сидерический период, *суток*	Большая полуось орбиты, *а.е.*	Эксцентриситет	Наклонение к эклиптике, *град*
1	Церера	300	600	4,0	9	05	1681	2,767	0,079	10,6
2	Паллада	250	150	5,1	—	—	1684	2,767	0,235	34,8
3	Юнона	110	20	6,3	7	13	1594	2,670	0,256	13,0
4	Веста	190	100	4,2	5	20	1325	2,361	0,089	7,1
6	Гебе	110	20	6,6	7	17	1380	2,426	0,202	14,8
15	Эвномия	140	40	6,2	6	07	1569	2,645	0,185	11,8
511	Давида	130	30	7,5	—	—	2072	3,182	0,177	10,7

Таблица 46.10

Кометы [1]

В таблице дан список периодических комет, которые наблюдались больше одного раза и возвращения которых ожидается: e — эксцентриситет; q — расстояние в перигелии; a — большая полуось орбиты

Комета	Последние появления. Дата прохождения через перигелий (до 1962 г.)	Число наблюденных появлений (до 1962 г.)	Период, лет	e	q, *а. е.*	a, *а. е.*
Энке	16/III 1951 г.	42	3,3	0,848	0,34	2,21
Брэдфилда—Скьяпарелли	18/IV 1947 г.	7	4,9	0,70	0,88	2,90
Темпеля II	2/VII 1946 г.	10	5,2	0,63	1,3	3,0
Понса—Винеке	10/VII 1945 г.	14	6,1	0,66	1,14	3,35
Форбса	16/IX 1948 г.	3	6,4	0,55	1,5	3,5
Когута	11/VIII 1946 г.	6	6,6	0,54	1,5	3,4
Шварцмана—Вахмана II	23/VIII 1948 г.	4	6,5	0,39	2,1	3,5
Джакобини—Цинтнера	18/IX 1946 г.	6	6,6	0,72	1,0	3,55
Перрэна	6/VI 1950 г.	10	6,7	0,61	1,37	3,54
Даниэля	24/VIII 1950 г.	4	6,8	0,56	1,5	3,58
Брукса II	25/VIII 1946 г.	8	6,95	0,435	1,87	3,65
Рейнмута I	23/VII 1950 г.	3	7,4	0,49	1,9	3,8
Уиппла	25/VI 1948 г.	3	7,41	0,36	2,45	3,80
Фая	28/IX 1947 г.	13	7,4	0,57	1,66	3,8
Отерма	15/VII 1950 г.	Ежегодно	7,86	0,144	3,39	3,96
Понтекулана	25/XI 1943 г.	4	8,1	0,70	1,19	4,0
Вольфа I	23/X 1960 г.	9	8,3	0,40	2,4	4,1
Кроммелина	11/IV 1944 г.	5	8,62	0,58	1,77	4,17
Вейсала I	10/XI 1949 г.	2	10,55	0,64	1,70	4,8
Неуйминна III	27/V 1951 г.	2	10,9	0,59	2,05	4,93
Тутля I	10/XI 1939 г.	8	13,6	0,82	1,02	5,7
Шварцмана—Вахмана I	9/VI 1941 г.	Ежегодно	16,2	0,14	5,51	6,4
Неуйминна I	16/XII 1948 г.	3	17,8	0,77	1,04	6,8
Крулевского	4/XI 1928 г.	4	27,9	0,92	0,75	9,2
Понса—Брукса	26/I 1884 г.	2	71,6	0,96	0,78	17,2
Ольберса	8/X 1887 г.	2	72,5	0,93	1,20	17,4
Галлея	19/IV 1910 г.	30	76,0	0,967	0,59	17,9

Физические характеристики комет [1]

Диаметр головы или комы кометы зависит от расстояния до Солнца r:

r, а. е.	0,3	0,5	1,0	2,0	3,0
Диаметр, 10^3 км	20	100	900	100	30

Диаметр центральной конденсации . . . ≈ 2000 км
Диаметр пыли . . . . . ≈ 10 км
Протяженность хвоста, наблюдаемого невооруженным глазом . . . . . $(10 \div 150) \cdot 10^6$ км
Расстояние от Солнца, начиная с которого появляется хвост . . . . . ≈ 1,7 а. е.
Масса $\mathcal{M}$ кометы (граммы), имеющей абсолютную звездную величину m:

$$\lg \mathcal{M} = 19 - 0{,}4\, m$$

В кометах обнаружены: Na, CH, CN, NH, OH, CH_2, NH_2, CO^+, N_2^+, OH^+, CH^+.

Метеоры [1]

Средняя масса $\mathcal{M}$, г, и радиус a, см, метеора, как функция звездной величины $m_{пер}$:

$$\lg \mathcal{M} = -0{,}1 - 0{,}4\, m_{пер}, \quad \lg a = -0{,}7 - 0{,}133\, m_{пер}$$

Таблица 46.11

Масса метеоритного вещества, выпадающего на Земли за сутки

Звездная величина		Масса одного метеорита, г	Суммарная масса, 10^6 г
$m_{пер} \leqslant -10$	Видимые	$\geqslant 8000$	~ 1
$-10 \leqslant m_{пер} \leqslant +6$	»	0,005—8000	~ 5
$6 \leqslant m_{пер} \leqslant 20$	Невидимые	$\leqslant 0{,}005$	~ 20

46.4. ЗВЕЗДЫ

Спектральная классификация звезд

Спектры звезд согласно исторически сложившейся классификации делятся на 10 классов, обозначаемых латинскими буквами в следующем порядке:

$$\begin{array}{ccccccccccc} & & & & & & S & & & & \text{побочный ряд } S \\ & & & & & & | & & & & \\ O & - & B & - & A & - & F & - & G & - & K & - & M \text{ основная последовательность} \\ & & & & & & & & | & & | & & \\ & & & & & & & & R & & N & & \text{побочный ряд } R \end{array}$$

(ранние классы) (поздние классы)

Принадлежность звезды к данному спектральному классу определяется видом линейчатого спектра звезды. Температура убывает от класса O к классу M. Каждый спектральный класс делится на 10 подклассов, обозначаемых арабскими цифрами от 0 до 9, которые ставятся после буквы, например, $F0$, $M5$. Иногда дают еще более дробную классификацию: (G 7,5 или K 0,8).

Спектральный класс связан с цветом звезды:

O — голубой цвет	G — желтый
B — голубовато-белый	K — оранжевый
A — белый	M — красный
F — желто-белый	

После обозначения спектрального класса римской цифрой указывается класс светимости звезды:

I — сверхгиганты (Ia — яркие, Ib — слабые)
II — яркие гиганты
III — гиганты
IV — субгиганты
V — главная последовательность
VI — субкарлики
VII — белые карлики

Кроме перечисленных десяти спектральных классов существуют еще три:

Q — новые звезды
P — планетарные туманности
W — звезды типа Вольфа — Райе

Звезды типа Вольфа — Райе делятся на углеродную последовательность ($WC5$ — $WC8$) и азотную последовательность ($WN5$ — $WN8$).

Для указания класса спектра кроме приведенных обозначений присваиваются еще и следующие:

c — сверхгиганты, например $c\,M\,1$
g — гиганты, » $g\,G\,2$
d — карлики, » $d\,G\,0$
sd — субкарлики, » $sd\,M\,2$
w — белые карлики, » $w\,A\,1$

Для обозначения различных характерных спектров приводятся дополнительные буквы -суффиксы [3]:

n — необычайно широкие и размытые линии
s — резкие линии
k — присутствуют межзвездные линии
e — присутствуют эмиссионные линии (в тех спектрах, где они не являются постоянной характеристикой)
q — частично обращенные эмиссионные линии
eq — эмиссионные линии с приходящим с фиолетовой стороны поглощением
ep — присутствуют эмиссионные линии, по своему характеру отличные от нормально соответствующих классу
ew — эмиссии, типичные для звезд класса W
em — присутствуют эмиссионные линии металлов и добавление к эмиссионным линиям водорода
v — переменность спектра (не обусловлена орбитальным движением и пульсацией)
ev — переменность относится только к эмиссионным линиям
p — особенный, необычный спектр. Иногда дают расшифровку особенности: в Андромедае $A0p$ (Mn II, Cr) — присутствует линия марганца, происхождение которой неизвестно (Cr)
pq — особенности, напоминающие спектр новой звезды
con — отсутствуют видимые линии поглощения
! — чрезвычайно ярко выраженная особенность

Характеристики спектральных классов [1]:

P — планетарные туманности
Q — новые
W — звезды Вольфа—Райе. Горячие звезды с широкими эмиссионными линиями или эмиссиями
O — горячие звезды с линиями нейтрального гелия в поглощении
B — линии гелия в поглощении; линии водорода усиливаются к классу A
A — линии водорода достигают наибольшей интенсивности, а затем ослабевают; линии Ca II усиливаются
F — линии Ca II усиливаются; линии металлов развиваются; линии H слабеют
G — линии Ca II жестко к других металлов интенсивны, линии водорода слабее
K — линии металлов очень интенсивны; развиваются молекулярные полосы
M — очень красные звезды; сильные полосы поглощения окиси титана
R, N — полосы поглощения молекулярных соединений углерода, окиси углерода и циана
S — полосы поглощения окиси циркония

Таблица 46.12

Эффективные температуры звезды [5]

Спектральный класс	$T_{эф}$, °K	Спектральный класс	$T_{эф}$, °K				
			Главная последовательность V	Субгиганты IV	Гиганты III	Гиганты II	Сверхгиганты Ib
B0	25 000	F5	6600	6510	6470	6340	6200
B1	22 500	F6	6300	6310	6020	5910	5800
B2	20 300	F8	6150	5890	5620	5460	5300
B3	18 000	G0	6000	5750	5300	5150	5000
B5	15 700	G2	5730	5350	4930	4770	4600
B6,5	14 000	G5	5520	5060	4650	4470	4290
B8	12 800	G8	5320	4870	4440	4290	4000
B9	11 800	A0	5120	4650	4200	4010	3850
A0	11 000	K1	4920	4450	4000	3850	3700
A1	10 300	K2	4760	4280	3810	3700	3500
A2	9 700	K3	4610	—	3660	3540	3430
A3	9 100	K5	4410	—	3550	3430	3320
A5	8 700	K6	4300	—	—	—	—
A7	8 100	M0	3910	—	3340	3270	3210
F0	7 600	M1	3400	—	3203	3150	3100
F2	7 000	M2	3200	—	3090	3070	3050
		M3	—	—	2985	—	—
		M4	—	—	2850	—	—
		M5	—	—	2710	—	—
		M6	—	—	2600	—	—

Температура центра планетарных туманностей оценивается в 90 000° К, а звезд Вольфа — Райе — 80 000°К.

Звездные величины [1, 5]

Яркость (или блеск) звезд выражается в логарифмической шкале звездных величин (зв. вел.), основанием которой является $100^{0,4} \approx 2,512$. Отношение блеска двух звезд I_1 и I_2 связано с их звездными величинами m_1 и m_2:

$$m_2 - m_1 = -2,512 \lg (I_2/I_1).$$

Чем ярче звезда, тем меньше ее звездная величина.

Видимые звездные величины обозначаются m.

Абсолютной звездной величиной называется звездная величина, отнесенная к расстоянию 10 *пк*:

$$M = m + 5 - 5 \lg r - A,$$

где r — расстояние, *пк*; A — поправка на поглощение света в межзвездном пространстве.

В зависимости от спектральной чувствительности метода измерения различают звездные величины: визуальные $m_{виз}$, $M_{виз}$ и фотовизуальные, или желтые $m_{пв} = m_{ф.\ пв} - V$; $M_{ф.\ пв}$ (определяются фотометрированием изображения, полученного на ортохроматической пластинке с желтым светофильтром. Этот метод по спектральной чувствительности близок к визуальному, поэтому часто как для фотовизуальных, так и для визуальных звездных величин применяют одно и то же обозначение: m; *виз*.)

Фотографические $m_{pg} = P$, M_{pg}, либо m_{ph} и M_{ph}. При применении синего светофильтра получают фотографические синие звездные величины B, M_B; ультрафиолетовые U, M_U; болометрические $m_{бол}$; $M_{бол}$.

Разность между фотографической и визуальной называется показателем цвета C, а разность болометрической и визуальной величин — болометрической поправкой Δm. Показатель цвета тем более, чем красивее звезда.

Звезда $M_{бол} = 0$ излучает $3,03 \cdot 10^{28}$ *вт* [1]. Звезда $m_{бол} = 0$ дает на границе земной атмосферы поток энергии $= 2,54 \cdot 10^{-5}$ *эрг/(см² · сек)* [1]. Звезда $M_{виз} = 0$ обладает силой света $2,47 \cdot 10^{26}$ *св* [1]. Звезда $m_{виз} = 0$ создает на границе земной атмосферы освещенность $2,58 \cdot 10^{-6}$ *лк* [1].

Диаграмма Рессела — Герцшпрунга

Три важнейшие характеристики звезды: масса, светимость и радиус могут быть связаны двумя независимыми соотношениями, которые обычно представляют графически. Диаграмма спектр — светимость носит название диаграммы Рессела — Герцшпрунга (рис. 46.2).

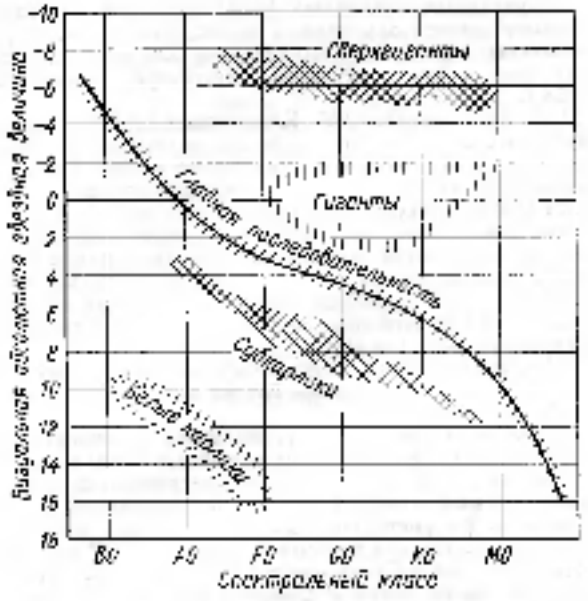


Рис. 46.2. Диаграмма Рессела — Герцшпрунга [4, 13] спектр — светимость с основными равновидностями звезд населения I.

Таблица 46.13

Ближайшие звезды [13]

Звезда	Расстояние, пк	Звездная величина: видимая	Звездная величина: абсолютная M_v	Спектр
Солнце	$4.85 \cdot 10^{-9}$	−26,7	+4,9	G4
Проксима Центавра	1,31	+11,3	15,7	M
α Центавра A	1,32	0,3	4,7	G4
α Центавра B	1,32	1,7	6,1	K1
Звезда Барнарда	1,84	9,5	13,1	M5
Ланланд 21185	2,46	10,7	13,7	M2
Вольф 359	2,48	13,5	16,6	M8
+36° 2147	2,58	7,6	10,4	M2
Сириус	2,66	−1,5	1,4	A1
Спутник Сириуса	2,66	+8,5	11,4	A5
Росс 154	2,90	10,6	13,2	M5
Росс 248	2,99	12,2	14,7	M6
Лейтен 7996	3,05	12,3	14,9	M6
ε Эридана	3,30	3,8	6,2	K2
Процион	3,37	0,5	2,8	G4
Спутник Проциона	3,37	10,8	13,1	—
61 Лебедя	3,38	5,4	7,7	K3
Спутник 61 Лебедя	3,38	6,1	8,4	K6
τ Кита	3,40	3,7	6,0	G5
ε Индейца	3,47	4,7	7,0	K5

Таблица 46.14

Самые яркие звезды [13]

В случае кратных звезд данные относятся ко всей системе в целом. Обозначения следующие: Виз. дв. — визуально двойная; Сп. дв. — спектрально-двойная; Чет. — четырехкомпонентная система; Перем. — переменная; Виз. тр. — визуально тройная.

Подробные звезды	Звездная величина: видимая	Звездная величина: абсолютная M_v	Расстояние [3], пк	Спектр [1]	Примечание [1]
Сириус	−1,6	1,4	2,66	A1	Виз. дв.
Канопус	−0,9	−4,6	55	cF0	
α Центавра	0,1	+4,7	1,32	G2, K3	Виз. тр.
Вега	0,1	+0,6	8,1	A0	—
Капелла	0,2	−0,5	13,7	gG1	Сп. дв.
Арктур	0,2	0,0	11	gK0	—
Ригель	0,3	−6,2	200	cB8	Чет.
Процион	0,5	+2,8	3,37	F5	Виз. дв.
Ахернар	0,6	−1,7	42,8	B5	—
Атебе	0,9	−5,1	61	gB1	Виз. дв.
Альтаир	0,9	+2,4	5,0	A7	—
Бетельгейзе	0,9	−5,0	200	cM2	Перем.
α Южного Креста	1,1	−2,8	67	B1	Виз. дв.
Альдебаран	1,1	−0,5	21	gK5	Виз. дв.
Поллукс	1,2	+1,0	10,7	gG8	—
Спика	1,2	−2,2	49	B1	Сп. дв.
Антарес	1,2	−2,4	52	cM1	Виз. дв.
Фомальгаут	1,3	+2,1	70	A3	—
Денеб	1,3	−5,2	165	cA2	—
Регул	1,3	−0,7	25,7	B8	Виз. тр.

Переменные звезды [18]

Переменные звезды делятся на три основных класса: пульсирующие, эруптивные и затменно-двойные.

Пульсирующие переменные звезды. Ниже приведены характерные особенности пульсирующих переменных звезд. Перед названием класса сделано условное обозначение, после названия — число объектов, зарегистрированных на 1958 г.

C. Долгопериодические (классические) цефеиды. 610. Период и форма кривой блеска постоянны. Периоды лежат в диапазоне от 1 до 70 дней. Амплитуда пульсации 0,1—2^m. Спектральный класс в минимуме блеска *G—K*, в максимуме блеска — *F*. Скорость увеличения радиуса до 20 км/сек.

