

Н. И. Кошкин
М. Г. Ширкевич

СПРАВОЧНИК

ПО
элементарной
физике



Н. И. КОШКИН
М. Г. ШИРКЕВИЧ

СПРАВОЧНИК ПО ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ФИЗИКЕ

ДЕСЯТОЕ ИЗДАНИЕ,
ИСПРАВЛЕННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1988

ББК 22.3
К76
УДК 53(038)

КОШКИН Н. И., ШИРКЕВИЧ М. Г. Справочник по элементарной физике.— 10-е изд., испр. и доп.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.— 256 с., ил

Справочник охватывает все основные разделы элементарной физики. В нем даны определения основных физических понятий, кратко сформулированы физические законы. Приведены справочные таблицы и графики. В новом издании (9-е издание выходило в 1982 г.) уточнены некоторые формулировки, введен новый справочный материал, современные обозначения.

Для учащихся школ, профессионально-технических училищ и техникумов а также для широкого круга работников различных профессий, которым требуется знание различных физических величин.

Табл. 175. Ил. 115.

Рецензент

кандидат физико-математических наук *А. С. Лагунов*

К $\frac{1704010000-021}{053(02)-88}$ 126-88

ISBN 5—02—013833—9

© Издательство «Наука».
Главная редакция
физико-математической литературы
1980; 1982; с изменениями, 1988

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к десятому изданию	9
К сведению пользующихся справочником	10
Введение	11
Основные единицы международной системы единиц (СИ)	14
Производные единицы международной системы единиц (СИ)	16

Г л а в а I

МЕХАНИКА

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

1. Кинематика	23
2. Законы динамики	31
3. Работа, мощность, энергия	39
4. Статика твердого тела	41
5. Элементы теории упругости	44
6. Механика жидкостей и газов	47
7. Механические колебания и волны. Звук	50

ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Табл. 1. Скорости в технических устройствах и транспортных средств	60
Табл. 2. Скорости процессов, происходящих в природе	60
Табл. 3. Ускорения	61
Табл. 4. Кинематические параметры и спутники планет	61
Табл. 5. Первая и вторая космические скорости на различных высотах	62
Табл. 6. Период обращения (T) спутника Земли на разных высотах (H)	62
Табл. 7. Плотность жидкостей	62
Табл. 8. Плотность твердых веществ	63
Табл. 9. Плотность металлов в жидком состоянии	64
Табл. 10. Плотность воды и ртути при различных температурах	64
Табл. 11. Плотность газов	65
Табл. 12. Объемная масса строительных материалов	65
Табл. 13. Объемная масса сельскохозяйственных продуктов	65
Табл. 14. Моменты инерции однородных тел	66
Табл. 15. Коэффициенты трения скольжения	66
Табл. 16. Ускорение свободного падения на разных широтах	67
Табл. 17. Характеристики планет Солнечной системы	67
Табл. 18. Центры тяжести однородных тел	67
Табл. 19. Пределы прочности материалов, полимеров и волокон	68
Табл. 20. Модули упругости и коэффициент Пуассона	69
Табл. 21. Сжимаемость жидкостей и твердых тел	69
Зависимость предела прочности и модуля Юнга от температуры	70
Табл. 22. Вязкость жидкостей	71
Табл. 23. Вязкость газов	71
Табл. 24. Вязкость газов при различных давлениях	71

Табл. 25.	Вязкость воды при различных температурах	72
Табл. 26.	Вязкость жидкостей при различных температурах	72
Табл. 27.	Вязкость металлов в жидком состоянии	72
Табл. 28.	Формулы для расчета скоростей волн в изотропных средах	73
Табл. 29.	Скорость звука в жидкостях	73
Табл. 30.	Скорость звука в твердых изотропных веществах	74
Табл. 31.	Свойства Земли на разной глубине и скорость сейсмических волн	74
Табл. 32.	Скорость звука в газах при нормальном давлении	75
	Скорость звука в воздухе и азоте	75
Табл. 33.	Шкала механических волн	75
Табл. 34.	Сила звука и звуковое давление	76
	Скорость волн на поверхности воды	77
	Уровни громкости звука	77
Табл. 35.	Коэффициент отражения звуковых волн при нормальном падении	78
Табл. 36.	Показатель поглощения звука в воздухе	78
Табл. 37.	Показатель поглощения звука для различных материалов	79
Табл. 38.	Показатель поглощения звука в жидкостях	79
Табл. 39.	Показатель поглощения ультразвуковых волн в морской воде	79

Г л а в а II

ТЕРМОДИНАМИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

1.	Основы термодинамики	80
2.	Фазовые превращения	83
3.	Тепловое расширение твердых и жидких тел	86
4.	Термодинамические свойства газов	87
5.	Явления переноса	90
	• Основы молекулярно-кинетической теории	91

ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Табл. 40.	Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ-68)	99
Табл. 41.	Тепловой баланс Земли	99
Табл. 42.	Удельные теплоемкости, теплоты плавления, теплоты парообразования, температуры плавления и кипения	100
Табл. 43.	Относительное изменение объема при плавлении	100
Табл. 44.	Температура плавления тугоплавких материалов	101
	Теплоемкость воды	101
Табл. 45.	Удельная теплоемкость при низких температурах	101
Табл. 46.	Температура стеклования, плотность и степень кристаллическости полимеров	102
Табл. 47.	Удельная теплоемкость газов при нормальном давлении	102
Табл. 48.	Удельная теплота парообразования	102
	Температура кипения воды	103
Табл. 49.	Удельная теплота парообразования при различных температурах	103
Табл. 50.	Удельная теплота парообразования углекислоты при различных температурах	103
Табл. 51.	Термические свойства сжиженных газов	104
Табл. 52.	Плотность, температура отвердевания и температура кипения водного раствора поваренной соли при различных концентрациях и нормальном давлении	104
Табл. 53.	Максимальные температуры кипения водных растворов солей при нормальном давлении	104
Табл. 54.	Свойства обычной и тяжелой воды	105
Табл. 55.	Критические параметры	105
Табл. 56.	Температура и давление тройных точек	105
Табл. 57.	Температурный коэффициент объема жидкостей	106
Табл. 58.	Свойства насыщенного водяного пара	106
Табл. 59.	Температурный коэффициент длины α твердых изотропных тел	107

Табл. 60.	Температурный коэффициент длины при различных температурах	107
Табл. 61.	Поверхностное натяжение воды и этилового спирта при различных температурах	107
Табл. 62.	Поверхностное натяжение жидкостей	108
Табл. 63.	Поверхностное натяжение металлов в жидком состоянии	108
Табл. 64.	Теплопроводность асбеста и пенобетона при различных температурах	108
Табл. 65.	Теплопроводность материалов	109
Табл. 66.	Теплопроводность жидкостей по кривой испарения	110
Табл. 67.	Теплопроводность газов при нормальном давлении	110
Табл. 68.	Температурный коэффициент давления газов	110
Табл. 69.	Коэффициент диффузии газов и паров в воздухе	110
Табл. 70.	Стандартная атмосфера	111
Табл. 71.	Коэффициент диффузии водных растворов	111
Табл. 72.	Постоянные для расчета коэффициентов диффузии и самодиффузии в твердых телах	112
Табл. 73.	Диаметры молекул газов	112
Табл. 74.	Удельная теплота сгорания топлива	112
Табл. 75.	Постоянные Ван-дер-Ваальса	113
Табл. 76.	Параметры элементарных кубических решеток	114
Табл. 77.	Психрометрическая таблица относительной влажности воздуха	114

Глава III

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

1.	Электрическое поле	115
2.	Постоянный электрический ток	123
3.	Магнитное поле	133
4.	Электромагнитная индукция	137
5.	Магнитное поле в веществе	140
6.	Электрические колебания и электромагнитные волны	143

ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Табл. 78.	Электрическое поле Земли	149
Табл. 79.	Электроизолирующие материалы	149
Табл. 80.	Диэлектрическая проницаемость жидкостей	150
Табл. 81.	Диэлектрическая проницаемость газов	150
Табл. 82.	Свойства сегнетоэлектриков Диэлектрическая проницаемость сегнетовой соли и титаната бария	150 151
Табл. 83.	Пьезоэлектрические модули кристаллов Электрические токи в атмосфере Земли Концентрация электронов в атмосфере	151 151 152
Табл. 84.	Удельное электрическое сопротивление и температурный коэффициент сопротивления металлов	152
Табл. 85.	Температура перехода металлов и сплавов в сверхпроводящее состояние	153
Табл. 86.	Сплавы с высоким активным сопротивлением	153
Табл. 87.	Допустимые силы тока в изолированных проводах при продолжительной работе	153
Табл. 88.	Плавкие предохранители Электропроводность водных растворов	154 154
Табл. 89.	Удельное сопротивление электролитов для различных концентраций	154
Табл. 90.	Термоэлектродвижущая сила пар металлов	155
Табл. 91.	Постоянная т. э. д. с. относительно платины Постоянная пары медь — константан	155 156
Табл. 92.	Электрохимические эквиваленты	156
Табл. 93.	Стандартные потенциалы при 298К Зарядка и разрядка аккумуляторов	156 157
Табл. 94.	Э. д. с. гальванических элементов	158

Табл. 95.	Подвижность ионов в водных растворах	159
Табл. 96.	Подвижность электронов в металлах	159
Табл. 97.	Подвижность ионов в газах при нормальном давлении и 20°C	159
Табл. 98.	Работа ионизации	160
Табл. 99.	Эмиссионные постоянные металлов и полупроводников	160
Табл. 100.	Эмиссионные постоянные пленок на металлах	160
Табл. 101.	Эмиссионные постоянные оксидных катодов	161
Табл. 102.	Свойства полупроводников	161
	Удельное электрическое сопротивление германия и кремния	162
	Напряжение пробоя между плоскими электродами	162
Табл. 103.	Искровые промежутки в воздухе	162
	Магнитное поле Земли	163
Табл. 104.	Свойства электротехнических сталей	163
Табл. 105.	Свойства магнитных (легированных) сталей	164
Табл. 106.	Свойства магнитно-твердых материалов	164
Табл. 107.	Свойства магнитно-мягких материалов	165
Табл. 108.	Свойства магнитодиэлектриков	165
Табл. 109.	Удельная магнитная восприимчивость и относительная магнитная проницаемость парамагнетиков и диамагнетиков	166
Табл. 110.	Температура Кюри металлов	166
Табл. 111.	Удельная магнитная восприимчивость металлов и полупроводников	166
	Магнитная проницаемость, индукция и гистерезис ферромагнетиков	167
	Магнитострикция ферромагнетиков	168
Табл. 112.	Магнитная индукция в ферромагнетиках и ферритах	168
Табл. 113.	Коэффициенты k для расчета индуктивности соленоида	169
	Зависимость сопротивления проводников от частоты переменного тока	169
	Зависимость силы тока в колебательном контуре от частоты внешней э. д. с.	169
Табл. 114.	Глубина проникновения токов высокой частоты в медный провод	170
Табл. 115.	Шкала электромагнитных излучений	170

Глава IV

ОПТИКА

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

1.	Энергетические и световые величины. Фотометрия	171
2.	Геометрическая оптика	173
3.	Линзы. Оптические приборы	175
4.	Волновая оптика	179
5.	Квантовая оптика	185
6.	Спектры излучения и поглощения	187
7.	Тепловое излучение	188

ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Табл. 116.	Относительная видность K_A дневного зрения	190
Табл. 117.	Яркость освещенных поверхностей	190
Табл. 118.	Яркость источников света	190
Табл. 119.	Освещенность, создаваемая различными источниками	191
Табл. 120.	Отражение солнечной радиации	191
Табл. 121.	Радиационный баланс атмосферы Северного полушария	192
	Спектры солнечного излучения	193
Табл. 122.	Коэффициент отражения при различных углах падения для стекла и воды	193
Табл. 123.	Отражение света при переходе из стекла в воздух	193
	Коэффициент отражения поляризованного и естественного света	194
Табл. 124.	Коэффициент отражения света полированными поверхностями металлов	194
Табл. 125.	Предельные углы полного отражения	195

Табл. 126. Длины волн, соответствующие главным фраунгоферовым линиям	195
Табл. 127. Показатели преломления для длин волн, соответствующих некоторым фраунгоферовым линиям	195
Табл. 128. Показатели преломления газов	196
Табл. 129. Показатели преломления твердых тел и жидкостей	196
Табл. 130. Дисперсия показателя преломления	197
Табл. 131. Коэффициент отражения дневного света	197
Табл. 132. Постоянные электрического и магнитного двойного лучепреломления	198
Табл. 133. Удельная постоянная вращения	198
Табл. 134. Вращательная дисперсия	198
Табл. 135. Спектры испускания металлов	199
Табл. 136. Спектры испускания газов	199
Табл. 137. Световая отдача, к. п. д. и яркость источников света	200
Табл. 138. Работа выхода электронов и красная граница фотоэффекта	200

Глава V

СТРОЕНИЕ АТОМА. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

1. Единицы, используемые в атомной и ядерной физике	201
2. Волновые свойства частиц	202
3. Модель атома Резерфорда — Бора — Зоммерфельда	202
4. Строение атома. Электронные оболочки	203
5. Атомное ядро	206
6. Ядерные превращения	208
7. Взаимодействие ядерных излучений с веществом	211
8. Единицы радиоактивности и ионизирующих излучений	212
9. Фундаментальные взаимодействия и их константы	214
10. Элементарные частицы и их классификация	215
11. Превращение частиц	216
12. Кварки и структура адронов	217

ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Энергетические уровни атома водорода	218
Табл. 139. Схема заполнения электронных оболочек атомов	219
Табл. 140. Распределение электронов во внешних оболочках	220
Табл. 141. Основные линии K-серии рентгеновского характеристического спектра и K-край поглощения	221
Табл. 142. Основные характеристики легких ядер	221
Табл. 143. Бета- и гамма-радиоактивные ядра	222
Табл. 144. Искусственно полученные элементы	222
Табл. 145. Массовые коэффициенты поглощения рентгеновского излучения	223
Табл. 146. Атомные и ионные радиусы	224
Табл. 147. Элементарные частицы	225
Табл. 148. Источники излучения и детекторы для обнаружения элементарных частиц	226
Табл. 149. Ионизационные потери α -частицы в газах	226
Табл. 150. Массовые коэффициенты ослабления электронов в алюминии	227
Табл. 151. Средний массовый пробег протонов высокой энергии	227
Табл. 152. Моменты импульсов и магнитные моменты нуклонов и ядер некоторых элементов	227
Табл. 153. Дозовые пределы облучения	228
Табл. 154. Термоядерные реакции во Вселенной	228
Табл. 155. Реакции синтеза и энерговыделение	229
Табл. 156. Эффективные сечения нейтронов	230
Табл. 157. Длина среднего пробега α -частиц	230
Компоненты линейного коэффициента ослабления γ -излучения в алюминии и свинце	230
Ионизирующее космическое излучение	231
Удельная энергия связи нуклонов в ядре	231
Деление ядер	231
Табл. 158. Периодическая система элементов Д. И. Менделеева	233

ПРИЛОЖЕНИЯ

I. Некоторые часто встречающиеся числа	234
II. Формулы для приближенных вычислений	234
III. Элементы теории погрешностей	234
IV. Множители для образования десятичных кратных и дольных единиц	237
V. Соотношения между внесистемными единицами и единицами СИ	237
VI. Универсальные физические константы	238
VII. Сравнительная таблица размеров единиц Международной системы (СИ) и гауссовой системы (СГС)	239
VIII. Основные формулы и законы	241
Предметный указатель	249
Summary	255

ПРЕДИСЛОВИЕ К ДЕСЯТОМУ ИЗДАНИЮ

Первое издание «Справочника по элементарной физике» вышло в 1960 г.; с тех пор он издавался на русском языке девять раз; кроме того, он издавался в переводах на языках народов СССР и социалистических стран, а также на английском, испанском, португальском, японском и хинди.

Главам справочника соответствуют традиционные разделы физики: механика, термодинамика и молекулярная физика, электричество, оптика, строение атома и элементарные частицы. Каждая глава состоит из двух частей: в первой части в основном приводятся краткие справочные данные о физических величинах и основных законах физики; во второй части приводятся значения физических величин и их зависимости от различных факторов (в таблицах или на графиках).

Теоретические сведения и табличные данные не претендуют на энциклопедическую полноту и, безусловно, они не могут заменить соответствующие учебники или специальные учебные пособия для изучения физики; эти сведения не соответствуют каким-либо учебным программам.

Справочник — не учебник: он предназначен для тех, кто знает физику и умеет применять ее законы для решения конкретных задач. Однако, как показало время, он широко используется учащимися школ, ПТУ и студентами при выполнении работ в лабораторных практикумах и при решении задач на семинарских занятиях с использованием микрокалькуляторов и персональных ЭВМ.

По мнению авторов, в справочнике отобраны такие данные, которые могут быть использованы широким кругом специалистов различных отраслей народного хозяйства при приближенных оценках влияния тех или иных физических факторов на различные технологические процессы. Конечно, для конструкторских разработок необходимы специализированные справочники, в которых приводятся более полные и более точные значения необходимых физических величин.

В настоящем десятом издании по существу заново написаны разделы «Основные понятия и законы», приведены новые теоретические сведения, таблицы и графики. Названия физических величин, их определения и обозначения даны в соответствии с ГОСТ 8.417-81 (СТ 1052-78) «ГСИ. Единицы физических величин».

Основные и производные единицы СИ приводятся в таблицах, размещенных в начале справочника; в приложении имеются сведения о симметричной системе единиц СГС (системе Гаусса), а также о некоторых внесистемных единицах.

К СВЕДЕНИЮ ПОЛЬЗУЮЩИХСЯ СПРАВОЧНИКОМ

В большинстве случаев названия веществ в справочных таблицах расположены в алфавитном порядке. Некоторые из таблиц построены в порядке возрастания или убывания значений величин.

Значения величин приводятся с погрешностью до двух-трех значащих цифр, что обычно достаточно для приближенных вычислений.

Количество значащих цифр в таблицах неодинаково. Это объясняется тем, что некоторые вещества можно получить в чистом виде, в то время как другие являются сложными смесями. Например, в значении плотности платины указаны четыре значащие цифры 21,46, а для латуни — две значащие цифры: 8,4—8,7, так как плотность ее изменяется в этих пределах в зависимости от сорта латуни.

Если в таблицах или графиках имеется множитель типа 10^n , то это означает, что указанное в соответствующей графе таблицы значение необходимо умножить на этот множитель. Например, в табл. 17 в третьем столбце имеется множитель 10^6 , в первой строке этой таблицы указано число 696; это означает, что радиус Солнца равен $696 \cdot 10^6$ м.

В примечаниях к таблицам указываются условия, для которых применимы приводимые значения (если в самом названии таблиц условия оговорены не полностью), дополнительные сведения по использованию таблиц и ряд других сведений.

Если в графе таблицы стоит прочерк, то это значит, что соответствующие данные отсутствуют или свойство вещества, определяемое соответствующей величиной, при указанных условиях не используется.

Если читателю не совсем ясен физический смысл величин в таблицах, то необходимо обратиться к соответствующему разделу «Основные понятия и законы».

Справки по соотношению единиц в различных системах можно найти в приложениях. В приложениях, кроме того, приведены формулы для приближенных вычислений и другие сведения.

ВВЕДЕНИЕ

Векторы и скаляры

В физике используются векторные и скалярные величины. Величины, значения которых определяются только положительными и отрицательными числами, называются *скалярами* (*скалярными величинами*). Примером скалярных величин являются масса, заряд, плотность, работа. Величины, значения которых определяются не только действительными числами, но и направлением в пространстве, называются *векторами* (*векторными величинами*). Например, ускорение, скорость, сила, напряженность поля и т. п. — векторные величины.

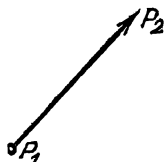


Рис. 1. Графическое представление вектора

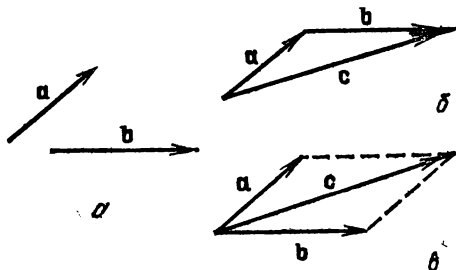


Рис. 2. Графические способы определения суммы двух векторов

На чертежах вектор изображается направленным отрезком в пространстве (см. рис. 1). Точка P_1 называется *началом вектора*, P_2 — его *концом*; длина отрезка P_1P_2 называется *модулем вектора*. Два вектора равны друг другу, если они имеют равные модули и одинаковые направления.

Графически *сумму двух векторов* a и b (рис. 2, а) можно определить двумя способами.

Первый способ (рис. 2, б): векторы a и b переносятся параллельно самим себе так, чтобы конец одного вектора совпал с началом другого вектора; тогда вектор, проходящий

через начало первого вектора и конец другого (рис. 2, б), равен сумме этих векторов. Эта сумма называется *векторной*.

Второй способ: векторы \mathbf{a} и \mathbf{b} переносятся параллельно самим себе так, чтобы начала их совместились (рис. 2, в). Тогда сумма векторов будет равна диагонали параллелограмма, построенного на этих векторах (на рис. 2, б и в сумма векторов равна \mathbf{c}). Поэтому иногда говорят, что сумма векторов находится по правилу параллелограмма.

Каждый вектор \mathbf{a} (рис. 3) можно разложить на несколько векторов \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 и т. д., сумма которых равна вектору \mathbf{a} .

Замена одного вектора суммой других векторов называется *разложением вектора на составляющие*. Например, составляющими вектора \mathbf{a} на рис. 3 являются векторы \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 , \mathbf{a}_3 .

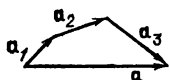


Рис. 3. Разложение вектора на его составляющие

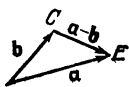


Рис. 4. Разность векторов

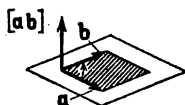


Рис. 5. Векторное произведение

При умножении вектора на положительное число получается вектор с тем же направлением, но с другим модулем; при умножении вектора на отрицательное число направление его изменится на противоположное; модуль вектора также изменится.

Определение разности двух векторов сводится к сложению уменьшаемого вектора с вектором, противоположным по направлению вычитаемому вектору. На рис. 4 вектор, идущий от точки C к точке E , равен разности векторов $\mathbf{a} - \mathbf{b}$.

Скалярным произведением двух векторов \mathbf{a} и \mathbf{b} называется произведение их модулей a и b на косинус угла φ между ними, т. е.

$$\mathbf{ab} = ab \cos \varphi.$$

Угол между векторами изменяется в пределах от 0 до π . Скалярное произведение двух векторов — величина скалярная.

Векторным произведением двух векторов \mathbf{a} и \mathbf{b} называется вектор \mathbf{c} , направленный перпендикулярно к плоскости, в которой лежат векторы \mathbf{a} и \mathbf{b} , и равный по модулю произведению модулей на синус угла φ между ними, т. е. $ab \sin \varphi$ (рис. 5). Векторное произведение обозначается следующим образом:

$$[\mathbf{ab}] = \mathbf{c}.$$

Направление вектора \mathbf{c} определяется по *правилу правого винта*: если вращение головки винта соответствует повороту от вектора \mathbf{a} к вектору \mathbf{b} по наименьшему углу, то поступательное перемещение винта будет указывать направление вектора \mathbf{c} .

Вектор называется *единичным*, если его модуль равен единице. Любой вектор можно представить как произведение его модуля на единичный вектор; например, $\mathbf{b} = |\mathbf{b}| \mathbf{b}_0$ (\mathbf{b}_0 — единичный вектор); единичный вектор не имеет размерности, его направление совпадает с направлением вектора \mathbf{b} .

Система единиц

Единица физической величины — это физическая величина, которой по определению присвоено числовое значение, равное единице. Единицы разделяются на два типа — основные и производные. *Основные* единицы устанавливаются независимо от единиц других величин; *производные* единицы определяются через основные единицы на основании зависимости между производной величиной и величинами, единицы которых выбраны в качестве основных. Совокупность основных и производных единиц, связанных между собой определенными соотношениями, называется *системой единиц*.

В соответствии с ГОСТом 8.417-81 (СТ 1052-78) в физике используется *Международная система единиц* (СИ). Допускается также применение некоторых внесистемных единиц.

В СИ используется семь основных единиц: метр (м) — единица длины, килограмм (кг) — единица массы, секунда (с) — единица времени, ампер (А) — единица силы электрического тока, кельвин (К) — единица температуры, моль (моль) — единица количества вещества, кандела (кд) — единица силы света, а также две дополнительные единицы: радиан (рад) — единица плоского угла и стерadian (ср) — единица телесного угла. Наименование основных, дополнительных и производных единиц СИ, а также их определения приводятся в таблицах.

Основные единицы международной системы единиц (СИ)

Наименование физической величины	Наименование	Единица		Определение
		Обозначение		
		русское	международное	
Длина	метр	м	m	<i>Метр</i> равен расстоянию, которое проходит плоская электромагнитная волна в вакууме за $1/299792458$ долю секунды
Масса	килограмм	кг	kg	<i>Килограмм</i> равен массе международного прототипа килограмма
Время	секунда	с	s	<i>Секунда</i> равна $9\,192\,631\,770$ периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133
Сила электрического тока	ампер	A	A	<i>Ампер</i> равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенными в вакууме на расстоянии один метр один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной один метр силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ ньютон
Термодинамическая температура	кельвин	K	K	<i>Кельвин</i> равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды
Количество вещества	моль	моль	mol	<i>Моль</i> равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой $0,012$ килограмм
Сила света	кандела	кд	cd	<i>Кандела</i> равна силе света в заданном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{14}$ герц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ ватт на стерадиан

Дополнительные единицы

Плоский угол	радиан	рад	rad	<i>Радиан</i> равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу
Телесный угол	стерадиан	ср	sr	<i>Стерадиан</i> равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы

Производные единицы международной системы единиц (СИ)

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
I. Пространство и время		
Площадь	<i>Квадратный метр</i> равен площади квадрата со сторонами, длины которых равны одному метру	m^2 m^2
Объем	<i>Кубический метр</i> равен объему куба с ребрами, длины которых равны одному метру	m^3 m^3
Скорость	<i>Метр в секунду</i> равен скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой эта точка за время одна секунда перемещается на расстояние один метр	m/c m/s
Ускорение	<i>Метр на секунду в квадрате</i> равен ускорению прямолинейно и равноускоренно движущейся точки, при котором за время одна секунда скорость точки изменяется на один метр в секунду	m/c^2 m/s^2
Угловая скорость	<i>Радиян в секунду</i> равен угловой скорости равномерно вращающегося тела, все точки которого за время одна секунда поворачиваются относительно оси на угол один радиан	$рад/c$ rad/s
Угловое ускорение	<i>Радиян на секунду в квадрате</i> равен угловому ускорению равноускоренно вращающегося тела, при котором за время одна секунда угловая скорость изменяется на один радиан в секунду	$рад/c^2$ rad/s^2
II. Периодические колебания		
Период	<i>Секунда</i>	c, s
Частота периодического процесса	<i>Герц</i> равен частоте периодического процесса, при которой за время одна секунда совершается один цикл периодического процесса	$Гц$ Hz
Волновое число	<i>Метр в минус первой степени</i> равен волновому числу колебаний с длиной волны один метр	m^{-1} m^{-1}
Коэффициент затухания	<i>Секунда в минус первой степени</i> равна коэффициенту затухания, при котором за время одна секунда амплитуда уменьшается в e раз (e — основание натуральных логарифмов)	c^{-1} s^{-1}
III. Механика		
Плотность	<i>Килограмм на кубический метр</i> равен плотности однородного вещества, масса которого при объеме один кубический метр равна одному килограмму	$кг/m^3$ kg/m^3

Продолжение

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
Удельный объем	<i>Кубический метр на килограмм</i> равен удельному объему однородного вещества, объем которого при массе один килограмм равен одному кубическому метру	м ³ /кг m ³ /kg
Количество движения, импульс	<i>Килограмм-метр в секунду</i> равен количеству движения материальной точки массой один килограмм, движущейся со скоростью один метр в секунду	кг·м/с kg·m/s
Момент количества движения (момент импульса)	<i>Килограмм-метр в квадрате на секунду</i> равен моменту количества движения материальной точки, движущейся по окружности радиусом один метр и имеющей количество движения один килограмм-метр в секунду	кг·м ² /с kg·m ² /s
Момент инерции	<i>Килограмм-метр в квадрате</i> равен моменту инерции материальной точки массой один килограмм, находящейся на расстоянии один метр от оси вращения	кг·м ² kg·m ²
Сила, сила тяжести (вес)	<i>Ньютон</i> равен силе, придающей телу массой один килограмм ускорение один метр на секунду в квадрате в направлении действия силы	Н N
Момент силы, момент пары сил	<i>Ньютон-метр</i> равен моменту силы, равной одному ньютону, относительно точки, расположенной на расстоянии один метр от линии действия силы	Н·м N·m
Импульс силы	<i>Ньютон-секунда</i> равна импульсу силы, равной одному ньютону и действующей в течение одной секунды	Н·с N·s
Давление, напряжение (нормальное, касательное), модуль (сдвига, объемного сжатия, продольной упругости)	<i>Паскаль</i> равен давлению, вызываемому силой один ньютон, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью один квадратный метр	Па Pa
Динамическая вязкость	<i>Паскаль-секунда</i> равна динамической вязкости среды, касательное напряжение в которой при ламинарном течении и при разности скоростей слоев, находящихся на расстоянии один метр по нормали к направлению скорости, равной один метр в секунду, равно одному паскалю	Па·с Pa·s
Поверхностное натяжение	<i>Ньютон на метр</i> равен поверхностному натяжению жидкости, создаваемому силой один ньютон, приложенной к участку контура свободной поверхности длиной один метр и действующей нормально к контуру и по касательной к поверхности	Н/м N/m
Работа	<i>Джоуль</i> равен работе силы один ньютон, перемещающей тело на расстояние один метр в направлении действия сил	Дж J
Энергия	<i>Джоуль</i>	
Мощность	<i>Ватт</i> равен мощности, при которой работа один джоуль производится за время одна секунда	Вт W

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
IV. Теплота		
Температура Цельсия	<i>Градус Цельсия</i> по размеру равен кельвину	°С, °C
Температурный коэффициент	<i>Кельвин в минус первой степени</i> равен температурному коэффициенту относительного изменения физической величины, при котором изменение температуры на один кельвин от принятой за начальную вызывает относительное изменение этой величины, равное единице	K^{-1} K^{-1}
Температурный градиент	<i>Кельвин на метр</i> равен температурному градиенту поля, в котором на участке длиной один метр в направлении градиента температура изменяется на один кельвин	K/m K/m
Теплота, количество теплоты	<i>Джоуль</i> равен количеству теплоты, эквивалентному работе один джоуль	Дж, J
Тепловой поток	<i>Ватт</i> равен тепловому потоку, эквивалентному мощности один ватт	Вт, W
Поверхностная плотность теплового потока	<i>Ватт на квадратный метр</i> равен поверхностной плотности теплового потока один ватт, равномерно распределенного по поверхности площадью один квадратный метр	$Вт/м^2$ W/m^2
Теплопроводность	<i>Ватт на метр-кельвин</i> равен теплопроводности вещества, в котором при стационарном режиме с поверхностной плотностью теплового потока один ватт на квадратный метр устанавливается температурный градиент один кельвин на метр	$Вт/(к \cdot К)$ $W/(m \cdot K)$
Теплоемкость	<i>Джоуль на кельвин</i> равен теплоемкости системы, температура которой повышается на один кельвин при подведении к системе количества теплоты один джоуль	Дж/К J/K
Удельная теплоемкость	<i>Джоуль на килограмм-кельвин</i> равен удельной теплоемкости вещества, имеющего при массе один килограмм теплоемкость один джоуль на кельвин	Дж/(кг·К) J/(kg·K)
Удельная газовая постоянная	<i>Джоуль на килограмм-кельвин</i> равен удельной газовой постоянной идеального газа массой один килограмм, совершающего при повышении температуры на один кельвин (и при постоянном давлении) работу один джоуль	Дж/(кг К) J/(kg·K)
Теплота фазового превращения	<i>Джоуль</i> равен количеству теплоты, эквивалентному работе один джоуль	Дж, J
Удельная теплота фазового превращения	<i>Джоуль на килограмм</i> равен удельному количеству теплоты системы, в которой веществу массой один килограмм сообщается (или отбирается от него) количество теплоты один джоуль	Дж/кг J/kg
V. Электричество и магнетизм		
Количество электричества (электрический заряд)	<i>Кулон</i> равен количеству электричества, проходящему через поперечное сечение проводника при токе силой один ампер за время одна секунда	Кл C

Продолжение

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
Напряженность электрического поля	<i>Вольт на метр</i> равен напряженности однородного электрического поля, создаваемой разностью потенциалов один вольт между точками, находящимися на расстоянии один метр на линии напряженности поля	В/м V/m
Электрическое напряжение	<i>Вольт</i> равен электрическому напряжению, вызываемому в электрической цепи постоянный ток силой один ампер при мощности один ватт	В, V
Электрический потенциал Разность электрических потенциалов Электродвижущая сила	<i>Вольт</i>	В, V
Электрическое смещение	<i>Кулон на квадратный метр</i> равен электрическому смещению, при котором поток электрического смещения сквозь поперечное сечение площадью один квадратный метр равен одному кулону	Кл/м ² C/m ²
Электрическая емкость	<i>Фарад</i> равен емкости конденсатора, напряжение между обкладками которого один вольт при заряде один кулон	Ф, F
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	<i>Фарад на метр</i> равен абсолютной диэлектрической проницаемости среды, в которой напряженность электрического поля один вольт на метр создает электрическое смещение один кулон на квадратный метр	Ф/м, F/m
Электрический момент диполя	<i>Кулон-метр</i> равен электрическому моменту диполя, заряды которого, равные каждый одному кулону, расположены на расстоянии один метр один от другого	Кл·м C·m
Плотность электрического тока	<i>Ампер на квадратный метр</i> равен плотности равномерно распределенного по поперечному сечению площадью один квадратный метр электрического тока силой один ампер	А/м ² A/m ²
Напряженность магнитного поля	<i>Ампер на метр</i> равен напряженности магнитного поля в центре длинного соленоида с равномерно распределенной обмоткой, по которой проходит ток силой, равной одной <i>n</i> -й части ампера, где <i>n</i> — число витков на участке длиной один метр	А/м A/m
Магнитная индукция	<i>Тесла</i> равен магнитной индукции, при которой через поперечное сечение площадью один квадратный метр проходит магнитный поток один вебер	Тл, T
Магнитный поток	<i>Вебер</i> равен магнитному потоку, при убывании которого до нуля в сцепленной с ним электрической цепи сопротивлением один ом через поперечное сечение проводника проходит количество электричества один кулон	Вб, Wb
Индуктивность	<i>Генри</i> равен индуктивности электрической цепи, с которой сцепляется магнитный поток один вебер при силе постоянного тока в ней один ампер	Гн, H