I. Неправильные переменные. 1370. Признаки периодичности выражены очень слабо или совсем отсутствуют.

M. Звезды типа Мира Кита. 3657. Долгопериодические гиганты с периодами от 80 до 1000 дней. Амплитуда изменения блеска 2,6—5^m. Спектры эмиссионные поздних спектральных классов (*Me*, *Se*).

SR. Полуправильные переменные. 1679. Гиганты или сверхгиганты, обладающие заметной периодичностью, периоды — от 30 до 1000 дней. Амплитуда изменения блеска 1—2^m.

RR. Переменные типа RR Лиры. 2426. Короткопериодические гиганты с периодами от 1 ч до 1 дня. Амплитуда изменения блеска 1—2^m. Спектральный класс.

как правило, *A*. Период и форма кривой блеска постоянны. Скорость увеличения радиуса до 100 *км/сек*.

UV. Звезды типа RV Тельца. 92. Сверхгиганты. Периоды от 30 до 150 дней, амплитуда до 3^m. Спектральные классы *G, K, M*.

βC. Звезды типа β Цефея. 11. Пульсирующие гиганты, амплитуда изменения блеска ~$0{,}1^m$. Периоды от 2,5 до 7 с. Спектр B1—B3.

δSc. Звезды типа δ Щита. 5. Переменные класса *F* с амплитудами $0{,}25^m$ и периодами до 1 дня.

αCV. Звезды типа α Гончих Псов. 9. Амплитуда изменения блеска ~$0{,}1^m$. Периоды от 1 до 25 дней. Спектр: *Ap*, сильные линии кремния, стронция, хрома и редкоземельных элементов. Обладают мощными магнитными полями, изменяющимися вместе с изменением блеска и спектра.

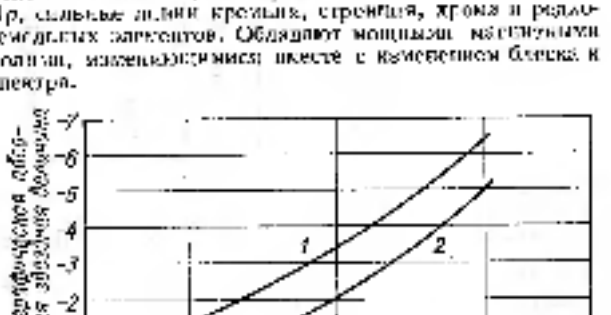


Рис. 46.5. Зависимость период — светимость для цефеид [4]:
1 — классические цефеиды (δ-Цефеи); *2* — цефеиды населения II (*RR*-Лиры).

Средняя абсолютная звездная величина связана у цефеид с периодом изменения блеска. Зависимость период — светимость несколько различна для звезд, концентрирующихся к галактической плоскости (классические цефеиды), и звезд, встречающихся в шаровых скоплениях (звезды населения II).

Эруптивные переменные. Ниже приведены характерные особенности эруптивных переменных звезд. Перед названием звезды стоит его условное обозначение, после названия — число обсерваций, зарегистрированных на 1958 г.

N. Новые звезды. 146. Карликовые горячие звезды, внезапно, за время от одного до нескольких десятков дней, увеличивающие блеск на $7—16^m$ и затем в течение нескольких лет оставающие до первоначального состояния. Вблизи максимума блеска спектр класса *A* или *F* с линиями поглощения. После достижения максимума блеска появляются широкие эмиссионные линии водорода, гелия и других элементов [3]. Скорость выбрасывания вещества от 300 до 1600 *км/сек*. Полная энергия, выделенная за вспышку, до 10^{46} *эрг*. Частота вспышек в Галактике ~2 в год [1].

Ne. Новоподобные переменные. 35. Наименования ноне характеризуют изменения блеска или спектральные особенности.

SN. Сверхновые звезды. 7. Внезапно увеличивающие блеск на 20 и более звездных величин и затем медленно ослабевающие. Спектр характеризуется очень широкими эмиссионными полосами. После вспышки спектр O, *WC* или *WN*. Скорость сбрасываемой оболочки достигает 8000 *км/сек*. Полная энергия вспышки до 10^{49} *эрг*. Частота появлений в Галактике ~1 вспышка за 250 лет [1].

RCB. Звезды типа R Северной Короны. 39. Звезды высокой светимости классов *F — K* и *R*, характеризующиеся медленными непериодическими ослаблениями блеска на $1—9^m$. В минимуме блеска появляются эмиссионные линии металлов.

RW. Звезды типа RW Возничего. 590. Характеризуются быстрыми и неправильными изменениями блеска. Амплитуды достигают нескольких звездных величин. Большинство звезд связано с диффузными туманностями.

UG. Звезды типа U Близнецов. 112. Карликовые звезды, за 1—2 дня увеличивающие свой блеск на $2—6^m$, затем ослабевающие в течение нескольких десятков дней. Средняя частота вспышек от 30 до 600 дней. Строгой периодичности нет. Спектр с эмиссионными линиями HI, HeI и HeII, CaII. В максимуме блеска линии поглощ.

Список галактических новых [2]

Таблица 46.15

Новая	Год вспышки	Видимая звездная величина: предельная стадии	максимум	конечной стадии	Спектр после вспышки	Время увеличения блеска на 3^m, дни	Тип
Тельца (Краб)	1054	—	—6	—	Э. т.*	—	*SN* I
Кассиопеи (Тихо)	1572	—	—4,1	—	Э. т.	—	*SN* I
Змееносца (Кеплера)	1604	—	—2,2	—	—	—	*SN* I
T Возничего	1891	13	4,0	14,5	*Oe*	120	*N*
Персея-2	1901	13,5	0,2	13,3	*Oe*	12	*N*
Змееносца	1910	13,7	4,6	14,3	*Oem*	37	*N*
Близнецов-2	1912	15	3,5	14,6	*Oe*	34	*N*
Орла-3	1918	10,6	—1,1	10,6	*Oe*	7	*N*
Лиры	1919	16,0	6,6	15,0	*Oem*	70	*N*
Лебедя 3	1920	15	2,0	16,1	*Oe*	14	*N*
RR Скульптора	1925	12,7	1,2	9	—	150	*N*
DQ Геркулеса	1934	14,3	1,4	13,8	—	105	*N*
CP Змееносца	1936	15,3	2,1	14,9	—	9	*N*
Кормы	1942	17	0,2	—	*Oe*	8	*SN*?

* Э. т. — Эмиссионная туманность.

UV. Звезды типа UV. Кита. 15. Карликовые звезды спектральных классов *dM3e — dM6e*. В течение нескольких десятков секунд увеличивают блеск на 6^m. Полная продолжительность вспышки несколько десятков минут.

Звезды типа Z Жирафа. 15. Схожи с *UG*, но имеют периоды постоянства блеска. Амплитуды изменения блеска от 2 до 5^m. Длительности циклов колеблются от 10 до 40 дней.

Затменно-двойные звезды [18]. Обозначение *E*. На 1968 г. зарегистрировано 2763 объекта. Двойные системы с плоскостью орбиты, близкой к лучу зрения наблюдателя. При вращении вокруг общего центра тяжести один компонент затмевает другой. Периоды изменения блеска совпадают с периодами обращения по орбите (от нескольких часов до десятков лет). Амплитуда изменения блеска может достигать нескольких звездных величин.

Пульсары

Предположительно пульсары — это карликовые или нейтронные звезды, резко меняющие свой блеск в радиодиапазоне (наиболее изучены дециметровый и метровый диапазоны). Для некоторых пульсаров обнаружены пульсации в видимом свете и рентгеновском излучении. Периодичность пульсаций весьма полная (с погрешностью до 10 %). Замечено, что периоды вращения пульсаров могут плавно увеличиваться на величину от 10^{-6} *секунд* до 10^{-7} *секунд*.

Таблица 46.16

Характеристики пульсаров, обнаруженных до 9 февраля 1970 г. [16]

Обозначения: *AP* 1641+09; *P* — пульсар; прямое восхождение $\alpha = 16$ ч 41 *мин*; склонение δ.

Название пульсара	Галактическая широта, град	Период, *сек*	Расстояние, *пк*	Длительность импульса, *мсек*
MP 0031	—07	0,940	300	25
MP 0324	—54	0,448	250	10
CP 0329	+64	0,714	670	7
MP 0350	—16	0,554	625	20
NP 0527	+21	3,745	1290	148
NP 0531	+21	0,033	1400	9,5
PSR 0626—28	—28	1,244	250	50
MP 0736	—40	0,374	2400	40

Продолжение табл. 46.16

Название пульсара	Галактическая широта, град	Период, *сек*	Расстояние, *пк*	Длительность импульса, *мсек*
CP 0808	+74	1,292	140	90
MP 0818	—45	1,237	—	25
AP 0823+26	+26	0,530	480	13
PSR 0833—45	—45	0,089	500	2
CP 0834	+06	1,273	700	35
MP 0835	—40	0,705	3000	20
PSR 0904+77	+77	1,579	—	<80
MP 0940	—56	0,662	3050	30
PP 0943	+08	1,093	440	24
CP 0950	+08	0,253	70	21
MP 0959	—56	1,439	2250	50
CP 1133	+16	1,188	120	43
MP 1154	—62	0,400	6750	—
AP 1237+25	+25	1,382	210	60
MP 1240	—63	0,368	5700	60
MP 1359	—70	0,690	—	20
MP 1426	—66	0,758	1700	10
MP 1449	—65	0,180	2250	5
PSR 1451—68	—68	0,253	300	25
NP 1508	+55	0,739	400	20
MP 1530	—50	1,372	500	25
AP 1541+09	+09	0,748	670	100
MP 1601	—03	0,421	—	16
PSR 1642—03	—03	0,387	825	20
MP 1706	—15	0,654	250	20
MP 1727	50	0,835	3500	30
MP 1747	—48	0,742	1090	20
PSR 1749—28	—28	0,562	1270	4,7
MP 1818	—03	0,600	1700	20
MP 1857	—25	0,611	—	35
MP 1911	—06	0,625	1870	20
CP 1919	+21	1,337	310	40
PSR 1929+10	+10	0,227	200	10
JP 1933+16	+16	0,358	2070	—
MP 1944	+17	0,440	—	35
JP 1946	+35	0,717	—	—
AP 2015+28	+28	0,587	360	28
JP 2062	+51	0,529	—	—
PSR 2045—16	—16	1,961	280	100
JP 2113	+46	1,014	—	—
PSR 2316+47	+47	0,536	1100	30
AP 2303+30	+30	1,075	—	30

Таблица 46.17

Белые карлики [2]

Звезда	Спектр	m_{pg}	M_{pg}	$\lg \frac{M}{M_\odot}$	$\lg \frac{R}{R_\odot}$	$\lg \frac{\rho}{\rho_\odot}$
Van Maanen	wF8	12,35	14,24	+0,1	—1,96	6,0
40 *Эридана B*	wA2	9,5	11,0	—0,37	—1,82	5,1
Сириус *B* [27]	wA5	10,0	11,3	—0,01	—2,11	6,39*
Процион *B*	wF8	10,8	13,1	—0,29	—1,9	5,4
R 627	wA5	14,24	13,8	0,2	—2,3	6,7
W 1346	wA2	11,5	10,8	+0,4	—1,81	5,8

* Ускорение силы тяжести 4,5·10^8 *см/сек*². Гравитационное красное смещение, расчет 63 *км/сек*, измерено (61±6) *км/сек* [27].

Гиганты [10, 17]

Звезда	Спектр	Светимость $m_{зв}$	Светимость $M_{зв}$	Температура поверхности, °К	Радиус (Солнце=1)	Плотность, г/см³
Капелла	gG1	0,09	−0,06	5500	12	$2,4\cdot10^{-3}$
Арктур	gK0	−0,06	−1,0	4100	30	$3\cdot10^{-4}$
Альдебаран	gK5	1,1	−0,1	3900	60	$2\cdot10^{-5}$
Шеат	gM5	2,6	−1,4	2900	170	$2\cdot10^{-6}$
Бетельгейзе	cM2	0,73	−4,1	3100	290	$6\cdot10^{-7}$
Антарес	cM1	1,0	−4,6	3100	480	$3\cdot10^{-7}$
Мира	cM7e	—	−0,8	—	400	—
Рас-Альгети	cM8	—	−3,4	—	600	—

46.6. ГАЛАКТИКА И ВСЕЛЕННАЯ

Галактика [2]

Диаметр	~25 *кпс*
Толщина	~1 *кпс*
Масса	$\sim1,1\cdot10^{11}\ M_\odot$
Общая средняя плотность	$\sim7\cdot10^{-24}$ *г/см³* $\sim0,1\ M_\odot/пс^3$
Средняя плотность в центре Галактики	$4\ M_\odot/пс^3$
Абсолютная звездная величина (если смотреть со стороны северного полюса Галактики)	$M_{зв}=-20,0^m$
Скорости освобождения для галактического центра	450 *км/сек*
для окрестностей Солнца	290 *км/сек*
для тонких Галактики	180 *км/сек*
Потенциальная энергия Галактики	$1,1\cdot10^{62}$ *эрг*

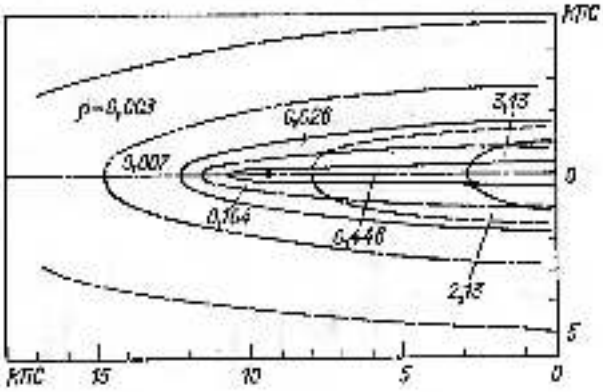


Рис. 46.4. Схематическая модель Галактики [4]. Положение Солнца отмечено кружком. Средние плотности даны в единицах плотности межзвездной среды вблизи Солнца.

Скорость галактического вращения на разных расстояниях от центра Галактики [4]:

Расстояние, *пк*	Скорость, *км/сек*
5000	150
10 000	190
15 000	220
20 000	230
25 000	224
30 000	212
35 000	197
40 000	189

Плотность звездной материи в окрестностях Солнца $0,05\ M_\odot\cdot пк^{-3}=3,5\cdot10^{-24}$ *г/см³* [1].

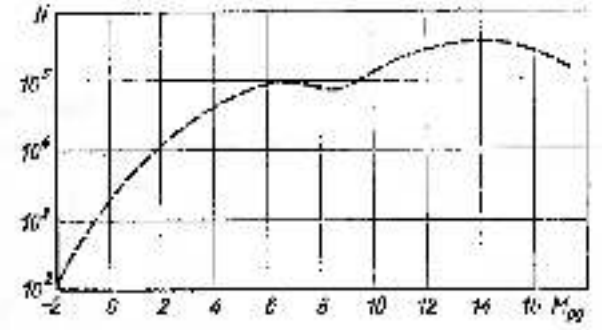


Рис. 46.5. Функция светимости [4]. По вертикальной оси отложено число звезд в кубе с ребром 1000 световых лет в окрестностях Солнца в зависимости от абсолютной звездной величины.

Таблица 46.19

Характеристики галактических подсистем [3]

Подсистемы	Полутолщина однородного слоя, пк	Число известных объектов	Предполагаемое число объектов
Объекты, концентрирующиеся около галактической плоскости			
Долгопериодические цефеиды	44	500	$3\cdot10^4$
Звезды класса *B*	46	10 000	$1{,}5\cdot10^6$
Рассеянные звездные скопления	53	500	$3{,}3\cdot10^4$
Звезды класса *O*	56	200	$5{,}5\cdot10^3$
Темные (пылевые) туманности	100	10^4	10^5
Сверхновые звезды	—	7	—
Подсистемы промежуточной составляющей			
Новые звезды	182	101	10^6
Переменные типа *RV* Тельца	200	92	10^4—10^5
Звезды классов *R*, *N*	100—300	400	$3{,}35\cdot10^4$
Планетарные туманности	217	350	$1{,}3\cdot10^6$
Звезды класса *S*	360	90	$5\cdot10^5$
Белые карлики	400	100	$6\cdot10^5$
Долгопериодические переменные звезды	500	3000	$1{,}3\cdot10^6$

Продолжение табл. 46.19

Подсистемы	Полутолщина однородного слоя, пк	Число известных объектов	Предполагаемое число объектов
Объекты, составляющие сферическую часть Галактики			
Долгопериодические переменные с периодом *P*—150—200 *сут*	2000	300	10^5
Короткопериодические цефеиды	2000	3000	$1{,}7\cdot10^6$
Долгопериодические цефеиды типа *W* Девы	3000	50	$2\cdot10^4$
Субкарлики			
Шаровые звездные скопления	2000 3000	300 100	10^{11} 230
Все звезды в среднем	380	10^9	$1{,}2\cdot10^{11}$

В звездное население I типа входят горячие гиганты и сверхгиганты, долгопериодические цефеиды, новые и сверхновые звезды, рассеянные скопления, водородные облака, пылевые туманности.

В звездное население II типа входят красные карлики, красные гиганты, короткопериодические цефеиды, шаровые скопления. Звездное население II типа образует ядра галактик и преобладает в областях, удаленных от основной плоскости спиральных галактик.

Среднее энерговыделение, отнесенное к единице массы для звездного населения для I и II типа, составляет соответственно 100 и 0,1 *эрг/(г·сек)* [3].

Межзвездная среда

Таблица 46.20

Яркие диффузные туманности [2]

К ярким туманностям *E*-типа относятся туманности с эмиссионными линиями в спектре. *E*-туманности светятся вследствие возбуждения атомов светом близлежащей звезды, обычно принадлежащей к более раннему, чем *B1* спектральному классу. Яркие туманности *C*-типа отражают свет близлежащих звезд.