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
Абсолютная магнитная проницаемость	<i>Генри на метр</i> равен абсолютной магнитной проницаемости среды, в которой напряженность магнитного поля один ампер на метр создает магнитную индукцию один тесла	Гн/м Н/т
Магнитный момент	<i>Ампер-квадратный метр</i> равен магнитному моменту электрического тока силой один ампер, проходящего по контуру площадью один квадратный метр	А·м ² А·м ²
Намагниченность (интенсивность намагничивания)	<i>Ампер на метр</i> равен намагниченности, при которой вещество объемом один кубический метр имеет магнитный момент один ампер на квадратный метр	А/м А/т
Электрическое сопротивление	<i>Ом</i> равен сопротивлению проводника, между концами которого возникает напряжение один вольт при силе постоянного тока один ампер	Ом, Ω
Электрическая проводимость, активная	<i>Сименс</i> равен электрической проводимости проводника сопротивлением один ом	См, S
Удельное электрическое сопротивление	<i>Ом-метр</i> равен удельному электрическому сопротивлению проводника площадью поперечного сечения один квадратный метр и длиной один метр, имеющего сопротивление один ом	Ом·м Ω·м
Удельная электрическая проводимость	<i>Сименс на метр</i> равен удельной электрической проводимости проводника, который при площади поперечного сечения один квадратный метр и длине один метр имеет электрическую проводимость один сименс	См/м S/m
Электромагнитная энергия	<i>Джоуль</i> равен электромагнитной энергии, эквивалентной работе один джоуль	Дж, J
<i>VI. Свет и связанные с ним электромагнитные излучения</i>		
Энергия излучения	<i>Джоуль</i> равен энергии излучения, эквивалентной работе один джоуль	Дж, J
Поток излучения, мощность излучения	<i>Ватт</i> равен потоку излучения, эквивалентному механической мощности один ватт	Вт, W
Поверхностная плотность потока излучения Энергетическая светимость (излучательность) Энергетическая освещенность (облученность)	<i>Ватт на квадратный метр</i> равен поверхностной плотности потока излучения, при которой поверхность площадью один квадратный метр излучает (или поглощает) поток излучения один ватт	Вт/м ² W/m ²
Энергетическая сила света (сила излучения)	<i>Ватт на стерадиан</i> равен электрической силе света точечного источника, излучающего в телесном угле один стерадиан поток излучения один ватт	Вт/ср W/sr

Продолжение

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
Энергетическая яркость (лучистость)	<i>Ватт настерадиан-квадратный метр</i> равен энергетической яркости равномерно излучающей плоской поверхности площадью один квадратный метр в перпендикулярном к ней направлении при энергетической силе света один ватт настерадиан	Вт/(ср·м ²) W/(sr·m ²)
Световой поток	<i>Люмен</i> равен световому потоку, испускаемому точечным источником в телесном угле одинстерадиан при силе света одна кандела	лм lm
Световая энергия	<i>Люмен-секунда</i> равна световой энергии светового потока в один люмен, действующего в течение одной секунды	лм·с lm·s
Яркость	<i>Кандела на квадратный метр</i> равна яркости светящейся поверхности площадью один квадратный метр при силе света одна кандела	кд/м ² cd/m ²
Светимость	<i>Люмен на квадратный метр</i> равен светимости поверхности площадью один квадратный метр, испускающей световой поток один люмен	лм/м ² lm/m ²
Освещенность	<i>Люкс</i> равен освещенности поверхности площадью один квадратный метр при падающем на нее световом потоке один люмен	лк lx
VII. Акустика		
Период звуковых колебаний	<i>Секунда</i>	с, s
Частота звуковых колебаний	<i>Герц</i>	Гц, Hz
Звуковое давление	<i>Паскаль</i>	Па, Pa
Длина волны	<i>Метр</i>	м, m
Скорость колебания частицы	<i>Метр в секунду</i>	м/с, m/s
Скорость звука	<i>Метр в секунду</i>	м/с, m/s
Звуковая энергия	<i>Джоуль</i>	Дж, J
Плотность звуковой энергии	<i>Джоуль на кубический метр</i> равен плотности звуковой энергии в канале объемом один кубический метр при звуковой энергии один джоуль	Дж/м ³ , J/m ³
Поток звуковой энергии; звуковая мощность	<i>Ватт</i>	Вт, W
Интенсивность звука	<i>Ватт на квадратный метр</i> равен интенсивности звука в канале при потоке звуковой энергии один ватт и площади поперечного сечения один квадратный метр	Вт/м ² W/m ²

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
<i>VIII. Физическая химия и молекулярная физика</i>		
Молярная масса	<i>Килограмм на моль</i> равен молярной массе вещества, имеющего при количестве вещества один моль массу один килограмм	кг/моль kg/mol
Молярный объем	<i>Кубический метр на моль</i> равен молярному объему вещества, занимающего при количестве вещества один моль объем один кубический метр	м ³ /моль m ³ /mol
Молярная теплоемкость	<i>Джоуль на моль-кельвин</i> равен молярной теплоемкости вещества, имеющего при количестве вещества один моль теплоемкость один джоуль на кельвин	Дж/(моль·К) J/(mol·K)
Массовая концентрация	<i>Килограмм на кубический метр</i> равен концентрации раствора, в объеме 1 м ³ которого содержится 1 кг растворенного вещества	кг/м ³ kg/m ³
Коэффициент диффузии	<i>Квадратный метр на секунду</i> равен коэффициенту диффузии вещества, в котором при постоянном градиенте плотности 1 кг/м ³ через поверхность, перпендикулярную градиенту, площадью 1 м ² за время 1 с переносится масса 1 кг	м ² /с m ² /s
Подвижность ионов	<i>Квадратный метр на вольт-секунду</i> равен подвижности ионов, перемещающихся со средней скоростью упорядоченного движения 1 м/с в постоянном электрическом поле напряженностью 1 В/м	м ² /(В·с) m ² /(V·s)

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

В механике изучается простейший вид движения — изменение положения тел относительно друг друга с течением времени; такое движение называется *механическим*.

Тело, относительно которого определяется положение других (движущихся) тел, называется *телом отсчета*. Тело отсчета, связанная с ним система координат и синхронизованные между собой часы, расположенные в различных точках, образуют *систему отсчета*.

1. КИНЕМАТИКА

В кинематике изучается движение, но не рассматриваются причины, которые обуславливают это движение.

Кинематика материальной точки. Тело, размерами которого можно пренебречь при описании его механического движения,

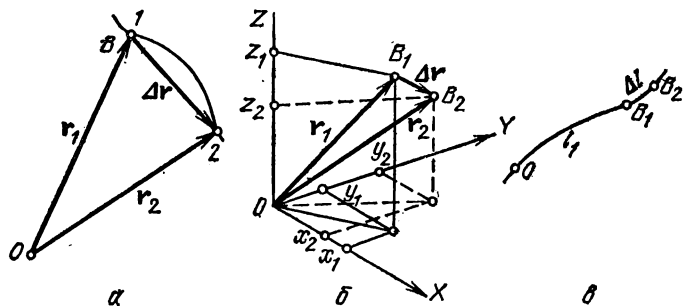


Рис. 1.1. Три способа описания движения: векторный (а), координатный (б), метод дуговых координат (в)

называется *материальной точкой*. Линия, вдоль которой перемещается материальная точка, называется *траекторией*. По виду траектории движения разделяются на два типа: *прямолинейное* и *криволинейное*.

При описании движения материальной точки используются три способа (рис. 1.1, а). Первый способ — *векторный*: положение

точки B определяется радиусом-вектором \mathbf{r}_1 , проведенным из точки O выбранной системы отсчета. За промежуток времени Δt точка B перемещается из позиции 1 в позицию 2, после чего положение точки B будет определяться радиусом-вектором \mathbf{r}_2 . Разность векторов определяет изменение положения точки при движении.

Второй способ — *координатный*: положение точки B_1 определяется проекциями x_1, y_1, z_1 радиуса-вектора \mathbf{r}_1 на координатные оси (рис. 1.1, б). Изменение положения материальной точки при перемещении из точки B_1 в точку B_2 определяется изменениями этих проекций $\Delta x = x_2 - x_1$, $\Delta y = y_2 - y_1$, $\Delta z = z_2 - z_1$, которые зависят от времени.

В третьем способе положение точки B_1 определяется *дуговой координатой* l_1 , которая равна расстоянию OB_1 , проходимому точкой по траектории от начала отсчета в точке O (рис. 1.1, в). Изменение положения материальной точки при перемещении из точки B_1 в точку B_2 определяется изменением дуговой координаты $\Delta l = l_2 - l_1$, зависящей от времени; l_2 — дуговая координата точки B_2 .

Перемещение, путь, скорость, ускорение. Разность векторов

$$\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = \Delta \mathbf{r} \quad (1.1)$$

называется *перемещением*.

Путь — это скалярная величина, равная расстоянию, которое проходит материальная точка по траектории за данный промежуток времени; он равен разности дуговых координат

$$l_2 - l_1 = \Delta l. \quad (1.1a)$$

В общем случае модуль перемещения и путь не равны друг другу.

Средней скоростью называется величина

$$\Delta \mathbf{r} / \Delta t = \mathbf{v}_{\text{ср}}, \quad (1.2)$$

где $\Delta \mathbf{r}$ — перемещение материальной точки за время Δt . *Мгновенной скоростью* называется величина, равная

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}, \quad (1.3)$$

ускорением называется величина

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{a}. \quad (1.4)$$

Проекции скорости и ускорения на оси прямоугольной системы координат определяются следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta x / \Delta t) = dx / dt, \\ v_y &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta y / \Delta t) = dy / dt, \\ v_z &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta z / \Delta t) = dz / dt, \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

$$\left. \begin{aligned} a_x &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta v_x / \Delta t) = dv_x / dt, \\ a_y &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta v_y / \Delta t) = dv_y / dt, \\ a_z &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta v_z / \Delta t) = dv_z / dt. \end{aligned} \right\} (1.6)$$

Модуль вектора скорости

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}, \quad (1.7)$$

модуль вектора ускорения

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}. \quad (1.8)$$

Для определения мгновенной скорости по дуговым координатам вводится единичный вектор τ ($\tau=1$), направленный по касательной к траектории в сторону возрастания дуговой координаты l ; вектор τ — переменный, он зависит от координаты l . Модуль мгновенной скорости

$$v_\tau = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{dl}{dt}. \quad (1.9)$$

Вектор мгновенной скорости $\mathbf{v} = v_\tau \tau$; таким образом, v_τ является проекцией вектора скорости \mathbf{v} на направление единичного вектора τ ; v_τ может иметь как положительное, так и отрицательное значение.

Проекция ускорения на направление вектора τ

$$a_\tau = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_\tau}{\Delta t} = \frac{dv_\tau}{dt} \quad (1.10)$$

называется *тангенциальным ускорением*.

Проекция ускорения на направление нормали \mathbf{n} к вектору τ

$$a_n = v_\tau^2 / \rho \quad (1.11)$$

называется *нормальным ускорением*. В формуле (1.11) ρ — радиус кривизны траектории в данной точке (рис. 1.2).

Модуль полного ускорения

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}. \quad (1.12)$$

Прямолинейное движение. Простейшими видами прямолинейного движения являются равномерное, равноускоренное и равнозамедленное движения. При *равномерном* прямолинейном движении скорость постоянна: в любой момент времени Δt $|\mathbf{v}$, $\mathbf{v}_{cp} = \mathbf{v} = \text{const}$, $\mathbf{a} = 0$; модуль перемещения

$$|\Delta r| = v \Delta t = s, \quad (1.13)$$

где s — пройденный за время Δt путь.

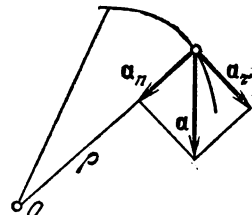


Рис. 1.2. Векторная диаграмма ускорения при криволинейном движении

При *равноускоренном* движении $a \parallel v$, модуль скорости увеличивается во времени, ускорение постоянно ($a = \text{const}$); скорость в момент времени t

$$v_t = v_0 + at, \quad (1.14)$$

где v_0 — скорость в момент начала отсчета времени ($t=0$).

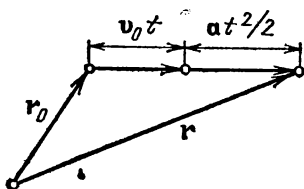


Рис. 1.3. Векторная диаграмма перемещения при равноускоренном движении

Перемещение Δr и путь s , пройденный материальной точкой за время t при равноускоренном движении, определяются соотношениями

$$\Delta r = v_0 t + at^2/2, \quad (1.15)$$

$$s_y = v_0 t + at^2/2. \quad (1.16)$$

При *равнозамедленном* прямолинейном движении векторы a и v имеют противоположные направления; в этом случае формула (1.16) имеет следующий вид:

$$s_s = v_0 t - at^2/2. \quad (1.17)$$

Криволинейное движение. Движение материальной точки по окружности является простейшим видом криволинейного движения. Положение точки A определяется в этом случае полярными координатами: модулем радиуса-вектора r , проведенного из начала координат O (рис. 1.4), и угловой координатой φ . Угол φ отсчитывается от оси Ox против хода часовой стрелки. Изменение уг-

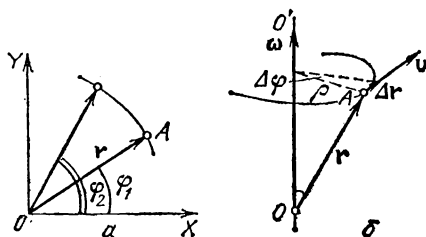


Рис. 1.4. а. Траектория материальной точки при движении по окружности; б. К определению направления вектора ω

ловой координаты $\varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi$ называется *углом поворота радиуса-вектора* точки A (или *угловым перемещением*). Элементарному углу поворота $\Delta\varphi$ соответствует элементарное перемещение, модуль которого $\Delta r = r \Delta\varphi$.

Мгновенная скорость материальной точки при движении по окружности называется *линейной скоростью*; отношение

$$\Delta\varphi/\Delta t = \omega_{ср} \quad (1.18)$$

называется *средней угловой скоростью*; в этом отношении $\Delta\varphi$ — угловое перемещение за время Δt .

Мгновенная угловая скорость

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt}, \quad (1.19)$$

угловое ускорение

$$\beta = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.20)$$

где $\Delta\omega$ — изменение угловой скорости за время Δt .

Угловая скорость и угловое ускорение — векторные величины. В общем случае

$$\mathbf{v} = [\omega\mathbf{r}], \quad \mathbf{a} = [\beta\mathbf{r}], \quad (1.21)$$

где \mathbf{r} — радиус-вектор точки A , проведенный из любой точки оси вращения O (рис. 1.4, б). Направления этих векторов вдоль оси вращения определяются из векторных уравнений (1.21) (см. введение). Вектор углового ускорения совпадает по направлению с вектором угловой скорости, если угловая скорость увеличивается; если угловая скорость уменьшается, то векторы ω и β имеют противоположные направления.

Если R — радиус окружности, то

$$v = \omega R, \quad a = \beta R, \quad (1.21a)$$

где v — линейная скорость, a — линейное ускорение.

Движение материальной точки *по окружности* называется *равномерным*, если угловая скорость постоянна; при этом виде движения нормальное ускорение

$$a_{ц} = v^2/R = \omega^2 R \quad (1.22)$$

называется *центростремительным ускорением*; вектор центростремительного ускорения направлен по радиусу к центру окружности.

Время одного оборота по окружности называется *периодом вращения* T ; величина $\nu = 1/T$ называется *частотой вращения*. Если угловая скорость изменяется, но угловое ускорение остается постоянным, то движение по окружности называется *равнопеременным*; угловая скорость ω_t и угловая координата φ_t в момент времени t при равнопеременном вращении определяются соотношениями

$$\omega_t = \omega_0 \pm \beta t, \quad (1.23)$$

$$\varphi_t = \varphi_0 \pm \omega_0 t \pm \beta t^2/2, \quad (1.24)$$

где ω_0 , φ_0 — угловая скорость и угловая координата в момент начала отсчета времени ($t=0$).

Если направления векторов линейной скорости и ускорения совпадают, то движение материальной точки *по окружности* называется *равноускоренным*; в противном случае оно называется *равнозамедленным*. Минус в формулах (1.23), (1.24) относится к равнозамедленному движению.

Кинематика твердого тела. Любое движение твердого тела можно представить как сумму поступательного движения и вращения вокруг неподвижной оси. Движение твердого тела, при котором любая связанная с телом прямая остается параллельной самой себе, называется поступательным; при поступательном движении все точки твердого тела за один и тот же промежуток времени совершают одинаковые перемещения; вследствие этого мгновенные скорости и ускорения всех точек в данный момент времени равны. Поэтому изучение поступательного движения твердого тела можно свести к изучению движения одной точки этого тела (см. формулы (1.1) — (1.8)).

При вращении твердого тела вокруг неподвижной оси его различные точки описывают окружности в плоскостях, перпендикулярных оси вращения; центры этих окружностей лежат на оси; поэтому для описания вращения твердого тела можно использовать уравнения, которые применяются при изучении движения точки по окружности (см. формулы (1.18) — (1.24)).

Инерциальные и неинерциальные системы отсчета. Система отсчета, относительно которой свободная материальная частица движется равномерно и прямолинейно, называется *инерциальной*. Проверить экспериментально наличие инерциальных систем отсчета невозможно, так как нельзя выделить свободную материальную точку.

Скорость и ускорение тела зависят в общем случае от системы отсчета. Пусть начало системы отсчета K' движется относительно системы K с переменной скоростью v_0 и ускорением a_0 ; если в системе K' скорость точки v' , а ускорение a' , то в системе K скорость и ускорение будут выражаться следующими формулами:

$$v = v_0 + v', \quad a = a_0 + a'. \quad (1.25)$$

Если система K' движется относительно системы K с постоянной скоростью ($v_0 = \text{const}$, $a_0 = 0$), то $a = a'$. В инерциальных системах ускорения тел одинаковы. В частном случае, когда v_0 постоянна и направлена вдоль оси OX , а координатные оси в обеих системах параллельны (рис. 1.5), координаты связаны согласно *преобразованиям Галилея*:

$$x' = x - v_0 t, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t, \quad (1.26)$$

где величины со штрихами относятся к системе K' .

При больших скоростях преобразования Галилея заменяются преобразованиями Лоренца. Для частного случая ($v_0 \parallel OX$), который рассматривается ниже, эти преобразования записываются в следующей форме:

$$x' = \frac{x - v_0 t}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t' = \frac{t - x v_0 / c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (1.27)$$

где $\beta = v_0/c$, c — скорость света в вакууме.

При малых скоростях ($v_0 \ll c$) преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея.

В движущейся системе отсчета, согласно преобразованиям Лоренца, длина отрезка, расположенного параллельно вектору v_0 , сокращается (*лоренцево сокращение*):

$$l' = l_0 \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (1.28)$$

где l_0 — собственная длина отрезка, т. е. его длина, измеренная в системе отсчета, относительно которой он неподвижен. Отрезок, который расположен перпендикулярно вектору скорости v_0 , в любых инерциальных системах имеет одинаковую длину.

Промежутки времени в движущейся системе отсчета увеличиваются:

$$\tau' = \tau_0 / \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (1.29)$$

где τ_0 — собственное время (время, измеренное в неподвижной системе отсчета).

Закон сложения скоростей: если в системе K (неподвижной) проекции скорости равны v_x и v_y , то в системе K' (подвижной)

$$v'_x = \frac{v_x - v_0}{1 - v_x v_0 / c^2}, \quad v'_y = \frac{v_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - v_x v_0 / c^2}. \quad (1.30)$$

Системы отсчета, движущиеся с ускорением, называются *неинерциальными*.

Если неинерциальная система K' вращается с постоянной угловой скоростью ω вокруг оси, неподвижной в инерциальной системе K , а материальная точка движется относительно K' со скоростью v' , то в системе K скорость этой точки

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}' + [\omega \mathbf{r}], \quad (1.31)$$

а ее ускорение \mathbf{a} относительно системы K состоит из трех частей:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}' + 2[\omega \mathbf{v}'] - \omega^2 \mathbf{r}, \quad (1.32)$$

где \mathbf{a}' — ускорение в системе K' , \mathbf{r} — радиус-вектор вращающейся точки, проведенный из произвольной точки оси вращения системы, \mathbf{r} — радиус-вектор, проведенный перпендикулярно к оси вращения.

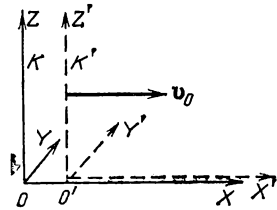


Рис. 1.5. Простейший случай расположения инерциальных систем отсчета

Составляющая ускорения $a_k = 2[\omega v']$ называется *кориолисовым ускорением*, $a_{oc} = -\omega^2 r$ называется *осецистремительным (центростремительным) ускорением*.

В неинерциальных системах отсчета, в отличие от инерциальных, ускорения различны.

Движение тела в поле земного тяготения. Во многих случаях (но не всегда) система отсчета, связанная с Землей, может считаться инерциальной. Земля совершает суточное вращение с угловой скоростью $\omega_3 = 7 \cdot 10^{-5}$ рад/с, а потому связанные с ней тела имеют центростремительное ускорение $a_3 = \omega_3 R_3$; средний радиус Земли $R_3 = 6 \cdot 10^8$ см, $a_3 = 3$ см/с²; величина $a_3 \ll g$ ($g = 9,8$ м/с²), ей можно пренебречь и считать систему отсчета, связанную с Землей, инерциальной; ниже используется такая инерциальная система.

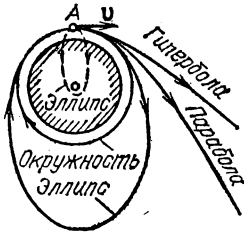


Рис. 1.6. Траектории движения тел в поле тяготения Земли при больших скоростях

На рис. 1.6 показаны траектории тел, вылетающих из точки А, лежащей вблизи поверхности Земли, с различными скоростями. Во всех случаях скорость направлена горизонтально; траектории рассчитаны для тел, массы которых значительно меньше массы Земли.

Траекторией является окружность радиусом R , если линейная скорость v_1 в точке А такова, что центростремительное ускорение $v_1^2/R = g$ (g — ускорение свободного падения). Скорость $v_1 = \sqrt{Rg} = 7,93$ км/с называется *первой космической скоростью*. При расчете v_1 значение R принято равным среднему радиусу Земли.

Чтобы преодолеть силу тяготения у поверхности Земли, телу необходимо (без учета сопротивления воздуха) сообщить скорость $v_2 = v_1 \sqrt{2}$. Скорость $v_2 = 11,16$ км/с называется *второй космической скоростью*; эта скорость также называется *скоростью освобождения (убегания)*.

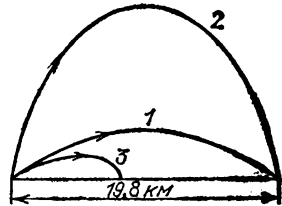
При скоростях v , которые удовлетворяют неравенству $v_1 < v < v_2$, тело движется по эллиптической траектории, при этом ближний к точке вылета А фокус эллипса находится в центре Земли. При скоростях $v > v_2$ тело движется по гиперболической траектории.

Для преодоления силы притяжения Солнца необходимо сообщить телу, которое находится на Земле, скорость $v_3 = \sqrt{2\gamma M_C/R_C}$ (γ — гравитационная постоянная, M_C — масса Солнца, R_C — расстояние Земли от Солнца). Скорость $v_3 = 42,10$ км/с называется *третьей космической скоростью*. Поскольку Земля

движется по орбите вокруг Солнца со скоростью $v_{ор} = 30$ км/с, то ракеты запускаются в направлении движения Земли; в этом случае им необходимо сообщать скорость $v_3 - v_{ор} \approx 12$ км/с (без учета сопротивления воздуха).

При движении тел со скоростями $v < v_1$ траектории представляют собой участки эллипса, дальний фокус которого совпадает с центром Земли (на рис. 1.6 эта траектория изображена штриховой линией). При движении со скоростями v , значительно меньшими v_1 ($v \ll v_1$), участки эллиптической траектории можно рассматривать как параболические траектории.

Рис. 1.7. Траектории движения тел вблизи поверхности Земли при небольших скоростях. Для указанных траекторий начальная скорость $v_0 = 550$ м/с; кривая 1 соответствует углу $\alpha = 20^\circ$, кривая 2 — углу $\alpha = 70^\circ$, кривая 3 — углу $\alpha = 20^\circ$, но с учетом сопротивления воздуха



Если тело брошено с поверхности Земли под углом α к горизонтальной плоскости с начальной скоростью $v_0 \ll v_1$, то ускорение свободного падения можно считать постоянным как по модулю, так и по направлению, а поверхность Земли рассматривать как плоскую. В этом случае траекторией является парабола (рис. 1.7), а дальность полета (S) и наибольшая высота подъема (H) вычисляются по формулам

$$S = v_0^2 \sin(2\alpha)/g, \quad H = v_0^2 \sin^2 \alpha / (2g).$$

Одна и та же дальность полета может быть получена при двух значениях угла α_1 и α_2 , причем $\alpha_2 = 90^\circ - \alpha_1$. Максимальной дальности полета соответствует угол $\alpha = 45^\circ$.

При наличии сопротивления воздуха дальность полета и высота подъема уменьшаются.

2. ЗАКОНЫ ДИНАМИКИ

В динамике изучается влияние взаимодействия тел на изменение механического движения.

Сила — мера взаимодействия тел (или полей и тел), проявляющегося в изменении скорости тел. Сила — величина векторная; вектор силы определяется модулем, направлением и точкой приложения.

Первый закон Ньютона. Тело находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, пока приложенные к телу силы не вызовут изменения этого состояния.

Изменение движения тела определяется не только действующей силой, но и свойствами самого тела. Тело оказывает «сопротивление» изменению скорости как по модулю, так и по направлению. Это свойство называется *инертностью*. Сущность 1-го закона Ньютона состоит в том, что утверждается наличие у тел инертности и существование инерциальных систем отсчета.

Физическая величина, характеризующая инертность тела, называется *инертной массой (массой)*. Кроме того, масса является мерой гравитационного взаимодействия тел (мерой тяготения). В этом случае масса называется *гравитационной*. Все опытные факты говорят о том, что инертная масса тела равна его гравитационной массе.

Второй закон Ньютона. Произведение массы материальной точки на ускорение равно действующей на эту точку силе. Векторы силы и ускорения имеют одинаковые направления:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}. \quad (1.33)$$

Ускорение при одновременном действии на тело нескольких сил определяется *равнодействующей силой*, которая равна векторной сумме всех приложенных к телу сил, т. е.

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n.$$

Произведение массы тела на его скорость называется *импульсом* (или *количеством движения*): $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$; импульс — величина векторная.

Используя понятие импульса, второй закон Ньютона можно записать в более общей форме:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta \mathbf{p} / \Delta t = d\mathbf{p} / dt = \mathbf{F}, \quad (1.34)$$

где $\Delta \mathbf{p}$ — изменение импульса за время Δt .

Таким образом, изменение импульса тела за одну секунду равно равнодействующей силе.

Третий закон Ньютона. Силы, с которыми две материальные точки взаимодействуют между собой, равны по модулю и направлены противоположно друг другу вдоль прямой, проходящей через эти точки:

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21} \quad \text{или} \quad m_1 \mathbf{a}_1 = -m_2 \mathbf{a}_2, \quad (1.35)$$

где \mathbf{F}_{12} — сила, приложенная к первой точке, \mathbf{F}_{21} — сила, приложенная ко второй точке, m_1 , m_2 — массы соответственно первой и второй материальной точки, \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 — их ускорения.

Законы Ньютона справедливы в инерциальных системах отсчета.

Основной закон движения. Математическое выражение второго закона Ньютона является основным уравнением динамики мате-

риальной точки:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}. \quad (1.36)$$

В проекциях на координатные оси уравнение (1.36) записывается в виде трех уравнений:

$$F_x = ma_x, \quad F_y = ma_y, \quad F_z = ma_z, \quad (1.36a)$$

где a_x, a_y, a_z — проекции ускорения, F_x, F_y, F_z — проекции силы.

В проекциях на касательную и нормаль к траектории (т. е. на направления единичных векторов $\boldsymbol{\tau}$ и \mathbf{n}) соотношение (1.36) представляется двумя уравнениями

$$ma_\tau = F_\tau, \quad ma_n = F_n, \quad (1.36b)$$

где a_τ и a_n — модули тангенциального и нормального ускорений, F_τ, F_n — проекции вектора силы на соответствующие направления.

В неинерциальных системах в основном законе динамики материальной точки, кроме силы \mathbf{F} , учитываются силы инерции. Например, если неинерциальная система K' вращается вокруг оси с постоянной угловой скоростью $\boldsymbol{\omega}$, а ось перемещается поступательно с ускорением \mathbf{a}_0 относительно K -системы, то ускорение в K' -системе

$$\mathbf{a}' = \mathbf{a} - \mathbf{a}_0 + \boldsymbol{\omega}^2 \boldsymbol{\rho} + 2[\mathbf{v}'\boldsymbol{\omega}], \quad (1.37)$$

где \mathbf{v}' — скорость точки относительно K' -системы, \mathbf{a} — ускорение в K -системе. После умножения (1.37) на m получаем основное уравнение движения материальной точки в неинерциальной системе отсчета:

$$m\mathbf{a}' = \mathbf{F} - m\mathbf{a}_0 + m\boldsymbol{\omega}^2 \boldsymbol{\rho} + 2m[\mathbf{v}'\boldsymbol{\omega}], \quad (1.38)$$

где $\mathbf{F}_\text{и} = -m\mathbf{a}_0$ — сила инерции, обусловленная поступательным движением неинерциальной системы отсчета, $\mathbf{F}_\text{цб} = m\boldsymbol{\omega}^2 \boldsymbol{\rho}$ — центробежная сила инерции, $\mathbf{F}_\text{к} = 2m[\mathbf{v}'\boldsymbol{\omega}]$ — сила Кориолиса.

Силы инерции имеют характерные особенности: они не отражают взаимодействия тел, а обусловлены движением неинерциальных систем. Поэтому к силам инерции неприменим третий закон Ньютона, т. е. для них нельзя указать соответствующих сил противодействия. В инерциальных системах отсчета сил инерции нет. Силы инерции, как и силы тяготения, пропорциональны массе тел.

При небольших скоростях ($v \ll c$) справедливы преобразования Галилея (см. (1.26)); ускорение материальной точки, силы, действующие на нее, а также ее масса не зависят от скорости движения инерциальных систем отсчета; форма уравнений движения в инерциальных системах отсчета сохраняется.

При больших скоростях ($v \sim c$) следует учитывать зависимость массы от скорости:

$$m = m_0 / \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (1.39)$$

где m_0 — масса неподвижного тела (масса покоя), m — масса движущегося тела, c — скорость света в вакууме, $\beta = v/c$.

При переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой проекции силы \mathbf{F} на координатные оси преобразуются согласно преобразованиям Лоренца (см. (1.27)) следующим образом:

$$F'_x = F_x, \quad F'_y = F_y \sqrt{1 - \beta^2}, \quad F'_z = F_z \sqrt{1 - \beta^2} \quad (1.40)$$

(относительная скорость параллельна оси OX , $OX \parallel OX'$, $OY \parallel OY'$, $OZ \parallel OZ'$).

Проекции силы имеют максимальное значение в той системе отсчета, относительно которой тело находится в покое.

Закон сохранения количества движения (импульса). Действующие на систему тел силы можно разделить на два вида — внутренние и внешние. *Внутренними* называются силы, которые действуют между телами, входящими в систему; *внешними* называются силы, обусловленные взаимодействием с телами, не принадлежащими данной системе. Система называется *замкнутой*, если внешние силы отсутствуют. Для замкнутой системы выполняется *закон сохранения количества движения*: векторная сумма количеств движения тел в замкнутой системе является величиной постоянной:

$$\sum_i \mathbf{p}_i = \text{const.} \quad (1.41)$$

Например, для замкнутой системы, состоящей из двух тел, выполняется соотношение

$$m_1 \mathbf{u}_1 + m_2 \mathbf{u}_2 = m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2,$$

где \mathbf{v}_1 и \mathbf{v}_2 — скорости первого и второго тел до взаимодействия, а \mathbf{u}_1 и \mathbf{u}_2 — скорости их после взаимодействия.

Закон сохранения количества движения выполняется только в инерциальных системах; в неинерциальных системах этот закон выполняется в том случае, когда сумма внешних сил (с учетом сил инерции) будет равна нулю. Такие специальные случаи имеют частный характер.

Закон сохранения количества движения является фундаментальным законом природы; он применяется не только для изучения механических систем, но и при исследовании фотонов (см. главу IV), а также других элементарных частиц (см. главу V).

Динамика вращательного движения. Для описания вращательного движения вводятся следующие величины: момент силы, момент количества движения, момент инерции. Указанные величины определяются или относительно точки, или относительно оси.

Моментом силы относительно точки O называется вектор (рис. 1.8, а)

$$\mathbf{M} = [\mathbf{r}\mathbf{F}], \quad (1.42)$$

где \mathbf{r} — радиус-вектор точки A . Модуль M равен произведению модуля силы F на плечо l (плечо — кратчайшее расстояние от точки O до линии действия силы), $l = r \sin \beta$, β — угол между \mathbf{r} и \mathbf{F} .

Моментом импульса (моментом количества движения) материальной точки относительно точки O называется вектор (рис. 1.8, б)

$$\mathbf{L} = [\mathbf{r}\mathbf{p}], \quad (1.43)$$

где $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ — количество движения (импульс), $L = pr \sin \beta = pl$, β — угол между \mathbf{r} и \mathbf{v} .

Моментом инерции I материальной точки массой m относительно точки O называется скалярная величина

$$I = mr^2.$$

Основной закон вращательного движения материальной точки. Скорость изменения момента количества движения равна моменту сил, действующих на точку, т. е.

$$\mathbf{M} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{L}}{\Delta t} = d\mathbf{L}/dt. \quad (1.44)$$

Уравнение (1.44) называется *уравнением моментов*. В неинерциальной системе отсчета в момент \mathbf{M} включаются и моменты сил инерции.

Моментом силы относительно оси OZ называется проекция момента силы \mathbf{M} на эту ось (обозначается M_z , см. рис. 1.8, а).

Моментом количества движения (импульса) относительно оси OZ называется проекция момента импульса \mathbf{L} на эту ось (обозначается L_z , см. рис. 1.8, б). Моменты силы и моменты импульса материальной точки относительно оси не зависят от выбора точки O на оси; это — величины скалярные.

Основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела вокруг неподвижной оси:

$$I\beta_z = M_z, \quad (1.45)$$

где M_z — алгебраическая сумма моментов внешних сил относительно оси вращения OZ , β_z — проекция углового ускорения на ось OZ , I — момент инерции тела относительно оси OZ .

Момент инерции твердого тела относительно оси равен сумме моментов инерции всех материальных точек, составляющих это тело. Момент инерции I относительно произвольной оси определяется по теореме Гюйгенса — Штейнера:

$$I = I_0 + mb^2, \quad (1.46)$$

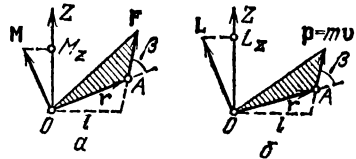


Рис. 1.8. К определению момента силы (а) и момента импульса (б)

где I_0 — момент инерции тела относительно оси, которая проходит через центр масс этого тела (см. (1.64)) параллельно данной оси, b — кратчайшее расстояние между осями.

Моменты сил относительно оси являются алгебраическими величинами; знаки моментов зависят от выбора положительного направления оси OZ и от направления вращения. Положительным направлением вращения считается такое, когда направление отсчета угловой координаты и направление оси OZ связаны правилом правого винта. Если под действием момента силы происходит вращение по направлению отсчета угловой координаты φ , то момент считается положительным.

Закон сохранения момента импульса (количества движения). В инерциальных системах отсчета векторная сумма моментов импульсов тел в замкнутой системе является постоянной величиной:

$$\sum_i L_i = \text{const.} \quad (1.47)$$

Закон сохранения момента импульса наряду с другими законами сохранения является фундаментальным законом природы.

Закон всемирного тяготения. Две материальные точки, имеющие массы m_1 и m_2 , взаимодействуют между собой с силой, модуль которой

$$F = \gamma m_1 m_2 / R^2, \quad (1.48)$$

где R — расстояние между точками, γ — гравитационная постоянная, равная $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с}^2)$. Эти силы называются гравитационными; гравитационные силы, действующие между двумя материальными точками, направлены вдоль прямой, проходящей через эти точки.

Гравитационная постоянная равна гравитационной силе, действующей между двумя материальными точками, которые находятся на расстоянии 1 метр друг от друга и имеют массы по 1 килограмму.

В случае однородных шаров с массами m_1 и m_2 сила взаимодействия выражается той же формулой (1.48), причём R соответствует расстоянию между центрами шаров.

Сила тяготения, сила тяжести, вес. Гравитационная сила, действующая между телом и Землей, называется силой тяготения. Сила тяготения

$$F_{\tau} = \gamma m M / R_3^2, \quad (1.49)$$

где m — масса тела, M — масса Земли, R_3 — ее радиус. Сила тяготения направлена к центру Земли.

Вследствие суточного вращения, кроме силы тяготения, на тело, расположенное на поверхности Земли, действует центробеж-

ная сила инерции $F_{цб} = m\omega^2\rho$ (см. (1.38)), которая направлена по радиусу-вектору ρ (рис. 1.9).

Равнодействующая $G = F_T + F_{цб}$ называется *силой тяжести*. Направление вектора G совпадает с направлением отвеса; вектор силы тяготения направлен по радиусу к центру Земли; обе силы совпадают по направлению лишь на полюсах, где $G = F_T$, и на экваторе, где $G = F_T - F_{цб}$.

Вектор силы тяжести и вектор силы тяготения незначительно отличаются по направлениям; угол α между ними равен приблизительно $0,0018 \sin(2\varphi)$ (φ — широта).

Вес — сила, с которой действует тело, находящееся в поле сил тяжести, на горизонтальную опору или подвес, препятствующие его свободному падению. Вес тела $P = G - ma$ (a — ускорение тела с опорой относительно поверхности Земли); если $a = 0$, то $P = G$; в невесомости a равно ускорению свободного падения g , вес $P = 0$, но сила тяжести $G \neq 0$.

Гравитационное поле. Гравитационное взаимодействие осуществляется посредством гравитационного поля (поля тяготения). *Напряженностью* поля тяготения называется сила тяготения, действующая на единичную массу: $g_T = F_T/m$.

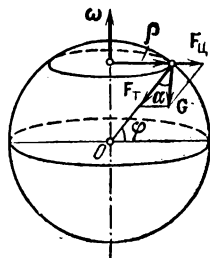


Рис. 1.9. Силы тяготения F_T и силы тяжести G на Земле

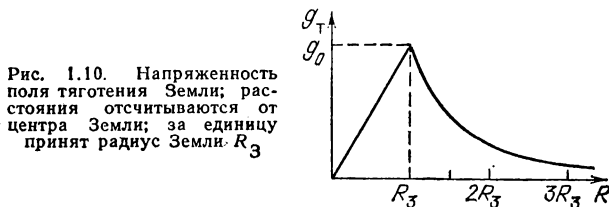


Рис. 1.10. Напряженность поля тяготения Земли; расстояния отсчитываются от центра Земли; за единицу принят радиус Земли R_3

Напряженность поля тяготения на высоте h от поверхности Земли определяется по формуле

$$g_T = \gamma \frac{M}{(R_3 + h)^2} = g_0 \frac{R_3^2}{(R_3 + h)^2}, \quad (1.50)$$

где g_0 — напряженность на поверхности Земли.

В первом приближении ($h \ll R_3$)

$$g_T = g_0 (1 - 2h/R_3). \quad (1.50a)$$

В центре Земли напряженность g_T равна нулю. Зависимость от расстояния до центра Земли изображена графиком рис. 1.10. При расчетах Земля рассматривается как однородный шар.

Ускорение свободного падения равно силе тяжести, действующей на единичную массу: $g = G/m$. В первом приближении можно считать, что $g = g_T$.

Силы трения. Силы, которые проявляются на поверхности двух соприкасающихся тел, если они перемещаются относительно друг друга, называются *силами трения*. Силы трения, которые проявляются и при отсутствии относительного движения тел, называются *силами трения покоя*. Если между поверхностями соприкасающихся твердых тел отсутствует прослойка жидкости (смазка), то трение называется *сухим* (или *внешним*). Сухое трение подразделяется на *трение скольжения* (одно тело скользит по поверхности другого) и *трение качения* (одно тело катится по поверхности другого).

Сила трения скольжения $F_{\text{тр}}$ зависит от материала и качества обработки соприкасающихся поверхностей тел, от скорости их относительного движения, от силы, сжимающей трущиеся поверхности (*силы нормального давления*), и от других факторов:

$$F_{\text{тр}} = fN. \quad (1.51)$$

Отношение $F_{\text{тр}}/N = f$ называется *коэффициентом трения скольжения*; он зависит от тех же факторов, что и сила трения скольжения. Отношение $F_{\text{п}}/N = f_{\text{п}}$ ($F_{\text{п}}$ — сила трения покоя) называется *коэффициентом трения покоя*; он изменяется в пределах от 0 до значения, которое незначительно превышает коэффициент трения скольжения.

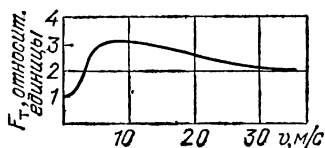


Рис. 1.11. Зависимость силы трения от скорости движения стальной пластинки по поверхности стальной пластинки

На рис. 1.11 приводится в качестве примера зависимость силы трения от скорости скольжения одной стальной пластинки по поверхности другой стальной пластинки. Ориентировочные значения f приведены в табл. 15.

Модуль силы трения качения

$$F_{\text{к}} = f_{\text{к}} N/R, \quad (1.52)$$

где R — радиус катящегося тела, $f_{\text{к}}$ — коэффициент трения качения, имеющий размерность длины, N — сила давления.

Ориентировочные значения $f_{\text{к}}$ приводятся в таблице:

Качение	f_k , см
металлического диска по металлу	0,001–0,002
колеса со стальным бандажем по стальному рельсу	0,005
чугунного колеса по стальному рельсу	0,12
шины автомобиля (со скоростью до 80 км/ч)	0,02

При увеличении скорости движения автомобиля f_k резко возрастает.

Коэффициент сцепления ψ колеса с дорожным покрытием равен отношению силы трения скольжения между колесом и поверхностью дороги к силе давления: $\psi = F_{\text{тр}}/N$. Коэффициент сцепления ψ на сухом асфальте $\sim 0,8$, на мокром асфальте — $0,1 \div 0,2$.

Плотность вещества. Плотностью ρ вещества называется масса единичного объема:

$$\rho = m/V, \quad (1.53)$$

где m — масса тела, V — его объем.

Масса сыпучих и рыхлых веществ (например, песка, зерна, каменного угля, дров и т. п.), занимающих объем 1 м^3 , называется *объемной массой*; в этом случае общий объем определяется суммой объемов частиц и объемов промежутков и полостей между частицами этого вещества.

3. РАБОТА, МОЩНОСТЬ, ЭНЕРГИЯ

Элементарной *работой силы* \mathbf{F} на элементарном перемещении $d\mathbf{r}$ точки приложения силы называется скалярная величина

$$\Delta A = \mathbf{F} \Delta \mathbf{r} = F \Delta s \cos \varphi, \quad (1.54)$$

где φ — угол между векторами \mathbf{F} и $\Delta \mathbf{r}$, $\Delta s = |\Delta \mathbf{r}|$ — элементарный отрезок пути, $F_s = F \cos \varphi$ — проекция вектора \mathbf{F} на направление $\Delta \mathbf{r}$ (рис. 1.12).

Работа силы на конечном участке пути (от точки A до точки B) определяется суммированием (интегрированием) элементарных работ на всех элементарных участках пути:

$$A = \sum F_s \Delta s = \int_A^B F_s ds. \quad (1.55)$$

В частном случае, когда сила постоянна и составляет один и тот же угол с элементарными перемещениями, работа

$$A_n = F_s \cos \varphi, \quad (1.55a)$$

где s — пройденный путь.

Работа — величина алгебраическая; она может быть положительной ($\cos \varphi > 0$) и отрицательной ($\cos \varphi < 0$).

Работа при вращении тела при постоянном моменте силы M :

$$A_B = M \Delta \varphi, \quad (1.56)$$

где $\Delta \varphi$ — угол поворота.

Мощностью N называется работа за время одна секунда:

$$N = A/\Delta t = Fv, \quad (1.57)$$

где F — сила, v — скорость, A — работа за время Δt .

Поле сил (силовым полем) называется одна из форм материи, которая проявляется как действие сил в пространстве; независи-

мое от времени поле сил называется *стационарным*.

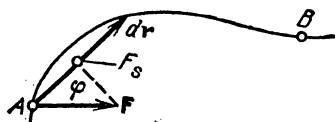


Рис. 1.12. К расчету работы

Если работа сил при перемещении тела между двумя точками стационарного поля не зависит от формы траектории, а зависит лишь от начального и конечного положения тела, то такое поле

называется *потенциальным*, а силы — *консервативными*; силы тяжести, кулоновские силы взаимодействия зарядов (см. гл. III) являются консервативными силами; силы трения — *неконсервативные* силы; они называются *диссипативными* силами.

В потенциальном поле при перемещении частицы из различных точек B_i в фиксированную точку O силами поля совершается работа, которая зависит только от радиусов-векторов r_i точек B_i . Величина $U(r)$, зависящая только от r и определяющая работу по перемещению частицы в потенциальном поле, называется *потенциальной энергией* этой частицы в данном поле. Потенциальная энергия определяется с точностью до постоянной величины. Работа сил потенциального поля равна убыли потенциальной энергии при переходе частицы из начального в конечное положение.

Другим видом механической энергии является кинетическая энергия, которая является мерой механического движения. *Кинетической энергией* движущегося со скоростью v тела массой m_0 называется величина

$$E_k = m_0 v^2 / 2. \quad (1.58)$$

Формула (1.58) справедлива при условии $v/c = \beta \ll 1$ (c — скорость света в вакууме).

При скоростях, приближающихся к скорости света в вакууме, кинетическая энергия рассчитывается по формуле

$$E_k = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right). \quad (1.59)$$

Кинетическая энергия тела, вращающегося относительно неподвижной оси:

$$E_{\text{в}} = I\omega^2/2, \quad (1.60)$$

где I — момент инерции, ω — угловая скорость.

Потенциальная энергия тела в поле тяготения Земли

$$E_{\text{п}} = -\gamma Mm/R, \quad (1.61)$$

где γ — гравитационная постоянная (см. (1.48)), M — масса Земли, m — масса тела, а R — расстояние от центра Земли до центра масс тела.

При удалении тела на небольшие расстояния от поверхности Земли поле тяготения можно считать однородным (ускорение свободного падения постоянно). В однородном поле тяготения потенциальная энергия тела

$$E_{\text{п}} = mgh, \quad (1.62)$$

где m — масса тела, g — ускорение свободного падения, h — расстояние между телом и некоторым условным уровнем, на котором значение потенциальной энергии принято равным нулю. Таким условным уровнем может служить, например, поверхность Земли.

Закон сохранения энергии. Энергией называется единая мера различных форм движения материи, в том числе и механического движения. Закон сохранения энергии является фундаментальным законом природы: энергия не создается и не уничтожается; она может переходить из одной формы в другую; возможен обмен энергией между различными видами материи — веществом и полем.

Полной механической энергией системы называется сумма кинетических и потенциальных энергий всех тел, входящих в эту систему.

Изменение механической энергии системы равно алгебраической сумме работ внешних сил и внутренних диссипативных сил:

$$E_2 - E_1 = A + A_{\text{д}}, \quad (1.63)$$

где E_2 — конечное значение энергии системы, E_1 — ее начальная энергия, A — работа внешних сил, $A_{\text{д}}$ — суммарная работа внутренних диссипативных сил.

Закон сохранения механической энергии: в инерциальной системе отсчета полная механическая энергия замкнутой системы тел, между которыми действуют лишь консервативные силы, остается постоянной.

4. СТАТИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Твердым телом в механике называется система материальных точек, расстояния между которыми остаются при движении неизменными.

Статика рассматривает условия равновесия тела или системы тел. Точку приложения силы в твердом теле можно смещать вдоль линии ее действия. Если на твердое тело действует несколько сил, направления которых пересекаются в одной точке, то оно останется в покое тогда, когда векторная сумма этих сил равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i = 0.$$

Твердое тело с неподвижной осью находится в равновесии, если алгебраическая сумма моментов внешних сил относительно этой оси равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n M_i = 0.$$

Центр масс. В любой системе частиц имеется характерная точка, которая определяется радиусом-вектором

$$\mathbf{r}_c = \left(\sum m_i \mathbf{r}_i \right) / m, \quad (1.64)$$

где m_i и \mathbf{r}_i — массы и радиусы-векторы частиц, m — масса всей системы. Эта точка называется *центром масс* (*центром инерции*).

В однородном поле сил тяжести центр масс совпадает с центром тяжести; *центр тяжести* — точка, в которой приложена равнодействующая параллельных сил тяжести, действующих на материальные точки тела (или системы). В однородном поле тяготения сумма моментов сил тяжести всех материальных точек тела относительно центра тяжести равна нулю.

Виды равновесия. Если при достаточно малом отклонении тела от некоторого положения равновесия возникают силы или моменты сил, возвращающие тело в первоначальное положение, то такое состояние называется *устойчивым равновесием*. В состоянии устойчивого равновесия потенциальная энергия тела имеет минимальное значение.

Если же при сколь угодно малом отклонении тела от положения равновесия возникают силы, способствующие увеличению этого отклонения, то такое состояние называется *неустойчивым равновесием*. При отклонении тела из *безразличного положения равновесия* дополнительных сил не возникает, и новое положение также является положением равновесия.

Равновесие тела на наклонной плоскости. На брусок, расположенный на наклонной плоскости, действуют силы тяжести \mathbf{G} , сила реакции опоры \mathbf{N} и сила трения покоя \mathbf{F}_n ; условие равновесия (без учета моментов сил):

$$\mathbf{G} + \mathbf{N} + \mathbf{F}_n = 0.$$

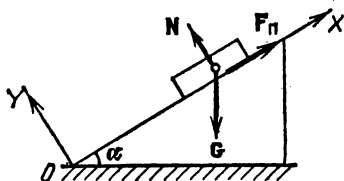
Если ось OX прямоугольной системы координат направлена параллельно наклонной плоскости, ось OY — перпендикулярно, то ус-

ловия равновесия в проекциях на эти оси (рис. 1.13) будут определяться уравнениями:

$$F_{\text{н}} - G \sin \alpha = 0, \quad N - G \cos \alpha = 0;$$

отношение $F_{\text{н}}/N = \text{tg } \alpha$. При условии, что $G \sin \alpha > F_{\text{н}}^r$ ($F_{\text{н}}^r$ — максимальное значение силы трения покоя), равновесие нарушается, брусок будет перемещаться вниз по наклонной плоскости.

Рис. 1.13. Равновесие тела на наклонной плоскости



Рычаг. Рычаг представляет собой стержень, который может вращаться вокруг неподвижной оси (опоры). Рычаг находится в

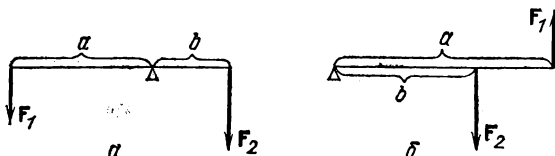


Рис. 1.14. Рычаги: *a* — рычаг с точкой опоры, находящейся между точками приложения действующих на него сил; *b* — рычаг с точкой опоры, расположенной с одной стороны от точек приложения действующих сил

равновесии, если сумма моментов действующих на него сил равна нулю (рис. 1.14):

$$F_1 a - F_2 b = 0,$$

где *a* и *b* — плечи сил F_1 и F_2 .

Условия равенства моментов сил применяются также к равновесию ворота (рис. 1.15, *a*) или лебедки.

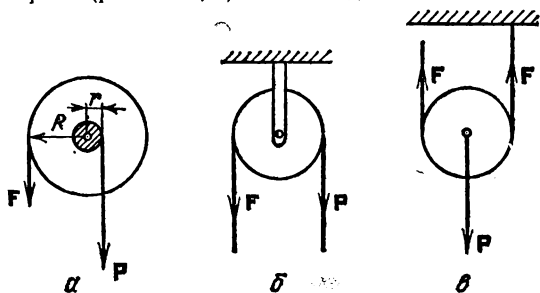


Рис. 1.15. Схема ворота (*a*), неподвижного блока (*b*) и подвижного блока (*c*)

Блок. Блок — простейший механизм в форме диска с желобом по окружности для цепи, каната, троса, нити и т. п. Неподвижный

блок (рис. 1.15, б) служит только для изменения направления перемещения. На подвижном блоке сумма всех действующих сил и сумма всех моментов сил равны нулю (рис. 1.15, в);

$$P - 2F = 0.$$

Отсюда следует, что $P = 2F$, $F = P/2$.

Полиспаст. Полиспаст (рис. 1.16, а) представляет собой систему подвижных и неподвижных блоков, укрепленных в двух держателях. Если полиспаст имеет n подвижных и n неподвижных

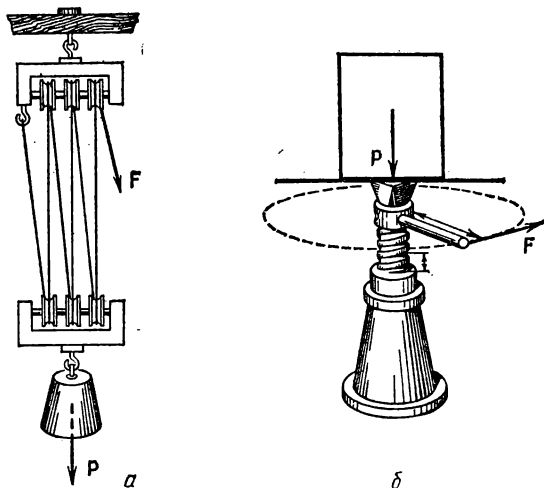


Рис. 1.16. Полиспаст (а) и винтовой домкрат (б)

блоков, то для уравнивания силы P необходимо приложить силу $F = P/(2n)$.

Домкрат винтовой. При отсутствии трения сила P , действующая вдоль оси винта, уравнивается силой F , приложенной к рукоятке (рис. 1.16, б): $F = Ph/(2\pi R)$, где R — расстояние от оси вращения до точки приложения силы, h — шаг винта.

5. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Изменение расстояния между точками тела под воздействием внешних сил называется *деформацией*. Иначе деформацию можно определить как изменение формы, размеров тела или его отдельных частей.

Деформация, исчезающая после прекращения действия внешних сил, называется *упругой*. При упругой деформации в теле возникают *силы упругости*, которые препятствуют изменению его

формы и объема; силы упругости при упругой деформации пропорциональны деформации (*закон Гука*).

Напряжением называется сила упругости, действующая на единичную площадь сечения деформированного тела, т. е. $\sigma = F/S$ (σ — напряжение, F — сила упругости, S — площадь сечения).

Вектор напряжения σ можно разложить на две составляющие: одна из них, имеющая направление вдоль нормали к плоскости сечения, называется нормальным напряжением σ_n ; другая составляющая, параллельная плоскости сечения, называется тангенциальным напряжением τ .

Продольная деформация. Простейшей деформацией является растяжение или сжатие стержня вдоль его оси; изменение длины Δl стержня и возникающие при такой деформации силы упругости F (по модулю равные внешним силам) связаны между собой следующим соотношением:

$$\Delta l = lF/(ES), \quad (1.65)$$

где S и l — площадь поперечного сечения и длина стержня до деформации, l/E — коэффициент пропорциональности; E называется *модулем продольной упругости* или *модулем Юнга*. Отношение $\Delta l/l = \varepsilon$ называется *относительной продольной деформацией* (или *просто продольной деформацией*).

Формула (1.65) выражает *закон Гука для продольной деформации*, который можно записать в следующей форме:

$$\sigma_n = E\varepsilon. \quad (1.65a)$$

Модуль Юнга равен напряжению, увеличивающему длину образца в два раза.

Однако образцы из металлов разрываются раньше, чем будет достигнуто такое удлинение; у полимерных материалов удлинение образцов при растяжении может быть многократным (до 1000%, см. рис. 1.17, б).

На рис. 1.17, а графически изображена экспериментальная зависимость σ_n от ε ; σ_m — предел прочности, т. е. напряжение, при котором на стержне получается местное сужение (шейка), σ_T — предел текучести, т. е. напряжение, при котором появляется *текучесть* (увеличение деформации без увеличения деформирующей силы), σ_y — предел упругости, т. е. напряжение, ниже которого справедлив закон Гука. Модуль упругости пропорционален тангенсу угла наклона на линейном участке диаграммы зависимости σ_n от ε (см. рис. 1.17, а).

Материалы разделяются на хрупкие и пластичные. *Хрупкие вещества* разрушаются при очень малых относительных удлинениях; они обычно выдерживают, не разрушаясь, большее сжатие, чем растяжение. Пластичные материалы типа каучукоподобных

полимеров (см. п. 6 гл. II) имеют значительные относительные деформации (рис. 1.17, б).

Наряду с продольной деформацией стержня происходит изменение его диаметра d (уменьшение — при растяжении, увеличение — при сжатии); отношение $\Delta d/d = \varepsilon_1$ называется *относительной поперечной деформацией*; отношение $\varepsilon_1/\varepsilon = \nu$ называется *коэффициентом Пуассона*; ν изменяется в пределах от 0,1 до 0,5.

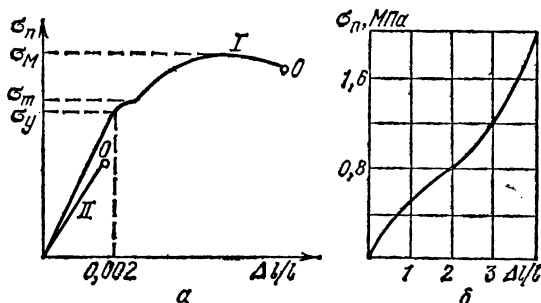


Рис. 1.17. а. Зависимость напряжения от относительной продольной деформации. Кривая I относится к пластичному материалу, кривая II — к хрупкому. В точках O происходит разрушение материала. б. Типичная кривая зависимости продольной деформации $\Delta l/l$ от напряжения σ (для каучукоподобных полимеров, см. гл. II п. 6)

Деформация сдвига. Элементарный объем $ABCDKLMN$, имеющий до деформации форму куба, под действием тангенциальных напряжений изменяется по форме (рис. 1.18). При отсутствии нормальных напряжений тангенциальные напряжения не изменяют длину ребер AD , BC и т. д., но грань $ABCD$ из квадрата преобразуется в ромб AB_1C_1D . Угол при вершине A до деформации был равен 90° , после деформации он равен $90^\circ - \gamma$, а угол при вершине B после деформации становится равным $90^\circ + \gamma$.

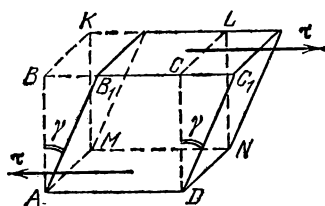


Рис. 1.18. Деформация сдвига

Угол γ является мерой искажения формы; он называется *деформацией сдвига*. Деформация сдвига равна отношению смещения одной грани элемента относительно второй параллельной грани к расстоянию между этими гранями, т. е. $BB_1/AB = \gamma$. Смещение BB_1 называется *абсолютным сдвигом*.

Закон Гука для сдвиговых деформаций записывается в следующем виде:

$$\tau = G\gamma, \quad (1.66)$$

где G — модуль сдвига — величина, равная отношению модуля тангенциального напряжения к деформации сдвига.

Сжимаемость вещества. Всестороннее сжатие тела приводит к уменьшению объема тела на ΔV и к возникновению упругих сил, стремящихся вернуть телу первоначальный объем. *Сжимаемостью* β называется относительное изменение объема тела $\Delta V/V$ при изменении давления Δp на 1 паскаль. Сжимаемость при адиабатическом процессе (см. гл. II) называется *адиабатической*.

Величина, обратная сжимаемости, называется *модулем объемной упругости* K .

Изменение объема тела ΔV при всестороннем сжатии вычисляется по формуле

$$\Delta V = -V\beta \Delta p, \quad (1.67)$$

где V — первоначальный объем тела, Δp — изменение давления.

В изотропной среде модуль Юнга E , коэффициент Пуассона ν , модуль объемной упругости K и модуль сдвига G связаны между собой уравнениями:

$$E = 2G(1 + \nu) = 2K(1 - 2\nu). \quad (1.68)$$

Потенциальная энергия деформированного стержня определяется по формуле

$$E_n = F_y \Delta l / 2, \quad (1.69)$$

где F_y — модуль силы упругости, Δl — удлинение стержня.

6. МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Жидкости и газы, в отличие от твердых тел, не обнаруживают сопротивления изменению их формы при сохранении их объема постоянным. Для изменения объема жидкости или газа необходимо действие внешних сил. Это свойство жидкости называется *упругостью объема*. Давление p — величина, равная отношению силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности.

Статика. При равновесии давление внутри жидкости (газа) не зависит от ориентации площади внутри жидкости, т. е. внешнее давление передается во все стороны равномерно (*закон Паскаля*).

Столб жидкости или газа, находясь в поле тяготения, создает давление, обусловленное весом этого столба:

$$p = \rho gh, \quad (1.70)$$

где ρ — плотность жидкости или газа, g — ускорение свободного падения, h — высота столба. Давление не зависит от формы столба, а определяется только его высотой.

В сообщающихся сосудах высоты столбов жидкостей обратно пропорциональны плотностям жидкостей:

$$h_1/h_2 = \rho_2/\rho_1. \quad (1.71)$$

На тело, погруженное в жидкость или газ, действует со стороны окружающей жидкости выталкивающая сила, направленная вертикально вверх и равная по модулю весу жидкости, вытесненной телом (*закон Архимеда*). Направление выталкивающей силы проходит через центр масс жидкости, вытесненной телом.

Движение идеальной жидкости. При движении жидкости или газа со скоростями значительно меньшими, чем скорость звука в этих средах, можно пренебречь их сжимаемостью. При относительном перемещении слоев жидкостей и газов возникают силы внутреннего трения. Если эти силы невелики, ими пренебрегают и рассматриваемый газ или жидкость называют *идеальными*. В противном случае говорят о *вязкой* жидкости или газе. Течение жидкости или газа называется *ламинарным*, если скорость и давление в каждой точке пространства, где протекает жидкость или газ, не зависят от времени; в противном случае течение называется *турбулентным* (*вихревым*); при турбулентном течении в жидкости образуются *вихри*.

Течение изображается графически линиями, которые проводятся таким образом, чтобы касательные к этим линиям совпадали по направлению с векторами скорости в данных точках в данный момент времени. Такие линии называются *линиями тока*. При ламинарном течении линии тока совпадают с траекториями частиц

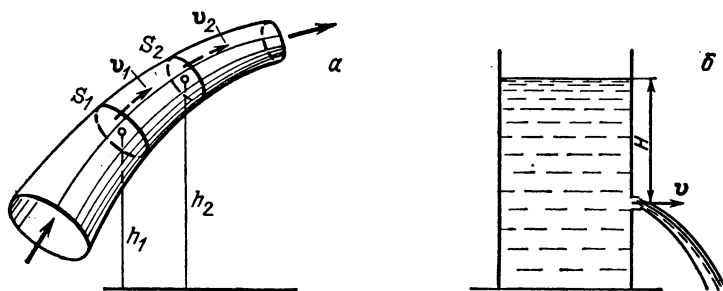


Рис. 1.19. а. Трубка тока. б. Вытекание жидкости из малого отверстия

жидкости (газа). Если провести внутри жидкости замкнутую кривую (контур, например, окружность), а затем через все точки контура провести линии тока, то последние образуют поверхность, которая называется *трубкой тока* (см. рис. 1.19, а). При ламинарном течении форма и расположение линий тока не изменяются во времени.

При ламинарном течении через любое поперечное сечение трубки тока за одинаковые промежутки времени проходят равные объемы жидкости:

$$S_1 v_1 \Delta t = S_2 v_2 \Delta t, \quad (1.72)$$

где S_1, S_2 — площади различных сечений одной и той же трубки тока, v_1, v_2 — модули скорости частиц жидкости в этих сечениях.

Уравнение Бернулли. При изменении сечения трубки тока изменяется не только скорость движущейся жидкости, но и давление, так что в любом сечении трубки тока ламинарного течения идеальной жидкости выполняется условие (рис. 1.19, а)

$$p + \rho gh + \rho v^2/2 = \text{const}, \quad (1.73)$$

где p — давление, ρ — плотность жидкости, v — модуль скорости течения жидкости в данном сечении трубки тока, которое расположено на высоте h от условно выбранного уровня.

Уравнение (1.73) называется *уравнением Бернулли*. Из этого уравнения следует *формула Торричелли*:

$$v^2 = 2gH, \quad (1.74)$$

где v — модуль скорости жидкости при вытекании из малого отверстия в сосуде, H — высота столба жидкости над отверстием (рис. 1.19, б).

Движение вязкой жидкости. При ламинарном течении реальной жидкости (или газа) слои смещаются относительно друг друга, при этом возникают силы внутреннего трения, тормозящие движения слоев, движущихся с большей скоростью, и ускоряющие слои с меньшей скоростью.

Модуль силы внутреннего трения (*закон Ньютона*):

$$F_{\text{тр}} = -\eta S \Delta v / \Delta l, \quad (1.75)$$

где Δv — разность скоростей движущихся слоев, Δl — расстояние между этими слоями по направлению, перпендикулярному скорости; η — *динамическая вязкость* — сила внутреннего трения, которая возникает между двумя соприкасающимися слоями площадью 1 м^2 при разности скоростей слоев 1 м/с , причем эти слои находятся на расстоянии 1 м по нормали к направлению скорости. Величина

$$\lim_{\Delta l \rightarrow 0} (\Delta v / \Delta l) = dv/dl$$

является модулем вектора — *градиента скорости*.

Вязкость жидкости и газа в значительной степени зависит от температуры.

Движение твердого тела в вязкой жидкости. При движении в жидкости твердого тела (например, шара) ближайшие слои жидкости прилипают к его поверхности и движутся вместе с ним; остальные слои перемещаются друг относительно друга.

Сила, действующая на движущееся твердое тело в жидкости и направленная в сторону, противоположную движению тела, называется *гидродинамической силой* (или *лобовым сопротивлением*). Лобовое сопротивление имеет две составляющие — силу трения и силу давления. Сила трения обусловлена вязкостью жидкости, сила давления — разностью давлений на передних и задних поверхностях движущегося тела. Сила трения пропорциональна скорости, сила давления пропорциональна квадрату скорости.

Если при движении тела в вязкой среде образуются вихри, то на него действует, кроме лобового сопротивления, *подъемная сила*, которая направлена перпендикулярно к вектору скорости.

При движении шара радиуса R со скоростью v модуль силы трения

$$F_{\text{ш}} = 6\pi\eta Rv, \quad (1.76)$$

где η — динамическая вязкость.

Соотношение (1.76) называется *формулой Стокса*.

Скорость равномерного (установившегося) падения шарика малых размеров в вязкой жидкости определяется по формуле

$$v = 2g(\rho - \rho_{\text{ж}})R^2/(9\eta), \quad (1.77)$$

где ρ — плотность материала шарика, R — его радиус, $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости, η — ее динамическая вязкость, g — ускорение свободного падения.