Туманность	Тип	$m_{пов}$	Расстояние, *пк*	Угловой диаметр, *мин*	Плотность *частиц/см³*	Масса, $M_\odot$	Возбуждающая звезда	
							Спектр	$M_{вис}$
Крабовидная *NGC* 1952	*E*	6,6	1050	5	1000	—	—	—
Большая туманность в Орионе *NGC* 1976	*E*	4	460	30	600	700	*O*e	5,4
Розетка *NGC* 2237	*E*	—	1400	80	30	9000	*O*5e	7,3
Лагуна *NGC* 6523	*E*	5,8	1500	25	20	3000	*O*5e	6,0
Северная Америка *NGC* 7000	*CE*	—	800	90	10	3000	*O*5	6,0
Туманность в Плеядах *NGC* 1432	*C*	—	125	40	—	—	*B*8	3,0

Таблица 46.21

Параметры различных типов темных туманностей [1]

Параметры	Глобула		Угольные мешки	Волокнистые облака
	I	II		
Диаметр, *пк*	0,06	0,5	8	40
Полное поглощение проходящего света A_{pg}, *зв. вел.*	5	1,5	1,5	1,4
Плотность вещества, *г/см³*	$>10^{-21}$	$5\cdot10^{-23}$	$3\cdot10^{-24}$	$5\cdot10^{-25}$
Масса, $M_\odot$ — 1	$>0{,}002$	0,05	13	300

Поглощение света звезд, межзвездная пыль [2]

Поглощение света звезд вблизи галактической плоскости A_{pg}	2,0 зв. вел./кпс
Для звезд, свет которых не задерживается облаками A_{pg}	0,3 зв. вел./кпс
Средняя плотность пылинок в пространстве вблизи галактической плоскости	$1,3 \cdot 10^{-28}$ г/см³
Масса пылинок	10^{-15} г
Температура пылинок	25 °К

Межзвездный газ [1]

Средняя плотность межзвездного газа $1,2 \cdot 10^{-24}$ г/см³ — 0,7 атомов водорода в 1 см³. Химический состав межзвездного газа совпадает с общей космической распространенностью элементов.

В соответствии с состоянием межзвездного газа различают области HI и HII. В областях HI водород в основном нейтрален, а металлы ионизованы. Кинетическая температура $T = 90$ °К. В областях HII водород и металлы ионизованы. Кинетическая температура $T = 10\,000$ °К.

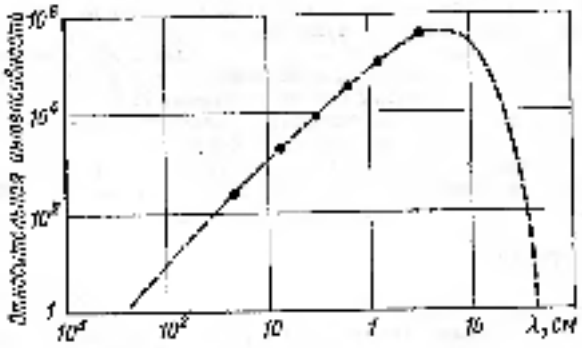


Рис. 46.6. Спектр радиоизлучения (кружки) излучения с температурой 3° К (пунктир) и измеренные значения для реликтового излучения (точка) [12, 22].

Излучение и поля в межзвездном пространстве [2]

Плотность энергии:	эрг/см³
Реликтовое излучение [22]	$0,6 \cdot 10^{-12}$
Излучение (свет звезд)	$0,7 \cdot 10^{-12}$
Турбулентное движение газа	$0,5 \cdot 10^{-12}$
Общее галактическое вращение	$1300 \cdot 10^{-12}$
Космические лучи	$1 \cdot 10^{-12}$
Магнитное поле	$4 \cdot 10^{-12}$
Эквивалентная температура реликтового излучения T	2,9 ± 0,7 °К
Напряженность межзвездного магнитного поля	$1 \cdot 10^{-6}$ эр

Внегалактические туманности (галактики) [1]

Согласно классификации Хаббла, галактики делятся на правильные и неправильные. Правильные галактики подразделяются [19] на спиральные S и эллиптические E. В соответствии со степенью развития спиральной структуры спиральные галактики имеют подтипы Sc, Sa, Sb, Sc для галактик с центральным ядром и

Таблица 46.22

Распределение галактик по абсолютным величинам [13]

Абсолютная звездная величина	Количество галактик S и Ir в 1000 Мпк³	Количество галактик E в 1000 Мпк³
От −21 до −22	0,025	
От −20 до −21	0,62	0,091
От −19 до −20	6,9	1,7
От −18 до −19	19	6,5
От −17 до −18	39	6,9
От −16 до −17	55	9,1
От −15 до −16	155	—

Таблица 46.23

Члены местной группы галактик [19] и некоторые ярчайшие галактики [13]

Галактика	Тип	Расстояние Δ, Мпс	Звездная величина: видимая	Звездная величина: абсолютная	Угловые размеры, мин	Диаметр, кпс	Масса $\mathfrak{M}$, 10^{10} $\mathfrak{M}_\odot$	Лучевая скорость, км/сек
Галактика	Sbc	—	—	−19	—	30	110 [2]	—
Большое Магеллановое Облако	Ir I	0,048	0,63	−18,1	10°×9,0°	6,4	6	+280 [1]
Малое Магелланово Облако	Ir I	0,048	2,6	−16,0	4°×2°	3,9	13	−167 [2]
Туманность Андромеды, M31, NGC 224	Sb	0,69	4,4	−20,3	197×92	40	340	−35
NGC 205 } Спутники M31	E5p	0,69	8,9	−15,8	20×16	6,2	1,6 [1]	−8
M32, NGC 221 }	E2	0,69	9,1	−16,6	12×8	2,4	1,9	+17
Система в Скульпторе	dE	0,51	9,2	−11,2	—	—	0,002	—
Система в Печи	dE	0,23	9,1	−12,9	60	4,0	0,02	+40 [2]
M81, NGC 3031 } Группа Большой	Sb	1,34	7,9 [1]	−18,7	16×10	6 [1]	100	+80 [2]
M82, NGC 3034 } Медведицы	Ir I	3,3	9,3 [1]	−16,8	8 [1]	2,7 [1]	15	+250 [1]
NGC 55	Ir I	1,9 [2]	7,1 [2]	−19,2 [2]	25 [1]	—	40	+180 [2]
NGC 253	Sb	2,2 [2]	7 [2]	−20 [2]	22 [1]	8 [1]	30	−70 [2]
NGC 1068	Sa	4,0 [2]	7,6 [2]	−19,1	10×8	12 [2]		+320 [2]
Сокбоpо [2]	Sa	4,4	8,1	−20,4	—	6	130	1020
NGC 4594	Sb	5,0	9,0 [1]	−20,7	7×1,5	3,0	50	1130 [1]
NGC 4486 [2]	E6	11	8,9	−23,5	—	13	1000	1220 [2]

SBa, *SBo*, *SBb*, *SBc* для галактик с ядром, находящихся посередине перемычки, соединяющей спиральные ветви. Эллиптические галактики делятся на подклассы от *E0* до *E7* по степени увеличения сплюснутости эллипсоидов. Неправильные галактики обозначаются *Ir*. Индекс I приписывается неправильным галактикам клочковатой формы, не имеющим ядра, индекс II приписывают неправильным галактикам неразрешенной структуры (по звезды, скопления, области *HII* и т. п.). При наличии некоторых отклонений в структуре галактики от типичных свойств добавляется индекс *p* (например, *FSp*).

Пространственная плотность галактик . . . . . 3 *Мпс*$^{-3}$

Вклад излучения галактик в яркость неба на 1 *кв·град*^{2} . . . . . 0,5 (m_{pg} = 10)

Средняя масса галактики . . . . . $\sim 5 \cdot 10^{10}$ $\mathfrak{M}_\odot$ = 10^{44} *г*

Количество звезд в галактиках . . $10^9 - 10^{12}$

Зависимость массы $\mathfrak{M}_G$ — светимость M_{pg} для галактик:

$$\lg \mathfrak{M}_G = \lg \mathfrak{M}_\odot - 0,4\, M_{pg} + 3,16.$$

Вселенная

Внегалактические туманности имеют тенденцию удаляться от нашей Галактики. Скорость удаления v, *км/сек*, связана с расстоянием до галактики: $v = HR$, где H — постоянная Хаббла, R — расстояние, *Мпс* (выражение справедливо при $v \ll c$)

$H = 75$ (*км/сек*)/*Мпс* = $2,44 \cdot 10^{-18}$ *сек*$^{-1}$ [19]

Возраст Вселенной [26] . . . . . $1/H = 13 \cdot 10^9$ *лет*

Средняя плотность материи [1] . . . $\rho = 10^{-30}$ *г/см*^{3}

Численность галактик в наблюдаемой части Вселенной [1] . . . . . $\sim 10^{10}$

Масса наблюдаемой части Вселенной [2] . . . . . $10^{56} - 3 \cdot 10^{56}$ *г*

Плотность излучения [1] . . . . . $4 \cdot 10^{-13}$ *эрг/см*^{3}

46.6. КОСМИЧЕСКОЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ

Поверхностная интенсивность радиоизлучения неба J связана с эквивалентной температурой T и частотой ν [1]:

$$J_\nu = 3,0745 \cdot 10^{-10}\, T\nu^2 \quad вт/(м^2 \cdot спектр. \cdot ед)$$

(T — в градусах Кельвина, ν — в герцах).

Яркость радиоизлучения неба имеет хорошо выраженный максимум в направлении на галактический центр. Яркие дискретные радиоисточники, как правило, не совпадают с яркими оптическими звездами.

Излучение межзвездного водорода (ν = 1420 *Мгц*) тоже концентрируется к плоскости Млечного Пути, но резкий максимум в направлении на центр Галактики отсутствует [8].

Средняя эквивалентная температура небесной сферы на частоте 100 *Мгц* составляет 700° К [1].

Излучение от полной небесной сферы на частоте 100 *Мгц*

$$W = 2,7 \cdot 10^{-20}\ вт/(м^2 \cdot сек)\ [1].$$

Спектры различных источников характеризуются спектральными индексами α или n, причем $\alpha + n = 2$:

$$J_\nu \sim \nu^\alpha \sim \lambda^{n-2}; \quad T \sim \nu^{\alpha-2} \sim \lambda^n.$$

Значения α и n для ν = 100 *Мгц* [2]:

Источники	α	n
Галактические (в среднем)	−0,71	2,71
Внегалактические	−1,06	3,06
Неидентифицированные	−1,21	3,21
Общее галактическое излучение	−0,45	2,45
Участки холодного неба	−0,66	2,66

Число радиоисточников N в единице телесного угла дающих поток больше F при ν = 100 *Мгц* [2]:

F, *вт/(м*^{2} *· гц)*	10^{-26}	10^{-24}	10^{-22}
$\lg N$	−1	+0,3	+2,1

Таблица 46.24

Спектральный состав радиоизлучения различных участков неба [26]

T_A — эквивалентная температура участка неба близкого к галактическому центру. T_H — температура участка на экваторе. Участок В расположен в холодной области неба вдали от галактического экватора.

ν, *Мгц*	T_A, °К	T_B, °К	T_B, °К
16,3	$2 \cdot 10^5$	75 000	50 000
40	67 000	900	8000
64	21 000	3100	2200
90	7700		—
400	6000	740	490
160	2180		—
230	1190	120	70
480	145	16,6	—
1200	17,9	—	—
3000	2,77	—	—

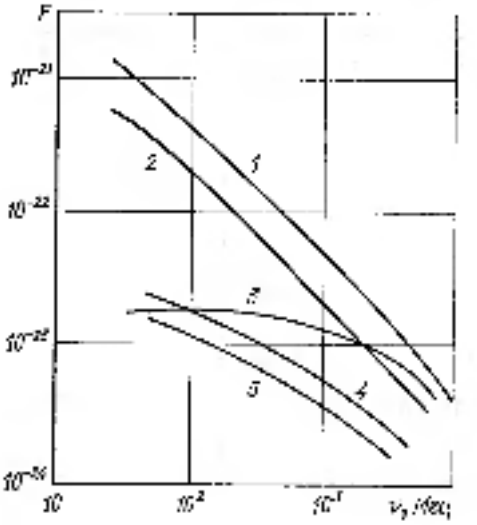


Рис. 46.7. Спектральный состав наиболее мощных дискретных источников радиоизлучения [26]:

1 — Кассиопея А; *2* — Лебедь А; *3* — Телец А; *4* — Центавр А; *5* — Дева А. F — поток излучения, *вт/(м*^{2}*·гц)*.

Таблица 46.25

Некоторые галактические источники радиоизлучения [8]

Источник	Расстояние R, кпс	Угловые размеры	α для частоты $\nu = 100$ Мгц	Поток F, 10^{-26} вт/(м²·гц)		Описание
				$\nu = 100$ Мгц	$\nu = 1000$ Мгц	
Лебедь X	−1,5	0° [1]	−0,2 [1]	4900*	—	Тепловой источник, область H II
Туманность Орион (NGC 6618)	1,7	6, 45°	—	1300*	—	Тепловой источник, область H II
Туманность Северная Америка	0,9	2, 5°	—	660*	—	Тепловой источник, область H II
Туманность Розетка (NGC 2244)	1,4	1, 33°	−0,17	500	520	Тепловой источник, область H II
Кассиопея А	3,4	3′×4′	−0,8	19 000	3100	Остатки сверхновой II типа 369 г.
Крабовидная туманность (M1)	1,1	3′,5× ×5′,5	−0,26	1700	1160	Остатки сверхновой I типа 1054 г.
Кассиопея Б	0,36	6°	−0,7	250	56	Остатки сверхновой I типа Тихо-Брагe 1572 г.
Сверхновая Кеплера	1,0	2,5′	—	80	—	Остатки сверхновой I типа 1604 г.

* Приведен для частоты $\nu = 22$ Мгц.

Таблица 46.26

Внегалактические источники радиоизлучения [8]

Источник	Расстояние R, Мпс	F_{100}	Угловые размеры		α для частоты $\nu = 100$ Мгц	Поток F, 10^{-26} вт/(м²·гц) $\nu = 100$ Мгц	22 радио [8], эрг/сек	Описание
			оптическое	радио				
Лебедь А	220	17,9	2″	85″	−0,68	11 800	10^{46}	M = −21,1. Сталкивающиеся галактики
Дева А (NGC 4486)	11	9,9	11″	11″	−0,73	1780	$8 \cdot 10^{40}$	M = −20,6. Сферическая галактика с голубым выбросом
Центавр А (NGC 5128)	4	6,6	20″	3′×8′	−0,66	1750	10^{40}	M = −21,3. Сталкивающиеся эллиптической и спиральной галактики
Геркулес А	320	17,6	0,5″	2,5″	0,6	560	$4 \cdot 10^{42}$	Двойная галактика с линейным излучением
Тидра А	240	15,9	0,5″	1″	—	400	—	То же
Персей А (NGC 1275)	70	13,3	2,4″	2,4″	−0,8	130	$3 \cdot 10^{42}$	Сталкивающаяся галактика

Квазары

Квазары — это квазизвездные внегалактические источники, радиоизлучение которых гораздо радиоизлучению наиболее мощных радиогалактик. Квазары характеризуются голубоватым цветом и хрякими линиями в спектре, имеющими большое красное смещение [19]. Обозначение: QSS.

Таблица 46.27

Характеристики некоторых квазаров [13]

При оценке расстояний Δ использовалось значение постоянной Хаббла $H = 75$ *км/(сек·Мпк)*. Расстояние оценивается из скорости разбегания v_r: $\Delta = v_r/H$, а скорость разбегания оценивается по красному смещению $z = \Delta\lambda/\lambda$ по графику рис. 46.8.

Квазар	$z = \Delta\lambda/\lambda$	$v_r \cdot 10^3$ *км/сек*	Δ, *Мпк*	Угловые размеры
3C 273	0,10	29 [19]	650	$< 0{,}2''$ [19]
3C 48	0,37	90	1200	$< 1''$
3C 147	0,55	130	1700	$< 1''$
3C 236	0,736	165	2000	—
3C 245	1,029	160	2400	—
3C 287	1,055	185	2500	—
3C 295	1,86	230	3100	$< 1''$
3C 9	2,012	240	3200	

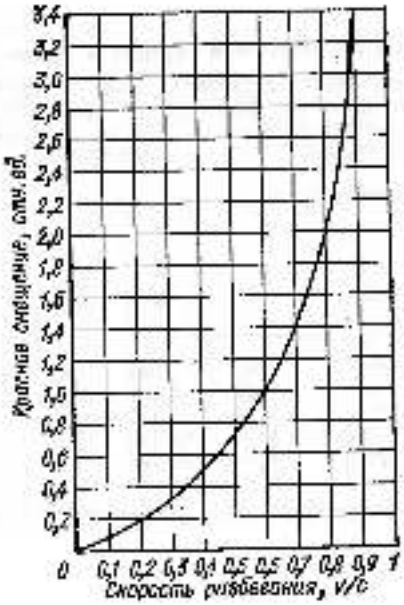


Рис. 46.8. Кажущие смещение удаленных галактик [21].

46.7. КОСМИЧЕСКИЕ ПОЛЕТЫ И ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ ЗЕМЛИ

Время существования спутника массой 100 кг и диаметром 1 м на круговых орбитах [23]:

Высота круговой орбиты, *км*	200	250	300	350	400	500
Время существования, сутки	0,4	4	20	65	160	1010

	Квазар 3C 273:	Квазар 3C 48:
Яркость M [13]	$-26{,}5$	-25
$m_{пр}$ [21]	13	16
Энергия излучения [13], *эрг/сек*:		
оптического	$2 \cdot 10^{44}$	$5 \cdot 10^{44}$
радио	10^{45}	10^{46}
Размер, *пс*	< 500 [19]	< 5000 [13]
Масса [21], $M_\odot$	$2 \cdot 10^{9}$	$2 \cdot 10^{9}$

Идентифицированные линии [13, 21, 24]:

Mg II (2798 Å);	Mg II (2799 Å);
Hγ (4102 Å); Hβ (4340 Å);	Ne V (2975 Å);
	Ne V (3346 Å);
Hβ (4861 Å); Hα (6563 Å);	Ne V (3426 Å);
O III (5007 Å)	O II (3727 Å);
	Ne III (3869 Å)

Таблица 46.28

Время существования, сутки, спутника массой 100 кг и диаметром 1 м на эллиптических орбитах [23]

Высота перигея, *км*	Высота апогея, *км*				
	500	700	1000	1300	1600
200	9	18	37	58	82
250	25	62	102	165	237
260	53	116	236	370	535
300	114	260	545	890	1280
400	410	1120	2630	4450	6000

Таблица 46.29

Периоды обращения спутников Земли

Период обращения спутника зависит от средней высоты полета. В случае движения по круговой орбите скорость движения спутника постоянна и равна первой космической скорости на данной высоте [14].