При разности давлений $p_1 - p_2$ на концах капиллярной трубки, которая имеет радиус r и длину l , протекающий за время одна секунда объем жидкости

$$V = \pi r^4 (p_1 - p_2)/(8l\eta). \quad (1.78)$$

7. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ. ЗВУК

Гармонические колебания. Ограниченные движения, повторяющиеся по времени полностью или частично в окрестности некоторого среднего положения (например, около положения равновесия), называются *колебаниями*.

Колебания называются *механическими*, если они характеризуются изменением только механических величин (смещения, скорости, ускорения и т. п.).

Периодическими называются такие колебания, в которых каждое значение изменяющейся величины повторяется неограниченное число раз через одинаковые промежутки времени. Наименьшее время, за которое повторяется каждое значение изменяющейся величины, называется *периодом* колебания T . Величина $f = 1/T$ называется *частотой* периодических колебаний.

Гармоническим колебанием называется периодическое изменение величины, которое выражается синусоидальным (или косинусоидальным) законом:

$$x = A_0 \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.79)$$

где A_0 — амплитуда колебаний — величина, равная наибольшему (по модулю) значению изменяющейся величины; $(\omega t + \varphi)$ — фаза гармонического колебания, φ — начальная фаза, ω — угловая частота:

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f. \quad (1.80)$$

Фаза гармонического колебания определяет значение изменяющейся величины (наряду с амплитудой) в данный момент времени. Фаза измеряется в угловых единицах (радианах или градусах).

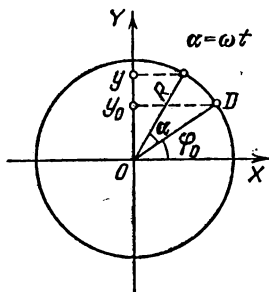


Рис. 1.20. Гармонические колебания проекции радиуса-вектора точки, которая движется по окружности с постоянной угловой скоростью

Примером гармонического колебания (рис. 1.20) может служить изменение проекции на ось OY радиуса-вектора точки D , которая движется по окружности радиуса R с постоянной угловой скоростью ω ; в этом случае $y = R \sin(\omega t + \varphi_0)$; в момент времени $t=0$ фаза равна φ_0 , $y = y_0 = R \sin \varphi_0$.

Гармонические колебания тела возбуждаются при воздействии на него квазиупругой силы. *Квазиупругими* называются такие силы, которые по своей природе не являются упругими, но их модуль пропорционален смещению тела от положения равновесия; эти силы всегда направлены к положению равновесия. Квазиупругая сила

$$\mathbf{F} = -k\mathbf{u}, \quad (1.81)$$

где k — коэффициент пропорциональности, который называется *коэффициентом квазиупругой силы*, \mathbf{u} — смещение; знак минус указывает на то, что векторы силы и смещения имеют противоположные направления.

Маятники. *Физическим маятником* называется тело, совершающее колебания вокруг горизонтальной оси под действием силы тяжести. Маятник называется *точечным* (или *математическим*),

если можно считать, что его масса сосредоточена в одной точке. Примером математического маятника может служить тело, подвешенное на тонкой нити, причем трение о воздух и в точке подвеса очень мало, а размеры тела малы по сравнению с длиной нити. Колебания математического маятника при малых углах отклонения можно считать гармоническими.

Период колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{l/g}, \quad (1.82)$$

где l — длина маятника, g — ускорение свободного падения.

Колебания тела, подвешенного на пружине, можно считать гармоническими, если при деформации (сжатии и растяжении) пружины выполняется закон Гука, а силы трения достаточно малы; *период колебаний маятника с упругой связью*

$$T = 2\pi\sqrt{m/k} \quad (1.83)$$

при условии, что $M \ll m$, где M — масса пружины, m — масса тела, k — жесткость пружины — скалярная величина, равная модулю силы, необходимой для растяжения пружины на длину 1 метр. Формула (1.83) относится не только к колебаниям груза на пружине, но и вообще ко всем случаям, при которых справедливо соотношение (1.81).

Крутильный маятник представляет собой тело, совершающее вращательно-колебательное движение под действием пружины (например, балансиры в часах). Когда амплитуда смещения и силы трения достаточно малы, эти колебания можно считать гармоническими; в этом случае *период колебаний крутильного маятника*

$$T = 2\pi\sqrt{I/D}, \quad (1.84)$$

где I — момент инерции тела относительно оси вращения, D — *крутильная жесткость* — скалярная величина, равная модулю момента сил, который необходим для поворота тела на угол 1 радиан.

Период колебаний физического маятника

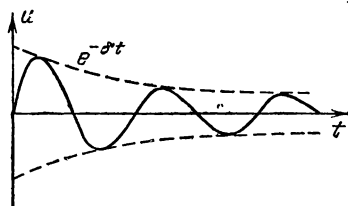
$$T = 2\pi\sqrt{I/(mga)}, \quad (1.85)$$

где I — момент инерции тела относительно оси, проходящей через точку подвеса, a — расстояние от центра тяжести до этой оси, m — масса тела, g — ускорение свободного падения. Величина $I_0 = I/(ma)$ называется *приведенной длиной* физического маятника.

Свободные и вынужденные колебания. Механические колебания, которые происходят под действием сил, возникающих в самой колебательной системе, называются *свободными (собственными) колебаниями*. Если свободные колебания тела обусловлены только квазиупругой силой, то они будут гармоническими.

Колебания тела, обусловленные одновременным действием квазиупругой силы и силы трения, которая пропорциональна скорости колебаний частиц \dot{u} (т. е. $F_{тр} = -r\dot{u}$), называются *затухающими*

Рис. 1.21. Затухающие колебания ($\varphi \neq 0$)

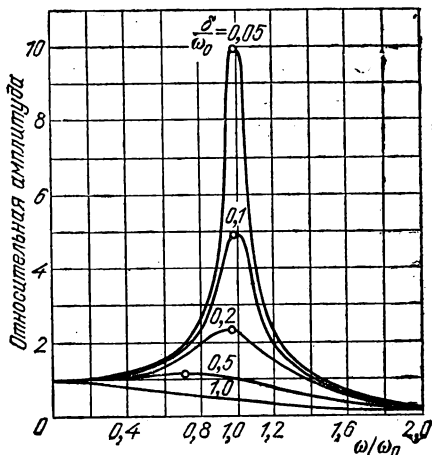


ющими; минус означает, что векторы скорости и силы трения направлены противоположно; $\dot{u} = du/dt$. При затухающих колебаниях смещение

$$u = u_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi). \tag{1.86}$$

Положительная величина u_0 называется *начальной амплитудой*, δ — *коэффициентом затухания*; $u_0 e^{-\delta t}$ — значение амплитуды в момент времени t , ω — угловая частота, e — основание натураль-

Рис. 1.22. Резонансные кривые при различных затуханиях. По оси OY отложены относительные амплитуды смещения Ak/F_0 , где A — амплитуда смещения, F_0/k — статическое смещение, равное тому смещению, которое вызвала бы постоянная сила, равная амплитуде действующей силы. По оси OX отложены отношения частот ω/ω_0 , где $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ — частота свободных колебаний при отсутствии трения. Кривые относятся к различным значениям δ/ω_0 . Кружочки указывают максимальные значения амплитуды смещения



ных логарифмов; $\delta = r/(2m)$, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$; r — коэффициент сопротивления, равный отношению модуля силы трения к модулю скорости колебаний частиц, m — масса тела, k — коэффициент квазиупругой силы, $\omega_0^2 = k/m$. График затухающих колебаний показан на рис. 1.21.

Колебания, которые совершает тело под действием периодической внешней силы, называются *вынужденными*. Амплитуда

вынужденных колебаний резко возрастает, если период гармонической внешней силы приближается к периоду свободных колебаний тела (см. рис. 1.22). Это явление называется *резонансом*. Если силы трения велики (т. е. имеется большое затухание), то резонанс выражен слабо или совсем отсутствует (например, при $\delta/\omega_0 > 1$).

Колебательные системы, в которых потери энергии за период колебаний пополняются за счет внутреннего источника энергии, называются *автоколебательными*, а самоподдерживающиеся колебания в таких системах называются *автоколебаниями* (например, колебания балансира в часах или маятника настенных часов).

Сложение гармонических колебаний. Уравнение двух гармонических колебаний, имеющих одинаковые частоты и направления смещений, можно записать в следующем виде:

$$u_1 = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1),$$

$$u_2 = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2),$$

где u_1 и u_2 — смещения, A_1 , A_2 — амплитуды. Амплитуда результирующего смещения A находится из векторной диаграммы, как

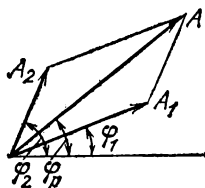


Рис. 1.23. Сложение амплитуд смещений двух гармонических колебаний с одинаковыми направлениями

показано на рис. 1.23; результирующее смещение $u = u_1 + u_2 = A \sin(\omega t + \varphi_p)$, где

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}, \quad (1.87)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_p = (A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2) / (A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2). \quad (1.88)$$

Два взаимно перпендикулярных гармонических колебания одинаковой частоты со смещениями вдоль осей OX и OY определяются уравнениями:

$$u_x = A_1 \sin(\omega_1 t), \quad u_y = A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi). \quad (1.89)$$

При сложении двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаний, определяемых уравнениями (1.89), траектории результирующего движения в плоскости XU определяются кривыми, которые называются *фигурами Лиссажу*. При равенстве частот ω_1 и ω_2 фигуры Лиссажу являются эллипсами, которые при разности начальных фаз $\varphi = m\pi$ ($m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) вырождаются в отрезки прямых. Если отношение частот равно рациональному числу, то фигуры Лиссажу со временем не изменяются; форма их зависит от отношения частот и разности начальных фаз (см. рис. 1.24).

Волны. Распространяющиеся в пространстве с течением времени изменения физической величины называются *волнами*. Например, при ударе по одному концу стержня образуется сжатие, которое распространяется с определенной скоростью вдоль стержня.

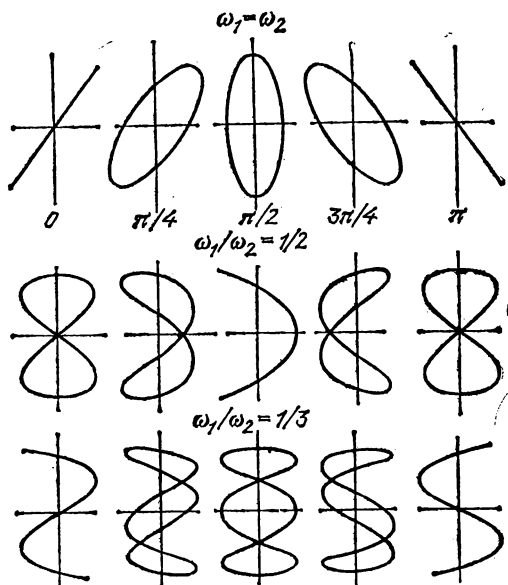


Рис. 1.24. Фигуры Лиссажу при разностях начальных фаз $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi$ и отношениях $\omega_1/\omega_2=1, 1/2, 1/3$; ω_1 — частота колебаний со смещением вдоль оси OX , ω_2 — частота колебаний со смещением вдоль оси OY

Если $L < \lambda$ (L — характерные размеры системы, λ — длина волны, см. ниже), то ограниченные повторяющиеся изменения в системе являются колебаниями; если $L > \lambda$, то такие изменения являются волнами.

Скорость распространения возмущения в среде называется *скоростью волны*. Скорость механических волн зависит от свойств среды, а в некоторых случаях и от частоты. Зависимость скорости волны от частоты называется *дисперсией скорости*.

При распространении механических волн каждая частица среды совершает колебательное движение около своего положения равновесия со скоростью, которая называется *скоростью колебания частицы*. Если при распространении волн величины, характеризующие состояние среды (например, плотность, смещение частиц, давление и т. п.), изменяются в любой точке пространства по синусоидальному закону, то такие волны называются *синусоидаль-*

ными (или гармоническими). Важной характеристикой синусоидальных волн является длина волны.

Расстояние, которое проходит волна за период, называется *длиной волны*:

$$\lambda = vT = v/f, \quad (1.90)$$

где v — скорость волны, f — частота.

Выражение вида

$$\xi = A \sin \omega(t - r/v) = A \sin(\omega t - kr) \quad (1.91)$$

называется *уравнением плоских гармонических волн*. В уравнении (1.91) ξ — любая величина, характеризующая состояние среды, (например, давление, температура и т. д.), A — амплитуда волны, ω — угловая частота, r — расстояние от источника, возбуждающего волну, до точки пространства, в которой рассматривается изменение той или иной величины, v — скорость волны, $k = 2\pi/\lambda$ — *волновое число*; $(\omega t - kr)$ называется *фазой волны*.

Поверхность, проведенная через точки, в которых совершаются колебания в одинаковых фазах, называется *волновой поверхностью*.

По форме волновых поверхностей различают *плоские* (плоские волновые поверхности), *цилиндрические* (цилиндрические волновые поверхности) и *сферические* (сферические волновые поверхности) волны. Уравнения цилиндрических и сферических волн:

$$\xi_{ц} = \frac{A}{\sqrt{r}} \sin(\omega t - kr), \quad (1.92)$$

$$\xi_{с} = \frac{A}{r} \sin(\omega t - kr), \quad (1.93)$$

где A — амплитуда волны на расстоянии 1 м от источника.

Если смещение частиц среды происходит параллельно направлению распространения волны, то такая волна называется *продольной*; если смещение частиц происходит в плоскости, перпендикулярной направлению распространения, то такая волна называется

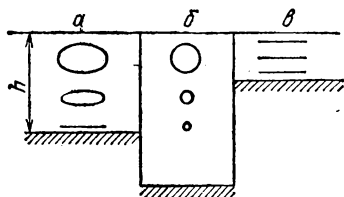


Рис. 1.25. Траектории частиц воды при распространении поверхностных волн: а — в неглубокой воде; б — в глубокой воде (отношение $2\pi h/\lambda \gg 1$); в — в мелкой воде (отношение $2\pi h/\lambda \ll 1$)

поперечной. Механические волны в газообразных средах являются продольными; в твердых телах возможны и продольные, и поперечные волны.

При распространении волн на поверхности жидкости, находящейся в поле тяготения, частицы движутся по сложным траекториям. Траектории частиц вблизи поверхности воды при распространении поверхностных волн показаны на рис. 1.25.

Интенсивностью волны называется средняя энергия, переносимая волной за время одна секунда через волновую поверхность площадью 1 м^2 . Интенсивность звуковых волн иногда называется *силой звука*.

Если при распространении волн смещения частиц происходят по гармоническому закону, то скорости колебания и ускорения частиц изменяются также по гармоническому закону (рис. 1.26). Амплитуда скорости колебания частиц

$$\dot{u}_0 = \omega u_0, \quad (1.94)$$

амплитуда ускорения

$$\ddot{u}_0 = a_0 = \omega^2 u_0, \quad (1.95)$$

интенсивность

$$I = \rho v \dot{u}_0^2 / 2, \quad (1.96)$$

где ρ — плотность среды, u_0 — амплитуда смещения, ω — угловая частота, v — скорость волн.

Звук. *Звуком* называются механические волны, частоты которых лежат в пределах от 17—20 до 20 000 Гц. Механические волны таких частот производят ощущение звука. Механические волны с частотами ниже 17 Гц называют *инфразвуками*, а свыше 20 000 Гц — *ультразвуками*.

Потоком звуковой энергии называется энергия, которая переносится звуковыми волнами через волновую поверхность за время одна секунда.

При восприятии звука ухом различают громкость, высоту тона и тембр. *Громкость звука* определяется амплитудой смещений, *высота тона* — частотой, *тембр* — частотами и амплитудами обертонов (колебаний с более высокими частотами).

Интенсивности звука при слуховом восприятии соответствует ощущение громкости звука. При определенной минимальной интенсивности человеческое ухо не воспринимает звука. Эта минимальная интенсивность называется *порогом слышимости*. Порог слышимости имеет различные значения для звука различных

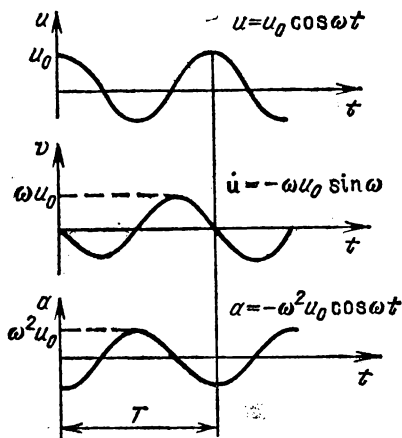


Рис. 1.26. Смещение, скорость колебаний и ускорение частиц среды в гармонической волне

частот. При больших интенсивностях ухо испытывает болевое ощущение. Наименьшая интенсивность при болевом восприятии звука называется *порогом болевого ощущения*.

Уровень интенсивности звука определяется в *децибелах* (дБ). Количество децибел равно десятичному логарифму отношения интенсивностей, умноженному на 10, т. е. $10 \lg (I/I_0)$. Обычно в акустике за I_0 принимается интенсивность 1 пДж/(м²·с), приблизительно равная интенсивности на пороге слышимости при 1000 Гц.

Разность между давлением в среде при распространении звуковых волн и давлением при отсутствии волн называется *звуковым давлением*. Амплитуда звукового давления

$$\Delta p_0 = \rho v \dot{u}_0, \quad (1.97)$$

где \dot{u}_0 — амплитуда скорости колебаний частиц, v — скорость волн.

Поглощение звука. Часть энергии, которая переносится звуковыми волнами, поглощается средой. Величина, равная отношению поглощенной звуковой энергии к звуковой энергии, поступающей в среду, называется *коэффициентом поглощения*.

Амплитуда звукового давления плоских звуковых волн уменьшается вследствие поглощения звуковой энергии средой по закону

$$\Delta p_d = \Delta p_0 e^{-\alpha d}, \quad (1.98)$$

где Δp_0 — амплитуда звукового давления входящих в среду волн, Δp_d — их амплитуда после прохождения расстояния d ; α — *показатель поглощения* — величина, равная $1/d_e$, где d_e — расстояние, на котором амплитуда звукового давления уменьшается в e раз.

Отражение звука. При падении звуковых волн на поверхность, разделяющую две среды, одна часть падающего потока звуковой энергии отражается обратно в первую среду, другая часть проходит во вторую среду.

Величина, равная отношению отраженного потока звуковой энергии к падающему потоку звуковой энергии, называется *коэффициентом отражения*. Величина, равная отношению прошедшего потока звуковой энергии к падающему потоку звуковой энергии, называется *коэффициентом пропускания*.

Для звуковых волн выполняются законы отражения и преломления, аналогичные законам отражения и преломления света (см. гл. IV).

Стоячие волны. При сложении двух монохроматических волн, распространяющихся в противоположных направлениях, образуются *стоячие волны*.

Уравнения плоских волн, одна из которых распространяется вдоль положительного направления оси Ox , а другая распростра-

няется навстречу первой, можно записать в следующей форме:

$$u_1 = A \cos(\omega t - kx + \varphi_1), \quad u_2 = A \cos(\omega t + kx + \varphi_2). \quad (1.99)$$

Волна смещений u_1 называется *бегущей волной*, волна u_2 — отраженной; амплитуды A обеих волн предполагаются одинаковыми. Уравнения (1.99) можно упростить путем смещения начала координат и начала отсчета времени таким образом, чтобы начальные фазы φ_1 и φ_2 были равны нулю; в этом случае результирующая волна смещения

$$u = u_1 + u_2 = 2A \cos(kx) \cos(\omega t). \quad (1.100)$$

Соотношение (1.100) называется *уравнением плоской стоячей волны*. Амплитуда плоской стоячей волны

$$A_c = 2A \cos(kx). \quad (1.101)$$

Точки, в которых амплитуды смещения имеют максимальные значения, называются *пучностями смещения*; пучности расположены на плоскостях, координаты которых удовлетворяют условиям

$$x = m\lambda/2 \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

Точки, где амплитуды смещений равны нулю, называются *узлами смещения*; узлы расположены на плоскостях, определяемых условием

$$x = (m + 1/2) \lambda/2 \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

Пучности и узлы смещены относительно друг друга на четверть длины волны. В отличие от бегущей волны, в стоячей плоской волне амплитуды смещения изменяются в пределах от 0 до $2A$; фазы колебаний в точках между двумя ближайшими узлами одинаковы, а при переходе через узел фаза изменяется скачкообразно на π ; в стоячей волне отсутствует перенос энергии, т. е. средний поток энергии в любом сечении равен нулю.

Если отраженная волна имеет амплитуду A_2 , бегущая — A_1 , причем $A_2 < A_1$, тогда в точках, где при условии $A_1 = A_2$ были узлы, амплитуда будет равна разности $A_1 - A_2$, а в тех точках, где были пучности, амплитуда будет равна сумме $A_1 + A_2$.

ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Таблица 1. Скорости в технических устройствах и транспортных средств

Виды движения	Скорость, м/с
Выход волокна из фильеры	до 80
Движение болванки в прокатном стане	3-7
Движение стрелок наручных часов по краю циферблата	$3 \cdot 10^{-6}$ - $2,5 \cdot 10^{-7}$
Метеорологическая ракета	1700
Микрочастица в ускорителях	до $0,999 c^*$)
Перемещение проходческого щита	$\sim 1,5 \cdot 10^{-4}$
Пассажирские лифты	1-7
Пламя по бикфордову шнуру	$\sim 0,01$
Поршень автомобильного двигателя	~ 20
Снаряд при вылете из орудия	до 1000
Транспортные средства:	
автомобиль	до 284
аппарат «Вега» (вблизи кометы Галлея)	$8 \cdot 10^4$
велосипед	до 14
вертолет	до 102
мотоцикл	до 140
поезд	до 105
подводная лодка	до 20
самолет	до 980
Упорядоченное движение электронов в проводниках	$\sim 10^{-4}$

Примечание. *) c - скорость света в вакууме.

Таблица 2. Скорости процессов, происходящих в природе

Вид движения	Скорость, м/с
Ветер	до 70 (в урагане)
Выброс твердых пород при извержении вулкана	до 400
Движение лавин	до 30
Движение нефти в глубине земли	до $6 \cdot 10^{-3}$
Движение облаков	до 20
Морские течения	до 3
Падение капель дождя	до 8
Падение снега	0,2
Перемещение материков	$1,5 \cdot 10^{-9}$
Перемещение метеоритов в верхних слоях атмосферы	$1-7 \cdot 10^4$
Распространение приливных волн	до 5
Рост гор	$6 \cdot 10^{-10}$
Течение воды в реке	до 7

Таблица 3. Ускорения

Вид движения	Ускорение, м/с ²
Аварийное торможение автомобиля	4—6
Автомобиль «Жигули»	1,5
Бегун на коротких дистанциях	1,5
Велосипедист	1,7
Гоночный автомобиль	8—9
Запуск и торможение космического корабля	4—6g
Конькобежец	1,9
Маневр реактивного самолета	до 10g
Микрочастицы в ускорителе	$2 \cdot 10^{14}$ — $5 \cdot 10^{18}$
Мотоцикл	3—6
Пассажирский лифт	0,9—1,6
Поезд метро	1
Поршень двигателя внутреннего сгорания	$3 \cdot 10^3$
Пуля в стволе винтовки	$2,5 \cdot 10^3$
Разгон поезда	0,2—0,4
Свая после удара копром	300
Снаряд в канале ствола	$4,5 \cdot 10^3$
Торможение при открытии парашюта	3g
Торможение поезда	0,5

Примечание. $g=9,81$ м/с².

Таблица 4. Кинематические параметры и спутники планет
(период обращения вокруг Солнца T_C , период
обращения вокруг оси T_0 , орбитальная скорость v_0 ,
скорость освобождения v , число спутников N)

Планета	T_C , г	T_0	v_0 , км/с	v , км/с	N
Меркурий	0,241	59 сут.	48,8	4,3	—
Венера	0,615	243 сут.	35,0	10,3	—
Земля	1,00004	23 ч. 56 мин. 4 с	29,8	11,16	1
Марс	1,881	24 ч. 37 мин. 22 с	24,2	5,0	2
Юпитер	11,86	9 ч. 51 мин.	13,06	57,6	14
Сатурн	29,46	10 ч. 14 мин.	9,65	37	10
Уран	84,01	10 ч. 49 мин.	6,78	22	5
Нептун	164,8	15 ч. 40 мин.	5,42	25	2
Плутон	250,6	6,4 сут.	4,75	10	?
Луна (Спутник Земли)		24 сут. 7 ч. 43 мин. 11 с	1,02	2,37	—

Таблица 5. Первая и вторая космические скорости на различных высотах (H)

H , 10^3 км	v_1 , км/с	v_2 , км/с	H , 10^3 км	v_1 , км/с	v_2 , км/с
0	7,9	11,18	10	4,93	6,98
0,5	7,62	10,77	20	3,89	5,50
1	7,35	10,40	30	3,31	4,68
2	6,90	9,76	40	2,94	4,15
5	5,92	8,37	50	2,66	3,76

Таблица 6. Период обращения (T) спутника Земли на разных высотах (H) *

H , км	T , ч	H , км	T , ч
0	1,41	1690	2,00
250	1,49	2000	2,12
500	1,58	5000	3,36
750	1,68	10000	5,78
1000	1,75	35800 **)	23,935
1500	1,93		

*) Указаны средние высоты обращения.

**) Высота, на которой орбитальная угловая скорость спутника равна угловой скорости точек поверхности Земли, так что спутник кажется неподвижно висящим в небе.

Таблица 7. Плотность жидкостей (при 20 °С)

Жидкость	ρ , 10^3 кг/м ³	Жидкость	ρ , 10^3 кг/м ³
Азотная кислота	1,51	Масло вазелиновое	0,8
Ацетон	0,791	Масло минеральное (смазочное)	0,90–0,93
Бензин	0,68–0,72	Масло подсолнечное	0,92–0,93
Бензол	0,879	Нитроглицерин	1,6
Молоко	1,028–1,032	Ртуть	13,55
Морская вода	1,01–1,03	Серная кислота (концентрированная)	1,83
Нефть	0,76–0,85	Соляная кислота (38%)	1,19
Бром	3,12	Хлороформ	1,489
Вода	0,99823	Толуол	0,866
Вода тяжелая (D ₂ O)	1,1086	Уксусная кислота	1,049
Гексан	0,660	Этиловый спирт	0,79
Гептан	0,684		
Глицерин	1,26		

Примечание. О свойствах тяжелой воды см. табл. 54.

Таблица 8. Плотность твердых веществ (при 20 °С)

Вещество	$\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$	Вещество	$\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$
<i>Металлы, сплавы, полупроводники</i>		Кварц	2,65
Алюминий	2,7	Корунд	4,00
Бронза	8,7—8,9	Слюда	2,6—3,2
Ванадий	6,02	<i>Горные породы</i>	
Висмут	9,8	Базальт	2,8—3,2
Вольфрам	19,34	Бокситы	2,9—3,5
Германий	5,3	Граниты	2,5—3,0
Дюралюминий	2,79	Каменный уголь (сухой)	1,2—1,5
Железо	7,8—7,9	Мел (воздушно-сухой)	2,0
Золото	19,31	Мрамор	2,5—2,8
Кобальт	8,8	<i>Различные материалы</i>	
Константан	8,88	Кость	1,8—2,0
Кремний	2,3	Лед (при 0 °С)	0,917
Латунь	8,4—8,7	Стекло	2,2—2,5
Магний	1,76	Стекло пирексо	2,23—2,25
Медь	8,93	Фарфор	2,2—2,4
Молибден	10,2	Эбонит	1,2
Натрий	0,975	Янтарь	1,1
Никелин	8,77	<i>Дерево (сухое)</i>	
Никель	8,9	Бальса (пробковое дерево)	0,12
Ниобий	8,57	Бамбук	0,4
Олово	7,29	Береза	0,7
Платина	21,46	Дуб, бук	0,7—0,9
Плутоний	19,25	Железное дерево (бакаут)	1,1—1,4
Свинец	11,34	Кедр	0,5—0,6
Серебро	10,5	Орех	0,6—0,7
Сталь	7,7—7,9	Сосна, ель	0,4—0,5
Титан	4,5	Черное дерево	1,1—1,3
Торий	11,71	Ясень, красное дерево	0,6—0,8
Уран	19,1	<i>Полимеры</i>	
Хром	7,15	Винипласт	1,38—1,4
Цинк	7,15	Плексиглас	1,18
Цирконий	6,5	Поливиниловый пласти.	1,34—1,4
Чугун	7,0	кат	
<i>Минералы</i>		Полистирол	1,06
Алмаз	3,51	Резина (каучук)	~1,2
Апатит	3,16—3,22	Текстолит	1,3—1,4
Асбест	2,35—2,6	Фторопласты	2,1—2,4
Графит	2,21—2,25		
Кальцит	2,6—2,8		

Примечание. О полимерах см. гл. II, п. 6.

Таблица 9. Плотность металлов в жидком состоянии

Металл	Температура, °C	ρ , 10^3 кг/м ³	Металл	Температура, °C	ρ , 10^3 кг/м ³
Алюминий	660	2,380	Натрий	100	0,928
	900	2,315		400	0,854
	1100	2,261		700	0,780
Висмут	300	10,03	Олово	409	6,834
	600	9,66		574	6,729
	962	9,20		704	6,640
Железо	1530	7,23	Свинец	400	10,51
Золото	1100	17,24		600	10,27
	1200	17,12	1000	9,81	
	1300	17,00	Серебро	960,5	9,30
Калий	64	0,82		1092	9,20
				1300	9,00

Таблица 10. Плотность воды и ртути при различных температурах (при нормальном давлении)

t , °C	ρ , 10^3 кг/м ³	t , °C	ρ , 10^3 кг/м ³	t , °C	ρ , 10^3 кг/м ³
<i>Плотность воды</i>					
-10	0,99815	8	0,99988	90	0,96534
-5	0,99930	9	0,99981	100	0,95838
0	0,99987	10	0,99973	150	0,9173
1	0,99993	20	0,99823	200	0,8690
2	0,99997	30	0,99567	250	0,794
3	0,99999	40	0,99224	300	0,710
4	1,00000	50	0,98807	350	0,574
5	0,99999	60	0,98824	374,15*)	0,307
6	0,99997	70	0,97781		
7	0,99993	80	0,97183		
<i>Плотность ртути</i>					
0	13,5951	35	13,5090	70	13,4237
5	13,5827	40	13,4967	75	13,4116
10	13,5704	45	13,4845	80	13,3995
15	13,5580	50	13,4723	90	13,3753
20	13,5457	55	13,4601	100	13,3514
25	13,5335	60	13,4480	300	12,875
30	13,5212	65	13,4358		

*) Критическая температура (см. гл. II).

Таблица 11. Плотность газов (при 0°C и нормальном давлении)

Газ	ρ , кг/м ³	Газ	ρ , кг/м ³
Азот	1,251	Озон	2,139
Аммиак	0,771	Окись углерода	1,25
Аргон	1,783	Углекислый газ	1,977
Ацетилен	1,173	Хлор	3,22
Водород	0,08988	Насыщенные пары при 0°C	
Воздух	1,293	Бензол	0,012
Гелий	0,1785	Водяной пар	0,005
Кислород	1,429	Этиловый спирт	0,033
Криптон	3,74	Этиловый эфир	0,683
Неон	0,900		

Примечание. Плотность межзвездного газа — $1,2 \cdot 10^{-21}$ кг/м³.

Таблица 12. Объемная масса строительных материалов

Материал	Объемная масса, кг/м ³
Асбестовая бумага	850—900
Асбестовый войлок	600
Бетон с каменным щебнем	2000
Асфальт	2120
Бетон сухой	1600
Вата хлопчатобумажная	~80
Глина, 15 — 20% вес. влажн.	1600—2000
Гравий воздушно-сухой	1840
Железобетон	~2200
Известь (в порошке)	500
Кирпич (плотно уложенный): красный	1600—1700
силикатный	1700—1900
Песок (сухой)	1200—1600
Песчаник	2600
Цемент (в порошке)	1400
Шлакобетон	1500
Шлак доменный	600—800
Шлак котельный	900—1300
Штукатурка известковая	1100

Таблица 13. Объемная масса сельскохозяйственных продуктов (кг/м³)

Продукт	Объемная масса, кг/м ³	Продукт	Объемная масса, кг/м ³
Горох	700	Огурцы	580
Картофель	670	Рис	500—550
Кукуруза (зерно)	750	Рожь	650—790
Морковь, свекла	650	Сено	50—100
Мука	400—500	Солома	40—100
		Ячмень	550—750

Таблица 14. Моменты инерции однородных тел

Тело	Относительно ося	I
Тонкий стержень длины l	перпендикулярной стержню и проходящей через его середину	$ml^2/12$
Круглый диск или цилиндр радиуса r	перпендикулярной плоскости диска и проходящей через его центр	$mr^2/2$
Шар радиуса r	совпадающей с диаметром	$0,4mr^2$
Тонкая труба или кольцо радиуса r	совпадающей с осью трубы или кольца	mr^2
Круглый цилиндр длины l и радиуса r	перпендикулярной оси цилиндра и проходящей через его середину	$m \left(\frac{l^2}{12} + \frac{r^2}{4} \right)$
Прямоугольный параллелепипед размерами $2a$, $2b$, $2c$	проходящей через центр и параллельной ребру длины $2a$	$\frac{m}{3} (b^2 + c^2)$

Примечание. В таблице даны моменты инерции тел относительно осей, проходящих через их центры тяжести.

Таблица 15. Коэффициенты трения скольжения

Соприкасающиеся поверхности	f
Бронза по бронзе	0,2
Бронза по стали	0,18
Дерево сухое по сухому дереву	0,25—0,5
Дуб по дубу вдоль волокон	0,48
Деревянные полозья по снегу и льду	0,03—0,04
То же, но полозья обиты железом	0,02
Канат пеньковый мокрый по дубу	0,33
Канат пеньковый сухой по дубу	0,53
Кожаный ремень по дубу	0,27—0,38
Кожаный ремень сухой по металлу	0,56
Колесо со стальным бандажом по стальному рельсу	0,16
Медь по чугуну	0,27
Металл влажный по дубу	0,24—0,26
Металл сухой по дубу	0,5—0,6
Подшипник скольжения при смазке	0,02—0,08
Резина (шины) по твердому грунту	0,4—0,6
Резина по чугуну	0,8
Сталь (или чугун) по феродо *) и райбесту *)	0,25—0,45
Сталь по льду (коньки)	0,02—0,03
Сталь по стали	0,18
Сталь по чугуну	0,16
Твердое тело по льду	0,02—0,03
Фторопласт по стали	0,06—0,08
Фторопласт по фторопласту	0,05—0,09
Чугун по бронзе	0,2
Чугун по чугуну	0,15

Примечания. 1. Звездочкой отмечены материалы, применяемые в тормозных и frictionных устройствах.

2. При низких температурах (около -140°C) коэффициент трения при скольжении твердых тел по льду увеличивается в 5—6 раз.

Таблица 16. Ускорение свободного падения на разных широтах (на уровне моря)

Широта, угловые градусы	$g, \text{ м/с}^2$	Широта, угловые градусы	$g, \text{ м/с}^2$
0	9,78030	55,45 (Москва)	9,81523
10	9,78186	59,57 (Ленинград)	9,81908
20	9,78634	60	9,81914
30	9,79321	70	9,82606
40	9,80166	80	9,83058
50	9,81066	90	9,83216

Таблица 17. Характеристики планет Солнечной системы (Расстояние от Солнца D , экваториальный радиус планеты R , плотность вещества планеты ρ , ускорение свободного падения на поверхности планеты $g_{\text{п}}$, масса M)

Небесное тело	$D, 10^{10} \text{ м}$	$R, 10^6 \text{ м}$	$\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$	$g_{\text{п}}, \text{ м/с}^2$	$M, 10^{24} \text{ кг}$
Солнце	—	696	1,41	274	$1,99 \cdot 10^6$
Меркурий	5,79	2,43	5,59	3,72	0,33
Венера	10,8	6,05	5,22	8,69	4,87
Земля	14,96	6,378	5,52	9,78	5,976
Марс	22,8	3,39	3,97	3,72	0,645
Юпитер	77,8	70,85	1,30	23,01	1899,3
Сатурн	142,7	60,1	0,71	9,44	568,4
Уран	286,9	24,6	1,47	9,67	86,8
Нептун	449,7	23,5	2,27	15,0	103
Плутон	594,7	2,2	10,4	8,0	1,1
Луна	0,03844 (от Земли)	1,737	3,34	1,62	0,0735

Таблица 18. Центры тяжести однородных тел

Тело	Положение центра тяжести
Тонкий стержень длиной l	В точке на оси стержня, расположенной на расстоянии $l/2$ от его концов
Цилиндр или призма	На середине отрезка, соединяющего центры оснований цилиндра или призмы
Шар	В центре
Пластинка малой толщины, имеющая форму сегмента	В точке на оси симметрии, смещенной от основания на $2/5$ высоты сегмента
Пирамида или конус	На отрезке, соединяющем вершину с центром основания; смещен от основания на $1/4$ этого отрезка
Полушарие	На оси симметрии; смещен от центра на $3/8$ радиуса
Сплошная треугольная пластина малой толщины	В точке пересечения медиан

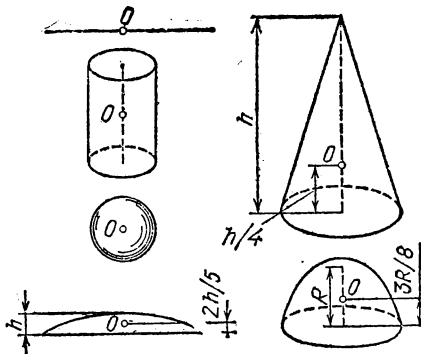


Рис. 1.27. Положение центра тяжести тел правильной геометрической формы

Таблица 19. Пределы прочности материалов, полимеров и волокон

Материал	Предел прочности, МПа	
	при растяжении	при сжатии
Бетон	—	4,9—34
Гранит	2,9	147—255
Дуб (15 % влажности)		
вдоль волокон	93	49
поперек волокон	—	14,7
Кирпич	—	7—29
Латунь, бронза	216—490	—
Лед (0 °С)	1	1—2
Сосна (15 % влажности)		
вдоль волокон	78	39
поперек волокон	—	4,9
Сталь для конструкций	373—412	—
кремнехромомарганцовистая	1520	—
машиноподелочная (углеродистая)	314—785	—
Стальная проволока	3400	—
<i>Полимеры</i>		
Аминопласты	78	196
Винипласт	39	78
Гетинакс	147—167	147—177
Древесно-слоистые пластики (ДСП), вдоль волокон	106—255	98—186
Каучук (натуральный)	27—28	—
Пенопласт (плиточный)	0,59	—
Плексиглас	49	68,6
Полистирол (бакелит)	39	98
Полиэтилен	11,7—44,1	12,2
Текстолит	0,2—0,4	0,13—0,16
Фторопласт-4	29,4—39,2	49,0—55,0
<i>Волокно</i>		
Асбестовое	2500—3000	—
Ацетатное	175—220	—
Вискозное	265—440	—
Капроновое	490—640	—
Из кремнезема (SiO ₂)	1380—1480	—
Лавсановое	172	—
Льняное	500—1000	—
Стекловолокно	2000	—
Шелковое	480—500	—
Шерстяное	150—250	—
Хлопковое	250—550	—

Примечание. О полимерах см. гл. II, п. 6.

Таблица 20. Модули упругости и коэффициент Пуассона

Материал	Модуль Юнга, ГПа	Модуль сдвига, ГПа	Коэффициент Пуассона
Алюминиевая бронза, литье	103	41	0,25 *)
Алюминий	63—70	25—26	0,32—0,36
Бетон	15—40	7—17	0,1—0,15
Висмут	32	12 *)	0,33 *)
Гранит, мрамор	35—50	14—44	0,1—0,15
Дюралюминий катаный	70	26	0,31 *)
Известняк	~35	~15	0,2
Инвар	135	55	0,25 *)
Кадмий	50	19 *)	0,3
Каучук	0,008	0,003	0,46
Кварц (плавленый)	73	31	0,17
Константан	160	61	0,33
Латунь холоднотянутая	89—97	34—36	0,32—0,42
Медь, литье	82	—	—
Медь катаная	108	39	0,31—0,34
Медь холоднотянутая	127	48	0,33 *)
Никель	204	79	0,28 *)
Плексиглас	5,25	1,48	0,35 *)
Резина мягкая вулканизированная	0,0015—0,005	0,0005—0,0015	0,46—0,49
Серебро	82,7	30,3	0,37 *)
Стали легированные	206	80	0,25—0,30
Стали углеродистые	195—205	8	0,24—0,28
Стальное литье	170	—	—
Стекло	49—78	17,5—29	0,2—0,3
Титан	116	44	0,32 *)
Фосфористая бронза катаная	113	41	0,32—0,35
Чугун белый, серый	113—116	44	0,23—0,27
Чугун ковкий	150	—	—

*) Расчетные значения.

Таблица 21. Сжимаемость жидкостей и твердых тел

Жидкость, твердое тело	Температура, °С	Интервал давлений, МПа	Сжимаемость, 10^{-11} Па $^{-1}$
<i>Жидкости</i>			
Ацетон	14,2	0,9—3,6	112
	0	0,1—50	83
	0	100—200	43
Вода	20	0,1—10	47
	20	50—100	38
	100	10—20	74
	100	50—100	61
Глицерин	14,8	0,1—1	22,3

Таблица 21 (продолжение)

Жидкость, твердое тело	Температура, °С	Интервал давлений, МПа	Сжимаемость, 10^{-11} Па^{-1}
Касторовое масло	14,8	0,1—1	47,7
Керосин	1	0,1—1,5	68—92
	94	0,1—1,5	110
	185	0—10	110
Оливковое масло	20	0,1—1	64
Ртуть	20	0,1—1	3,96
Спирт этиловый	20	0,1—5	113
<i>Твердые тела</i>			
Алмаз	20	—	0,23
Железо	20	—	0,59
Медь	20	—	0,74
Олово	20	—	1,8
Серебро	20	—	1,0

Зависимость предела прочности и модуля Юнга от температуры

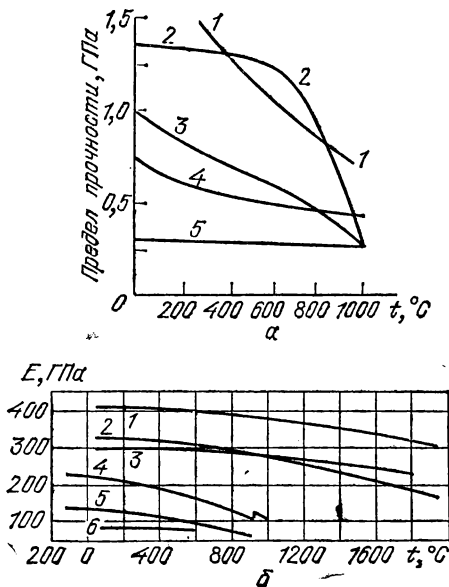


Рис. 1.28. Зависимости от температуры: а — предела прочности (1 — вольфрам, 2 — никелевая сталь, 3 — кобальтовая сталь, 4 — сплав Мо 0,5 Ti; 5 — сплав Ti 36 Al); б — модуля Юнга (1 — вольфрам; 2 — молибден, 3 — карбид кремния, 4 — железо, 5 — медь, 6 — стекло)

Таблица 22. Вязкость жидкостей (при 18 °С)

Жидкость	$\eta, 10^{-2}$ Па·с
Анилин	0,46
Ацетон	0,0337
Бензол	0,0673
Вода	0,105
Глицерин	139,3
Касторовое масло	120,0
Масло машинное легкое	11,3
Масло машинное тяжелое	66,0
Пентан	0,0244
Ртуть	0,159
Сероуглерод	0,0382
Спирт этиловый	0,122
Толуол	0,0613

Таблица 23. Вязкость газов (при 0 °С)

Вещество	$\eta, 10^{-5}$ Па·с	Вещество	$\eta, 10^{-5}$ Па·с
Азот	1,67	Кислород	1,92
Аммиак	0,93	Метан	1,04
Водород	0,84	Окись азота	1,72
Воздух	1,72	Окись углерода	1,67
Гелий	1,89	Углекислый газ	1,40
Закись азота	1,38	Хлор	1,29

Таблица 24. Вязкость газов при различных давлениях (η , мкПа·с)

Газ	Температура $t, ^\circ\text{C}$	Давление, МПа			
		5,07	10,1	30,4	81,0
Азот	25	18,1	19,9	26,8	45,8
	75	20,5	21,5	26,6	41,6
Воздух	0	18,2	19,7	28,6	—
	25	19,2	20,6	28,0	—
	100	22,4	23,4	28,1	—
Углекислота	40	18,1	48,8	—	—
	40	13,4	28,8	—	—

Таблица 25. Вязкость воды при различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60
$\eta, \text{мкПа}\cdot\text{с}$	1797	1518	1307	1140	1004	895	803	655	551	470
$t, ^\circ\text{C}$	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
$\eta, \text{мкПа}\cdot\text{с}$	407	357	317	284	256	232	212	196	184	174

Таблица 26. Вязкость жидкостей при различных температурах ($\eta, 10^{-2} \text{ Па}\cdot\text{с}$)

Жидкость	$t, ^\circ\text{C}$					
	10	20	30	50	70	100
Анилин	0,653	0,439	0,318	0,191	0,129	0,076
Ацетон	0,0358	0,0324	0,0295	0,0251	—	—
Бензол	0,076	0,065	0,056	0,0436	0,035	—
Касторовое масло	244	98,7	45,5	12,9	4,9	—
Трансформаторное масло	4,2	1,98	1,34	0,64	0,38	0,213

Таблица 27. Вязкость металлов в жидком состоянии

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$\eta, \text{мПа}\cdot\text{с}$	Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$\eta, \text{мПа}\cdot\text{с}$
Алюминий	700	2,90	Олово	240	1,91
	800	1,40		400	1,38
				600	1,05
Висмут	304	1,65	Ртуть	20	1,54
	451	1,28		50	1,40
	600	0,99		100	1,24
Калий	100	0,46	200	1,03	
	200	0,34	300	0,90	
	500	0,185	400	0,83	
	700	0,14	500	0,77	
Натрий	103,7	0,69	600	0,74	
	400	0,25	Свинец	441	2,11
	700	0,18		551	1,69
				844	1,18

Таблица 28. Формулы для расчета скоростей волн в изотропных средах

Виды волн	Расчетные формулы
Продольные волны в стержнях	$v_0^2 = E/\rho$
Волны объемного сжатия в твердом теле	$v_1 = E(1-\nu)/(\rho(1+\nu)(2-2\nu))$
Поперечные волны (волны сдвига)	$v_2^2 = G/\rho$
Продольные волны в тонких пластинках	$v_{пл}^2 = E/(\rho(1-\nu^2))$
Волны в жидкостях	$v_{ж}^2 = 1/(\rho\beta_{ад})$
Волны в реальных газах	$v_r^2 = \gamma p/\rho$
Волны в идеальных газах	$v_{ид}^2 = \gamma R T/\mu$
Поверхностные волны в жидкостях (на границе газ—жидкость)	$v_n^2 = g\lambda/(2\pi) + 2\pi\alpha/(\lambda\rho)$
Поверхностные волны в слое малой глубины ($h < 0,5\lambda$)	$v_M^2 = gh$

Примечания. 1. E —модуль Юнга, G —модуль сдвига, ν —коэффициент Пуассона, $\beta_{ад}$ —адиабатическая сжимаемость, ρ —плотность, отношение удельных теплоемкостей $\gamma = c_p/c_v$, p —давление, α —поверхностное натяжение, R —молярная газовая постоянная, μ —молярная масса, T —температура, λ —длина волны, g —ускорение свободного падения, h —глубина слоя жидкости.
2. В кристаллах скорость волн зависит от направления распространения.

Таблица 29. Скорость звука в жидкостях

Жидкость	t_0 , °C	v , м/с	α , м/(с·K)
Анилин	20	1656	-4,6
Ацетон	20	1192	-5,5
Вода морская	17	1510—1550	—
Вода	25	1497	2,5
Глицерин	20	1923	-1,8
Керосин	34	1295	—
Ртуть	20	1451	-0,46
<i>Масла</i>			
Веретенное	32	1342	—
Кедровое	29	1406	—
Льняное	31,5	1772	—
Оливковое	32,5	1381	—
Трансформаторное	32,5	1425	—

Примечание. Скорость звука в жидкостях уменьшается с повышением температуры (за исключением воды). Скорость звука v_t при температуре t может быть подсчитана по формуле $v_t = v + \alpha(t - t_0)$, где v —указанная в таблице скорость, α —температурный коэффициент, указанный в последнем столбце, t_0 —указанная в таблице температура.

Таблица 30. Скорость звука в твердых изотропных веществах (при 20 °С)

Вещество	v_0 , м/с	v_1 , м/с	v_2 , м/с
Алюминий	5080	6260	3080
Гипс	—	4970	2370
Железо	5170	5850	3230
Каучук	—	1479	—
Латунь	3490	4430	2123
Лед	3280	3980	1990
Медь	3710	4700	2260
Мрамор	—	6150	3260
Никель	4785	5630	2960
Олово	2730	3320	1670
Песчаник	—	3700	—
		4900	
Плексиглас	—	2670	1121
Полистирол	—	2350	1120
Пробка	500	—	—
Резина	46	1040	27
Свинец	2640	3600	1590
Сталь углеродистая	5050	6100	3300
Стекло кварцевое	5370	5570	3515
» кронглас	5300	5660	3420
» легкий флинт	4550	4800	2950
» тяжелый крон	4710	5260	2960
» флинт	3490	3760	2220
Фарфор	4884	5340	3120
Эбонит	1570	2405	—

Примечание. Обозначения см. в табл. 28.

Таблица 31. Свойства Земли на разной глубине и скорость сейсмических волн

Механические волны, распространяющиеся в земной коре, называются *сейсмическими*. Сейсмические волны могут быть как продольными v_1 (волны сжатия), так и поперечными v_2 (волны сдвига); указаны плотность ρ , давление p , ускорение g , глубина H

H , км	ρ , 10^3 кг/м ³	v_1 , км/с	v_2 , км/с	p , ГПа	g , м/с ²
33	3,32	8,18	4,63	0,9	9,85
100	3,38	8,18	4,63	3,1	9,89
200	3,47	8,29	4,63	6,5	9,92
500	3,89	9,65	5,31	17,4	9,99
1000	4,68	11,42	6,36	39,2	9,95
2000	5,24	12,79	6,93	88	9,86
4000	10,8	9,51	—	240	8,00
5000	11,5	10,44	—	318	6,13

Таблица 32. Скорость звука в газах при нормальном давлении

Газ	$t_0, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м/с}$	$\alpha, \text{м}/(^\circ\text{C}\cdot\text{К})$
Азот	0	334	0,6
Аммиак	0	415	—
Водород	0	1284	2,2
Водяной пар	134	494	—
Воздух	0	331	0,59
Гелий	0	965	0,8
Кислород	0	316	0,56
Углекислый газ	0	259	0,4
Неон	0	435	0,8

Примечания. 1. Скорость звука в газах при постоянном давлении увеличивается с повышением температуры. Для расчета скорости v_t при температуре t приведен температурный коэффициент α ; $\alpha = (v_t - v) / (t - t_0)$ (см. примечание к табл. 29).

2. При высоких частотах (или низких давлениях) наблюдается дисперсия скорости звука. Приведенные значения относятся к диапазону частот (10—10⁶) Гц, где дисперсия скорости отсутствует.

Скорость звука в воздухе и азоте

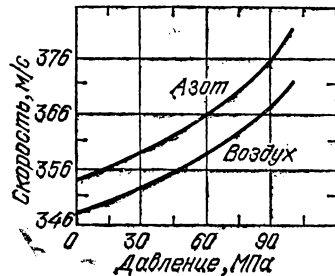


Рис. 1.29. Зависимость скорости звука в воздухе и азоте от давления. Приведенные зависимости относятся к температуре 20 °С и диапазону частот от 200 до 500 кГц

Таблица 33. Шкала механических волн

Частота, Гц	Наименование	Способы возбуждения	Применение
0,5—20	Инфразвук	Колебания воды в больших водоемах	Прогнозирование погоды
20—2·10 ⁴	Слышимый звук	Голосовые связки человека и животных, музыкальные инструменты, свистки, сирены, громкоговорители и т. д.	Связь и сигнализация, а также измерение расстояний (звукометрия)

Таблица 33 (продолжение)

Частота, Гц	Наименование	Способы возбуждения	Применение
$2 \cdot 10^4 - 10^{10}$	Ультразвук	Магнитострикционные и пьезоэлектрические излучатели; возбуждаются также некоторыми животными и насекомыми (летучие мыши, сверчки, саранча и т. д.)	Гидролокация, дефектоскопия деталей, ускорение химических реакций, медицинские и биологические исследования
10^{11} и выше	Гиперзвук	Тепловые колебания молекул и кристаллических решеток	В исследованиях структуры молекул, в линиях задержки СВЧ

Таблица 34. Сила звука и звуковое давление

Сила звука		Δp , Па	Примеры звуков указанной силы
дБ	Вт/м ²		
0	10^{-12}	0,00002	Сила звука вблизи предела чувствительности человеческого уха
10	10^{-11}	0,000065	Шорох листьев. Слабый шопот на расстоянии 1 м
20	10^{-10}	0,0002	Шелест листьев в тихом саду
30	10^{-9}	0,0065	Сила звука в тихой комнате. Средний уровень шума в зрительном зале
40	10^{-8}	0,002	Негромкая музыка. Шум в жилом помещении
50	10^{-7}	0,0065	Сила звука при слабой работе громкоговорителя. Шум в учреждении с открытыми окнами
60	10^{-6}	0,002	Средний уровень разговорной речи на расстоянии 1 м
70	10^{-5}	0,0645	Шум мотора грузового автомобиля. Шум внутри движущегося трамвая
80	10^{-4}	0,20	Шумы на улице с интенсивным движением транспорта и в машинописном бюро
90	10^{-3}	0,645	Автомобильный гудок. Фортиссимо большого симфонического оркестра
100	10^{-2}	2,0	Звуки автомобильной сирены
110	10^{-1}	6,45	Шум при работе пневматического молота
120	1	20	Реактивный двигатель на расстоянии 5 м. Сильные удары грома
130	10	64,5	Сила звука вблизи болевого предела, звук уже не слышен

Скорость волн на поверхности воды

При малых длинах волн (меньших 2 см) основную роль играют силы поверхностного натяжения; такие волны называют *капиллярными*.

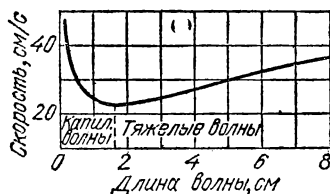


Рис. 1.30. Дисперсия поверхностных волн ($h > 0,5\lambda$).

При больших длинах волн основную роль играют силы тяжести, а волны называют в этом случае *тяжелыми* (или *гравитационными*). Скорость поверхностных волн зависит от длины волны, если глубина жидкости достаточно велика ($h > \lambda/2$).

Уровни громкости звука

На рис. 1.31 приведены кривые интенсивности звуков равной громкости. Верхняя кривая соответствует порогу болевого ощущения, нижняя — порогу слышимости. Значения частот отложены в логарифмическом масштабе.

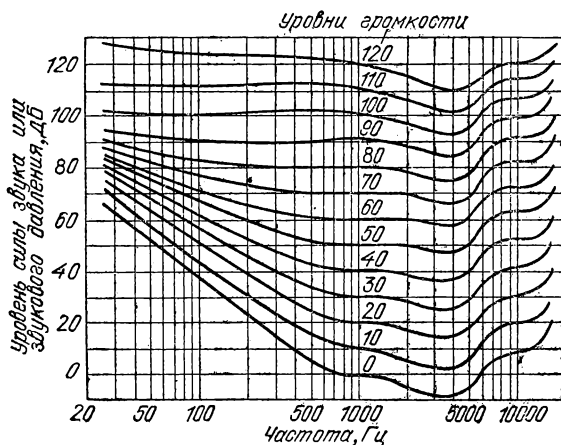


Рис. 1.31. Уровни громкости

Таблица 35. Коэффициент отражения звуковых волн при нормальном падении

Материал	Алюминий	Вода	Масло	Медь	Никель	Ртуть	Сталь	Стекло
Алюминий	0	72	74	18	24	1	21	2
Вода		0	0,6	87	89	75	88	65
Масло			0	88	90	76	89	67
Медь				0	0,8	13	0,3	19
Никель					0	19	0,2	34
Ртуть						0	16	4
Сталь							0	31
Стекло								0

Примечания. 1. Коэффициент отражения будет одним и тем же как, например, при переходе звука из ртути в сталь, так и из стали в ртуть. Значения коэффициентов отражения даны в процентах.

2. При отражении от тонких пластинок коэффициент отражения зависит от отношения толщины пластинки к длине волны.

3. Указаны значения для трансформаторного масла.

Таблица 36. Показатель поглощения звука в воздухе α , 10^{-2} м^{-1} (при 20 °С и нормальном давлении)

Частота, кГц	Относительная влажность воздуха, %				
	10	20	40	60	80
1	0,13	0,06	0,03	0,03	0,03
2	0,47	0,23	0,10	0,09	0,08
4	1,27	0,82	0,38	0,24	0,20
6	1,87	1,61	0,84	0,54	0,39
8	2,26	2,48	1,45	0,96	0,69
10	2,53	3,28	2,20	1,47	1,08

Таблица 37. Показатель поглощения звука для различных материалов

Материал	Частота, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Войлок (25 мм)	0,18	0,36	0,71	0,79	0,82	0,85
Деревянные доски (20 мм)	0,10	0,11	0,11	0,08	0,082	0,11
Кирпичная стена (неоштукатуренная) (23 мм)	0,024	0,025	0,032	0,041	0,049	0,07
Ковер с ворсом (9 мм)	0,09	0,08	0,21	0,27	0,27	0,37
Мрамор (камень) полированный	0,01	—	0,01	—	0,015	—
Стекло (одинарное) (0,6—0,7 мм)	0,03	—	0,027	—	0,02	—
Стекланная вата (9 см)	0,32	0,40	0,51	0,60	0,65	0,60
Фанера (5 мм)	0,20	0,28	0,26	0,09	0,12	0,11
Хлопчатобумажная ткань	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Штукатурка гипсовая	0,013	0,015	0,020	0,028	0,04	0,05
» известковая	0,025	0,045	0,06	0,085	0,043	0,058

Таблица 38. Показатель поглощения звука в жидкостях

Жидкость	$t, ^\circ\text{C}$	Диапазон частот, МГц	$\alpha/f^2, 10^{-15} \text{ с}^2/\text{м}$
Азот (жидкий)	-199	40—50	~11
Ацетон	25	4—20	50
Бензол	20	1—200	850—900
Вода	20	1—200	25
Глицерин	26	4—20	1700
Керосин	25	6—20	110
Нефть	25	1—10	~100
Ртуть	20	0,5—1000	5,5

Примечание. Указанные значения относятся к давлениям 0,1—2 МПа. В таблице приведены отношения показателя поглощения к квадрату частоты. В указанных диапазонах частот α/f^2 не зависит от частоты.

Таблица 39. Показатель поглощения ультразвуковых волн в морской воде (при 15—20 °С)

$f, \text{ кГц}$	20	24	100	200	230	480	940
$\alpha, 10^{-3} \text{ м}^{-1}$	0,023	0,050	0,37	0,69	1,25	2,00	2,90

Глава II. ТЕРМОДИНАМИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

Термодинамика — раздел физики, в котором изучаются закономерности превращения энергии; в *молекулярной физике* используется представление о молекулярном строении вещества, на основе различных моделей изучаются закономерности, характерные для большого числа частиц (молекул, атомов, ионов, квантов и т. д.), и устанавливаются свойства вещества в различных состояниях.

1. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Термодинамическая система. Совокупность тел, которые могут обмениваться между собой, а также с внешней средой энергией и веществом, называется *термодинамической системой* (или просто *системой*).

Тела, находящиеся вне границ термодинамической системы, называются *внешней средой*.

Величины, характеризующие состояние системы, называются *термодинамическими параметрами*; важнейшими из них являются объем (удельный объем), давление, температура.

Термодинамическая система, которая не обменивается ни энергией, ни веществом с внешней средой, называется *изолированной*; изолированная система с течением времени приходит в состояние термодинамического равновесия и не может самопроизвольно выйти из этого состояния (*первый постулат термодинамики*).

Температура. Скалярная величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия и определяющая теплообмен между телами, называется *температурой*. Температура является одним из интенсивных (т. е. не зависящих от массы) параметров системы; она является мерой средней кинетической энергии теплового движения молекул или атомов. Для неравновесной системы понятие температуры не имеет смысла. Положение о существовании температуры равновесной системы составляет основу *второго постулата термодинамики*.

С изменением температуры изменяются размеры тела, плотность, упругость, электропроводность и т. д. Температура, кото-

рая определяется по термодинамической шкале температур, называется *термодинамической*.

Единицей термодинамической температуры является *кельвин* (см. «Основные единицы СИ»). Допускается применение температуры Цельсия, которая определяется выражением $t = T - T_0$, где $T_0 = 273,15$ К по определению. По размеру *градус Цельсия* равен кельвину; температура Цельсия обозначается символом °С.

Для практических целей на основе термодинамической шкалы температур установлена *Международная практическая температурная шкала 1968 г.* (МПТШ-68), в которой устанавливаются 11 температурных точек; температуры этих точек и условия их воспроизведения указаны в табл. 40. Если необходимо указать, что температура определена по МПТШ-68, то в обозначениях температуры добавляется индекс 68 (например, T_{68} или t_{68}).

Молярная масса. Масса тела, в котором содержится один моль вещества, называется *молярной массой*. *Относительной молекулярной массой* называется отношение массы молекулы m данного вещества к 1/12 части массы атома m_C изотопа углерода-12 (см. гл. V, п. 5). Относительная масса $M_r = 12 m/m_C$.

Теплота, теплоемкость. Передача энергии от одного тела к другому может быть осуществлена двумя способами: первый способ — посредством работы механических или электромагнитных сил; второй способ — посредством теплообмена, когда энергия передается тепловым движением молекул за счет теплопроводности или тепловым излучением (см. гл. IV). Энергия, передаваемая при теплообмене, называется *количеством теплоты* (или просто *теплотой*).

Теплоемкостью называется количество теплоты, которое необходимо сообщить для нагревания тела на один кельвин.

Для нагревания тела массой m от температуры T до $T_1 = T + \Delta T$ необходимо сообщить ему количество теплоты ΔQ .

Величина

$$c_{\text{ср}} = \frac{\Delta Q}{m \Delta T} \quad (2.1)$$

называется *средней удельной теплоемкостью* в интервале температур $T \div T_1$.

Истинной удельной теплоемкостью (*удельной теплоемкостью*) при температуре T называется

$$c = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta T} \Big|_m = \frac{1}{m} dQ/dT. \quad (2.2)$$

Удельная теплоемкость зависит от температуры. Однако в большинстве случаев этой зависимостью пренебрегают и считают, что удельная теплоемкость — теплота, которая необходима для повышения температуры тела массой 1 кг на один кельвин.

Теплоемкость тела, масса которого равна молярной массе, называется *молярной теплоемкостью*.

Молярная теплоемкость

$$C = \mu c, \quad (2.3)$$

где c — удельная теплоемкость, μ — молярная масса.

Теплота, необходимая для увеличения температуры тела массой m на ΔT , рассчитывается по формуле:

$$\Delta Q = ct \Delta T, \quad (2.4)$$

где c — удельная теплоемкость.

Теплоемкость зависит от условий нагревания. Теплоемкость при изобарическом процессе (нагревание происходит при постоянном давлении) называется *теплоемкостью при постоянном давлении* (c_p). Теплоемкость при изохорическом процессе (нагревание осуществляется при постоянном объеме) называется *теплоемкостью при постоянном объеме* (c_v); всегда $c_p > c_v$; для веществ в твердом состоянии теплоемкости c_p и c_v незначительно отличаются друг от друга.

Законы термодинамики. *Внутренней энергией* называется энергия системы (или тела), при этом не учитывается кинетическая энергия системы в целом и ее потенциальная энергия во внешнем поле.

С молекулярно-кинетической точки зрения внутренняя энергия равна сумме кинетических энергий отдельных молекул и энергии взаимодействия между ними.

Внутренняя энергия зависит только от параметров состояния p , V , T и не зависит от того, каким способом было получено это состояние.

Сумма теплоты ΔQ , которую получает система при нагревании, и работы ΔA , которая совершается внешними силами, равна изменению внутренней энергии δU (*первый закон термодинамики*):

$$\Delta Q + \Delta A = \delta U. \quad (2.5)$$

Изменение внутренней энергии δU не зависит от процесса и определяется параметрами начального и конечного состояний; напротив, ΔQ и ΔA зависят от процессов перехода из начального в конечное состояние. Если к системе подводится теплота, то $\Delta Q > 0$; если работа совершается внешними силами, то $\Delta A < 0$; в противных случаях $\Delta Q < 0$ и $\Delta A > 0$.

Совершаемая системой элементарная работа

$$\Delta A = p \Delta V, \quad (2.6)$$

где ΔV — изменение объема;

работа системы в процессе перехода из одного состояния в другое:

$$A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV, \quad (2.7)$$

где V_1 , V_2 — объемы системы в начальном и конечном состояниях.

Совокупность изменяющихся состояний системы называется *термодинамическим процессом* (или просто *процессом*). Различают обратимые и необратимые процессы.

Обратимым называется такой процесс, который может происходить в прямом и в обратном направлениях, при этом должны выполняться следующие условия: а) при возвращении к первоначальному состоянию система проходит через те же самые состояния, что и в прямом процессе, но в обратном порядке; б) в системе и внешней среде по окончании процесса не останется каких-либо изменений.

Процессы, не удовлетворяющие этим условиям, называются *необратимыми*.

Теплота не может самопроизвольно переходить от менее нагретого тела к более нагретому телу без каких-либо изменений во внешней среде (*второй закон термодинамики*).

На основе второго закона термодинамики определяется, в каком направлении возможен переход теплоты между двумя телами (системами), а также устанавливается предельное значение *коэффициента полезного действия тепловых машин*:

$$\eta = (T_1 - T_2)/T_1, \quad (2.8)$$

где T_1 — температура нагревателя тепловой машины, T_2 — температура холодильника.

Теплоемкость любого тела при приближении к абсолютному нулю стремится к нулю (следствие из *третьего закона термодинамики*).

2. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

Фаза. Часть системы, которая в отсутствие внешних воздействий имеет одинаковые физические свойства во всех своих точках и ограничена поверхностью раздела, называется *фазой*. Например, лед, вода, водяной пар, образующие систему, являются различными фазами воды; графит и алмаз — различные фазы твердого углерода. Система может состоять из одной фазы.

Переход вещества из одной фазы в другую называется *фазовым переходом*.

Теплота фазовых переходов. Фазовый переход вещества из кристаллического твердого состояния в жидкое называется *плавлением*; обратный переход — из жидкого состояния в твердое кристаллическое состояние называется *кристаллизацией*. Фазовые переходы

сопровождаются поглощением или выделением определенного количества теплоты (при постоянных давлении и температуре), это количество теплоты называется *теплотой фазового перехода*.

Теплота фазового перехода при плавлении кристаллов и поликристаллов

$$Q_{\text{п}} = \lambda m, \quad (2.9)$$

где m — масса расплавленного вещества, λ — удельная теплота плавления — теплота, необходимая для превращения в жидкое состояние при температуре плавления твердого тела массой 1 кг. При кристаллизации происходит выделение теплоты. Теплота плавления равна теплоте кристаллизации; во время плавления (кристаллизации) температура не изменяется.

При плавлении происходит увеличение объема; исключение составляют вода, гелий, сурьма, чугун и висмут и некоторые другие сплавы, у которых происходит уменьшение объема.

Фазовый переход вещества из кристаллического состояния непосредственно в пар называется *сублимацией*.

Фазовый переход пара в жидкое или кристаллическое состояние называется *конденсацией*.