Высота, км	Круговая скорость, м/сек	Период обращения, ч	Высота, км	Круговая скорость, м/сек	Период обращения, ч
0	7909	1,41	1 690	7062	2,00
250	7760	1,49	2 000	6906	2,12
500	7617	1,58	5 000	5621	3,35
750	7482	1,66	10 000	4935	5,76
1000	7354	1,75	35 800	3072	23,935
1500	7116	1,93			

Таблица 46.30

Значения минимально необходимых скоростей для полета к планетам [14] (высота участка выведения 200 км)

Планета	Скорость в конце участка выведения, км/сек	Продолжительность полета до встречи с планетой, год	Планета	Скорость в конце участка выведения, км/сек	Продолжительность полета до встречи с планетой, год
Меркурий	13,31	0,29	Сатурн	16,03	6,04
Венера	11,25	0,40	Уран	15,73	16,0
Марс	11,36	0,71	Нептун	16,00	30,6
Юпитер	14,00	2,72			

46.8. КОСМИЧЕСКАЯ РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ

Атомные массы элементов, приведенные в табл. 46.31, даны в шкале, в которой за единицу принята 1 а. е. м., равная массе 1/12 атома ^{12}C (см. разд. 1.6). Множитель перехода в физической шкале равен 1,000300. В последней колонке приведен десятичный логарифм космической распространенности элементов [7]. Все значения даны относительно водорода, для которого принято $\lg N = 12,00$. Значения даны для числа атомов естественной смеси изотопов.

Таблица 46.31

Космическая распространенность элементов

Атомный номер	Элемент	Атомная масса, а. е. м.	lg N
1	H	1,00797	12,00
2	He	4,0026	11,21
3	Li	6,939	3,56
4	Be	9,0122	2,80
5	B	10,811	2,88
6	C	12,01115	8,60
7	N	14,0067	8,05
8	O	15,9994	8,95
9	F	18,9984	6,0
10	Ne	20,183	8,70
11	Na	22,9898	6,30
12	Mg	24,312	7,40
13	Al	26,9815	6,22
14	Si	28,086	7,50
15	P	30,9736	5,40
16	S	32,064	7,35
17	Cl	35,453	6,25
18	Ar	39,948	6,89
19	K	39,102	4,82
20	Ca	40,08	6,19
21	Sc	44,956	2,85
22	Ti	47,90	4,89
23	V	50,942	3,82
24	Cr	51,996	5,38
25	Mn	54,9380	5,12
26	Fe	55,847	6,57
27	Co	58,9332	4,75
28	Ni	58,71	5,95
29	Cu	63,54	4,50
30	Zn	65,37	4,23
31	Ga	69,72	2,45
32	Ge	72,59	3,20
33	As	74,9216	2,11
34	Se	78,96	3,33
35	Br	79,909	2,65
36	Kr	83,80	2,21
37	Rb	85,47	2,35
38	Sr	87,62	2,70
39	Y	88,905	2,45
40	Zr	91,22	2,50
41	Nb	92,906	1,50
42	Mo	95,94	1,88
43	Tc	99	→0,6 [1]
44	Ru	101,07	1,44
45	Rh	102,905	0,8
46	Pd	106,4	1,20
47	Ag	107,870	0,82
48	Cd	112,40	1,46
49	In	114,82	0,75
50	Sn	118,69	1,57
51	Sb	121,75	0,95
52	Te	127,60	2,05
53	J	126,9044	1,30
54	Xe	131,30	2,06
55	Cs	132,905	1,16
56	Ba	137,34	2,08
57	La	138,91	1,10
58	Ce	140,12	1,29
59	Pr	140,907	0,66
60	Nd	144,24	1,30
61	Pm	147	0,2 [1]
62	Sm	150,35	0,89
63	Eu	151,96	0,46
64	Gd	157,25	1,05

Продолжение табл. 46.31

Атомный номер	Элемент	Атомная масса, а. е. м.	ν, %
65	Tb	158,924	0,25
66	Dy	162,50	1,08
67	Ho	164,930	0,39
68	Er	167,26	0,84
69	Tm	168,934	0,08
70	Yb	173,04	0,75
71	Lu	174,97	0,06
72	Hf	178,49	0,4
73	Ta	180,948	0,75
74	W	183,85	0,6
75	Re	186,2	0,9
76	Os	190,2	1,4
77	Ir	192,2	1,2
78	Pt	195,09	1,7
79	Au	196,967	0,66
80	Hg	200,59	0,75
81	Tl	204,37	0,55
82	Pb	207,19	1,50
83	Bi	208,980	0,5
84	Po	210	—
85	At	211	—
86	Rn	222	—10,3 [1]
87	Fr	223	—
88	Ra	226,12	—5,2 [1]
89	Ac	227	—9,6 [1]
90	Th	232,038	0,00
91	Pa	231	—7,6 [1]
92	U	238,03	—0,30
93	Np	237	—
94	Pu	242	—

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллен К. У. Астрофизические величины. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
2. Allen C. W. Astrophysical Quantities. 2nd ed., Lond., Univ. of London, 1963.
3. Курс астрофизики и звездной астрономии. Под ред. А. А. Михайлова. М., «Наука», т. 2, 1962; т. 3, 1964; т. 1, 1973.
4. Бок Б., Бок П. Млечный путь. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1959.
5. Франц-Каменецкий Д. А. Физические процессы внутри звезд. М., Физматгиз, 1959.
6. Аллер Л. Астрофизика. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1956.
7. Аллер Л. Распространенность химических элементов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
8. Стайнберг Ж., Леку Ж. Радиоастрономия. Пер. с франц. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
9. Сонт Г. Радиоастрономия. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
10. Рессел Г. Н., Дуган Р. С., Стюарт Д. К. Астрономия. Пер. с англ. М.—Л., ОНТИ, 1935.
11. Справочник по космонавтике. Под ред. Н. Я. Кондратьева и В. А. Одинцова. М., Изд-во Мин-ва обороны СССР, 1966.
12. Корец М. А. «Природа», 1965, т. 11, с. 54; 1968, т. 4, с. 119.
13. Атекян Т. А. Звезды, галактики, Метагалактика. М., «Наука», 1966.
14. Александров С. Г., Федоров Р. Е. Советские спутники и космические корабли. М., Изд-во АН СССР, 1961.
15. «Правда», 8 сентября 1972 г.; Маров М. Я. «Природа», 1972, т. 10, с. 9.
16. Корец М. А., Понизовский З. Л. «Природа», 1970, т. 7, с. 35.
17. Гольдберг Л., Аллер Л. Атомы, звезды и туманности. М. — Л., Гостехиздат, 1948.
18. Кукаркин Б. В. и др. Общий каталог переменных звезд. М., Изд-во АН СССР, 1958.
19. Воронцов-Вельяминов Б. А. Внегалактическая астрономия. М., «Наука», 1972.
20. «Природа», 1971, т. 1, с. 92.
21. Гринштейн Д. Л. В сб.: «Астрофизика». Пер. с англ. М., «Наука», 1967, с. 162.
22. Гинзбург В. Л. «Наука и жизнь», 1966, т. 3, с. 60.
23. Окорокский Д. Г. «Успехи физ. наук», 1957, т. 58, с. 93.
24. Ефремов Ю. Н. «Природа», 1964, т. 2, с. 32.
25. Бербидж М., Бербидж Д. См. [21], с. 169.
26. Шиловский И. С. Космическое радиовещание. М., Физматгиз, 1966.
27. «Природа», 1972, т. 9, с. 104.
28. Кондратьев К. Я. Погода и климат на планетах. М., «Знание», 1975.

ГЛАВА 47

ГЕОФИЗИКА

47.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕМЛИ

Фигура Земли

В 1967 г. на съезде Международной Ассоциации Геодезии в Швейцарии была принята «Геодезическая система 1967» со следующими характеристиками Земли:

Экваториальный радиус Земли	$a = 6378160$ м
Геоцентрическая гравитационная постоянная Земли (включая атмосферу)	$GM = 398603 \cdot 10^9$ м³/сек²
Динамический коэффициент формы Земли	$J = 0{,}0010827$
Угловая скорость вращения Земли	$\omega = 7{,}292115147 \times 10^{-5}$ рад/сек
Отношение массы атмосферы к массе Земли	$\mu_a = 0{,}030001$

Этой системе соответствуют следующие параметры Земли:

Геометрические

Большая полуось	$a = 6378160$ м
Малая полуось	$b = 6356774{,}5161$ м
Линейный эксцентриситет	$E = 521854{,}6732$ м
Полярный радиус кривизны	$c = 6399617{,}4290$ м

e — первый эксцентриситет	$e^2 = 0,006694605532656$
e' — второй эксцентриситет	$e'^2 = 0,006739972512832$
Сжатие	$f = (a - b)/a = -0,003352923371299$
Обратное сжатие	$1/f = 298,247167427$
Средний радиус	$R_1 = (2a + b)/3 = 6371031,5664$ м
Радиус сферы равной площади	$R_2 = 6371029,9148$ м
Радиус сферы равного объема	$R_3 = 6371023,5210$ м

Физические

Нормальный потенциал эллипсоида	$U_0 = 62637000 62,3 \frac{см}{сек^2}$ м
Коэффициенты сферической гармоники разложения потенциала в ряд:	
$J_2 = 0,0011827;$	$J_4 = 0,0000000005516$
$J_6 = -0,0000023712640;$	$J_8 = -0,0000000001428$
Нормальное ускорение силы тяжести на экваторе . .	$\gamma_e = 978,03184536$ см/сек²
Нормальное ускорение силы тяжести на полюсе . . .	$\gamma_p = 983,21772792$ см/сек²
$f' = (\gamma_p - \gamma_e)/\gamma_e = 0,0052792552330$	
$k = (b\gamma_p - a\gamma_e)/(a\gamma_e) = 0,0019310633321$	

В СССР в 1946 г. принят эллипсоид Красовского с параметрами:

Экваториальный радиус . .	$a = 6378245$ м
Полярный радиус	$b = 6356863,0$ м
Сжатие	$f = 1/298,3$
Площадь поверхности эллипсоида	$5,10 \cdot 10^8$ км²
Объем эллипсоида	$1,083 \cdot 10^{12}$ км³
Средний радиус равновеликой сферы	$R_1 = 6371110$ м
Средняя плотность Земли .	$\rho = 5,517$ г/см³
Масса Земли, имеющая плотность ρ_1	$M = 5,975 \cdot 10^{27}$ г

Строение Земли

Форма Земли, близкая к эллипсоиду вращения, указывает на то, что вещество Земли находится в гидростатическом равновесии по отношению к действующим на него силам (притяжения и центробежным), т. е. ведет себя по отношению к длительно действующим силам как жидкое тело [3, 4]. По оценкам, вязкость Земли равна 10^{22} пз.

В то же время модуль сдвига, определенный для Земли в целом по кратковременным воздействиям (землетрясения, приливы и перемещения масс в атмосфере и т. п.), составляет около $15 \cdot 10^{11}$ дин/см². Таким образом, земной шар является вязко-упругим телом с периодом релаксации $\tau \approx 10^{10}$ сек.

Упругие свойства внутри Земли изменяются на некоторых определенных глубинах скачком и плавно в пределах слоев, разделенных этими границами. Важнейшими границами являются поверхность Мохоровичича, залегающая на глубине 10—70 км, и поверхность Вихерта — Гутенберга на глубине 2900 км, резко преломляющая продольные упругие волны и не пропускающая поперечных волн. Эти границы разделяют земной шар на три главные зоны: ядро, мантию и кору. Кора обладает наибольшей жесткостью, мантия характеризуется высокой вязкостью, а ядро находится в состоянии, близком к жидкому, и реагирует лишь на продольные волны изменением своего объема. Внутри трех главных зон земного шара имеются менее четко выраженные границы.

Внутреннее строение Земли определяется по известной ее массе, моменту инерции земного шара и на основе изучения упругих волн от землетрясений [4]. Получено, что плотность вещества в центре Земли $\rho_0 \geq 12,2$ г/см³ и ядро Земли отделено от вышележащих слоев на глубине 2900 км резким скачком плотности, порядка 4 г/см³. Скачкообразные изменения плотности с глубиной могут быть вызваны изменением как вещественного состава пород, так и их фазового состояния.

Кора континентов в 3—10 раз толще коры океана [5]. Толщина коры континентов различна на платформах (30—40 км) и в геосинклиналях (40—60 км). В зонах самых высоких гор Памира и Гималаев она достигает 70—80 км. Нижняя граница коры — граница Мохоровичича M — в этих областях образует корни гор, которые глубоко (на 30—40 км) по сравнению с платформенными равнинными районами погружаются в мантию. Кора океанов — тонкая, около 4—8 км. Граница M залегает здесь на глубине 10—15 км. Разность глубин границы M на континентах и в океанах составляет 20—50 км. Средняя плотность коры на континентах 2,7—2,8 г/см³, под океанами — 2,9 г/см³. Плотность верхней мантии 3,3—3,4 г/см³. Кора как бы плавает в более тяжелой мантии. На континентах поверхность мантии образует впадины, в океанах — огромные выступы. Земная кора континентов и океанов различается по значениям скоростей распространения упругих волн. Кора океанов не содержит слоев со скоростью распространения продольных волн ~6 км/сек, характерных для коры континентов.

В земной коре различают два главных слоя: осадочный, состоящий из пород, залегающих почти горизонтально, и консолидированный, или кристаллический. Скорости распространения упругих волн в осадочных породах имеют широкие пределы, но в толстых слоях обычно не превышают 5 км/сек. Консолидированной части коры свойственны скорости свыше 6 км/сек (на континентах в верхней части консолидированной коры скорости близки к 6 км/сек, в низкой — к 7 км/сек; на океанах 6,5—7 км/сек).

Суммарная масса [6] главных элементов земной коры, которая делится на литосферу, гидросферу, биосферу и атмосферу, распределяется следующим образом:

Элемент земной коры	Масса, 10^{23} г
Литосфера	2900
Гидросфера	1644
Атмосфера	5,1
Биосфера	0,01

47.2. ЛИТОСФЕРА

Состав

Литосфера состоит из осадков и кристаллических пород. В пределах литосферы различают [6] два резко различных региона: глубинная океаническая область (площадь 266 млн. км², средняя глубина ниже уровня моря 4,5 км, мощность слоя 6 км) и область континентального типа (площадь 105 млн. км², средняя высота над уровнем моря 0,75 км, мощность 35,05 км). Различают две переходные области, химически промежуточные между составом этих регионов: область молодых складчатых поясов (площадь 42 млн. км²) и субокеаническую область (площадь 53 млн. км²). Остающиеся 2 млн. км² суши в основном представляют собой вулканические острова.

Таблица 47.1

Плотность, сила тяжести и давление внутри Земли [4]

Глубина, км	Плотность ρ, г/см³	Сила тяжести g, см/сек²	Давление P, 10¹² дин/см²
0	2,76	980	0,000
33	2,85	983	0,009
33	3,32	983	0,009
80	3,36	984	0,025
80	3,87	984	0,025
200	3,94	983	0,071
400	4,06	981	0,149
800	4,30	977	0,313
1200	4,52	974	0,486
2400	5,13	1010	1,056
2900	9,74	1068	1,330
3600	10,72	913	2,02
4900	11,87	632	3,06
5400	16,16	457	3,53
6000	17,65	184	3,85
6371	17,90	0	3,92

Таблица 47.2

Космогонический возраст Земли [8]

Использованный метод	Оценка возраста, млн. лет	Начальное условие
По приливному трению	2000—4000	Луна на ближайшем расстоянии от Земли
По содержанию неона в океанах	> 180	Образование океанов
По осадконакоплению	> 350	То же
По солнечному излучению	> 20	Образование Солнца
По температуре в земной коре	> 20	Образование Земли
По радиоактивности горных пород	> 3000	Кристаллизация древних пород
По отношению свинец/уран в земной коре	< 4000	Образование земной коры
По содержанию ^{235}U	< 5000	То же
По содержанию свинцовых руд	4500 ± 200	» »

Таблица 47.3

Абсолютная шкала геологического летосчисления [2]

Эра	Эпоха	Млн. лет назад
Кайнозой	Новейшая	0—10 000 лет
	Плейстоцен	10
	Плиоцен	15
	Миоцен	30
	Олигоцен	40
	Эоцен	50
	Палеоцен	60

Продолжение табл. 47.3

Эра	Эпоха	Млн. лет назад
Мезозой	Верхнемеловая	60
	Нижнемеловая	125
	Юрская	160
	Триасовая	200
Палеозой	Пермская	200
	Пенсильванская	285
	Миссисипская	310
	Девонская	350
	Силурийская	410
	Ордовикская	470
	Кембрийская	530
Протерозой	Позднедокембрийская	$1{,}6 \cdot 10^9$
Архей		$3{,}5 \cdot 10^9$
	Породы до образования земной коры	$4{,}5 \cdot 10^9$

Таблица 47.4

Средний химический состав литосферы [5]

Соединение	Масса, 10¹⁸ т	Содержание, %	Соединение	Масса, 10¹⁸ т	Содержание, %
SiO_2	13 050	55,2	Fe_2O_3	661	2,8
Al_2O_3	3 629	15,3	K_2O	452	1,9
CaO	2 082	8,8	TiO_2	385	1,6
FeO	1 781	5,6	P_2O_5	62,0	0,3
MgO	1 231	6,2	MnO	42,6	0,2
Na_2O	682	2,9			

Таблица 47.5

Основные физические свойства горных пород [7]

Свойство	Пределы значений для горных пород: магматических и метаморфических	осадочных
Плотность, г/см³	2,5—3,3	1,9—2,9
Пористость, %	до 10	до 40
Магнитная восприимчивость, 10^{-6} ед. СГСМ	100—4000	до 600
Остаточное намагничивание, 10^{-6} ед. СГСМ	до 4000	—
Модуль Юнга, 10^{11} Г/см²	5—30	2,5—12
Коэффициент Пуассона	0,21—0,26	0,23—0,27
Скорость распространения продольных колебаний, км/сек	4,9—10,1	0,5—5,9