Фазовый переход жидкости в пар называется *парообразованием*, обратный переход называется *сжижением*; парообразование, происходящее со свободной поверхности жидкости (твердого тела), называется *испарением*; если парообразование происходит как со свободной поверхности жидкости, так и во всем объеме жидкости, то оно называется *кипением*. Кипение происходит при постоянной температуре (при постоянном внешнем давлении). Эта температура называется *температурой кипения*. Изменение температуры кипения воды с давлением равно приблизительно $2,8 \cdot 10^{-4}$ кельвин на паскаль.

Теплота фазового перехода при парообразовании

$$Q_{\text{к}} = r m, \quad (2.10)$$

где m — масса вещества, перешедшего в пар, r — *удельная теплота парообразования* — теплота, необходимая для перехода в пар 1 кг жидкости (при постоянных температуре и давлении).

Кривые фазовых переходов. Испарение жидкости в открытом сосуде может продолжаться до полного исчезновения жидкости. В закрытом сосуде испарение жидкости продолжается до установления равновесия между жидкостью и паром, при этом процессы испарения и конденсации компенсируют друг друга. Такое равновесие называется *динамическим*. Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называется *насыщенным*.

Кипение происходит при такой температуре, когда давление насыщенных паров жидкости равно внешнему давлению. При по-

стоянном давлении температура кипения данной жидкости остается неизменной.

С повышением температуры увеличивается давление и плотность насыщенного пара, а плотность жидкости уменьшается. Кривая, изображающая зависимость давления насыщенного пара от температуры, называется *кривой испарения*; для твердых кристаллических тел такие кривые называются *кривыми сублимации*. Кривая, изображающая зависимость температуры плавления от давления, называется *кривой плавления*.

Кривые плавления, испарения и сублимации называются *кривыми фазовых переходов*. Типичная диаграмма фазовых переходов изображена на рис. 2.1, а. Справа от линии $КТрВ$ находится область газообразного состояния, слева от линии $АТрВ$ расположена область твердого состояния, между линиями $АТр$ и $КТр$ находится область жидкого состояния.

Точка, в которой пересекаются кривые фазовых превращений, называется *тройной точкой* (точка $Тр$ на рис. 2.1, а). Тройная точка определяет условия (давление, температуру и плотность) термодинамического равновесия трех фаз: твердой, жидкой и газообразной. Например, для воды тройная точка соответствует температуре 273,16 К (точно), давлению 609 Па. У гелия кривые равновесия газ — жидкость и твердый гелий — жидкий гелий (HeI , $HeII$) не пересекаются, т. е. у него нет тройной точки (рис. 2.1, б).

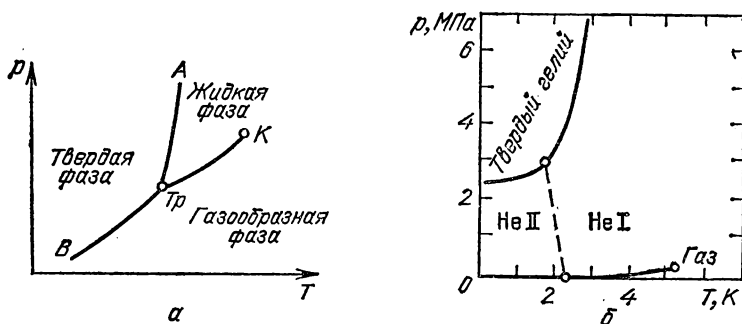


Рис. 2.1. а — диаграмма фазовых превращений, $АТр$ — кривая плавления, $КТр$ — кривая испарения, $ВТр$ — кривая сублимаций, $К$ — критическая точка, $Тр$ — тройная точка; б — кривые равновесия твердый гелий — жидкий гелий и жидкий гелий — газ; штриховая линия — кривая равновесия между двумя фазами (жидкий гелий HeI и $HeII$)

При некоторой температуре, характерной для данной жидкости, плотности жидкости и насыщенного пара становятся одинаковыми, а граница раздела между этими фазами исчезает. Такое состояние называется *критическим*, а соответствующие этому со-

стоянию плотность, давление и температура называются *критическими параметрами* (см. ниже рис. 2.3). Кривая испарения обрывается при критической температуре (рис. 2.1, а).

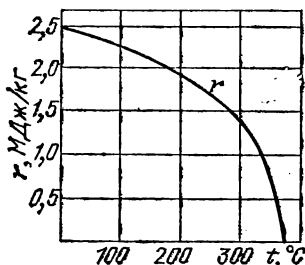


Рис. 2.2. Зависимость удельной теплоты парообразования воды от температуры

Удельная теплота парообразования r зависит от температуры. С увеличением температуры удельная теплота парообразования уменьшается; при критической температуре она равна нулю. На рис. 2.2 показана зависимость r от температуры для воды.

3. ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТВЕРДЫХ И ЖИДКИХ ТЕЛ

С изменением температуры твердых и жидких тел изменяются их размеры и объем. Длина l_T тела при температуре T определяется по формуле:

$$l_T = l_0 (1 + \alpha \Delta T), \quad (2.11)$$

где l_0 — длина при температуре $T_0 = 273,15$ К, α — *температурный коэффициент длины* — среднее (в интервале температур от T_0 до T) относительное удлинение при изменении температуры на 1 кельвин: $\alpha = (l_T - l_0) / (l_0 \Delta T)$, $\Delta T = T - T_0$.

Объем тела V_T при температуре T определяется по формуле

$$V_T = V_0 (1 + \beta \Delta T), \quad (2.12)$$

где V_0 — объем при температуре T_0 , β — *температурный коэффициент объема* — среднее (в данном интервале температур) относительное изменение объема тела при изменении температуры на 1 кельвин, т. е. $\beta = (V_T - V_0) / (V_0 \Delta T)$.

В твердом изотропном теле (свойства такого тела одинаковы по всем направлениям) $\beta = 3\alpha$.

Более точно изменение длины Δl представляется формулами вида $l_T = l_0 (1 + a \Delta T + b (\Delta T)^2)$ (a и b — коэффициенты, определяемые экспериментально для каждого вещества).

Температурный коэффициент длины изменяется с изменением температурного интервала, в котором происходит нагревание тела. Так, для железа $l_T = l_0 (1 + 1,17 \cdot 10^{-5} \Delta T + 4,7 \cdot 10^{-9} (\Delta T)^2)$; его температурный коэффициент длины при нагревании от 0°C до 75°C

равен $1,21 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, а для интервала $0^\circ\text{C} - 750^\circ\text{C}$ он равен $1,52 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

При нагревании тел происходит изменение их плотности; при температуре T плотность

$$\rho_T = \rho_0 / (1 + \beta \Delta T), \quad (2.13)$$

где ρ_0 — плотность тела при T_0 , β — температурный коэффициент объема.

4. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОВ

Идеальный газ. Газы, свойства которых описываются уравнением состояния

$$pV = mRT/\mu, \quad (2.14)$$

называются *идеальными*, а уравнение (2.14) называется *уравнением состояния идеального газа* или *уравнением Менделеева — Клапейрона*. В уравнении (2.14) p — давление, V — объем газа массы m , μ — молярная масса (см. п. 1 этой главы), R — молярная газовая постоянная, равная работе одного моля идеального газа при нагревании на 1 кельвин при изобарическом процессе (см. ниже).

С точки зрения молекулярно-кинетической теории (см. п. 6 этой главы) идеальный газ — это такой газ, молекулы которого рассматриваются как материальные точки, которые движутся хаотически и взаимодействие между которыми имеет место лишь в моменты упругих соударений.

Модель идеального газа соответствует предельному состоянию реального газа при малых плотностях; уравнение (2.14) применяется к таким газам, плотность которых меньше плотности их насыщенных паров при тех же температурах; как следует из (2.14), плотность идеального газа можно рассчитать по формуле

$$\rho = \mu p / (RT). \quad (2.15)$$

Температурный коэффициент объема и давления идеального газа $\beta = 1/273,15 \text{ K}^{-1}$.

Разность молярных теплоемкостей идеального газа

$$C_p - C_v = R. \quad (2.16)$$

Закон Дальтона. Каждый газ, входящий в состав газовой смеси, имеет такое давление, какое он имел бы один, занимая весь объем смеси при той же температуре. Это давление называется *парциальным*. В смеси идеальных газов, которые не вступают в химическую реакцию, общее давление равно сумме парциальных давлений p_i (*закон Дальтона*):

$$p = \sum_i p_i. \quad (2.17)$$

Термодинамические процессы в идеальном газе. Если при изменении состояния один из параметров (p , V или T) остается постоянным, то процессы соответственно называются *изобарическими* ($p = \text{const}$), *изохорическими* ($V = \text{const}$), *изотермическими* ($T = \text{const}$). При *адиабатическом* процессе теплота к системе не подводится, т. е. $\Delta Q = 0$.

Основные характеристики процессов приводятся в таблице.

Процесс	Постоянные параметры	Уравнение состояния	Работа газа массой m	Изменение внутренней энергии 1 моля газа
1	2	3	4	5
Изобарический	m, p	$V/T = \text{const}$ (закон Гей-Люссака)	$A_p = \frac{mR\Delta T}{\mu}$	$\delta U = C_V \Delta T$
Изохорический	m, V	$p/T = \text{const}$ (закон Шарля)	$A_V = 0$	$\delta U = \Delta Q$
Изотермический	m, T	$pV = \text{const}$ (закон Бойля—Мариотта)	$A_T = \frac{mRT}{\mu} \times$ $\times \ln \frac{V_2}{V_1} =$ $= \frac{mRT}{\mu} \ln \frac{p_1}{p_2}$	$\delta U = 0$
Адиабатический	$m, \Delta Q = 0$	$pV^\gamma = \text{const},$ $\gamma = c_p/c_V$	$A_Q = \frac{mC_V}{\mu} \times$ $\times (T_1 - T_2)$	$\delta U = C_V \Delta T$

Примечания. 1) Индексы 1 и 2 у V , p и T указывают соответственно значения этих параметров в начальном и конечном состояниях; C_V — молярная теплоемкость при постоянном объеме.

2) При изотермическом расширении газа теплота расходуется на работу против внешних сил, при сжатии теплота передается во внешнюю среду.

Изотермы реального газа. Если плотность газа становится сравнимой с плотностью насыщенного пара при данной температуре, то уравнение состояния идеального газа для расчетов использовать нельзя.

Изотермы реального газа (рис. 2.3, а) отличаются от изотерм идеального газа, которые в координатах p — V изображаются гиперболой. На рис. 2.3, а приводятся типичные изотермы реального газа; их характерной особенностью является наличие горизон-

тальных участков A_1B_1 , A_2B_2 и т. д. Эти участки соответствуют равновесным состояниям между жидкостью и насыщенным паром, при этом одна часть объема занята жидкостью, другая — насыщенным паром.

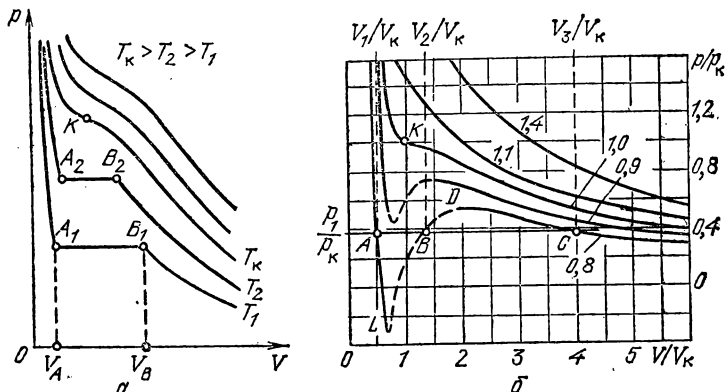


Рис. 2.3. Изотермы: а — реального газа (T_k — критическая температура, K — критическая точка); б — Ван-дер-Ваальса. По осям отложены относительные значения объема (V/V_k) и давления (p/p_k); числа у изотерм соответствуют температуре в относительных единицах (T/T_k)

В точках A_1, A_2, \dots различных изотерм весь объем V_A заполнен жидкостью, в точках B_1, B_2, \dots весь объем V_B заполняется насыщенным паром. Разность объемов жидкости и ее насыщенного пара (при одной и той же температуре) уменьшается с увеличением температуры. При температуре T_k , которая называется *критической*, разность $V_B - V_A$ становится равной нулю.

Уравнение Ван-дер-Ваальса. В реальном газе необходимо учитывать межмолекулярные силы (см. п. 6 этой главы). В уравнении состояния газа

$$\left(p + \frac{m^2}{\mu^2} \frac{a}{V^2}\right) \left(V - \frac{m}{\mu} b\right) = mRT/\mu, \quad (2.18)$$

которое называется *уравнением Ван-дер-Ваальса*, силы притяжения учитываются членом a/V^2 , а силы отталкивания — постоянной b . В (2.18) V — объем, занимаемый массой газа m , μ — молярная масса, a и b — *постоянные Ван-дар-Ваальса*, которые могут быть определены по критическим параметрам (для одного моля газа) — объему V_k , давлению p_k и температуре T_k :

$$a = 3p_k V_k^2, \quad b = V_k/3, \quad 8p_k V_k = 3RT_k.$$

В действительности постоянные a и b зависят от температуры.

Изотермы Ван-дер-Ваальса приведены на рис. 2.3, б. При температурах ниже T_k изотермы имеют S-образный изгиб; при этих

температурах одному значению давления p соответствуют три значения объема (например, давлению p_1 соответствуют объемы V_1, V_2, V_3). При температурах T_k и выше изотермы не имеют S-образного изгиба. Температура T_k является *критической температурой*; соответствующие этому состоянию давление p_k и объем V_k называются *критическим давлением* и *критическим объемом*.

В действительности на участке S-образного изгиба изотермы идут горизонтально, т. е. параллельно оси абсцисс; например, при давлении p_1 изотерма проходит через точки A, B, C . Эти участки соответствуют равновесию между жидкостью и насыщенным паром. При некоторых условиях изотерма может проходить по участкам AL (*перегретая жидкость*) и DC (*пересыщенный пар*), но такие состояния являются неустойчивыми.

Для сжижения газов посредством увеличения давления или уменьшения объема необходимо охладить их ниже критической температуры. В табл. 51 приводятся температуры кипения сжиженных газов. Уменьшая давление (например, откачивая образующиеся пары), можно понижать температуру кипения.

Влажность. В окружающем нас воздухе всегда находится некоторое количество водяного пара. Отношение массы находящегося в воздухе водяного пара к объему, который занимает воздух при данных условиях, называется *абсолютной влажностью*. Отношение массы насыщенного водяного пара к объему воздуха, в котором находится этот насыщенный пар, называется *максимальной абсолютной влажностью*.

Относительной влажностью воздуха называется отношение абсолютной влажности к максимальной абсолютной влажности при тех же условиях. Относительная влажность определяется в процентах.

Б. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА

В неравновесных системах происходят необратимые процессы — передача теплоты, массы, количества движения, которые называются *явлениями переноса*; к ним относятся теплопроводность, диффузия, внутреннее трение.

Тепловой поток. Теплота, которая передается через поверхность σ за 1 секунду, называется *тепловым потоком*. Передача теплоты тепловыми потоками называется *теплопроводностью*. Через поверхность площадью S за время Δt переносится количество теплоты (закон Фурье)

$$\Delta Q = -\lambda S \Delta t \Delta T / \Delta l, \quad (2.19)$$

где ΔT — разность температур между двумя точками, расстояние между которыми по направлению наибольшего изменения темпера-

туры равно Δl ; λ — *теплопроводность* — тепловой поток через плоскость площадью 1 м^2 при отношении $\Delta T/\Delta l$, равном 1 кельвин на метр, при этом предполагается, что плоскость расположена перпендикулярно направлению переноса тепла;

$$\lim_{\Delta l \rightarrow 0} (\Delta T/\Delta l) = dT/dl$$

является модулем вектора, который называется *градиентом температуры*. Градиент — величина векторная; единичный вектор градиента направлен перпендикулярно к поверхности в сторону увеличения температуры. Минус в формуле (2.19) указывает на то, что теплота переносится в сторону уменьшения температуры.

Диффузия. Процесс выравнивания плотностей двух или нескольких соприкасающихся веществ называется *диффузией*. Масса вещества, которая переносится при диффузии через поверхность соприкосновения, выражается соотношением (*закон Фика*)

$$\Delta M = -DS \Delta t \Delta \rho / \Delta l, \quad (2.20)$$

где $\Delta \rho / \Delta l$ — средний градиент плотности, равный отношению разности плотностей $\Delta \rho$ между двумя точками к расстоянию между ними Δl ; D — *коэффициент диффузии* — масса продиффундирующего вещества через поверхность площадью 1 м^2 за время 1 с при градиенте плотности, равном 1 кг/м^4 , при этом предполагается, что плоскость расположена перпендикулярно направлению переноса массы; величина

$$\lim_{\Delta l \rightarrow 0} (\Delta \rho / \Delta l) = d\rho/dl$$

является модулем вектора — *градиента плотности*. Минус в формуле (2.20) указывает на то, что перенос массы при диффузии происходит в сторону уменьшения плотности.

К явлениям переноса относится внутреннее трение; оно рассмотрено в гл. I, п. 6.

6. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

В основе молекулярно-кинетической теории лежит экспериментально доказанное утверждение, что все вещества состоят из *молекул* — наименьших частиц, сохраняющих все химические свойства вещества. Между молекулами действуют как силы притяжения, так и силы отталкивания; если первые препятствуют растяжению, то вторые препятствуют сжатию тела.

Процессы, которые изучаются в этой теории, определяются взаимодействием и характером движения большого количества молекул. Например, температура идеального газа определяется средней кинетической энергией (ϵ_p) хаотического поступательного движения

одной молекулы:

$$T = 2 \langle \varepsilon_0 \rangle / (3k), \quad (2.21)$$

где $k = \frac{R}{N_A}$ — постоянная Больцмана, N_A — постоянная Авогадро — число молекул в одном моле любого вещества (по определению); $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Межатомное и межмолекулярное взаимодействие. Взаимодействие между атомами и молекулами осуществляется электрическими силами; последние обусловлены электронами и ядрами атомов (см. гл. V).

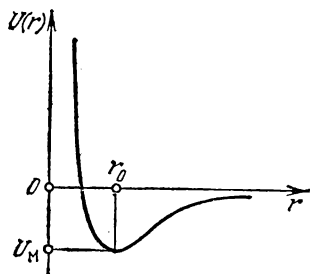


Рис. 2.4. Потенциальная кривая межатомного взаимодействия

Потенциальная энергия взаимодействия двух одинаковых атомов, образующих простейшие двухатомные молекулы (например, H_2 , O_2 , N_2 , Cl_2 и др.), представлена схематически на рис. 2.4 как функция расстояния r между ядрами атомов. Эта функция имеет глубокий минимум U_M при значениях $r=r_0$; на расстояниях $r < r_0$ происходит отталкивание, на расстояниях $r > r_0$ атомы притягиваются; расстояние $r=r_0$ соответствует устойчивому равновесию в расположении атомов в молекуле. Значения r_0 имеют порядок 10^{-8} см, $U_M = (4 \div 8)$ эВ.

Межмолекулярное взаимодействие (часто называемое *ван-дер-ваальсовским*) можно в первом приближении изобразить потенциальными кривыми, которые аналогичны кривым межатомного взаимодействия; однако глубина потенциальной ямы для кривой межмолекулярного взаимодействия значительно меньше и составляет $(0,1 \div 0,01)$ эВ.

Кинетическая теория идеальных газов. В молекулярно-кинетической теории газа используется модель идеального газа, которая должна удовлетворять следующим условиям: собственный объем молекул мал по сравнению с объемом сосуда, в котором находится газ; между молекулами отсутствуют силы взаимодействия; соударения молекул между собой и со стенками сосуда абсолютно упругие; молекулы движутся хаотически с различными скоростями.

В равных объемах идеальных газов при одинаковых давлении и температуре содержится одинаковое количество молекул (*закон Авогадро*). Средний путь, проходимый молекулами между двумя ближайшими соударениями, называется *средней длиной свободного пробега*. Средняя длина свободного пробега в идеальном газе:

$$l = kT / (\sqrt{2} \pi \sigma^2 p), \quad (2.22)$$

где k — постоянная Больцмана, σ — диаметр молекул, T — температура, p — давление.

Закол распределения молекул по скоростям называется *функцией распределения*. Функция распределения молекул по скоростям идеального газа (*распределение Максвелла*) представлена на рис. 2.5;

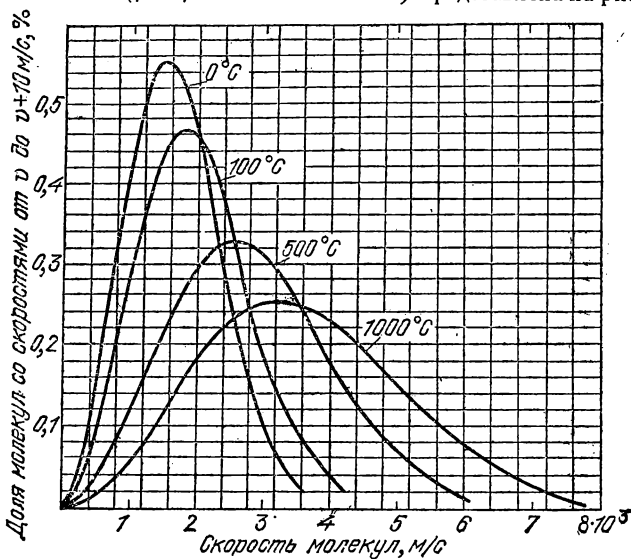


Рис. 2.5. Распределение молекул водорода по скоростям для различных температур

на оси ординат указано относительное количество молекул ($\Delta n/n$), которые имеют скорости в пределах от v до $v + \Delta v$; на другой оси отложены значения скоростей.

Скорость, соответствующая максимуму на рис. 2.5, называется *наиболее вероятной скоростью* v_B .

Средняя скорость молекул

$$v_{\text{ср}} = \sum_i |v_i|/n, \quad (2.23)$$

где $|v_i|$ — модули скоростей молекул, n — количество молекул.

Средняя квадратичная скорость

$$v_k = \sqrt{\sum_i v_i^2/n}.$$

Из распределения Максвелла получаются следующие выражения для расчета скоростей:

$$\begin{aligned} v_{\text{ср}} &= \sqrt{8kT/(\pi m)} = \sqrt{8RT/(\pi \mu)}, \\ v_k &= \sqrt{3kT/m} = \sqrt{3RT/\mu}, \\ v_B &= \sqrt{2kT/m} = \sqrt{2RT/\mu}, \end{aligned} \quad (2.24)$$

где m — масса молекулы, μ — молярная масса. Из (2.24) следует, что $v_k > v_{\text{ср}} > v_b$.

Давление газа обусловлено ударами отдельных молекул о стенки сосуда; оно рассчитывается по формуле

$$p = \frac{1}{3} n m v_k^2 = nkT, \quad (2.25)$$

где n — концентрация молекул (количество молекул в одном кубическом метре).

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов:

$$pV = \frac{2}{3} E = \frac{1}{3} M v_k^2, \quad (2.26)$$

где E — суммарная кинетическая энергия поступательного движения всех молекул в объеме V , M — масса газа.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы идеального газа зависит только от температуры:

$$\epsilon_0 = \frac{3}{2} kT. \quad (2.27)$$

Кинетическая энергия молекул одного моля идеального газа

$$E_\mu = \frac{3}{2} RT. \quad (2.28)$$

Молекулы, которые обладают скоростями, большими скорости освобождения (см. гл. I, п. 1), могут покинуть верхние слои атмосферы и уйти в мировое пространство.

Барометрическая формула. Атмосфера представляет собой смесь газов, находящихся в поле тяготения планеты, которую она окружает. Давление атмосферы падает с увеличением расстояния h от поверхности планеты. Если принять, что температура атмосферы не зависит от высоты, то

$$p = p_0 e^{-\mu gh/(RT)}, \quad (2.29)$$

где μ — средняя молярная масса смеси газов, составляющих атмосферу, g — ускорение свободного падения вблизи поверхности планеты, R — молярная газовая постоянная, T — температура, p_0 — давление атмосферы у поверхности планеты, e — основание натуральных логарифмов ($e \approx 2,72$). Соотношение (2.29) называется *барометрической формулой*.

Для атмосферы Земли барометрическая формула может быть представлена в следующем виде:

$$h \approx 18400 T \lg(p_0/p)/T_0,$$

где h — высота (в метрах), $T_0 = 273,15$ К.

Теплопроводность, вязкость, коэффициент диффузии идеального газа. Эти величины (λ , η , D) вычисляются по формулам:

$$\lambda = \rho v_{\text{ср}} l c_V / 3, \quad \eta = \rho v_{\text{ср}} l / 3, \quad D = v_{\text{ср}} l / 3, \quad (2.30)$$

где ρ — плотность газа, $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость теплового движения молекул газа, c_V — удельная теплоемкость при постоянном объеме, l — средняя длина свободного пробега молекул.

Вакуум. Если длина свободного пробега молекул становится больше размеров сосуда, в котором находится газ, то такое состояние газа называется *вакуумом*.

В вакууме при движении двух пластин параллельно друг другу с относительной скоростью Δv возникает сила трения $F_{\text{в}}$; также осуществляется перенос тепла (*теплопередача*) $Q_{\text{в}}$ между поверхностями, которые имеют разности температур $\Delta T t$

$$F_{\text{в}} = \eta_{\text{в}} S \Delta v, \quad Q_{\text{в}} = \lambda_{\text{в}} S \Delta T t, \quad (2.31)$$

где $\eta_{\text{в}} = \rho v_{\text{ср}} / 6$, $\lambda_{\text{в}} = \rho v_{\text{ср}} c_V / 6$, S — площадь пластины или поверхности, t — время, ρ — плотность, c_V — удельная теплоемкость, $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость.

Молекулярное движение в жидкостях. Молекулы в жидкостях вдали от критической температуры совершают колебания около временных положений равновесия со средним периодом колебаний τ_0 ; положения равновесия соответствуют приблизительно расстояниям r_0 потенциальной кривой (см. рис. 2.4).

В среднем за время «оседлой жизни» $\tau > \tau_0$ центр колебаний смещается на межатомное расстояние.

На молекулы, находящиеся на поверхности жидкости, со стороны остальных молекул действуют силы, направленные внутрь жидкости.

Поверхностный слой молекул находится в состоянии, напоминающем растянутую пленку, стремящуюся сократить свою поверхность. На любой участок свободной поверхности прилегающие участки поверхности действуют с силой, стремящейся удержать этот участок в растянутом состоянии. Эти силы направлены вдоль поверхностного слоя и называются *силами поверхностного натяжения*.

Сила поверхностного натяжения

$$F = \alpha l, \quad (2.32)$$

где l — длина контура свободной поверхности жидкости, α — *поверхностное натяжение* — поверхностная сила, приложенная к участку контура длиной l м и действующая нормально к контуру по касательной к свободной поверхности.

Поверхностное натяжение уменьшается с увеличением температуры и обращается в нуль при критической температуре.

Кристаллическая структура (кристаллы). Твердые тела разделяются на два вида — аморфные и кристаллические.

Аморфные тела сохраняют свою форму (например, стекло, смолы, пластмассы), но по другим свойствам они подобны жидкостям с очень большой вязкостью, которая уменьшается с увеличением температуры; поэтому при увеличении температуры аморфные тела постепенно размягчаются и становятся обычными жидкостями. У кристаллических тел переход в жидкое состояние происходит скачком при определенной температуре плавления.

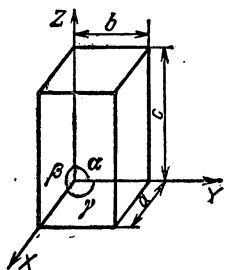


Рис. 2.6. Параметры элементарной ячейки

частицы совершают колебания относительно положения равновесия.

Кристаллическую решетку кристалла можно получить переносом элементарной ячейки в трех направлениях. Геометрическая форма элементарной ячейки определяется тремя ребрами a , b , c и тремя углами между ними α , β , γ (см. рис. 2.6); имеется 14 типов таких решеток (рис. 2.7).

Вещества, состоящие из множества хаотически ориентированных малых кристаллов, называются *поликристаллическими*.

Некоторые вещества в определенном интервале температур могут находиться в своеобразном состоянии, которое называется *жидкокристаллическим*. В обычной жидкости расположение молекул и их взаимная ориентация совершенно хаотичны. В жидком кристалле в отдельных областях или слоях имеет место упорядоченность в ориентации молекул. В обычных условиях жидкий кристалл представляет собой как бы поликристалл, состоящий из жидких кристаллов, ориентированных хаотически. В магнитных и электрических полях или посредством других воздействий можно получить жидкий «монокристалл».

Вещество, имеющее жидкокристаллическую фазу, имеет также и обычную жидкую изотропную, а также твердокристаллическую фазы.

Плазма. Газ, атомы и молекулы которого в значительной мере ионизованы (см. гл. III, п. 2), называется *плазмой*. Вещество при температурах 10^4 К и выше является плазмой. Однако не всякий ионизованный газ является плазмой; ионизованный газ называется плазмой, если величина $\delta = kT / (4\pi ne^2)$ значительно меньше размеров сосуда, в котором находится газ (n — концентрация заряженных

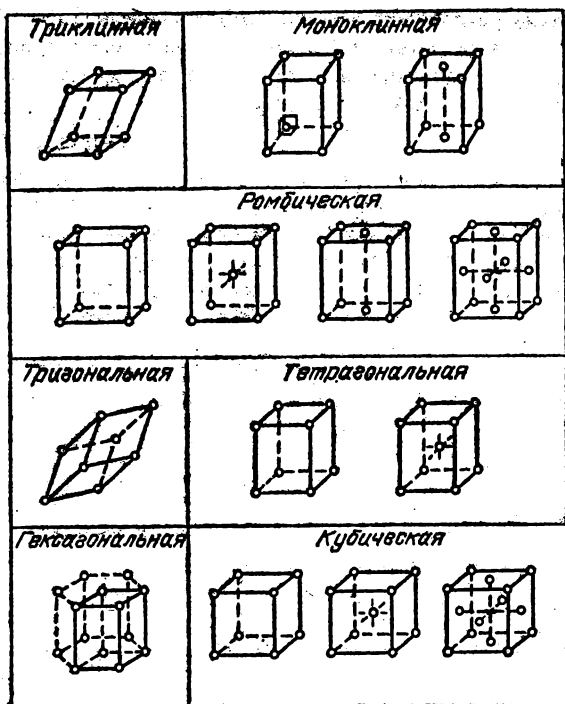


Рис. 2.7. Типы элементарных кристаллических решеток

частиц в плазме, e — заряд одного иона, T — температура, k — постоянная Больцмана). Зависимость δ от температуры представлена на рис. 2.8.

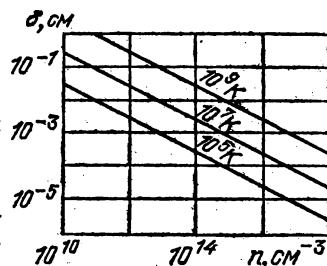
Коэффициент диффузии ионов в плазме определяется так же, как и для идеальных газов, т. е. соотношением

$$D = v_i \lambda_i / 3, \quad (2.33)$$

где v_i и λ_i — средняя скорость и средняя длина свободного пробега ионов.

Главную роль в переносе теплоты в плазме играют электроны; теплопроводность плазмы

$$\lambda_T = 1,24 \cdot 10^{-11} T^{5/2} \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}). \quad (2.34)$$

Рис. 2.8. Зависимость величины δ от плотности для различных температур

Например, при $T \approx 10^8$ К теплопроводность водородной плазмы больше теплопроводности серебра при комнатной температуре.

Полимеры. *Полимерами* называются вещества, молекулы которых состоят из большого числа атомов (или групп атомов), образующих длинные цепи (*полимерные цепи*). Полимерные цепи называются *макромолекулами*. Исходное вещество, из которого образуются полимерные цепи, называется *мономером*. Например, из мономера этилена образуется полимер — полиэтилен. Число звеньев в полимерной цепи называется *степенью полимеризации*. Степень полимеризации может изменяться в пределах от нескольких единиц до 10 000 и больше; относительные молекулярные массы полимеров имеют значения $10^4 + 10^6$ (см. п. 1 этой главы).

Полимеры состоят из кристаллических и аморфных областей; отношение объема кристаллических областей к объему всего образца называется *степенью кристалличности*. Степень кристалличности зависит от способа получения полимера. Например, в полиэтилене высокой плотности ($\rho = 0,919 + 0,973$ г/см³) степень кристалличности изменяется в пределах 60 ÷ 90 %, в полиэтилене низкой плотности ($\rho = 0,913 + 0,934$ г/см³) в пределах 40 ÷ 60 %.

У полимеров нет определенной температуры плавления. Например, натуральный каучук кристаллизуется в температурном интервале от -25 до 45 °С. Однако при медленной кристаллизации (и плавлении) полимеров с высокой степенью кристалличности можно получить равновесную температуру плавления. Например, температура плавления у полиэтилена находится в интервале температур $102 + 137$ °С, у полипропилена $160 + 170$ °С, у фторопласта — $4 + 327$ °С.

Аморфные полимеры с линейными цепочками молекул могут находиться в трех состояниях: стеклообразном, высокоэластическом и вязкоупругом. В *стеклообразном состоянии* совершаются колебания атомов, образующих полимерную цепь; в *высокоэластическом состоянии* происходят (наряду с колебаниями атомов) крутильные колебания отдельных звеньев, вследствие чего полимерная цепь может изгибаться.

Вязкоупругое состояние характеризуется подвижностью микромолекулы (полимерной цепи) в целом. Переход из одного состояния в другое происходит в некотором диапазоне температур. *Температурой стеклования* называется средняя температура перехода из стеклообразного в высокоэластическое состояние; средняя температура перехода из высокоэластического состояния в вязкотекучее называется *температурой текучести*. Отношение $T_{пл}/T_c = 1,5$ для несимметричных цепей; $T_{пл}/T_c = 2$ для симметричных цепей ($T_{пл}$ — температура плавления, T_c — температура стеклования).

ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Таблица 40. Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ-68)

Равновесие двух фаз, где это не оговорено особо, предполагается при нормальном атмосферном давлении (1 атм = 101 325 Па).