Продолжение табл. 47.5

Свойство	Пределы значений для горных пород	
	магматических и метаморфических	осадочных
Удельное электрическое сопротивление, *ом·м*	400—100 000	0,3—5000
Коэффициент теплопроводности, *ккал/(м·ч·град)*	0,1—2,6	0,9—2,6
Удельная теплоемкость, *ккал/(г·град)*	0,12—0,28	0,16—0,23

Таблица 47.6

Распространенность химических элементов в земной коре [8, 9]

Атомный номер	Элемент	Массовое % содержание	Атомный номер	Элемент	Массовое % содержание
1	Водород	1,00	42	Молибден	$1\cdot10^{-4}$
2	Гелий	$1\cdot10^{-6}$	44	Рутений	$5\cdot10^{-7}$
3	Литий	$5\cdot10^{-3}$	45	Родий	$1\cdot10^{-8}$
4	Бериллий	$2\cdot10^{-4}$	46	Палладий	$5\cdot10^{-8}$
5	Бор	$5\cdot10^{-3}$	47	Серебро	$5\cdot10^{-7}$
6	Углерод	0,35	48	Кадмий	$5\cdot10^{-4}$
7	Азот	0,04	49	Индий	$1\cdot10^{-5}$
8	Кислород	49,13	50	Олово	$8\cdot10^{-4}$
9	Фтор	0,08	51	Сурьма	$5\cdot10^{-5}$
10	Неон	$5\cdot10^{-7}$	52	Теллур	$1\cdot10^{-5}$
11	Натрий	2,40	53	Иод	$1\cdot10^{-4}$
12	Магний	2,35	54	Ксенон	$3\cdot10^{-9}$
13	Алюминий	7,45	55	Цезий	$3\cdot10^{-4}$
14	Кремний	26,00	56	Барий	0,06
15	Фосфор	0,12	57	Лантан	$6,5\cdot10^{-4}$
16	Сера	0,10	58	Церий	$2,9\cdot10^{-3}$
17	Хлор	0,20	59	Празеодим	$4,5\cdot10^{-4}$
18	Аргон	$3\cdot10^{-5}$	60	Неодим	$1,7\cdot10^{-3}$
19	Калий	2,35	62	Самарий	$7\cdot10^{-4}$
20	Кальций	3,25	63	Европий	$2\cdot10^{-6}$
21	Скандий	$5\cdot10^{-4}$	64	Гадолиний	$7,5\cdot10^{-4}$
22	Титан	0,61	65	Тербий	$1\cdot10^{-5}$
23	Ванадий	0,02	66	Диспрозий	$7,5\cdot10^{-4}$
24	Хром	0,03	67	Гольмий	$1\cdot10^{-4}$
25	Марганец	0,10	68	Эрбий	$6,5\cdot10^{-4}$
26	Железо	4,20	69	Тулий	$1\cdot10^{-4}$
27	Кобальт	$2\cdot10^{-3}$	70	Иттербий	$5\cdot10^{-4}$
28	Никель	0,02	71	Лютеций	$1,7\cdot10^{-4}$
29	Медь	0,01	72	Гафний	$4\cdot10^{-3}$
30	Цинк	0,02	73	Тантал	$2,4\cdot10^{-3}$
31	Галлий	$1\cdot10^{-4}$	74	Вольфрам	$7\cdot10^{-3}$
32	Германий	$4\cdot10^{-4}$	75	Рений	$1\cdot10^{-5}$
33	Мышьяк	$5\cdot10^{-3}$	76	Осмий	$5\cdot10^{-8}$
34	Селен	$8\cdot10^{-4}$	77	Иридий	$1\cdot10^{-8}$
35	Бром	$1\cdot10^{-3}$	78	Платина	$2\cdot10^{-5}$
36	Криптон	$2\cdot10^{-8}$	79	Золото	$5\cdot10^{-7}$
37	Рубидий	$8\cdot10^{-4}$	80	Ртуть	$5\cdot10^{-6}$
38	Стронций	0,035	81	Таллий	$1\cdot10^{-4}$
39	Иттрий	$5\cdot10^{-4}$	82	Свинец	$1,6\cdot10^{-2}$
40	Цирконий	0,025	83	Висмут	$1\cdot10^{-5}$
41	Ниобий	$3,2\cdot10^{-4}$	84	Торий	$1\cdot10^{-3}$
			85	Уран	$4\cdot10^{-4}$

Гравиметрия

Сила тяжести на поверхности Земли [4]. Основные элементы гравитационного поля Земли — его потенциал, первые и вторые производные — относятся к прямоугольной системе координат с направлениями осей: x — на север, y — на восток, z — вниз, по направлению отвесной линии. Гравитационный потенциал W выражается в *эрг*, а для его первой $g_z = dW/dz$ и вторых производных ($W_{xx}, W_{yy}, \ldots$) введены специальные наименования единиц измерения. Для ускорения силы тяжести: 1 *гал* = 1 *см/сек²*. Вторые производные потенциала измеряются в *этвешах*, иногда этвеш обозначается буквой E: 1 *этвеш* = 10^{-9} *сек²*.

Сила тяжести на поверхности Земли определяется первой производной гравитационного потенциала по направлению внутренней нормали (ускорением силы тяжести) и представляет собой сумму сил гравитационного притяжения Земли и центробежной силы инерции.

Значения вторых производных потенциала силы тяжести на поверхности эллипсоида Красовского выражаются формулами:

$$W_{xx} - W_{yy} = W_A = 5,1\,[1 + \cos 2\varphi]\ \text{этвеш};$$

$$W_{xz} = 8,1\ \sin^2\varphi\ \text{этвеш}$$

Таблица 47.7

Зависимость силы тяжести g от широты места φ на поверхности эллипсоида Красовского [10—12]

φ, *град*	g, $\frac{см}{сек^2}$	φ, *град*	g, $\frac{см}{сек^2}$	φ, *град*	g, $\frac{см}{сек^2}$
0	978,0300	30	979,3213	60	981,9141
5	978,1682	35	979,7209	65	982,2453
10	978,1838	40	980,1659	70	982,6061
15	978,3758	45	980,6149	75	982,8565
20	978,6337	50	981,0663	80	983,0257
25	978,9521	55	981,5034	85	983,1759
				90	983,2360

Таблица 47.8

Нормальные значения восточного и внутреннего вертикального градиента силы тяжести на поверхности международного эллипсоида 1924 г. [10,12]

Широта φ, *град*	$W_{xx}^{восточ}$, *этвеш*	$W_{zz}^{внутр}$, *этвеш*
20	3087,23	849,30
30	3086,63	848,70
40	3085,80	847,90
50	3085,10	847,17
60	3084,36	846,43
70	3083,76	845,83

Вариации силы тяжести [4]. Периодические изменения силы тяжести на поверхности Земли, обусловленные влиянием Луны, составляют до $2{,}49 \cdot 10^{-4}$ *см/сек²*, когда Луна находится в зените. Амплитуда солнечного приливного действия составляет $9{,}6 \cdot 10^{-5}$ *см/сек²*, так что суммарное влияние Луны и Солнца на силу тяжести достигает $3{,}45 \cdot 10^{-4}$ *см/сек²*.

Амплитуда приливных изменений силы тяжести зависит от широты места наблюдения и уменьшается к высоким широтам.

Сейсмология

Сейсмичность Земли [15]. Накопление упругих напряжений в тектонически активных местах земной коры вызывает тектонические землетрясения. К ним относятся подавляющее большинство землетрясений, в том числе все катастрофические. Причиной землетрясений могут быть также вулканические процессы: извержения, взрывы, лава и т. п.

Вулканические землетрясения сравнительно редки, слабы, носят локальный характер. Из глубинах 50—700 *км* возникают очень сильные глубокофокусные, или плутонические, землетрясения.

Упругие волны в Земле [13]. Распространение упругих деформаций при землетрясениях носит волновой характер. Обычно регистрируются продольные *P* и поперечные *S* объемные волны, а также поверхностные — волны Рэлея *R*, у которых колебания частиц происходят в плоскости, перпендикулярной к поверхности и проходящей через направление сейсмического луча, и поперечные поверхностные волны Лява *L*.

Скорость сейсмических волн возрастает с глубиной, причем на верхней границе земной коры скорость продольных волн 7,8—8,0 *км/сек*, а поперечных 4,3—4,4 *км/сек*. После очень небольшого уменьшения скорости на глубине около 80—100 *км* она вновь растет с глубиной. Особенно большой рост скорости продольных и поперечных волн наблюдается на глубине порядка 400—600 *км* (с 9 до 10 *км/сек*). К этим глубинам приурочен максимум частоты глубоких землетрясений. Начиная с 900 *км* и до границы ядра рост скорости замедляется. На границе ядра скорость продольных волн составляет 13,6 *км/сек*, а поперечных 7,3—7,4 *км/сек*.

На границе ядра скорость продольных волн падает скачком до 7,6—8,0 *км/сек* и снова растет с глубиной; после довольно резкого изменения скорости на глубине около 5000 *км* она остается постоянной и в центре Земли достигает 11,2—11,3 *км/сек*.

Поперечные волны через земное ядро не проходят.

Землетрясения [14]. Для характеристики силы землетрясений используются главным образом степень повреждения зданий и сооружений; кроме того, учитываются остаточные явления в грунтах, субъективные ощущения и т. п.

Интенсивность землетрясений выражается в магнитудах *M* — величинах, определяемых по записям объемных или поверхностных волн на сейсмических станциях [13]. Определения магнитуд относятся к землетрясениям, очаги которых залегают на глубине 20—30 *км*.

Землетрясение, энергия которого принята за единицу ($M = 0$) расходует энергию около 10^{12} *эрг*. Наиболее сильные землетрясения не превышают $M = 8{,}5$, что соответствует энергии до 10^{25} *эрг*. Прирост интенсивности на 0,5 *M* соответствует увеличению энергии примерно в 10 раз.

Таблица 47.9

Шкала землетрясений, принятая в СССР в 1962 г.

Эта шкала основана на максимальной амплитуде смещения маятника, параметры которого (период собственных колебаний 0,25 *сек* и логарифмический декремент затухания 0,50) соответствуют характеристикам зданий, имеющих массовое распространение.

Балл	Наименование	Смещение [15], *мк*	Ускорение [11], *см/сек²*	Характеристика
1	Незаметное	—	2,5	Колебания почвы отмечаются приборами (инструментальные)
2	Очень слабое	—	2,5—5,0	Иногда ощущаются людьми
3	Слабое	—	5—50	Колебания отмечаются немногими людьми
4	Умеренное	0,5	10—16	Отмечается многими людьми. Возможно колебание окон, дверей
5	Довольно сильное	0,5—1	25—250	Качание висящих предметов, скрип полов, осыпание побелки
6	Сильное	1,1—2	50—100	Легкие повреждения в зданиях: тонкие трещины в штукатурке, трещины в печах и т. п.
7	Очень сильное	2,1—4	100—250	Значительные повреждения в зданиях: отпадывание отдельных кусков штукатурки, тонкие трещины в стенах
8	Разрушительное	4,1—6	250—500	Разрушения в зданиях: большие трещины в стенах, падение карнизов, дымовых труб
9	Опустошительное	8,1—16	500—1000	В некоторых зданиях обвалы: падение стен, перекрытий, крыши
10	Уничтожающее	16,1—32	1000—2500	Обвалы во многих зданиях, трещины в грунте около метра шириной
11	Катастрофическое	> 32	2500—5000	Многочисленные трещины на поверхности Земли, большие обвалы в горах
12	Сплошная катастрофа	—	> 500	Изменение рельефа в больших размерах

Таблица 47.10

Частота землетрясений на Земле [13]

Характеристика землетрясения	Интенсивность, M	Число в год
Катастрофические	7,8 и выше	1
Опустошительные	7,0—7,7	10
Разрушительные	6,0—6,9	100
Очень сильные	5,0—5,9	1 000
Сильные	4,0—4,9	10 000
Умеренные	3,0—3,9	100 000

Микросейсмические колебания [17, 18]. Микросейсмические колебания, микросейсмы 1-го рода — глобальное мелькание, связанное с деятельностью циклонов над водными бассейнами. Периоды их заключены в диапазоне 1—12 *сек*; в сторону больших периодов соответствуют большие амплитуды. Непрерывные колебания поверхности имеют синусоидальную или неправильную форму с сезонным изменением интенсивности. Значения смещений колеблются от 0,3 до 4,5 *мкм*.

Микросейсмы 2-го рода вызваны поверхностными явлениями (транспорт, промышленные предприятия, лес, прибой и т. п.), они имеют периоды от 0,001 до 0,1 *сек*, зависят от грунтовых условий и быстро убывают с удалением от источника. Амплитуды смещений лежат в диапазоне $\sim 10^{-2}$—$5 \cdot 10^{-3}$ *мкм*.

Земной магнетизм

Магнитное поле Земли характеризуется вектором напряженности T и выражается в эрстедах (*э*) или гаммах (γ) (1γ = 10^{-5} *э*). Проекции вектора T на оси прямоугольной системы координат образуют составляющие геомагнитного поля: z — вертикальную, x — северную, y — восточную. Часто применяется также горизонтальная $H = \sqrt{x^2 + y^2}$ составляющая.

Угол между горизонтальным направлением H и географическим меридианом называется склонением D, а угол, образуемый вектором напряженности с горизонтальной плоскостью, — наклонением J.

Постоянное магнитное поле Земли [16, 19]. Географическое распределение постоянного магнитного поля соответствует полю однородно намагниченной сферы с координатами полюсов: северного (в Южном полушарии) $\varphi = 71{,}2°$, $\lambda = 156{,}8°$ и южного (в Северном полушарии) $\varphi = 71{,}5°$, $\lambda = 99{,}4°$. Линия, соединяющая магнитные полюса, наклонена относительно географической оси на 11,5° и смещена от центра Земли на 1140 *км* в сторону Тихого океана.

Напряженность магнитного поля на магнитном полюсе 0,65 *э*, напряженность магнитного поля на магнитном экваторе 0,35 *э*. Градиенты вертикальной dz/dh и горизонтальной dH/dh составляющих магнитного поля по высоте h и широте φ для широты Ленинграда равны

$$\frac{dz}{dh} = -25{,}6\ \gamma/км; \quad \frac{dz}{d\varphi} = 250\ \gamma/град = 2{,}5\ \gamma/км;$$

$$\frac{dH}{dh} = -7{,}5\ \gamma/км; \quad \frac{dH}{d\varphi} = -250\ \gamma/град = -4{,}0\ \gamma/км.$$

Магнитный момент однородно намагниченного земного шара [20] $M = 8{,}3 \cdot 10^{25}$ ед. СГСМ.

Элементы постоянного магнитного поля Земли изменяются на ее поверхности в следующих пределах [21].

Полный вектор напряженности поля

от + 0,62 до — 0,73 *э*

Горизонтальная составляющая . . от 0 до 0,41 *э*

Вертикальная составляющая . . от + 0,62 до — 0,73

Магнитное склонение . . . . . от — 180 до + 180°

Магнитное наклонение . . . . . от — 90 до + 90°

Географическое распределение постоянного магнитного поля Земли с учетом магнитных аномалий площадью от нескольких километров до целых материков изображается в виде карт. Карта склонения напряженности магнитного поля приведена на рис. 47.1.

Вековые вариации геомагнитного поля [4]. Средние значения элементов геомагнитного поля изменяются со временем. Сравнение элементов поля для 1885 и 1950 г. приводит к выводу, что полный магнитный момент Земли уменьшается в течение года приблизительно на $7 \cdot 10^{24}$ своего значения. Следовательно, короткий в геологическом отношении отрезок времени достаточен, чтобы полностью изменить всю картину геомагнитного поля.

Переменное магнитное поле Земли. Периодические вариации. Все периодические вариации магнитного поля Земли имеют источники вне Земли. Вариации классифицируют по длине периода, что является одновременно классификацией по физическим причинам. Выделяются солнечно-суточные вариации, вызванные суточным движением Земли вокруг Солнца, лунно-суточные, годовые, циклические вариации с периодом 11 лет, связанные с изменением солнечной активности и т. п. Амплитуды всех периодических вариаций, кроме солнечно-суточных, составляют единицы угловых минут независимо от единицы напряженности поля.

Непериодические вариации магнитного поля Земли. Магнитные бури [21]. Магнитные бури и общая магнитная активность представляют взаимодействием корпускулярного излучения Солнца с постоянным магнитным полем Земли. Магнитные бури — резкие, неправильной формы колебания магнитного поля Земли начинаются одновременно на всем земном шаре и имеют тенденцию к повторению через 27 суток. Поле изменяется по величине и направлению на несколько процентов за время от нескольких часов до нескольких суток.

Земные теллурические токи [22, 23]. Токи и переменное геомагнитное поле — явления, связанные между собою. Плотность теллурических токов j для различных участков земной поверхности приблизительно одинакова $j = 2$ *а/км*^{2}. Интенсивность теллурических токов возрастает от низких широт к высоким. На низких широтах напряженность поля обычно не превосходит десятков милливольт на километр. В полярных странах напряженность может достигать единиц и даже десятков вольт на километр; наиболее сильны теллурические токи во время магнитных бурь.