Состояние равновесия	Присвоенные значения температуры	
	К	t, °C
Тройная точка равновесного водорода	13,81	-259,34
Равновесие между жидкой и газообразной фазами водорода при давлении 3333,05 Па	17,042	-256,108
Равновесие между жидкой и газообразной фазами водорода	20,28	-252,87
Равновесие между жидкой и газообразной фазами неона	27,102	-246,048
Тройная точка кислорода	54,361	-218,789
Равновесие между жидкой и газообразной фазами кислорода	90,188	-182,962
Тройная точка воды	273,16	0,01
Равновесие между жидкой и парообразной фазами воды	373,15	100
Равновесие между твердой и жидкой фазами цинка	692,73	419,58
Равновесие между твердой и жидкой фазами серебра	1235,08	961,93
Равновесие между твердой и жидкой фазами золота	1337,58	1064,43

Примечание. Положение о МПТШ-68 принято Международным комитетом мер и весов в 1968 г.

Таблица 41. Тепловой баланс Земли

Компоненты теплового баланса	Плотность теплового потока, МДж/(м ² ·год)
Общий поток, поглощаемый Землей В том числе:	17034
поглощение поверхностью Земли	4689
поглощение атмосферой	2345
Потери поверхностью Земли:	
через длинноволновое излучение	1675
на испарение	2470
передача энергии в атмосферу (турбулентная теплоотдача)	544

Таблица 42. Удельные теплоемкости c_p , теплоты плавления λ , теплоты парообразования r , температуры плавления $t_{пл}$ и кипения $t_{кп}$

Вещество	c_p , кДж/(кг·К) при 20 °С	$t_{пл}$, °С	λ , кДж/кг	$t_{кп}$, °С	r , кДж/кг
Алюминий	0,88	658,3	322—394	2300	9220
Ацетон	2,18	-94,3	96	56,2	524
Бензол	1,705	5,5	127	80,2	396
Висмут	0,13	271	50	1560	855
Германий	0,31	958	478	2700	—
Глицерин	2,4	—	176	290	825
Дерево:					
дуб 6—8% вес. влажн.	2,4	—	—	—	—
сосна 8% вес. влажн.	1,7	—	—	—	—
Железо	0,45	1530	293	3050	6300
Золото	0,13	1064,4	66,6	2800	1578
Калий	0,763	64	60,8	760	2080
Латунь	0,38	900	—	—	—
Лед (вода)	4,19	0	334	100	2260
Литий	4,40	186	628	1317	20 500
Магний	1,3	651	373	1103	5450
Медь	0,39	1083	214	2360	5410
Натрий	1,3	98	113	883	4220
Нафталин	1,3	80,3	151	218	316
Никель	0,46	1452	243—306	3000	7210
Олово	0,23	231,9	59	2270	3020
Ртуть	0,138	-38,9	11,73	356,7	285
Свинец	0,13	327,3	22,5	1750	880
Серебро	0,235	961,9	88	2184	2350
Сероуглерод	1,006	-112	66,6	46,2	348
Спирт этиловый	2,43	-114	105	78,3	846
Сплав Вуда	0,17	65,5	35	—	—
Сталь	0,46	1300—1400	205	—	—
Толуол	1,73	-95,1	72,1	110,7	365
Фторопласт-4	0,92—1,05	—	—	—	—
Чугун	0,50	1100—1200	96—138	—	—
Эфир этиловый	2,35	-116,3	113	34,6	351

Таблица 43. Относительное изменение объема при плавлении

Вещество	$\Delta V/V$, %	Вещество	$\Delta V/V$, %
Алюминий	6,6	Олово	2,6
Висмут	-3,32	Ртуть	3,6
Галлий	-3	Свинец	3,6
Золото	5,19	Серебро	4,99
Индий	2,5	Сплавы алюминия (Cu, Mg, Mn)	4,5—5,9
Кадмий	4,74	Сталь углеродистая	4,5—6,0
Калий	2,41	Сурьма	-0,94
Лед (вода)	-8,3	Цезий	2,6
Литий	1,5	Цинк	6,9
Магний	4,2	Чугун серый	2,4—3,6
Медь (бронза, латунь)	3,0—4,5		
Натрий	2,5		

Таблица 44. Температура плавления тугоплавких материалов

Вещество	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$
Карбиды тантала и циркония	3500—3900
Вольфрам	3416
Оксиды циркония и гафния	3000—3200
Тантал	2950
Ниобий	2415
Цирконий	1860
Титан	1725

Теплоемкость воды

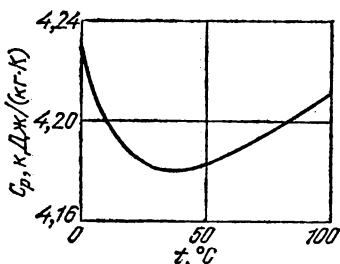


Рис. 2.9. Удельная теплоемкость воды при различных температурах

Таблица 45. Удельная теплоемкость при низких температурах (Дж/(кг·К))

Вещество	Температура, К							
	20 (кипе- ние H_2)	50	77 (кипе- ние N_2)	90 (кипе- ние O_2)	100	150	200	298
Алюминий	10,3	144	349	426	485	686	800	900
Железо	4,6	54	147	189	221	332	393	447
Медь	7,9	98	202	237	260	331	366	396
Никель	5,0	68,6	168	209	238	336	392	445
Плавленый кварц	25,7	115	201	244	274	420	540	740
Сталь (нерж.)	4,6	67	163	214	244	364	424	477
Фторопласт-4	77,6	210	316	364	399	553	695	1120

Примечание. В интервале температур от 0 до 300 $^\circ\text{C}$ средняя теплоемкость меди равна 410 Дж/(кг·К), плавленого кварца — 860 Дж/(кг·К).

Таблица 46. Температура стеклования, плотность и степень кристалличности полимеров

Полимер	Температура стеклования, К	Плотность аморфной фазы	Плотность кристаллической фазы	Степень кристалличности, %
Каучук натуральный	201	0,91	0,92	15
Поливиниловый спирт	354	1,26	1,35	30
Полиакрилонитрил	363	1,14	1,17	80
Полиметилметакрилат (плексиглас)	378	1,17	1,23	10
Поливинилденхлорид	254	1,66	1,95	25
Поливинилхлорид	358	1,39	1,52	15
Полипропилен	253	0,85	0,95	55
Полистирол	358	1,05	1,13	
Политетрафторэтилен (фторопласт-4)	153	1,0	2,35	90
Полиэтилен	192	0,86	1,0	40—90

Примечания. 1. Степень кристалличности определяется различными методами с большой погрешностью; кроме того, она зависит от способа получения образца.

2. Наименьшая степень кристалличности у полиэтилена относится к полиэтилену низкого давления, наибольшая — к полиэтилену высокого давления.

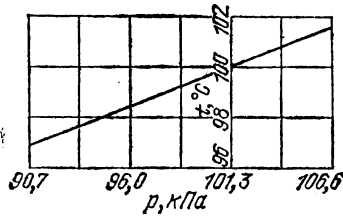
Таблица 47. Удельная теплоемкость газов при нормальном давлении (c_p , кДж/(кг·К))

Температура, °С	Кислород		Воздух		Углекислый газ		Водяной пар		Пары этилового спирта	
	c_p	γ	c_p	γ	c_p	γ	c_p	γ	c_p	γ
0	0,9149	1,397	1,006	1,400	0,8148	1,301	—	—	1,341	1,16
100	0,934	1,385	1,010	1,397	0,9136	1,260	1,103	1,28	1,689	1,12
200	0,964	1,37	1,027	1,390	0,9927	1,235	1,978	1,30	2,011	1,10
300	0,9948	1,353	1,048	1,378	1,057	1,217	2,015	1,29	2,321	1,08
600	1,069	1,321	1,115	1,345	1,192	1,188	2,208	1,26	3,168	1,06

Таблица 48. Удельная теплота парообразования

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$r, \text{ кДж/кг}$
Бензин	50—120	230—314
Воздух (20% O_2)	20	213
Глицерин	100	828
Керосин	160—230	210—230
Кислота азотная	20	482
Кислота серная	20	512
Нафталин	220	316
Фреон-11 (CFCl_3)	0	189
Фреон-12 (CF_2Cl_2)	0	155
Хлороформ	61,2	247

Температура кипения воды

Рис. 2.10. Зависимость температуры кипения воды (H_2O) от атмосферного давленияТаблица 49. Удельная теплота парообразования при различных температурах (r , кДж/кг)

t , °C	Спирты			Этиловый эфир	Уксусная кислота	Бензол
	метиловый	этиловый	пропиловый			
0	1220	927	—	388	—	—
20	1190	925	—	367	352	—
40	1160	920	—	347	365	—
60	1130	894	—	329	376	—
80	1090	866	726	308	384	401
100	1030	827	688	287	387	383
120	974	773	642	261	396	363
140	906	717	598	234	385	347
160	831	658	541	193	376	331
180	743	584	488	134	368	313
200	688	487	429	—	358	288
220	472	370	358	—	344	261
240	—	169	266	—	328	227
260	—	—	141	—	303	184
280	—	—	—	—	266	115

Таблица 50. Удельная теплота парообразования углекислоты при различных температурах

t , °C	r , кДж/кг	t , °C	r , кДж/кг
-50	338	0	237
-40	320	20	155
-30	304	30	63
-10	262	31,1	0,0

Таблица 51. Термические свойства сжиженных газов

Сжиженный газ	$T_{пл}$, К	λ , Дж/моль	$T_{кп}$, К	r , Дж/моль
Азот	63,2	713	77,3	5530
Аргон	83,8	1180	87,3	6610
Водород	14,0	117	20,4	944
Воздух	60	—	81	6080
Гелий	—	14	4,2	93,8
Кислород	54,4	445	90,2	6840
Неон	24,6	366	27,1	1770
Углекислый газ	216,4 (при 0,505 МПа)	7950	194,7 (сублимация)	16500
Фтор	55,2	1520	85,2	6460

Примечание. Молярная теплота плавления λ соответствует температуре плавления $T_{пл}$ в тройной точке, теплота парообразования r — температуре кипения $T_{кп}$ при нормальном давлении.

Таблица 52. Плотность, температура отвердевания и температура кипения водного раствора поваренной соли при различных концентрациях и нормальном давлении

Плотность раствора при 20 °С, $10^3 \cdot \text{кг/м}^3$	Концентрация NaCl, 1 кг на 100 кг воды	Температура отвердевания, °С	Температура кипения, °С
1,009	1,5	-0,9	100,2
1,02	3,0	-1,8	100,4
1,05	7,5	-4,4	101,2
1,10	15,7	-9,8	102,7
1,15	25,0	-16,0	104,9
1,17	30,1	-21,2	106,2

Таблица 53. Максимальные температуры кипения водных растворов солей при нормальном давлении

Вещество	Концентрация 1 кг на 100 кг воды при температуре кипения	t , °С
Ва (NO ₃) ₂	27,5	101,7
CaCl ₂	305	178
CuSO ₄	82,2	104,2
KI	220	185
LiCl	151	168
NaCl	40,7	108,8
NaNO ₃	222	120

Примечание. Даны такие концентрации, при которых температуры кипения растворов являются максимальными.

Таблица 54. Свойства обычной и тяжелой воды

	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	$t_{м}, ^\circ\text{C}$	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	Критическая температура, $^\circ\text{C}$	Критическое давление, МПа	Плотность в крит. состоянии, 10^3 кг/м^3	Наибольшая плотность, 10^3 кг/м^3
Вода обычная	0	3,98	100	374,15	22,11	0,315	1
Вода тяжелая	3,82	11,23	101,43	371,5	21,8	0,338	1,106

Примечания. 1. При температуре $t_{м}$ плотность имеет наибольшее значение. 2. Тяжелая вода (D_2O) — оксид дейтерия, который является изотопом водорода (см. табл. 142).

Таблица 55. Критические параметры

Вещество	$t_{к}, ^\circ\text{C}$	$p_{к}, \text{МПа}$	$\rho_{к}, 10^3 \text{ кг/м}^3$
Азот	-147,1	3,39	0,311
Ацетон	235	4,76	0,268
Бензол	288,6	4,83	0,304
Вода	374,15	22,11	0,315
Водород	-239,9	1,3	0,031
Гелий	-267,9	0,2	0,069
Кислород	-118,8	5,03	0,430
Кислота уксусная	321,6	5,79	0,351
Метан	-82,5	4,64	0,162
Нафталин	468,2	3,97	—
Спирт метиловый	240	7,97	0,272
» пропиловый	263,7	5,07	0,273
» этиловый	243,1	6,38	0,276
Толуол	320,6	4,21	0,292
Углекислота	31,1	7,39	0,460

Таблица 56. Температура и давление тройных точек

Вещество	T, K	$p, \text{кПа}$	Вещество	T, K	$p, \text{кПа}$
Азот	63,14	12,53	Вода	273,16	0,61
Кислород	54,361	0,15	Аммиак	195,5	6,06
Неон	24,56	43,1	Углекислота	216,56	518
Водород	13,81	7,04	Бензойная кислота	395,51	—

Таблица 57. Температурный коэффициент объема жидкостей (для температуры около 18 °С)

Вещество	$10^{-4} \beta, \text{K}^{-1}$	Вещество	$10^{-4} \beta, \text{K}^{-1}$
Анилин	8,5	Нефть	9,2
Ацетон	14,3	Ртуть	1,8
Бензол	10,6	Сероуглерод	11,9
Вода при (5—10) °С	0,53	Скипидар	9,4
» (10—20) °С	1,50	Спирт метиловый	11,9
» (20—40) °С	3,02	» пропиловый	9,8
» (40—60) °С	4,58	» этиловый	11,0
» (60—80) °С	5,87	Толуол	10,8
Глицерин	5,0	Хлороформ	12,8
Керосин	10,0	Эфир этиловый	16,3
Кислота азотная	12,4		

Таблица 58. Свойства насыщенного водяного пара

Давление, 10 ⁵ Па	Температура <i>t</i> , °С	Удельный объем, м ³ /кг	Удельная теплота паро- образования, кДж/кг
0,0059	0	207	2500
0,0196	17,2	63,3	2457
0,098	45,4	14,96	2388
0,196	59,7	7,8	2360
0,392	75,4	4,071	2322
0,588	85,45	2,785	2297
0,784	93,0	2,127	2278
0,88	96,2	1,905	2269
0,98	99,1	1,726	2262
1,013	100	1,674	2260
1,209	105	1,42	2242
1,76	116,3	0,996	2215
1,96	119,6	0,902	2206
2,94	132,9	0,617	2168
3,92	142,9	0,4708	2137
4,90	151,1	0,3818	2111
5,88	158,1	0,3214	2088
6,86	164,2	0,2778	2067
7,84	169,6	0,2448	2048
8,82	174,5	0,2189	2031
9,8	179,0	0,1980	2014
11,8	187,1	0,1663	1984
13,7	194,1	0,1434	1956
15,7	200,4	0,1261	1930
17,6	206,2	0,1125	1907
19,6	211,4	0,1015	1882
29,4	232,8	0,0679	1790
39,2	249,2	0,0506	1712
55,0	270	0,0356	1605
74,4	290	0,0255	1480
99	310	0,0183	1320
128	330	0,0130	1140
166	350	0,00881	893
211	370	0,00493	440
220,6	374	0,00347	113
221,1	374,15	0,00317	0

Таблица 59. Температурный коэффициент длины α твердых изотропных тел
(для температуры около 20 °C)

Вещество	$10^{-6} \alpha, \text{K}^{-1}$	Вещество	$10^{-6} \alpha, \text{K}^{-1}$
Алмаз	0,91	Магний	25,1
Алюминий	22,9	Медь	16,7
Бронза	17,5	Нейзильбер	18,4
Винипласт	70	Никель	13,4
Висмут	13,4	Олово	21,4
Вольфрам	4,3	Платина	8,9
Графит	8,3	Платино-иридиевый сплав (10 % Ir)	8,7
Дерево (вдоль волокон)	2—6	Свинец	28,3
Дерево (поперек волокон)	50—60	Сталь углеродистая	11,1—12,6
Дюралюминий	22,6	Сталь нержавеющая	9,6—16,0
Железо кованое	11,9	Стекло химическое	9
» литое	10,2	посудное (№ 23)	
Золото	14,5	» пирекс	3,0
Инвар (36,1 % никеля)	0,9	» кварцевое	0,26
Иридий	6,5	Углерод (графит)	7,9
Кварц (плавленый)	0,5	Фарфор	3,0
Кирпичная стена	~5,5	Цемент и бетон	12,0
Константан	17,0	Цинк	30,0
Латунь	18,9	Чугун	10—12
Лед (от -10° до 0 °C)	50,7	Эбонит	70

Таблица 60. Температурный коэффициент длины при различных температурах ($\alpha, 10^{-6} \text{K}^{-1}$)

Материал	Температура, К				
	0	40	100	200	300
Алюминий	0	1	11	19,5	23
Медь	0	1	9,5	15	17,5
Сталь малоуглеродистая	0	0,5	5	10	11,5
Сталь нержавеющая	0	-0,2	8	13,5	16
Титан	0	0,5	4	7	8,5
Фторопласт-4	0	35	55	95	282
Стекло (пирекс)	0	-0,5	1,6	2,5	3,2

Таблица 61. Поверхностное натяжение воды и этилового спирта при различных температурах ($\alpha, \text{мН/м}$)

Вещество	Температура, °C										
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	300	370
Вода	75,6	71,18	66,18	60,75	54,9	48,63	42,25	35,4	28,57	14,40	0,47
Спирт этиловый	24,4	21,9	19,2	16,4	13,4	10,1	6,7	3,3	0,1	—	—

Таблица 62. Поверхностное натяжение жидкостей (при 20 °С)

Вещество	α , мН/м	Вещество	α , мН/м
Азотная кислота	59,4	Нефть	26
Анилин	42,9	Нитробензол	43,9
Ацетон	23,7	Серная кислота	57,4
Бензол	29,0	Спирт метиловый	22,6
Вода	72,8	» пропиловый	23,8
Глицерин	59,4	» этиловый	22,8
Керосин	28,9 (0 °С)	Толуол	28,5
Масло касторовое	36,4 (18 °С)	Уксусная кислота	27,8
» оливковое	33,06 (18 °С)	Эфир этиловый	16,9

Таблица 63. Поверхностное натяжение металлов в жидком состоянии

Металл	t , °С	α , мН/м	Металл	t , °С	α , мН/м
Алюминий	750	520	Ртуть	20	465
				112	454
				200	436
				300	405
Висмут	400	370		300	405
				500	363
				354	394
Калий (в атм. CO ₂)	64	410	Свинец	350	442
Натрий	100	206,4		450	438
	250	199,5		500	431
Олово	300	526			
	400	518			
	500	510			

Таблица 64. Теплопроводность асбеста и пенобетона при различных температурах, Вт/(м·К)

Материал	Температура, °С				
	-18	0	50	100	150
Асбест	—	0,15	0,18	0,195	0,20
Пенобетон	0,1	0,11	0,11	0,13	0,17

Примечание. Плотность асбеста ρ_1 576 кг/м³, пенобетона — 400 кг/м³.

Таблица 65. Теплопроводность материалов

Вещество	Влажность, %	λ , Вт/(м·К)
<i>Металлы</i>		
Алюминий	—	209,3
Железо	—	74,4
Золото	—	312,8
Латунь	—	85,5
Медь	—	389,6
Ртуть	—	29,1
Серебро	—	418,7
Сталь	—	45,4
Чугун	—	62,8
<i>Термоизоляционные материалы</i>		
Асбестовая бумага	Воздушно-сухая	0,177—0,134
Асбестовый картон	Воздушно-сухой	0,157
Вата стеклянная	—	0,035—0,081
Войлок асбестовый	Воздушно-сухой	0,052—0,093
» шерстяной	»	0,047—0,058
Газостекло (пеностекло)	Воздушно-сухое	0,073—0,107
Камышит (плиты)	Воздушно-сухой	0,105
Пенобетон	Воздушно-сухой	0,07—0,32
Пенопласты	Воздушно-сухие	0,043—0,058
Торфоплиты	—	0,047—0,07
Шлак котельный	Воздушно-сухой	0,233—0,372
<i>Другие материалы</i>		
Бетон с каменным щебнем	8	1,28
Бумага	Воздушно-сухая	0,14
Винилпласт	—	0,13
Гравий	Воздушно-сухой	0,36
Гранит	—	3,14
Глина	15—20	0,7—0,93
Дуб (вдоль волокон)	6—8	0,35—0,43
» (поперек волокон)	6—8	0,2—0,21
Железобетон	8	1,55
Картон	Воздушно-сухой	0,14—0,35
Кирпичная кладка	Воздушно-сухая	0,67—0,87
Кожа	»	0,14—0,16
Лед	—	2,21
Пробковые плиты	0	0,042—0,054
Снег свежесыпавший	—	0,105
» уплотненный	—	0,35
» при 0 °С	—	0,64
Сосна (вдоль волокон)	8	0,35—0,41
» (поперек волокон)	8	0,14—0,16
Стекло (обыкновенное)	—	0,7—0,8
Фторопласт-4	—	0,233
Цементно-песчаный раствор	—	1,1—1,2
Шлакобетон	13	0,698
Штукатурка (известковая)	6—8	0,8—0,9

Т а б л и ц а 66. Теплопроводность жидкостей по кривой испарения, Вт/(м·К)

Вещество	Температура, °С			Вещество	Температура, °С		
	0	50	100		0	50	100
Анилин	0,19	0,177	0,167	Масло вазелиновое	0,126	0,122	0,119
Ацетон	0,17	0,16	0,15				
Бензол	—	0,138	0,126	» касторовое	0,184	0,177	0,172
Вода	0,651	0,648	0,683	Спирт метиловый	0,214	0,207	—
Глицерин	—	0,283	0,288	» этиловый	0,188	0,177	—
				Толуол	0,142	0,129	0,119

Т а б л и ц а 67. Теплопроводность газов при нормальном давлении

Вещество	Температура, °С	λ , 10^{-4} Вт/(м·К)
Азот	15	251
Аргон	41	187
Водород	15	1754
Воздух	20	257
Гелий	43	1558
Кислород	20	262
Метан	0	307
Углекислый газ	20	162

Т а б л и ц а 68. Температурный коэффициент давления газов

Газ	Азот	Аммиак	Водород	Воздух	Гелий	Кислород	Углекислый газ
α , 10^{-3} К $^{-1}$	3,674	3,802	3,662	3,674	3,660	3,674	3,726

Т а б л и ц а 69. Коэффициент диффузии газов и паров в воздухе (при 0 °С и нормальном давлении)

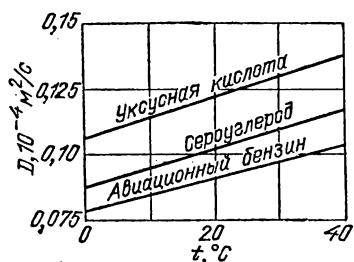


Рис. 2.11. Зависимость коэффициента диффузии газов в воздухе от температуры

Газ	D , 10^{-4} м 2 /с
Аммиак	0,2
Ацетилен	0,19
Бензин авиационный	0,079
Водород	0,64
Водяной пар	0,21
Кислород	0,18
Кислота уксусная	0,107
Метан	0,2
Метиловый спирт	0,13
Сероуглерод	0,09
Углекислый газ	0,14
Этиловый спирт	0,10
Этиловый эфир	0,08

Таблица 70. Стандартная атмосфера

Высота, м	p/p_0	ρ/ρ_0	$t, ^\circ\text{C}$	Высота, м	p/p_0	ρ/ρ_0	$t, ^\circ\text{C}$
0	1	1	15	6000	0,465	0,538	-24
1000	0,887	0,907	8,5	7000	0,405	0,481	-30,5
2000	0,784	0,822	2	8000	0,351	0,428	-37
3000	0,692	0,742	-4,5	9000	0,303	0,381	-43,5
4000	0,608	0,669	-11	10 000	0,261	0,337	-50
5000	0,533	0,601	-17,5	—	—	—	—

Примечание. Значения давления p и плотности ρ даны в относительных единицах p/p_0 , ρ/ρ_0 ; p_0 и ρ_0 —давление и плотность на уровне моря при температуре 15°C .

Таблица 71. Коэффициент диффузии водных растворов

Растворимое вещество	$t, ^\circ\text{C}$	Концентрация, моль/л	$D, 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$
Аммиак	12	1,0	1,64
	4	3,55	1,23
Глицерин	10	0,125	0,63
		0,875	0,40
		1,75	0,35
Калий хлористый	25	0,02	1,95
	18,5	1,0	1,61
		2,0	1,73
Кальций хлористый	9	0,29	0,79
		0,37	1,09
		1,5	0,84
Кислота азотная	19,5	0,10	2,4
		0,90	2,62
		3,90	2,85
Кислота серная	18	0,35	1,53
		2,85	1,85
		4,85	2,20
Кислота соляная	19,2	0,10	2,56
		0,90	3,04
		3,20	4,5
Медный купорос	17	0,10	0,45
		0,50	0,34
		0,95	0,27
Натрий хлористый	15	0,02	1,09
		0,1	1,09
		0,9	1,12
		3,9	1,18
Сахар тростниковый	18,5	0,30	0,36
		0,97	0,28
		1,97	0,50
Серебро азотнокислое	12	0,02	1,19
		0,10	1,13
		0,90	1,02
		3,9	0,61
Спирт этиловый	11	0,05	0,84
		0,25	0,8
		0,75	0,72
		3,75	0,52

Таблица 72. Постоянные для расчета коэффициентов диффузии и самодиффузии в твердых телах

Диффундирующее вещество	Диффузионная среда	D_0 , м ² /с	W_0 , кДж/моль
Углерод	α -железо	$2 \cdot 10^{-6}$	84,2
»	γ -железо	$1,9 \cdot 10^{-6}$	118,6
Медь	Железо	$3,0 \cdot 10^{-4}$	255,6
»	Никель	$1,01 \cdot 10^{-7}$	148,7
»	Серебро	$5,9 \cdot 10^{-9}$	103,9
»	Медь	$6,2 \cdot 10^{-9}$	200
Водород Н ₂	α -железо	$2,2 \cdot 10^{-7}$	12,2
Азот	»	$6,6 \cdot 10^{-7}$	77,9
Золото	Золото	$9,1 \cdot 10^{-6}$	174,7
Серебро	Серебро	$4,4 \cdot 10^{-6}$	184,4
Свинец	Свинец	$1,4 \cdot 10^{-4}$	109,0
α -железо	α -железо	$2,0 \cdot 10^{-4}$	240,0
Кремний	Кремний	$1,8 \cdot 10^{-4}$	460,9

Примечание. Коэффициенты рассчитываются по эмпирической формуле $D = D_0 e^{-W_0/(RT)}$, где R — молярная газовая постоянная, T — температура.

Таблица 73. Диаметры молекул газов

Газ	Диаметр, нм	Газ	Диаметр, нм
Азот	0,37	Метан	0,444
Аргон	0,36	Неон	0,354
Водород	0,27	Окись углерода	0,370
Гелий	0,215	Ртуть	0,30
Кислород	0,356	Углекислый газ	0,454
Криптон	0,314	Хлор	0,544
Ксенон	0,40		

Таблица 74. Удельная теплота сгорания топлива

Теплота сгорания, определяемая с учетом теплоты, которая расходуется на испарение воды, содержащейся в топливе, называется высшей теплотой W_B , без учета — нижней теплотой W_H (МДж/кг).

Топливо	W_B	W_H
<i>Твердое</i>		
Антрацит (марки «А»)	32—34	19—27
Бурые угли	25,0—29,0	10,0—17,0
Горючие сланцы	27,0—33,0	6,3—8,4
Древесный уголь	30—31	—
Дрова	8,4—10,5	—
Каменные угли длиннопламенные	31,0—32,0	21,0—24,0
Порох	—	3,0—3,1
Торф	22,0—25,0	8,4—11,0
Ядерное топливо	$7,4 \cdot 10^7$	—

Таблица 74 (продолжение)

Топливо	W_B	W_H
<i>Жидкое (20 °С, 101 325 Па)</i>		
Бензин	—	44—47
Дизельное топливо	—	42—43
Керосин	—	44—46
Мазут	—	39,0—41,0
Топливо для реактивных двигателей самолетов (Т-1)	42,9	—
Этиловый спирт	—	27,2
<i>Газообразное (0 °С, 1013 гПа)</i>		
Ацетилен	50,0 (58,2)	48,2 (56,0)
Бутан	49,6 (132,0)	46,1 (123,0)
Водород	142,0 (12,8)	120,0 (10,8)
Коксовый газ (очищенный)	—	34,8 (16,4)
Окись углерода	10,2 (12,7)	—
Природный газ	—	42,0—47 (33—36)
Пропан	50,4 (101)	46,6 (94)

Примечание. На практике теплота сгорания газообразного топлива рассчитывается на один кубический метр (при нормальном давлении и температуре 0 °С); значения в МДж/м³ указаны в скобках.

Таблица 75. Постоянные Ван-дер-Ваальса

Вещество	a , Дж·м ³ /моль	b , 10 ⁻⁹ м ³ /моль
Азот	0,141	39,2
Аммиак	0,422	37,2
Аргон	0,136	32,3
Ацетон	1,58	98,5
Бензол	1,85	115
Вода	0,555	30,5
Водород	0,0245	26,6
Гелий	0,0035	23,8
Кислород	0,138	31,8
Криптон	0,234	39,9
Ксенон	0,415	51
Метан	0,228	27,1
Неон	0,21	17,1
Пропан	0,92	84,5
Ртуть	0,82	16,7
Спирт метиловый	0,95	67
» пропиловый	1,5	101
» этиловый	1,22	84
Эфир этиловый	1,75	134

Таблица 76. Параметры элементарных кубических решеток

Вещество	Тип решетки	Число атомов (молекул)	a , нм
<i>Металлы</i>			
Алюминий	ГЦК	4	0,404
Вольфрам	ОЦК	2	0,316
Железо	ОЦК	2	0,287
Золото	ГЦК	4	0,408
Медь	ГЦК	4	0,361
Платина	ГЦК	4	0,392
Свинец	ГЦК	4	0,495
Серебро	ГЦК	4	0,409
<i>Полупроводники</i>			
Алмаз	ГЦК	8	0,3566
Арсенид галлия	ГЦК	4	0,569
Германий	ГЦК	8	0,5657
Кремний	ГЦК	8	0,5431
Серое олово (α)	ГЦК	8	0,646
Фосфид индия	ГЦК	4	0,586
<i>Ионные кристаллы</i>			
Галлит	ГЦК	4	0,5638
Сильвин	ГЦК	4	0,629
Хлористый цезий	кубнч.	1	0,411
<i>Молекулярные кристаллы</i>			
Аргон	ГЦК	4	0,543
Неон	ГЦК	4	0,453

Примечание. ГЦК — гранецентрированная кубическая решетка, ОЦК — объемноцентрированная кубическая решетка.

Таблица 77. Психрометрическая таблица относительной влажности воздуха

Показания сухого термометра, °С	Разность показаний сухого и влажного термометров, °С										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	100	81	63	45	28	11	—	—	—	—	—
2	100	84	68	51	35	20	—	—	—	—	—
4	100	85	70	56	42	28	14	—	—	—	—
6	100	86	73	60	47	35	23	10	—	—	—
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	—	—
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	—
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	50	45	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Примечание. Стносительную влажность определяют с помощью психрометра, состоящего из двух термометров — сухого и с резервуаром, покрытым влажной материей. Для определения относительной влажности по таблице нужно взять столбец, соответствующий разности показаний сухого и влажного термометров, и строку, соответствующую показанию сухого термометра.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Электрические заряды. Источник электромагнитного поля (см. п. 6 этой главы), связанный с материальными носителями этого свойства (например, электронами и протонами), называется *электрическим зарядом*. Электрический заряд не зависит от системы отсчета.

Различают два вида зарядов — *положительные* и *отрицательные*; одноименные заряды отталкиваются, разноименные — притягиваются. Например, заряды, возникающие на стекле, потертом о кожу, считаются *положительными*; заряды, возникающие на янтаре, натертом сукном или мехом, считаются *отрицательными*. Носителями отрицательных зарядов в атоме являются *электроны*, носителями положительных зарядов — *протоны*, входящие в состав ядер атомов. Сумма положительных и отрицательных зарядов в атоме равна нулю; заряды распределяются таким образом, что атом в целом является нейтральным.

Процесс *электризации* заключается в том, что отрицательные и положительные заряды распределяются неравномерно между телами (например, при электризации трением или в гальваническом элементе) или между отдельными частями одного и того же тела (например, при электростатической индукции).

Алгебраическая сумма зарядов в изолированной системе сохраняется постоянной (*закон сохранения электрических зарядов*); заряды могут перемещаться от одного тела к другому или смещаться внутри тела, в молекуле, атоме; заряд не зависит от системы отсчета.

Носителями зарядов в различных средах могут быть *электроны* (например, в металлах), *ионы* — частицы молекул или атомов, имеющие положительные и отрицательные заряды (например, в электролитах и газах), и *моллоны* — коллоидные частицы в жидкости, имеющие заряды.

По модулю любой заряд кратен заряду электрона (или протона). Заряд электрона и протона называется *элементарным зарядом*. Заряд протона равен по модулю заряду электрона.

Взаимодействие зарядов. Взаимодействие точечных зарядов (*закон Кулона*) в инерциальной системе отсчета, относительно которой они неподвижны, записывается в следующей форме:

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi \epsilon \epsilon_0 r_{12}^3} \mathbf{r}_{12}, \quad F_{12} = \frac{|Q_1| |Q_2|}{4\pi \epsilon \epsilon_0 r_{12}^2}, \quad (3.1)$$

где \mathbf{F}_{12} — сила, действующая на заряд Q_2 , находящийся в электрическом поле заряда Q_1 , \mathbf{r}_{12} — радиус-вектор, проведенный от заряда Q_1 к заряду Q_2 , ϵ_0 — *электрическая постоянная*, ϵ — *относительная диэлектрическая проницаемость* среды; ϵ показывает, во сколько раз уменьшается сила взаимодействия точечных зарядов в безграничной однородной жидкой или газообразной среде по сравнению с вакуумом. Сила \mathbf{F}_{21} , действующая на заряд Q_1 , который находится в электрическом поле заряда Q_2 , по модулю равна F_{12} . Направления сил \mathbf{F}_{21} и \mathbf{F}_{12} противоположны; их линия действия проходит через заряды.