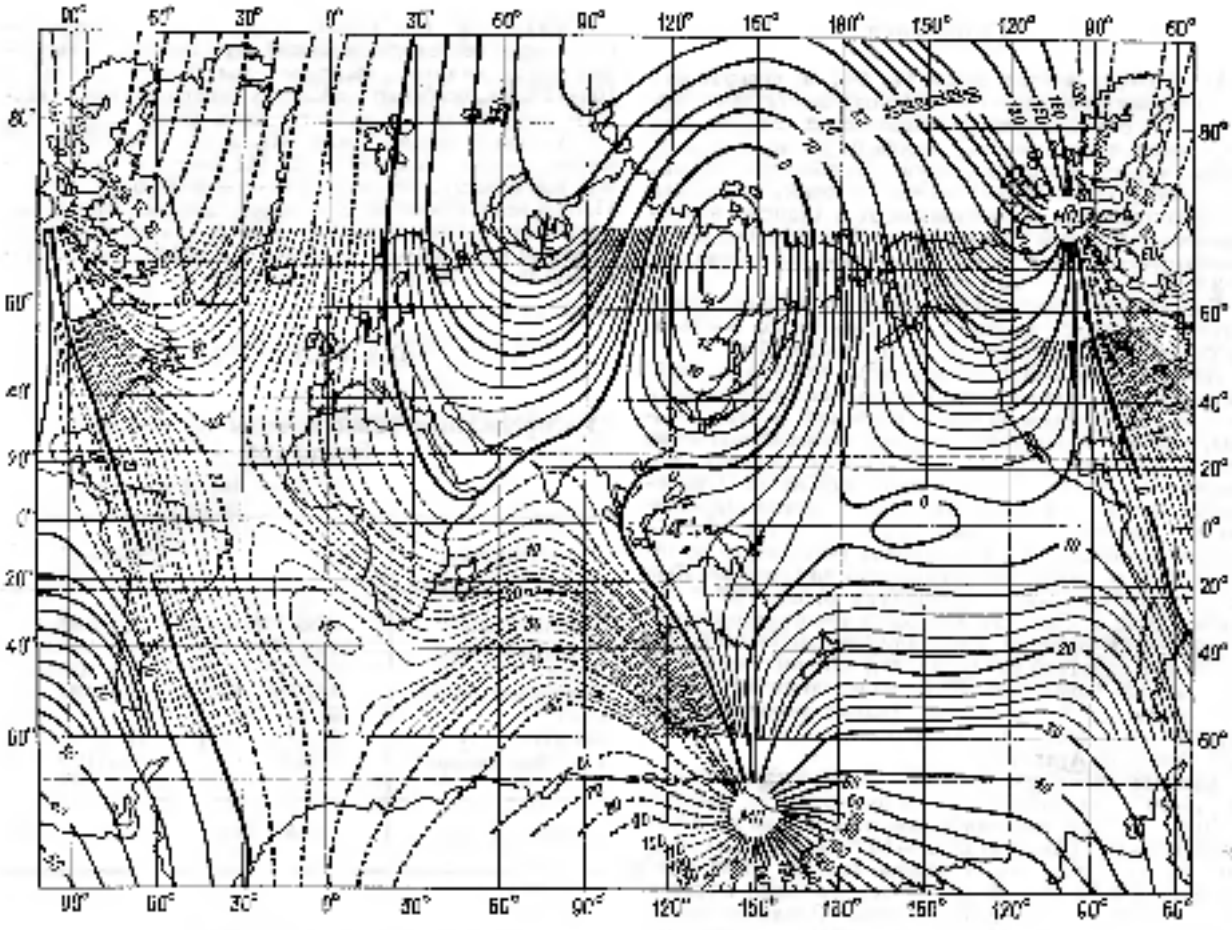


Рис. 47.1. Напряженность магнитного поля Земли T, *нт*, на 1985 г. [32].

Таблица 47.11

Солнечно-суточные вариации геомагнитного поля [21]

Составляющие напряженности	Годы малой магнитной активности				Годы большой магнитной активности			
	Средние широты		Высокие широты		Средние широты		Высокие широты	
	Спокойные дни	Возмущенные дни	Спокойные дни	Возмущенные дни	Спокойные дни	Возмущенные дни	Спокойные дни	Возмущенные дни
Горизонтальная H, $0{,}8\cdot10^{-3}$ *а/м*	7—40	18—58	44—80	50—402	8—74	25—109	27—77	50—480
Вертикальная z, $0{,}8\cdot10^{-3}$ *а/м*	4—16	9—36	20—40	103—305	6—26	14—126	15—70	126—215
Модуль полного вектора, $0{,}8\cdot10^{-3}$ *а/м*	6—26	11—62	20—65	150—300	8—35	13—104	35—130	230—275

Геотермика

Температура внутри Земли [4, 24]. У поверхности Земли температура почвы и неглубоко залегающих горных пород определяется балансом тепла, получаемого от Солнца и излучаемого в атмосферу. Роль терморегулятора играет водная и воздушная оболочка Земли. В среднем глубина проникновения суточных колебаний температуры почвы в зависимости от ее свойства и географических условий изменяется от 35 до 100 *см*. Запаздывание наступления экстремумов в среднем составляет 2—3 *ч* на каждые 10 *см* глубины.

Глубина проникновения годовых колебаний температуры составляет в низких широтах около 5—10 *м*, а в средних и высоких 8—24 *м*, доходя до 30 *м*.

Вековые изменения температуры проникают глубже 50 *м* и сохраняются надолго вследствие запаздывания температурной волны по фазе с глубиной. Вечная мерзлота, распространяющаяся местами до нескольких сотметров, является реликтом ледникового периода, минувшего несколько десятков тысяч лет назад. Наблюдения в шахтах и буровых скважинах показывают постоянное увеличение температуры с глубиной. На глубине около 2800 *м* в Клайфорнии температура достигает 120° С, в разведочных скважинах на Северном Кавказе зарегистрирована температура около 160° С на глубине 3200 *м*. Скорость изменения температуры с глубиной характеризуется величиной геотермического градиента или обратной ему величиной геотермической ступени *м/град*. Значения dT/dh изменяются от 0,1 до 0,01 *град/м*. Для дна океана среднее значение dT/dh порядка 0,08 *град/м* (для Тихого океана) и 0,04 *град/м* (для Северной Атлантики).

Средний поток тепла из недр Земли составляет около $1,2 \cdot 10^{-6}$ *кал/(см²·сек)* с отклонениями от среднего до 50%. На суше измерения теплового потока дали значение $1,04 \cdot 10^{-6}$ (Англия) и $1,16 \cdot 10^{-6}$ *кал/(см²·сек)* (Южная Африка). Средние значения потока тепла через дно океана $0,14 \cdot 10^{-6}$—$8,09 \cdot 10^{-6}$ *кал/(см²·сек)*. Постоянным источником внутреннего тепла Земли являются радиоактивные элементы. Отмечено, что если бы радий был распределен равномерно до глубины в несколько десятков километров с такой же средней концентрацией, как и гранитах, то выделение тепла одним радием могло бы дать весь наблюдаемый тепловой поток Земли.

Таблица 47.12

Концентрация радиоактивных элементов в горных породах различных типов [33]

Породы	Концентрация, отн. ед.			
	^{40}C	^{232}U	^{238}Th	^{40}K
Гранит	2,9	2,1	0,1	3,1
Промежуточная	1,4	1,0	4,3	1,3
Базальтовая	0,9	0,65	3,2	1,1
Дунит	0,9	0,00	0,0	0,00

Из всех имеющихся сведений следует, что температура внутри Земли интенсивно возрастает до глубины 200 *км*, после чего ее рост с глубиной резко замедляется. Температура в центре Земли может быть оценена в 2000 — 4000° С, причем более вероятно нижнее значение.

Охлаждение глубинных слоев Земли в настоящее время идет медленно. Аномалией в термическом отношении зоной являются верхние слои Земли до глубин 100—200 *км*, особенно в областях распространения пиелах поднятых и магматических горах.

Тепловой баланс Земли [31]. Земля ежегодно поглощает 166 *ккал/см²*. Из них: 112 *ккал/(см²·г)* — земная поверхность; 56 *ккал/(см²·г)* — атмосфера Земли. Потери земной поверхностью через длинноволновое эффективное излучение 40 *ккал/(см²·г)*. Потери на испарение 59 *ккал/(см²·г)*. Передача в атмосферу через турбулентную теплопередачу 13 *ккал/(см²·г)*.

47.3. ГИДРОСФЕРА

Распределение запасов воды на поверхности Земли [24]

Таблица 47.13

Запасы воды	Объем, *см³*	Масс, *т*
Океаны и моря	$1336 \cdot 10^{6}$	$1,3 \cdot 10^{21}$
Полярный лед	$3,5 \cdot 10^{6}$	$3,5 \cdot 10^{19}$
Озера	$2,5 \cdot 10^{6}$	$2,5 \cdot 10^{19}$
Подземные озера	$2,5 \cdot 10^{6}$	$2,5 \cdot 10^{19}$
Реки	$6 \cdot 10^{4}$	$5 \cdot 10^{17}$
Болота	$6 \cdot 10^{6}$	$6 \cdot 10^{19}$
Снежный покров	250	$2,5 \cdot 10^{18}$
Полные запасы	$\sim 1340 \cdot 10^{6}$	$(1,8 \div 2,7)\ 10^{21}$

Влагооборот. Баланс влаги по поверхности Земли [24]. Общее количество воды, выпадающей за один год в виде осадков для всего земного шара оценивается в $5 \cdot 10^{14}$ *т*, что в 40 раз больше общего содержания воды в атмосфере. По современным данным (с погрешностью до 10%), общее количество осадков, выпадающих на поверхность Мирового океана, дает в среднем слой осадков 102 *см/год*, что соответствует выпадению 370 000 *км³* воды. Испарение с поверхности океана составляет 113 *см/год* или 407 000 *км³* воды, и речной сток в океаны оказывается равным 16,3 *см/год*, или 37 000 *км³*.

Для поверхности суши с учетом стока в океан получены следующие значения: осадки 71,0 *см/год* (102000 *км³*), испарение 44,6 *см/год* (64 500 *км³*) и сток 25,4 *см/год* (37 500 *км³*). На долю частей суши, не имеющих стока в океан, приходится всего около 8000 *км³* осадков и столько же на испарение. В целом для земного шара годовой слой осадков, равный годовой величине испарения, составляет 92,6 *см/год* (472 000 *км³*), причем на сушу из общего количества осадков выпадает только 22%, а на океан 78%; испарение же с поверхности суши составляет 14% общего испарения, а остальные 86% испаряются с поверхности океана.

Большая часть воды (90%) содержится в нижнем слое атмосферы (до 8—10 *км*) и составляет 0,3—0,4% массы атмосферного воздуха в этом слое.

Основная часть воды в атмосфере находится в парообразном состоянии (около 96%), на долю облачных частиц (капель воды и кристаллов льда) приходится менее 5% массы воды, содержащейся в атмосфере.

Состав океанической и пресной воды

Вследствие большой ионизирующей способности воды растворенные в ней соли оказываются в ионно-дисперсной форме. Общее количество растворенных веществ в 1 г морской воды в граммах называется соленостью, выражается в промилле и обозначается S, ‰. Существует связь между S, ‰ и хлорностью (содержанием хлора в морской воде):

$$S,\ ‰ = 0{,}03 + 1{,}805\ Cl,\ ‰.$$

Средняя соленость морской воды S равна 34,85 ‰, средняя хлорность Cl равна 19,37 ‰.

Таблица 47.14

Средний химический состав океанической воды при $T = 5°C$ и хлорности 19 ‰ [25]

Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %
Кислород	85,94	Медь	$6 \cdot 10^{-5}$
Водород	10,82	Свинец	$4 \cdot 10^{-5}$
Хлор	1,896	Марганец	$4 \cdot 10^{-7}$
Натрий	1,056	Селен	$4 \cdot 10^{-7}$
Магний	$1{,}272 \cdot 10^{-1}$	Цезий	$2 \cdot 10^{-7}$
Сера	$8{,}84 \cdot 10^{-2}$	Уран	$1{,}5 \cdot 10^{-7}$
Кальций	$4{,}00 \cdot 10^{-2}$	Молибден	$5 \cdot 10^{-6}$
Калий	$3{,}80 \cdot 10^{-2}$	Галлий	$5 \cdot 10^{-6}$
Бром	$6{,}5 \cdot 10^{-3}$	Торий	$< 5 \cdot 10^{-6}$
Углерод	$3{,}0 \cdot 10^{-3}$	Никель	$3 \cdot 10^{-6}$
Азот	$1{,}7 \cdot 10^{-3}$	Ванадий	$3 \cdot 10^{-6}$
Стронций	$1{,}33 \cdot 10^{-1}$	Церий	$3 \cdot 10^{-6}$
Бор	$4{,}6 \cdot 10^{-1}$	Иттрий	$3 \cdot 10^{-6}$
Кремний	$> 2 \cdot 10^{-3}$	Лантан	$3 \cdot 10^{-6}$
Фтор	$1{,}3 \cdot 10^{-1}$	Криптон	$2{,}8 \cdot 10^{-5}$
Аргон	$6{,}1 \cdot 10^{-1}$	Висмут	$2 \cdot 10^{-6}$
Рубидий	$2 \cdot 10^{-6}$	Неон	$1{,}1 \cdot 10^{-5}$
Литий	$1 \cdot 10^{-5}$	Кобальт	$1 \cdot 10^{-6}$
Фосфор	$1 \cdot 10^{-5}$	Серебро	$1 \cdot 10^{-6}$
Иод	$5 \cdot 10^{-4}$	Ксенон	$9{,}4 \cdot 10^{-8}$
Барий	$5 \cdot 10^{-4}$	Скандий	$4 \cdot 10^{-9}$
Мышьяк	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$	Ртуть	$3 \cdot 10^{-9}$
Цинк	$1 \cdot 10^{-3}$	Гелий	$5{,}2 \cdot 10^{-12}$
Алюминий	$1 \cdot 10^{-3}$	Золото	$5 \cdot 10^{-10}$
Железо	$1 \cdot 10^{-3}$	Радий	$(0{,}2 \div 3) \cdot 10^{-10}$

Таблица 47.15

Важнейшие вещества, растворенные в морской, озерной и речной водах [7]

Вещества, растворенные в морской воде			Вещества, растворенные в озерной и речной водах		
Ионы	Концентрация, г/м³	Общая масса, 10^9 т	Ионы	Концентрация, г/м³	Общая масса, 10^9 т
Cl^-	19 000	30 928	CO_2	51,2	1178
Na^{+1}	10 770	17 532	CO^{+6}	29,8	680
SO_4^{-2}	2 701	4 391	SO_4^{-2}	17,7	407
Mg^{+2}	1 298	2 077	SiO_2	17,1	393
Ca^{+2}	408	653	Cl^{-1}	8,3	191
K^{+1}	387	649	Na^{+1}	6,4	198
HCO^-	128	205	Mg^{+2}	5,0	155
Br^{-1}	66	106	(Al, $Fe)_2O_3$	4,0	92
H_3BO_3	27	43	K^{+1}	3,1	71
Sr^{+2}	14	22	NO_3^{-1}	1,3	30

Таблица 47.16

Растворимость газов ($см^3/л$) в морской и пресной воде в зависимости от температуры

Газ	В пресной воде при T				В морской воде, $S = 35$ ‰ при T			
	0° C	10° C	20° C	30° C	0° C	10° C	20° C	30° C
N_2	18,10	14,60	12,24	10,16	14,04	11,72	10,18	9,06
O_2	10,29	8,02	6,57	5,57	8,04	6,41	5,35	4,50
Ar	0,54	0,42	0,35	0,29	0,41	0,31	0,26	0,21
CO_2	0,52	0,36	0,20	0,20	0,44	0,31	0,23	0,18
Всего. . .	29,45	23,40	19,42	17,02	22,93	18,75	16,01	13,97

Плотность и электропроводность воды

Плотность ρ морской воды. Плотность морской воды зависит от температуры, солености и давления. Зависимость ρ_0 от солености определяется формулой

$$\rho_0 = (-0{,}093 + 0{,}8149\ S^0/_{00} - 0{,}000492\ S^2\ ^0/_{00} + 0{,}0000068\ S^3\ ^0/_{00})\ г/см^3,$$

где

$$\sigma_0 = (\rho_0 - 1)\,1000\ г/см^3 \quad \rho_0 \text{ — при } T = 0°C$$

Характерные для поверхности моря значения плотности, зависящие от температуры, находятся в пределах от 0,9960 до 1,0283 $г/см^3$. Все значения плотности, зависящие от температуры, солености и давления, которые наблюдаются в Мировом океане, укладываются в пределах 1,0757—0,9960 $г/см^3$.

Разности плотности воды

Вода	Отклонение плотности от океанической, 10^{-4} $г/см^3$
Океаническая	0,0
Снеговая	0,038
Дождевая	—0,025
Внутренних озер, рек, ручьев	—0,015
В живых организмах	—0,003
$^1H_2{}^{18}O$	—2,6
В растениях	+0,002
В минералах	+0,039
В Мировом море	+0,015

Таблица 47.17

Удельная электропроводность $\lambda \cdot 10^{9}$ (*см/см*), морской воды в зависимости от температуры и солености S

T, °C	S, ‰			
	10	20	30	40
0	923	1747	2528	3276
15	1378	2594	3740	4874
25	1712	3214	4626	5967

Физические свойства морского льда [26].

В высоких широтах различают ледчерный (образуется исключительно из осадков) и морской лед. Морская вода не имеет определенной точки замерзания. При общей солености воды 35‰ образование льда начинается при —1,8° С. По мере промерзания льда остается небольшое количество морской воды, в которой отдельные соли выкристаллизовываются при более низких температурах и только при —55° С полностью затвердевает образовавшийся рассол. Соленость и количество находящегося во льду воздуха определяет плотность морского льда.

Таблица 47.18

Плотность морского льда в зависимости от солености S и содержания в нем воздуха

Объемное содержание воздуха, %	S, ‰			
	0	10	20	30
0	0,918	0,925	0,934	0,942
3	0,890	0,898	0,906	0,914
6	0,863	0,871	0,879	0,887
9	0,835	0,843	0,851	0,859

Звук и свет в океане

Звук в океане [26]. Скорость звука определяется уравнением Лапласа $c = \sqrt{\gamma/\rho\kappa}$, где $\gamma = c_p/c_v$; ρ — плотность и κ — адиабатическая сжимаемость. Однако значения скорости звука, определенные по этой формуле, оказываются заниженными на 3—4 *м/сек*. Номограммы значений скорости звука в морской воде приведены в [26].

В океане под холодными поверхностными слоем температура с глубиной сильно понижается, скорость звука также уменьшается, однако одновременное увеличение давления с глубиной влечет за собой некоторое повышение скорости звука. В зависимости от стратификации температуры и солености на глубинах 700—1300 *м* наблюдается минимум скорости звука. Отчетливые минимумы отсутствуют только там, где термическая стратификация незначительна (море Уэдделла и Красное).

Свет в океане [26]. При высоте Солнца более 40° море поглощает почти полностью падающий на него свет, а отражает менее 5%. При большом волнении и большом количестве пены на поверхности отражательная способность понижается и отражение может превысить 40% падающего излучения. С убыванием высоты Солнца отражение сильно возрастает.

Тепловой баланс океана

В сутки в море проникает $Q_{пов}$ = 295 *кал/см²*, из них на прямую радиацию приходится 64% и на диффузную 44%.

Таблица 47.19

Коэффициенты преломления света в морской воде в зависимости от длины волны λ и солености S [29]

λ, *нм*	S, ‰			
	0	10	20	35
667,8	1,33087	1,33271	1,33452	1,33726
587,6	1,33305	1,33491	1,33675	1,33951
501,5	1,33636	1,33824	1,34011	1,34293
447,2	1,33845	1,34035	1,34229	1,34616

Расход тепла с поверхности моря в процентах от $Q_{пов}$ приходится на подводную освещенность — 2%, на отражение — 6%, на тепловую энергию эффективного излучения поверхности — 42%, на конвекцию — 7%, на испарение — 51%. Менее значительными составляющими теплового баланса Мирового океана являются: приход тепла в результате химико-биологических реакций — 0,1%, приход тепла от трения — 0,05% и приход тепла от распада радиоактивных веществ в морской воде — 0,000017%. Приход тепла из внутренних частей Земли — 0,03%.

Проникающая в море тепловая энергия используется почти исключительно в тонком приповерхностном слое. В чистой океанической воде уже в своем верхнем сантиметровом слое поглощается 27% радиации, в метровом слое — 62% и только 0,45% всей энергии доходит до глубины 100 *м*.

Таблица 47.20

Нагревание (°С) слоя воды толщиной 1 *м* на различных глубинах при поглощении 1000 *кал/см²*

Залегание слоя, *м*	Вода	
	чистая океаническая	купли прибрежная
0—1	6,24	7,72
1—2	0,610	0,900
5—6	0,256	0,120
10—11	0,104	0,014
20—21	0,040	0,000

47.4. АТМОСФЕРА

Строение атмосферы

Атмосфера на своем протяжении не является однородной. Особенно резко ее свойства изменяются по вертикали. По составу, температурному режиму, электрическим характеристикам атмосфера в вертикальном направлении может быть разделена на ряд слоев. Особенно отчетливо различия в свойствах этих слоев проявляются в распределении температуры по высоте.

Прилегающий к Земле слой — *тропосфера* — характеризуется уменьшением температуры с высотой (порядка 6 *град/км*) и кончается *тропопаузой* на высоте от 7 *км* на полюсе до 17 *км* на экваторе. Выше лежит *стратосфера*, где температура возрастает приблизительно от 200° К в тропопаузе до 280° К в *стратопаузе* (на высоте 50 *км*). Далее следует *мезосфера*, где температура уменьшается с высотой до 170—180° К на высоте около 85 *км* (*мезопауза*).

Эти три слоя: тропосфера, стратосфера и мезосфера характеризуются гомогенным газовым составом и носят общее название *гомосферы*.

Начиная с 85 *км* температура атмосферы вновь возрастает вследствие поглощения ультрафиолетовой радиации Солнца. Средний градиент температуры равен 20 *град/км* до высоты 150 *км*, а далее рост постепенно замедляется и заканчивается на высоте 300 *км*. Эта область атмосферы называется *термосферой* и заканчивается *термопаузой*, которая лежит днем на высоте 350—450 *км*, а ночью опускается на высоту 200—250 *км*. Термосфера и лежащий над ней обширный слой *экзосферы* носят общее название *гетеросферы*, так как характеризуются гравитационным разделением газов. Благодаря этому разделению на высоте около 750 *км* преобладает атомарный кислород, а на высоте 1500 *км* — гелий.

Разделение газов заканчивается на высоте в несколько тысяч километров переходом к водородному составу атмосферы. Чтобы выделить область, где столкновения между молекулами не меняют их вылету за пределы земной атмосферы, вводят термин *экзосфера*. Экзосфера лежит выше 700 *км*. На высотах до 200 100 *км* по характеру изменения температуры атмосфера делится на одиннадцать слоев. Общим свойством всех слоев является линейность изменения молекулярной температуры T_M, °К, по геопотенциальной высоте Ф, выраженной в геопотенциальных метрах (*гп*, *м*). Геопотенциальная (Ф) и геометрическая (*z*) высоты связаны соотношением $\Phi = rz/(r + z)$, где $r = 6\,371\,210$ *м* — средний радиус Земли.

Молекулярная температура T_M связана с кинетической T следующей зависимостью:

$$T_M = T_0 \cdot \frac{M_0}{M_z},$$

где M_0 и M_z — молекулярные массы воздуха на уровне моря и на рассматриваемой высоте соответственно. Для расчетов приняты следующие значения физических характеристик атмосферы на уровне моря и физических констант:

Барометрическое давление на географической широте $\varphi = 40°32'40''$ при температуре ртути 273,15° К и средней плотности ртути 13596,1 *кг/м*³:

$$P_0 = 1013{,}25\ \text{мбар} = 760\ \text{мм рт. ст.}$$

Температура $T_0 = 15°C = 288{,}15°K$.

Газовая постоянная сухого воздуха:

универсальная . . . . . 3,31436 · 10⁷ *эрг/(град·моль)*;

удельная . . . . . 2,87039 · 10⁶ *эрг/(град·г)*.

Динамическая вязкость воздуха при $T = 273°K$:

$$\mu_0 = 1{,}75 \cdot 10^{-5}\ \text{пз} \cdot \text{сек/м}^2 = 1716{,}16 \cdot 10^{-7}\ \text{пз}.$$

Ускорение силы тяжести $g_0 = 980{,}665$ *см/сек*².

Стандартная атмосфера

По многочисленным данным, полученным прямыми и косвенными методами, определены характеристики некоторой средней, или стандартной атмосферы.

Барометрическая формула [24]. Для определения разности высот $z_2 - z_1$ между двумя точками, давление в которых равно P_2 и P_1, можно воспользоваться барометрической формулой Лапласа:

$$z_2 - z_1 = 18\,400\,(1 + 0{,}00366\,\bar{t}) \cdot [1 + 0{,}378\,(\bar{e}/\bar{p})] \times$$
$$\times (1 + 0{,}0024 \cos 2\varphi)\,(1 + 3{,}14 \cdot 10^{-7}\,\bar{h})\,\lg(P_1/P_2),$$

где $\bar{t}$, $\bar{h}$, $(\bar{e}/\bar{p})$ — средние значения температуры, высоты над уровнем моря и отношения парциального давления водяного пара к атмосферному. Если пренебречь зависимостью силы тяжести от широты и высоты и считать воздух сухим, можно воспользоваться упрощенной барометрической формулой:

$$z_2 - z_1 = 18\,400\,(1 + 0{,}00366\,\bar{t})\,\lg(P_1/P_2).$$

Таблица 47.2г

Состав атмосферного воздуха [29, 24]

Вещество	Молекулярная масса, а.е.м.	Объемное содержание, %	Число молекул на 1 *см*² нормального столба
N_2	28,0134	78,084 ± 0,004	1,678 · 10²³
O_2	31,998	20,945 ± 0,002	4,001 · 10²⁴
Ar	39,948	0,934 ± 0,001	2,007 · 10²³
CO_2	44,009	0,030 ± 0,003	7,09 · 10²⁰
Ne	20,179	(1,818 ± 0,004) 10⁻²	3,89 · 10¹⁹
He	4,0026	(5,24 ± 0,004) 10⁻⁴	1,13 · 10¹⁹
CH_4	16,043	~ 2,2 · 10⁻⁴	–
Kr	83,80	(1,14 ± 0,01) · 10⁻⁴	2,45 · 10¹⁸
NO_2	46,006	(0,5 ± 0,1) 10⁻⁴	–
H_2	2,0158	~ 0,5 · 10⁻⁴	–
Xe	131,30	(6,7 ± 0,1) 10⁻⁶	1,87 · 10¹⁷
Озон	—	(0 — 0,07) 10⁻⁶	—
Сухой воздух	28,966	100,0	2,149 · 10²⁵

Таблица 47.22

Распределение молекулярной массы и температуры по высоте

Высота z, км	Молекулярная масса, а. е. м.	Температура, °К: молекулярная	Температура, °К: кинетическая	Градиент молекулярной температуры, °К/км, м.	Высота z, км	Молекулярная масса, а. е. м.	Температура, °К: молекулярная	Температура, °К: кинетическая	Градиент молекулярной температуры, °К/км, м.
0	28,966	288,15	288,15	−0,00651122	110	20,934	257,04	257,36	0,00601741
11	28,966	216,66	216,66	0	120	28,727	335,00	332,24	0,02346357
25	28,966	216,66	216,66	0,00276008	150	28,107	1010,00	960,05	0,01587408
46	28,966	247,00	247,00	0	160	27,900	1199,40	1153,26	0,00306464
54	28,966	274,00	274,00	−0,00649044	170	27,700	1228,71	1175,00	0,00308461
80	28,966	185,00	185,00	0	180	27,470	1257,53	1193,20	0,00308461
95	28,966	165,00	185,00	0,00600000	190	27,245	1287,06	1210,60	0,00308461
					200	27,000	1316,10	1226,80	0,00308461

Таблица 47.23

Таблица стандартной атмосферы

Геометрическая высота z, км	Температура, °К	Барометрическое давление, мм рт. ст.	Плотность, кг/м³	Скорость звука, м/сек	Вязкость: динамическая, η, 10^{-4} пз	Вязкость: кинематическая, ν, 10^{-2} м²/сек	ν_0 м²/сек	Средняя длина свободного пробега молекулы l, 10^{-8} м
−2	301,19	988,50	1,4781	347,90	1,8517	1,2528	9,81281	5,3471
−1,5	297,98	906,30	1,4114	346,01	1,8362	1,3010	9,81127	5,5933
−1	294,67	854,52	1,3469	344,11	1,8207	1,3517	9,80973	5,8329
−0,5	291,42	806,21	1,3850	342,21	1,8051	1,4048	9,80819	6,0657
0	288,15	760,00	1,2250	340,28	1,7894	1,4607	9,80665	6,3741
0,5	284,90	715,90	1,1672	338,36	1,7735	1,5196	9,80511	6,6656
1	282,65	674,12	1,1117	336,43	1,7578	1,5812	9,80357	6,9991
1,5	278,40	634,30	1,0582	334,48	1,7420	1,6461	9,80203	7,3079
2	275,14	596,28	1,0066	332,52	1,7260	1,7146	9,80049	7,6372
2,5	271,89	560,24	0,95706	330,55	1,7099	1,7866	9,79895	8,0880
3	268,64	525,98	0,90941	328,56	1,6937	1,8624	9,79742	8,4170
3,5	265,38	493,36	0,86345	326,56	1,6773	1,9420	9,79586	8,8333
4	262,13	462,46	0,81942	324,56	1,6610	2,0271	9,79435	9,2744
4,5	258,88	433,15	0,77714	322,54	1,6446	2,1162	9,79281	9,7426
5	255,63	405,37	0,73654	320,51	1,6280	2,2105	9,79128	10,240
5,5	252,38	379,04	0,69758	318,47	1,6114	2,3100	9,78974	10,771
6	249,13	354,13	0,66022	316,41	1,5946	2,4153	9,78820	11,335
6,5	245,88	330,54	0,62441	314,34	1,5778	2,5266	9,78667	11,936
7	242,63	308,27	0,59010	312,25	1,5609	2,6452	9,78514	12,579
7,5	239,38	287,20	0,55725	310,15	1,5439	2,7705	9,78360	13,264
8	236,14	267,38	0,52580	308,05	1,5267	2,9030	9,78207	13,994
8,5	232,89	248,62	0,49585	305,92	1,5095	3,0443	9,78053	14,777
9	229,64	230,95	0,46712	303,78	1,4922	3,1942	9,77900	15,614
9,5	226,40	214,36	0,43977	301,63	1,4747	3,3534	9,77747	16,509
10	223,15	198,70	0,41357	299,45	1,4571	3,5222	9,7594	17,471
11	216,66	170,19	0,36485	295,07	1,4217	3,8906	9,77287	19,610
12	216,66	145,44	0,31180	295,07	1,4217	4,5595	9,76981	22,346
13	216,66	124,30	0,26648	295,07	1,4217	5,3351	9,76675	26,649
14	216,66	106,24	0,22776	295,07	1,4217	6,2420	9,76370	31,413
15	216,66	90,810	0,19467	295,07	1,4217	7,3020	9,76063	36,752
16	216,66	77,610	0,16640	295,07	1,4217	8,5437	9,75758	42,996
17	216,66	66,350	0,14224	295,07	1,4217	9,9552	9,75452	50,301
18	216,66	56,719	0,12159	295,07	1,4217	11,692	9,75146	58,840
19	216,66	48,489	0,10395	295,07	1,4217	13,676	9,74842	68,825
20	216,66	41,455	0,088870	295,07	1,4217	15,997	9,74537	80,505
22	216,66	30,395	0,064966	295,07	1,4217	21,893	9,73927	110,13
24	216,66	22,156	0,047501	295,07	1,4217	29,959	9,73318	150,62
26	216,40	16,219	0,034336	295,00	1,4207	41,842	9,72710	209,25
28	224,87	11,959	0,024701	300,61	1,4465	58,370	9,72102	296,27
30	230,35	8,8777	0,017901	304,25	1,4959	83,605	9,71494	407,86
35	244,01	4,3529	$8,2842\cdot10^{-3}$	313,14	1,5681	185,29	9,69976	897,62
40	257,66	2,2191	$4,0003\cdot10^{-3}$	321,78	1,6394	403,56	9,68456	1890,0
45	271,26	1,1732	$2,0086\cdot10^{-3}$	330,17	1,7098	849,77	9,66957	3821,8
50	274,60	0,63441	$1,0754\cdot10^{-3}$	331,82	1,7206	1599,7	9,65452	7156,5
60	253,40	0,18092	$3,3162\cdot10^{-4}$	319,11	1,6166	4674,9	9,63452	22 684
70	219,15	0,043701	$9,2747\cdot10^{-5}$	296,76	1,4353	1547,5	9,59466	77 433
80	185,00	0,0063564	$2,0179\cdot10^{-5}$	272,66	1,2420	59202	9,56494	322 410
90	185,00	0,013834	$3,4733\cdot10^{-5}$	272,66	1,2420	35756	9,53506	154 7400

Таблица 47.24

Рекомендуемые физические характеристики для высот от 95 000 до 300 000 м

Геометрические высоты, км	Температура, °К	Барометрическое давление, мм рт. ст.	Плотность, кг/м³	Молекулярная масса, а. е. м.	Ускорение свободного падения тела, м/сек²
95	185,00	$5,6400 \cdot 10^{-3}$	$1,4170 \cdot 10^{-6}$	28,996	9,59061
100	209,22	$2,4310 \cdot 10^{-4}$	$5,3903 \cdot 10^{-7}$	28,962	9,50591
105	233,36	$1,1584 \cdot 10^{-4}$	$2,2900 \cdot 10^{-7}$	28,952	9,45121
110	257,36	$5,8071 \cdot 10^{-5}$	$1,0581 \cdot 10^{-7}$	28,934	9,47660
115	294,97	$3,2314 \cdot 10^{-5}$	$5,0674 \cdot 10^{-8}$	28,831	9,46190
120	332,24	$1,9160 \cdot 10^{-5}$	$2,6580 \cdot 10^{-8}$	28,727	9,44741
125	442,64	$1,2555 \cdot 10^{-5}$	$1,3025 \cdot 10^{-8}$	28,034	9,43289
130	552,04	$9,0540 \cdot 10^{-6}$	$7,5055 \cdot 10^{-9}$	28,520	9,41839
135	660,51	$6,9357 \cdot 10^{-6}$	$4,7673 \cdot 10^{-9}$	28,417	9,40390
140	768,00	$5,5394 \cdot 10^{-6}$	$3,2766 \cdot 10^{-9}$	28,314	9,38948
145	874,48	$4,5608 \cdot 10^{-6}$	$2,3005 \cdot 10^{-9}$	28,210	9,37507
150	980,06	$3,8428 \cdot 10^{-6}$	$1,7682 \cdot 10^{-9}$	28,107	9,36069
155	1068,1	$3,2937 \cdot 10^{-6}$	$1,3868 \cdot 10^{-9}$	28,003	9,3437
160	1155,3	$2,8558 \cdot 10^{-6}$	$1,1061 \cdot 10^{-9}$	27,900	9,33205
165	1165,6	$2,4996 \cdot 10^{-6}$	$9,5603 \cdot 10^{-10}$	27,810	9,31671
170	1175,0	$2,1887 \cdot 10^{-6}$	$8,2787 \cdot 10^{-10}$	27,700	9,30240
175	1184,2	$1,9200 \cdot 10^{-6}$	$7,1767 \cdot 10^{-10}$	27,596	9,28821
180	1193,2	$1,6872 \cdot 10^{-6}$	$6,2332 \cdot 10^{-10}$	27,476	9,27400
185	1202,0	$1,4850 \cdot 10^{-6}$	$5,4276 \cdot 10^{-10}$	27,361	9,25983
190	1210,6	$1,3096 \cdot 10^{-6}$	$4,7276 \cdot 10^{-10}$	27,245	9,24570
195	1216,9	$1,1562 \cdot 10^{-6}$	$4,1262 \cdot 10^{-10}$	27,125	9,23159
200	1226,8	$1,0226 \cdot 10^{-6}$	$3,6409 \cdot 10^{-10}$	27,000	9,21750
205	1236,0	$9,0586 \cdot 10^{-7}$	$3,1603 \cdot 10^{-10}$	26,875	9,20347
210	1245,0	$8,0379 \cdot 10^{-7}$	$2,7709 \cdot 10^{-10}$	26,750	9,18950
215	1253,7	$7,1435 \cdot 10^{-7}$	$2,4336 \cdot 10^{-10}$	26,620	9,17548
220	1262,0	$6,3585 \cdot 10^{-7}$	$2,1412 \cdot 10^{-10}$	26,487	9,16150
225	1269,9	$5,6684 \cdot 10^{-7}$	$1,8870 \cdot 10^{-10}$	26,346	9,14762
230	1277,4	$5,0606 \cdot 10^{-7}$	$1,6656 \cdot 10^{-10}$	26,205	9,13370
235	1284,4	$4,5245 \cdot 10^{-7}$	$1,4726 \cdot 10^{-10}$	26,055	9,11988
240	1290,9	$4,0508 \cdot 10^{-7}$	$1,3039 \cdot 10^{-10}$	25,899	9,10610
245	1297,0	$3,6317 \cdot 10^{-7}$	$1,1563 \cdot 10^{-10}$	25,739	9,05228
250	1302,8	$3,2604 \cdot 10^{-7}$	$1,0250 \cdot 10^{-10}$	25,577	9,07850
255	1309,5	$2,9311 \cdot 10^{-7}$	$9,1100 \cdot 10^{-11}$	25,392	9,06480
260	1316,2	$2,6380 \cdot 10^{-7}$	$8,1161 \cdot 10^{-11}$	25,213	9,05110
265	1322,6	$2,3794 \cdot 10^{-7}$	$7,2236 \cdot 10^{-11}$	25,033	9,03744
270	1326,8	$2,1480 \cdot 10^{-7}$	$6,4405 \cdot 10^{-11}$	24,854	9,02380
275	1334,6	$1,9421 \cdot 10^{-7}$	$5,7605 \cdot 10^{-11}$	24,672	9,01021
280	1340,0	$1,7581 \cdot 10^{-7}$	$5,1548 \cdot 10^{-11}$	24,488	8,99660
285	1344,9	$1,5906 \cdot 10^{-7}$	$4,6195 \cdot 10^{-11}$	24,299	8,98309
290	1349,5	$1,4465 \cdot 10^{-7}$	$4,1463 \cdot 10^{-11}$	24,110	8,96960
295	1353,9	$1,3142 \cdot 10^{-7}$	$3,7253 \cdot 10^{-11}$	23,920	8,95610
300	1356,0	$1,1956 \cdot 10^{-7}$	$3,3521 \cdot 10^{-11}$	23,731	8,94260

Радиационный баланс атмосферы

Средний радиационный баланс Северного полушария при средних условиях облачности [31]:

Составляющие радиационного баланса	Поток энергии, *кал/(см² · мин)*
Коротковолновая радиация:	
Инсоляция на верхней границе атмосферы	0,500
Поглощение радиации в атмосфере (общее)	0,087
озоном	0,014
водяным паром и углекислотой	0,005
облаками	0,008
Отражение и рассеяние радиации в мировое пространство (общее)	0,176
атмосферой	0,031
облаками	0,125
земной поверхностью	0,021
Поглощение радиации земной поверхностью (общее)	0,237
прямой солнечной	0,112
пропущенной облаками	0,072
рассеянной	0,053
Длинноволновая радиация (общее излучение)	0,321
Эффективное излучение земной поверхности:	
тепловое излучение	0,072
противоизлучение атмосферы	0,482
эффективное излучение	0,090
Тепловое излучение тропосферы:	
тепловое излучение, поглощенное тропосферой	0,545
собственное тепловое излучение тропосферы	0,765

Тепловое излучение в широке пространство земной поверхности (в долях прозрачности)	
тропосферы	0,027
стратосферы	0,283
	0,014

Поглощение лучистой энергии в атмосфере [24]. Основную роль в поглощении лучистой энергии в атмосфере играют кислород, озон, углекислый газ, водяной пар и пыль. В целом атмосферой поглощается 17—25% солнечной радиации. Кислород имеет полосы поглощения главным образом в ультрафиолетовой части спектра.

В видимой части поглощение происходит в полосах *A* с центром около 0,76 *мкм* и *B* с центром около 0,69 *мкм*, однако поглощение в них мало и слабо влияет на ослабление радиации.

Озон образуется в результате поглощения солнечной радиации ($\lambda < 2420$ Å) на высотах от 10 до 60 *км* с центром поглощения около 22 *км*. Основные полосы поглощения озона лежат также в ультрафиолетовой области, следствием чего является то, что наблюдаемый у земной поверхности спектр обрывается на длине волны ~3000 Å. В этой области спектра поглощение озоном солнечной радиации составляет около 2—3% всего интегрального потока.

Наиболее важной полосой поглощения углекислого газа является широкая полоса 12,9—17,1 *мкм*, расположенная в максимуме теплового излучения атмосферы.

Важнейшее значение в поглощении лучистой энергии в атмосфере имеет водяной пар. Это определяется не только большим его содержанием, но и очень большим числом линий и полос в его спектре. Наибольшее значение из них имеют полосы, расположенные в инфракрасной области спектра.

Полосы поглощения водяного пара

Обозначение полосы	α	β	ρ, σ	φ	ψ	Ω
Центр полосы λ, *мкм*	0,72	0,82	0,93	1,13	1,38	1,86
Обозначение полосы	ω_1	ω_2	$\varkappa$	—	θ	
Центр полосы λ, *мкм*	2,01	2,65	2,68	3,2—4,0	4,0—4,9	

В видимой области наиболее сильны две полосы: α 7900—6850 Å и сдвоенная полоса 6060—5850 Å.

Таблица 47.25

Альбедо различных поверхностей

Поверхность	Альбедо, %	Поверхность	Альбедо, %
Чернозем:		Вспаханное поле:	
сухой	14	сухое	8—12
влажный	8	влажное	5—7
Серозем:		Рожь и пшеница	10—25
сухой	25—30	Трава:	
влажный	10—12	свежая	26
Глина синяя:		влажная	10
сухая	23	Древесная растительность	10—18
влажная	16		
Песок желтый:			
сухой	35		
серый	18—23		
речной	43		

Отражение солнечной радиации [24]. Альбедо интегральное отношение отраженного по всем направлениям потока к потоку, упавшему на отражающую поверхность Земли, близко к 40%, причем основной вклад (75%) вносит альбедо облаков, а наименьшее зеленые (7%) имеет альбедо земной поверхности. Остальная часть составляет альбедо атмосферы.

Электрические явления в атмосфере

Ионы в атмосфере [24]. В результате ионизации газов, входящих в состав атмосферы, образуются первичные (молекулярные) ионы и устойчивые комплексы из 10—15 молекул (легкие ионы). Путем присоединения легких ионов к частицам аэрозоля образуются более крупные — тяжелые и ультратяжелые ионы. Обнаруживаются также средние или промежуточные ионы, природа которых не вполне ясна.

Капли тумана и облачных элементов имеют размеры 10^{-6}—10^{-4} *см* и могут иметь заряд, но к числу ионов обычно не относятся. Как правило, каждый ион несет один элементарный заряд, если его радиус меньше 10^{-6} *см*.

Из многочисленных известных ионизаторов главнейшими для нижних слоев атмосферы являются излучения радиоактивных веществ, содержащихся в земной коре и атмосфере, а также космические лучи. Над океанами основным ионизатором является космическое излучение.

Таблица 47.26

Основные группы атмосферных ионов

Группа ионов	Подвижность, $см^2/(в \cdot сек)$	Радиус ионов, Å
Легкие	10^{-2}—1	6,6—80
Средние	10^{-3}—10^{-4}	80—250
Тяжелые	10^{-5}—$2,5 \cdot 10^{-5}$	250—550
Ультратяжелые	$< 2,5 \cdot 10^{-5}$	> 550

Таблица 47.27

Число ионов, возникающих за 1 *сек.* в 1 *см*³ воздуха [30]

Местонахождение воздушной массы	Ионизация			
	Излучение радиоактивных элементов		Космическое излучение	Итого
	почвы	воздуха		
Над сушей	4,0	4,6	1,5—1,6	10,1—10,4
Над океаном	—	—	1,5—1,6	1,5—1,6

Проводимость воздуха [30]. Средняя удельная проводимость воздуха $\lambda = 2 \cdot 10^{-4}$ ед. СГСЭ (над сушей от $0,2 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-4}$ ед. СГСЭ в зависимости от конвекции атмосферы и содержания радиоактивных элементов в земной коре). Для населенных пунктов она уменьшается (для Лондона $\lambda = 0,35 \cdot 10^{-4}$ ед. СГСЭ, на Шпиц-

берегне λ — 4,95·10⁻⁴ ед. СГСЭ). Проводимость нижних слоев атмосферы более чем на 95% обусловлена легкими ионами.

Над сушей у земной поверхности концентрация тяжелых ионов в 10—100 раз больше, чем легких.

Электрическое поле в атмосфере. [24]. Почти всегда вертикальная составляющая электрического поля в атмосфере значительно превосходит его горизонтальные составляющие, что соответствует отрицательному заряду земной поверхности. Средняя поверхностная плотность электрического заряда Земли равна $dQ/ds = -3{,}45\cdot10^{-9}$ ед. СГСЭ/см². Полный заряд Земли равен $Q = -17\cdot10^{16}$ ед. СГСЭ $= -6{,}7\cdot10^{5}$ *к*. Приведенные значения получены в предположении, что средний вертикальный градиент электрического потенциала у земной поверхности равен 130 *в/м*.

Электрические заряды осадков. Частицы осадков всех видов несут на себе электрические заряды, которые возникают в результате нескольких групп процессов электризации, в числе которых соударение поляризованных частиц, захват частицами осадков воздушных ионов, разбрызгивание капель воды, электризация при изменении агрегатного состояния.

Таблица 17.28

Электрический заряд Q осадков различного происхождения и ток I, создаваемый ими [24]

Характер осадков	$Q_{ср}$, *к*	$Q_{макс}$, *к*	$I_{ср}$, *а*	$I_{макс}$, *а*
Облагороженный дождь	10^{-15} — 10^{-14}	$5\cdot10^{-13}$	$5\cdot10^{-16}$	$5\cdot10^{-14}$
Ливневый дождь	10^{-13} — 10^{-12}	$5\cdot10^{-11}$	$1\cdot10^{-14}$	$5\cdot10^{-12}$
Град	10^{-14}	10^{-10}	—	$1\cdot10^{-11}$
Снег	10^{-15} — 10^{-13}	$5\cdot10^{-12}$	$5\cdot10^{-14}$	$5\cdot10^{-13}$

Заряд отдельных капель меняется в очень широких пределах. Число положительно заряженных капель в среднем в 1,5 раза больше числа отрицательно заряженных. Это отношение меняется от 1 : 1 до 3 : 1. В то же время средний отрицательный заряд на одну каплю ($1{,}3\cdot10^{-13}$ *к*) больше положительного ($1{,}1\cdot10^{-13}$ *к*). Капли облачного дождя заряжены до 0,5—10 *в*, у грозового ливня до 300 *в* при среднем значении 40 *в*.

Стратификация атмосферы в зависимости от степени ионизации [30]

Наблюдения за распространением радиоволн показали, что газы, образующие атмосферу, ионизованы. Известны четыре регулярно наблюдаемых более или менее ярко выраженных слоя: D, E, F_1 и F_2.

Слои E и F_2 непрерывны и простираются над всем земным шаром, а слои D и F_1 регулярно появляются лишь в определенное время суток и года. Кроме того, в области непрерывных слоев E и F_2 время от времени появляются спорадические слои $E_{спор}$ и $F_{2\,спор}$, представляющие собой отдельные облака с большой концентрацией ионов и электронов. Нижняя граница ионосферы совпадает с началом слоя D. Число электронов в 1 *см*³ составляет несколько тысяч. Слой D отражает длинные (и несколько километры) волны; при наклонном падении частично отражает и заметно поглощает короткие волны (30—100 *м*) и сильно поглощает волны длиной 100—500 *м*.

На высоте от 85—90 *км* до 130—140 *км* располагается слой E — постоянно существующая область ионизации с максимумом концентрации электронов (до $\sim2\cdot10^{5}$ *см*⁻³) на высотах 120—130 *км*. Ночью концентрация электронов уменьшается до $5\cdot10^{4}$ *см*⁻³. Слой E днем отражает и заметно поглощает волны длиннее 10 *м*, в при наклонном падении отражает более короткие (15—20 *м*). На уровне максимальной концентрации электронов слоя E находится нижняя граница полярных сияний.

На высоте 200—500 *км* в области слоев F_1 и F_2 наблюдается наибольшая концентрация электронов. Слой F_1 образуется только летом в дневные часы в нормальных условиях на высоте 180—220 *км*. Максимальная концентрация электронов в слое F_1 составляет $(2 \div 5)10^{5}$ *см*⁻³. Слой F_1 существенно влияет на распространение коротких волн. Максимальная концентрация электронов в слое F_2 составляет несколько миллионов в 1 *см*³. Высота зоны максимальной концентрации 200—400 *км*. Состояние слоя F_2 оказывает решающее влияние на радиосвязь в диапазоне 10—200 *м*.

Выше максимума слоя F_2 концентрация ионов и электронов очень медленно уменьшается с высотой, приближаясь на высотах 2300—3000 *км* к состоянию межпланетного газа (10^{3}—10^{5} *см*⁻³).

Ионизация верхней атмосферы в сильной степени определяется влиянием Солнца; степень ионизации изменяется со временем суток, с сезоном и фазой цикла солнечной активности. Сильное влияние на ионизацию оказывает также бомбардировка атмосферы частицами солнечного происхождения, вызывающие магнитные бури и полярные сияния. Область E предположительно соответствует области диссоциации $O_2 \to O + O$, а область D — ионизации O_3, соответствующей первому потенциалу ионизации. Максимумы ионизации областей F_1 и F_2 располагаются примерно на высотах 200 и 275 *км* соответственно. В течение ночи области F_1 и F_2 сливаются, образуя один слой ионизации. Слой D ночью исчезает, а слой E заметно рассеивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гутенберг Б.** Физика земных недр. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
2. **Харгей П. М.** Возраст Земли. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1962.
3. **Джеффрис Г.** Земля, её происхождение, история и развитие. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
4. **Фединский В. В.** Разведочная геофизика. М., «Недра», 1964.
5. **Косиньская И.** [illegible] «Вестник АН СССР», 1965, т. 2, с. 51.
6. **Полдерварт А.** В сб.: Земная кора. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1957, с. 130.
7. **Берг Ф.** См. [6], с. 114.
8. **Ферсман А. Е.** Геохимия. М., ОНТИ, 1933—1939 гг., т. 1—4.
9. **Чердынцев В. В.** Распространенность химических элементов. М., Госгеолиздат, 1956.
10. **Жонголович И. Л.** В кн.: Труды ЦНИИГеодезии, аэрофотосъемки и картографии, 1948, вып. 68.
11. **Cassinis G.** «Bull. Géodésique», 1926, v. 25, c. 117.
12. **Сорокин Л. В.** Гравиметрия и гравиметрическая разведка. М., Гостехиздат, 1948.
13. **Саваренский Е. Ф., Кирнос Д. П.** Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М., Госгеолиздат, 1955.
14. ГОСТ СССР 6249—52.
15. Землетрясения в СССР, М., Изд-во АН СССР, 1961.
16. **Тверской П. Н.** Курс геофизики. Л., Гидрометеоиздат, 1959.
17. **Проскурякова Т. А., Рыкунин Л. Н.** В сб.: Международный геофизический год. Т. 5, М., «Наука», 1963.
18. **Melton B. S., Jonson D. P.** «Proc. IRE», 1962, v. 50, N 11, p. 2328.

19. Яновский Б. М. Земной магнетизм. М., Гостехиздат, 1953.
20. Афанасьева Е. Н. «Изв. АН СССР. Сер. геофизич», 1947, т. 2, с. 55.
21. Справочник по переменному магнитному полю Земли. Л., Гидрометеоиздат, 1954.
22. Крылов А. П. Основы геомагнетизма. Л., Изд-во ЛГУ, 1950.
23. Виноградов П. А. «Геология и геофизика», 1963, № 12, с. 111.
24. Тверской П. Н. Курс метеорологии. Л., Гидрометеоиздат, 1962.
25. Брюевич С. В. Элементарный состав воды Мирового Океана.— В кн.: «Труды Института Океанологии АН СССР». Т. 2. М., «Наука», 1949.
26. Дитрих Г., Колле К. Общее мореведение. Л., Гидрометеоиздат, 1961.
27. Зубов Н. Н. Океанологические таблицы. Л., Гидрометеоиздат, 1957.
28. Барре Л. С. Таблицы скорости звука в морской воде. М., Изд-во Вычл. Центра АН СССР, 1961.
29. Ивиоли М. Аэрономия. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1964.
30. Аверкиев М. С. Метеорология. М., Изд-во МГУ, 1960, т. 2.
31. Будыко М. И., Кондратьев И. Я. «Космические исследования», 1964, т. 2, вып. 1, с. 62.
32. Карта напряженности магнитного поля Земли. Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн. Л., Ленингр. отд., 1964.
33. Jacobs J. A. The Earth Interior.— "Encycl. of Physics", Ed. E. S. Flügge. Springer-Verlag, Berlin v. 47, 1956.

ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Справочник

Под редакцией академика
И. К. Кикоина

Редакторы *Ю. С. Абрин*, *Г. С. Лин*
Художественный редактор *А. Т. Карягин*
Переплет художника *А. С. Александрова*
Технический редактор *Н. А. Бахрина*
Корректоры *Н. А. Сидорова* и
Л. С. Тимохина

Сдано в набор № 1. 1976 г. Подписано к печати 2.III. 1976 г. Т 06281, Т-ЧСК, формат 84X108/16. Бумага типографская № 1. Усл. печ. л. 16,81. Уч.-изд. л. 32,02. Тираж 99 000 экз. Цена 2 р. 16 коп. Зак. изд. 1946. Изд. тип. 702.

Издательство «Атомиздат» 103031 Москва К-31, ул. Ждановича, 5

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

На базах и складах Союзкниги и издательства имеется следующая литература:

Коэффициенты перевода единиц измерения физико-технических величин. 1967 г. 40 стр., 0—08 коп.

Заказы принимают все книжные магазины, распространяющие научно-техническую литературу. В Москве обращайтесь по адресу: Москва, 103031, ул. Петровка, 15, магазин № 8, отдел «Книга почтой».

АТОМИЗДАТ

ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

СПРАВОЧНИК