В Международной системе единиц электрическая постоянная $\epsilon_0 = 1/(36\pi \cdot 10^9)$ фарад на метр $= 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

В пространстве вокруг электрического заряда образуется *электрическое поле*: это проявляется в том, что на неподвижный «пробный» заряд действует сила.

Взаимодействие между электрическими зарядами осуществляется посредством электрического поля, которое, как и другие виды полей, является одним из видов материи (наряду с веществом). Поле неподвижных зарядов называется *электростатическим*.

Напряженность электрического поля. Сила, действующая на единичный неподвижный положительный заряд, помещенный в данную точку поля, называется *напряженностью электрического поля*

$$\mathbf{E} = \mathbf{F}/Q. \quad (3.2)$$

Напряженность — величина векторная. Направление вектора напряженности совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд в данной точке поля.

Напряженность полей нескольких зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых каждым зарядом в отсутствие других зарядов.

Напряженность электрического поля точечного заряда:

$$\mathbf{E}_T = \frac{Q}{4\pi \epsilon \epsilon_0 r^3} \mathbf{r}, \quad (3.3)$$

где \mathbf{r} — радиус-вектор, проведенный из точки, где расположен заряд Q , в точку, в которой определяется напряженность.

Напряженность электрического поля равномерно заряженной бесконечной плоскости:

$$\mathbf{E}_n = \sigma \mathbf{n} / (2\epsilon \epsilon_0), \quad (3.4)$$

где σ — *поверхностная плотность заряда* — заряд, приходящийся на единичную площадь поверхности, \mathbf{n} — единичный вектор нормали.

Напряженность электрического поля равномерно заряженной сферы (шара) ($r \geq R$):

$$E_{\text{ш}} = Qg_0 / (4\pi\epsilon_0 r^2), \quad (3.5)$$

где \mathbf{r} — радиус-вектор, проведенный из центра сферы в точку, в которой определяется напряженность, g_0 — единичный вектор по направлению \mathbf{r} , R — радиус сферы; внутри сферы напряженность равна нулю.

Напряженность электрического поля длинного цилиндра, заряженного равномерно по поверхности,

$$E_{\text{ц}} = \tau g_0 / (2\pi\epsilon_0 r), \quad (3.6)$$

где τ — *линейная плотность заряда* — величина, равная отношению заряда Q к длине цилиндра l , \mathbf{r} — радиус-вектор, проведенный перпендикулярно к оси цилиндра в точку, в которой определяется напряженность, g_0 — единичный вектор \mathbf{r} , R — радиус цилиндра; внутри цилиндра напряженность равна нулю.

Векторная величина $\mathbf{D} = \epsilon\epsilon_0 \mathbf{E}$ называется *электрическим смещением*.

Линией напряженности (или *силовой линией*) электрического поля называется такая линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением вектора напряженности \mathbf{E} (рис. 3.1—3.3).

Электрический диполь. Два разноименных точечных заряда, равных по модулю, называются *электрическим диполем* (рис. 3.4). *Электрический момент диполя* $\mathbf{p}_i = Q\mathbf{l}$ (\mathbf{l} — вектор, проведенный от отрицательного заряда к положительному). Напряженность электрического поля диполя в какой-либо точке определяется векторной суммой напряженностей полей \mathbf{E}_+ и \mathbf{E}_- зарядов Q_+ и Q_- , образующих диполь, т. е. $\mathbf{E} = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_-$.

В точке, удаленной от диполя ($r \gg l$), модуль вектора напряженности в вакууме

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p_i}{r^3} \sqrt{3 \cos^2 \theta + 1}, \quad (3.7)$$

где r — модуль радиуса-вектора, проведенного от центра диполя в точку поля, в которой рассчитывается напряженность, θ — угол между радиусом-вектором \mathbf{r} и осью диполя, проходящей через его заряды, p_i — модуль электрического момента диполя.

Линии напряженности электрического поля диполя представлены на рис. 3.2, а.

Работа и разность потенциалов. При перемещении зарядов силами электрического поля совершается работа. Работа в электростатическом поле не зависит от формы траектории, по которой пере-

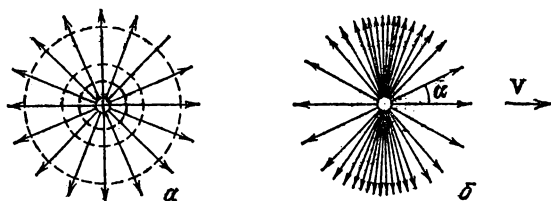


Рис. 3.1. Линии напряженности электрического поля точечного положительного заряда; *a* — неподвижного, *b* — движущегося с постоянной скоростью ($v/c \approx 0,8$, где c — скорость света)

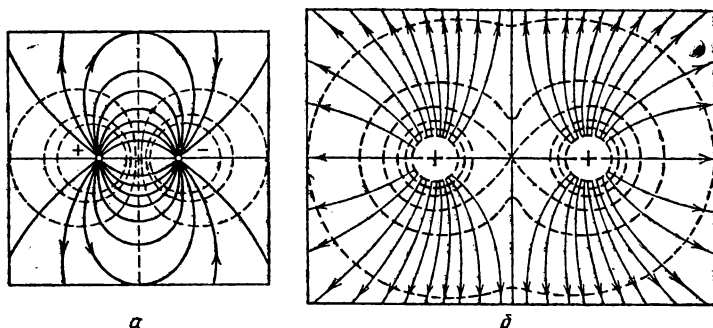


Рис. 3.2. Линии напряженности: *a* — поля двух разноименных точечных зарядов; *b* — поля двух одноименных точечных зарядов

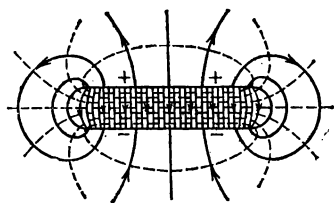


Рис. 3.3. Электрическое поле плоского конденсатора

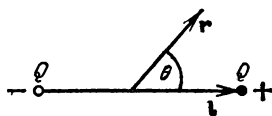


Рис. 3.4. Электрический диполь

мещается заряд. *Потенциалом* в данной точке поля называется потенциальная энергия положительного единичного заряда, помещенного в этой точке. Обычно в физике принимают, что в бесконечно удаленной точке потенциал равен нулю; иногда считают, что Земля имеет потенциал, равный нулю. Потенциал электростатического поля равен работе сил этого поля при перемещении положительного заряда 1 кулон из данной точки в бесконечность. Потенциал, с другой стороны, равен работе внешних сил при перемещении положительного заряда 1 кулон из бесконечности в данную точку поля.

Разностью потенциалов между двумя точками электрического поля называется работа сил электрического поля по перемещению между этими точками положительного заряда 1 кулон:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = A/Q. \quad (3.8)$$

Поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал, называется *эквипотенциальной поверхностью*. На рис. 3.1—3.3 сечения эквипотенциальных поверхностей изображены штриховыми линиями.

Линии напряженности электростатического поля перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям. Работа электрических сил при перемещении заряда по эквипотенциальной поверхности равна нулю. Если A и B — две точки, расположенные на одной и той же линии напряженности электрического поля на малом расстоянии друг от друга, то в точке A напряженность этого поля

$$E_A = -\Delta\varphi/\Delta l, \quad (3.9)$$

где $\Delta\varphi$ — разность потенциалов между точками A и B , Δl — расстояние между ними по линии напряженности электрического поля.

Величина

$$\lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{d\varphi}{dl}$$

является модулем вектора, который называется *градиентом потенциала*.

В *однородном электрическом поле* векторы напряженности во всех точках имеют одинаковые модули и одинаковые направления (например, поле в плоском конденсаторе); в таком поле

$$E = |\varphi_1 - \varphi_2|/l,$$

где $|\varphi_1 - \varphi_2|$ — модуль разности потенциалов между двумя точками, которые расположены на одной и той же линии напряженности электрического поля, l — расстояние между ними.

Емкость. Два (или более) проводника, между которыми имеется электрическое поле, все силовые линии которого начинаются на одном проводнике и заканчиваются на другом, назы-

ваются конденсатором, а сами проводники — обкладками конденсатора.

Заряд, который необходимо сообщить одной из обкладок конденсатора, чтобы разность потенциалов между обкладками изменилась на 1 вольт, называется *емкостью* (емкостью) конденсатора

$$C = Q/(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (3.10)$$

По форме проводящих поверхностей различают плоские, цилиндрические и сферические конденсаторы.

Емкость плоского конденсатора:

$$C_{\text{пл}} = \epsilon \epsilon_0 S/d, \quad (3.11)$$

где S — площадь поверхности одной пластины (меньшей, если они не равны), d — расстояние между пластинами, ϵ — относительная электрическая проницаемость материала, находящегося между обкладками.

Емкость цилиндрического конденсатора и коаксиального кабеля:

$$C_{\text{ц}} = 2\pi\epsilon\epsilon_0 l/(\ln(b/a)), \quad (3.12)$$

где b — радиус внешнего цилиндра, a — радиус внутреннего цилиндра, l — длина.

Емкость сферического конденсатора:

$$C_{\text{сф}} = 4\pi\epsilon\epsilon_0/(1/a - 1/b), \quad (3.13)$$

где a и b — радиусы внутренней и внешней сфер.

Емкость двухпроводной линии:

$$C_{\text{л}} = \pi\epsilon\epsilon_0 l/(\ln(d/a)), \quad (3.14)$$

где d — расстояние между осями параллельных проводов, a — их радиус, l — длина.

При параллельном соединении конденсаторов с емкостями $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ общая емкость

$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n; \quad (3.15)$$

при последовательном соединении тех же самых конденсаторов общая емкость $C_{\text{пос}}$ определяется из соотношения

$$1/C_{\text{пос}} = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots + 1/C_n. \quad (3.16)$$

Энергия заряженного конденсатора:

$$W = CU^2/2. \quad (3.17)$$

В пространстве, где имеется электрическое поле, сосредоточена энергия. *Объемной плотностью энергии электрического поля* называется величина, равная

$$\lim_{\Delta V \rightarrow 0} (\Delta W/\Delta V) = dW/dt = w, \quad (3.18)$$

где ΔW — энергия поля, заключенная в элементарном объеме ΔV .

В электрическом поле напряженностью E объемная плотность энергии

$$w = \epsilon \epsilon_0 E^2 / 2. \quad (3.19)$$

Проводники в электростатическом поле. Во внешнем электрическом поле происходит смещение отрицательных зарядов (электронов) в направлении, противоположном направлению вектора напряженности, а положительные заряды (ядра атомов) смещаются по направлению вектора напряженности; такое перемещение происходит в течение очень малых промежутков времени и приводит к частичному разделению зарядов, в результате чего на поверхности проводника появляются нескомпенсированные заряды, различные по знаку. Это явление называется *электростатической индукцией*, а появившиеся нескомпенсированные заряды называются *индуцированными*. Толщина поверхностного заряженного слоя имеет порядок 10^{-8} см. Индуцированные заряды создают дополнительное электрическое поле, которое вместе с внешним полем образует *результатирующее поле*.

Напряженность результирующего поля внутри проводника равна нулю, поверхность проводника является эквипотенциальной поверхностью; вектор напряженности электрического поля вне проводника направлен по нормали в каждой точке его поверхности; он определяется по формуле

$$E = \sigma / \epsilon, \quad (3.20)$$

где σ — поверхностная плотность заряда (см. (3.4)), n — единичный вектор внешней нормали. Если $\sigma > 0$, то вектор E направлен от поверхности проводника; если $\sigma < 0$, то вектор E направлен к его поверхности.

Диэлектрики в электростатическом поле. *Диэлектриками* называются вещества, не проводящие электрического тока. Во внешнем электрическом поле диэлектрик поляризуется, т. е. приобретает электрический момент, равный векторной сумме дипольных моментов его молекул. У неполярных молекул диполи образуются при поляризации. Под воздействием внешнего электрического поля происходит *поляризация*, т. е. в неполярных молекулах происходит смещение зарядов различных знаков; в полярных молекулах дипольные моменты молекул преимущественно ориентируются в направлении внешнего поля; при этом в диэлектрике возникают нескомпенсированные заряды. Для количественной оценки поляризации всего диэлектрика вводится векторная величина P , равная векторной сумме всех моментов диполей в единичном объеме:

$$P = \sum_i p_i / \Delta V = n \langle p \rangle, \quad (3.21)$$

где n — концентрация молекул, $\langle p \rangle = \left(\sum_i p_i \right) / (\Delta N)$ — средний дипольный момент одной молекулы, ΔN — число диполей в объеме ΔV . Вектор \mathbf{P} называется *поляризованностью* диэлектрика.

В изотропном диэлектрике

$$\mathbf{P} = \kappa \epsilon_0 \mathbf{E}, \quad (3.22)$$

где κ — безразмерная величина, которая называется *диэлектрической восприимчивостью*; κ всегда больше нуля.

Векторы \mathbf{D} и \mathbf{E} связаны между собой:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \epsilon_0 (1 + \kappa) \mathbf{E} = \epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}, \quad (3.23)$$

где $\epsilon = 1 + \kappa$ — относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Сегнетоэлектрики. Сегнетоэлектрики получили свое название от сегнетовой соли, в которой впервые была обнаружена самопроизвольная (спонтанная) поляризация. Даже в отсутствие электрического поля в сегнетоэлектриках имеются малые (микроскопические) объемы, которые обладают электрическим моментом. Эти области спонтанной поляризации называются *доменами*. Электрические моменты доменов в отсутствие поля ориентированы в различных направлениях, поэтому электрический момент всего сегнетоэлектрика будет равен нулю. Во внешнем электрическом поле сегнетоэлектрик поляризуется в целом за счет изменения направления поляризации доменов. После прекращения действия поля сохраняется остаточная поляризация. Относительная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков ϵ имеет большие значения (иногда порядка нескольких тысяч); она сильно зависит от напряженности электрического поля; зависимость ϵ от E в сегнетоэлектриках аналогична зависимости μ от H в ферромагнетиках (п. 5 гл. III).

При температурах, превышающих некоторое значение, тепловое движение разрушает домены, вследствие чего сегнетоэлектрические свойства исчезают. Такая температура называется *температурой Кюри*.

Пьезоэлектрический эффект. При механической деформации некоторых кристаллов в определенных направлениях на их поверхности образуются электрические заряды противоположных знаков, а внутри кристалла возникает электрическое поле. При изменении направления деформации изменяются и знаки зарядов. Это явление называется *пьезоэлектрическим эффектом (пьезоэффектом)*, а кристаллы, в которых он наблюдается, называют *пьезоэлектриками*. Пьезоэлектрический эффект обратим; если кристалл находится в электрическом поле, то он деформируется; это явление называется *обратным пьезоэлектрическим эффектом*. Обратный пьезоэффект используется для получения ультразвуков.

Заряд, возникающий при пьезоэлектрическом эффекте, определяется соотношением

$$Q = d_{ij}F, \quad (3.24)$$

где F — модуль деформирующей силы, d_{ij} — постоянные для данного кристалла коэффициенты, которые называются *пьезоэлектрическими модулями*; они зависят от вида деформации, ориентации и температуры.

2. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Сила тока, плотность тока. Упорядоченное движение носителей зарядов называется *электрическим током*.

Силой электрического тока называется

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt} = I, \quad (3.25)$$

где ΔQ — заряд, который переносится через поверхность за время Δt . Если сила тока не изменяется во времени, то такой ток называется *постоянным*; сила постоянного тока

$$I = Q/t, \quad (3.26)$$

где Q — заряд, переносимый через поверхность за время t .

Плотностью тока называется векторная величина, модуль которой

$$j = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta S} = \frac{dI}{dS}, \quad (3.27)$$

где ΔI — сила тока, протекающего через элемент поверхности ΔS , расположенный перпендикулярно направлению упорядоченного движения носителей зарядов. Направление вектора плотности тока \mathbf{j} совпадает с направлением вектора скорости упорядоченного движения носителей положительных зарядов. Направление тока определяется направлением вектора \mathbf{j} .

При равномерном распределении силы тока по поверхности модуль вектора плотности тока

$$j = I/S, \quad (3.28)$$

где S — площадь плоской поверхности, расположенной перпендикулярно направлению тока.

Плотность тока можно рассчитать по формуле

$$\mathbf{j} = nq \langle \mathbf{v} \rangle, \quad (3.29)$$

где n — количество носителей зарядов в единичном объеме, q — заряд одного носителя, $\langle \mathbf{v} \rangle$ — средняя скорость его упорядоченного движения.

Если ток обусловлен носителями, которые имеют различные заряды, то плотность тока будет равна сумме плотностей токов

отдельных носителей

$$j_c = \sum n_i q_i \langle v_i \rangle. \quad (3.30)$$

Подвижностью u носителей зарядов называется скалярная величина, равная отношению модуля средней скорости $\langle v \rangle$ к модулю напряженности электрического поля E :

$$u = \langle v \rangle / E.$$

Тогда

$$j = nquE = \gamma E, \quad (3.31)$$

где $\gamma = nqu$ — *удельная электрическая проводимость* (см. (3.33)).

Ток в металлах. Электродвижущая сила. Ток в металлах представляет собой упорядоченное движение свободных электронов, которое поддерживается в течение длительного промежутка времени электрическим полем внутри проводника. Чтобы в проводнике был ток, необходимо на его концах поддерживать разность потенциалов с помощью специальных устройств, которые называются *источниками* (генераторами) тока.

На клеммах разомкнутого источника тока поддерживается разность потенциалов за счет работы таких сил, которые по своей природе отличаются от электростатических. Такие силы называются *сторонними*. Сторонние силы, действующие внутри источника, переносят заряды против направления действия электрических сил; электрические силы переносят заряды внутри источника от положительного полюса к отрицательному, сторонние силы — от отрицательного полюса к положительному. Сторонние силы возникают при соприкосновении разнородных проводников (например, в гальванических элементах, аккумуляторах), проводников различной температуры; вихревое электрическое поле, возбуждаемое при электромагнитной индукции, проявляется в проводниках как действие сторонних сил.

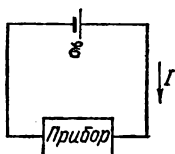


Рис. 3.5. Схема простой электрической цепи

Электродвижущей силой (э. д. с.) источника называется работа сторонних сил при перемещении положительного заряда 1 кулон. Э. д. с. источника равна разности потенциалов на клеммах разомкнутого источника.

Электрической цепью называется совокупность источника тока, соединительных проводов, приборов (или других устройств), в которых имеется электрический ток (рис. 3.5).

Закон Ома. На участке цепи, не содержащем э. д. с., сила тока в проводнике пропорциональна разности потенциалов на его концах:

$$I = (\varphi_1 - \varphi_2) / r. \quad (3.32)$$

Величина $1/r$ называется *электрической проводимостью*, r называется *электрическим сопротивлением*. Элемент электрической цепи с электрическим сопротивлением называется *резистором*.

Сопротивление однородного проводника постоянного сечения:

$$r = \rho l / S, \quad (3.33)$$

где ρ — *удельное электрическое сопротивление (удельное сопротивление)* — сопротивление однородного проводника длиной l м и площадью поперечного сечения 1 м^2 , l — длина проводника, S — площадь поперечного сечения. Величина $\gamma = 1/\rho$ называется *удельной электрической проводимостью*.

С повышением температуры удельное сопротивление большинства металлов увеличивается; это изменение удельного сопротивления может быть приближенно описано соотношением

$$\rho_T = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T), \quad (3.34)$$

где ρ_T — удельное сопротивление при температуре T , ρ_0 — удельное сопротивление при температуре $T_0 = 273,15 \text{ К}$, $\Delta T = T - T_0$, α — *температурный коэффициент сопротивления*; он равен относительному изменению сопротивления при нагревании проводника на 1 кельвин. При определенных низких температурах у некоторых металлов удельное сопротивление скачком уменьшается и становится равным нулю. Это явление называется *сверхпроводимостью*.

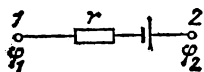


Рис. 3.6. Участок цепи с э. д. с.

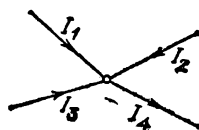


Рис. 3.7. Узел токов

При последовательном соединении резисторов общее электрическое сопротивление равно сумме их электрических сопротивлений $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$, т. е.

$$r_{\text{пос}} = r_1 + r_2 + \dots + r_n, \quad (3.35)$$

При параллельном соединении тех же самых резисторов общая электрическая проводимость равна сумме их электрических проводимостей:

$$1/r_{\text{пар}} = 1/r_1 + 1/r_2 + \dots + 1/r_n. \quad (3.36)$$

Обобщенный закон Ома. На участке цепи, где имеется источник э. д. с. (рис. 3.6), сила тока

$$I = (\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}) / r, \quad (3.37)$$

где $\varphi_1 - \varphi_2$ — разность потенциалов между точками 1 и 2, \mathcal{E} — электродвижущая сила, r — общее сопротивление участка цепи.

Напряжением U (или падением напряжения) на участке цепи 1—2 (рис. 3.6), где имеется э. д. с., называется величина, равная работе электрических и сторонних сил по перемещению положительного заряда 1 кулон на этом участке:

$$U = Ir = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}. \quad (3.38)$$

Напряжение на участке цепи равно разности потенциалов в том случае, если на этом участке нет э. д. с.

В замкнутой цепи точки 1 и 2 соединяются вместе, тогда $\varphi_1 = \varphi_2$ и сила тока

$$I = \mathcal{E}/r. \quad (3.39)$$

Э. д. с. и произведение Ir — величины скалярные, алгебраические. Значение э. д. с. принимается положительным, если произвольно выбранное направление обхода совпадает с переходом от отрицательного к положительному полюсу источника. Произведение Ir считается положительным, если направление тока совпадает с направлением обхода.

Работа электрического тока. Работа сил электрического поля по перемещению зарядов в цепи называется *работой тока*. Работа постоянного тока на участке цепи с напряжением U :

$$A = IUt = I^2rt = U^2t, \quad (3.40)$$

где t — время прохождения тока, r — сопротивление участка цепи, I — сила тока.

Работа тока за время одна секунда называется *мощностью*. Мощность

$$P = IU. \quad (3.41)$$

Правила Кирхгофа. Токи, напряжения, э. д. с. в разветвленной цепи рассчитываются на основе *правил Кирхгофа*. Точка, в которой соединены не менее трех проводников разветвленной цепи, называется узлом.

Первое правило: алгебраическая сумма сил токов на участках цепи, сходящихся в любой точке разветвления, равна нулю. Например, на рис. 3.7

$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0.$$

Токи, входящие в узел, считаются положительными, токи, выходящие из узла, — отрицательными.

Второе правило: для любого замкнутого контура, выделенного из разветвленной цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивления соответствующих участков цепи равна алгебраической сумме всех электродвижущих сил в этом контуре. При составлении указанной суммы положительными считаются те токи, направления которых совпадают с условно выбранным направлением обхода контура. Положительными считаются те э. д. с.,

которые повышают потенциал в направлении обхода (т. е. направление обхода совпадает с переходом от отрицательного полюса источника к положительному). Например (рис. 3.8),

$$I_1 r_1 + I_2 r_2 - I_3 r_3 = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_3.$$

При последовательном соединении одинаковых источников

$$I(nr_i + r) = n\mathcal{E}, \quad (3.42)$$

где n — число источников, r_i — внутреннее сопротивление одного источника, r — внешнее сопротивление цепи, \mathcal{E} — э. д. с. одного источника.

При параллельном соединении n одинаковых источников

$$I(r + r_i/n) = \mathcal{E}. \quad (3.43)$$

Ток в электролитах. К *электролитам*, или *проводникам второго рода*, относятся растворы кислот, щелочей и солей в воде и других растворителях, а также расплавленные соли. В электролитах носителями зарядов являются ионы — части молекул, имеющие положительный или отрицательный заряд.

Электрическое поле в электролите образуется между электродами, которые соединяются с клеммами источника э. д. с. и погружаются в электролит; электрод, соединенный с положительным полюсом, называется *анодом*; электрод, соединенный с отрицательным полюсом, называется *катодом*. Положительные ионы, перемещающиеся в электрическом поле к катоду, называются *катионами*; отрицательные ионы, перемещающиеся к аноду, называются *анионами*.

Плотность тока в электролите

$$\mathbf{j} = n_+ q_+ \langle \mathbf{v}_+ \rangle + n_- q_- \langle \mathbf{v}_- \rangle, \quad (3.44)$$

где n_+ , $\langle \mathbf{v}_+ \rangle$ — концентрация и средняя скорость упорядоченного движения катионов, q_+ — заряд одного катиона, n_- , $\langle \mathbf{v}_- \rangle$ — концентрация и средняя скорость анионов, q_- — заряд одного аниона. Подвижность ионов — скалярная величина, равная отношению:

$$u_+ = \langle v_+ \rangle / E, \quad u_- = \langle v_- \rangle / E.$$

Плотность тока можно определить через подвижность ионов u_+ и u_- :

$$\mathbf{j} = (n_+ u_+ q_+ + n_- u_- q_-) \mathbf{E}, \quad (3.45)$$

где \mathbf{E} — напряженность электрического поля. Для электролитов справедлив закон Ома.

При прохождении тока через электролиты (или расплавленные соли) изменяется их химический состав, а на электродах происхо-

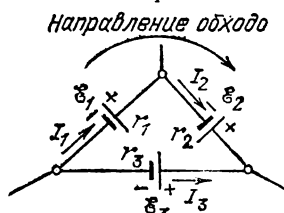


Рис. 3.8. Контур, выделенный из разветвленной цепи

дит выделение различных веществ. Это явление называется *электролизом*. Масса вещества, выделившегося на электроде при электролизе, пропорциональна заряду, который переносится через электролит (*первый закон Фарадея*):

$$m = kQ. \quad (3.46)$$

Коэффициент пропорциональности k , равный массе вещества, отложившегося на электроде при переносе через электролит заряда 1 кулон, называется *электрохимическим эквивалентом данного вещества*.

Электрохимический эквивалент вещества пропорционален его химическому эквиваленту (*второй закон Фарадея*):

$$k = \frac{1}{F} \frac{\mu}{n}. \quad (3.47)$$

Химический эквивалент — внесистемная единица массы, равная отношению молярной массы μ данного вещества к его валентности n . F называют *постоянной Фарадея*; эта постоянная равна заряду, при прохождении которого через электролит на электроде выделяется масса вещества, равная одному химическому эквиваленту.

Гальванические элементы. Между электродом, погруженным в электролит, и раствором устанавливается разность потенциалов. Эту разность называют *электрохимическим потенциалом* данного электрода в данном растворе.

Стандартным потенциалом называется разность между химическими потенциалами в растворах с нормальной концентрацией (1 моль на литр) данного металла и стандартного электрода, потенциал которого принимается равным нулю. При погружении в электролит двух электродов между ними устанавливается разность потенциалов, равная разности электрохимических потенциалов электродов. Электролит с двумя погруженными в него разнородными электродами называется *гальваническим элементом* (например, медная и цинковая пластинки в растворе серной кислоты — *элемент Вольта*).

Аккумуляторы являются гальваническими элементами, в которых электроды изготовлены из таких материалов, что они восстанавливают свои первоначальные свойства при пропускании тока (зарядке) в обратном направлении по сравнению с током при разрядке. Заряд, который может быть получен от аккумулятора при данных условиях работы (температуре, разрядном токе, начальном напряжении), называется *зарядом аккумулятора*; заряд аккумулятора выражается в кулонах.

Разрабатываются топливные элементы, в которых э. д. с. образуется вследствие химических реакций окисления и восстановления. В качестве восстановителя чаще всего используется водород, окислителя — кислород или воздух. В таких элементах непрерывно подается топливо, а также отводятся продукты реакции.

Ток в газах. Ток в газах обусловлен наличием в них ионов и свободных электронов. *Ионизация газов* состоит в том, что электроны отрываются от нейтральных молекул и часть из них присоединяется к другим нейтральным молекулам и атомам. Энергия, которая необходима для того, чтобы оторвать электрон от молекулы или атома, называется *работой ионизации*.

Плотность тока в газах, как в металлах и жидкостях, определяется концентрацией ионов, их зарядами и подвижностью. Однако ввиду зависимости концентрации ионов от напряженности поля и их неравномерного распределения по объему, занимаемому газом, проводимость в газах в большинстве случаев не подчиняется закону Ома.

Различаются два вида проводимости газов: несамостоятельная и самостоятельная. При *несамостоятельной проводимости* ионы образуются в газе не под действием приложенного электрического поля, а в силу других причин (например, за счет рентгеновского излучения, нагревания газа и т. п.). При *самостоятельной проводимости* ионы образуются под действием электрического поля, приложенного между электродами.

Термоэлектронная эмиссия. Энергия, которая необходима для выхода электрона из металла в вакуум (в состоянии с кинетической энергией, равной нулю), называется *работой выхода*.

Выход электронов из металла под действием теплового движения называется *термоэлектронной эмиссией*; электрон может вылететь из металла при условии

$$m_e v_n^2 / 2 \geq A, \quad (3.48)$$

где m_e — масса электрона, v_n — проекция скорости неупорядоченного движения электронов на нормаль к поверхности, A — работа выхода.

Наибольшее значение тока термоэлектронной эмиссии (при неизменной температуре) называется *током насыщения*. Модуль плотности тока насыщения при термоэлектронной эмиссии определяется выражением

$$j = BT^2 e^{-A/(kT)}, \quad (3.49)$$

где B — постоянная, T — температура, k — постоянная Больцмана, $e \approx 2,72$ — основание натуральных логарифмов. Величины A и B называются *эмиссионными постоянными*. Согласно теории величина B для всех чистых металлов должна быть одинакова ($1,20 \times 10^6 \text{ A} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}^2)$); на опыте, однако, получаются различные значения. Широкое применение на практике получили *оксидные катоды*. Эти катоды получают путем нанесения на металлическое основание окислов бария и некоторых других металлов, что значительно уменьшает работу выхода.

Между холодными электродами, находящимися в газе, при больших напряженностях поля происходит разряд в виде искры (*пробой*). Напряжение, необходимое для пробоя (*пробивное напряжение*), зависит от материала, формы, размеров электродов, а также от произведения pd (где p — давление газа, d — расстояние между электродами). Если p и d меняются таким образом, что их произведение остается постоянным, то пробивное напряжение не изменяется. Расстояние между электродами, при котором наступает пробой при данном напряжении, называется *искровым промежутком*. По длине искровых промежутков можно определять напряжение между электродами.

Электропроводность плазмы. В отличие от нейтрального газа, плазма является хорошим проводником тока; например, начиная с температур 10^7 К, проводимость ионизованного водорода больше проводимости меди и серебра; проводимость плазмы космического пространства сравнима с проводимостью металлических проводников при комнатной температуре.

В первом приближении можно считать, что ток в плазме создается потоком электронов, так как ионы имеют значительно меньшую подвижность. В этом случае удельную электронную проводимость можно рассчитать по формуле $\sigma^- = 10^{-3} T^{3/2}$ См/м; σ^- слабо зависит от концентрации (рис. 3.9).

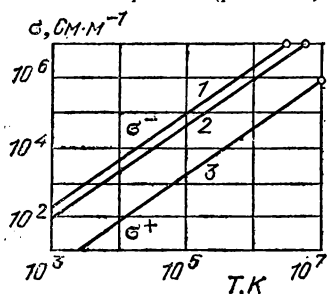


Рис. 3.9. Удельная электрическая проводимость полностью ионизованной водородной плазмы в зависимости от температуры; σ^- — электронная проводимость для концентрации $1 - 10^9$ см $^{-3}$; $2 - 10^{19}$ см $^{-3}$; σ^+ — ионная проводимость для концентрации 10^{19} см $^{-3}$ (3)

Полупроводники. Полупроводниками называются такие вещества, в которых электропроводность обусловлена движением электронов, а удельное сопротивление при комнатных температурах лежит в пределах (10^{-4} — 10^7) Ом·м. Удельное сопротивление полупроводников резко меняется с изменением температуры. В отличие от металлов, сопротивление полупроводников уменьшается с повышением температуры. Сопротивление полупроводников сильно зависит от наличия примесей.

Электроны, входящие в состав изолированных атомов, находятся в дискретных энергетических состояниях (см. гл. V). В изолированном атоме не может быть более двух электронов, находящихся

в одном и том же энергетическом состоянии; но и такие электроны будут отличаться друг от друга ориентацией спинов. При взаимодействии атомов энергетические уровни электронов незначительно изменяются по сравнению с энергетическими уровнями электронов невзаимодействующих атомов; вследствие взаимодействия N атомов

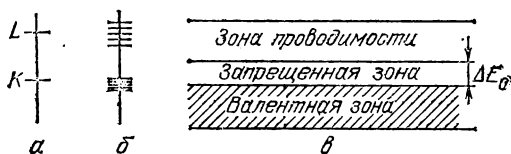


Рис. 3.10. Уровни энергии электронов в полупроводниках: а — нерасщепленные уровни энергии K и L ; б — расщепление уровней при взаимодействии; в — схема размещения зон: валентной, запрещенной и проводимости

образуется N близко расположенных энергетических уровней (рис. 3.10). Совокупность расщепленных энергетических уровней образует зону дозванных (разрешенных) — значений энергии. Зоны отделяются друг от друга интервалами недозволенных значений энергии; такие интервалы энергии называются *запрещенными зонами*.

Электропроводность как металлов, так и полупроводников обусловлена лишь валентными электронами, так как электроны внутренних оболочек прочно связаны с ядром. При температуре 0 К валентные электроны занимают низшие энергетические уровни. Все разрешенные уровни в этой зоне являются занятыми. Эта зона является *заполненной* (или *валентной*) *зоной*. Во второй зоне дозванных уровней энергии при температуре 0 К нет ни одного электрона; эта зона называется *зоной проводимости*. Энергия, необходимая для перехода электрона из заполненной зоны в зону проводимости называется *шириной запрещенной зоны* ΔE_0 . У металлов зона проводимости и валентная зона перекрываются; у диэлектриков $\Delta E_0 > 2$ эВ. Электропроводность обусловлена наличием электронов в зоне проводимости; если нет электронов в зоне проводимости, нет и электропроводности.

В результате теплового движения часть электронов переходит из валентной зоны в зону проводимости. Количество электронов в зоне проводимости определяется соотношением

$$n = A e^{-\Delta E_0 / (2kT)}, \quad (3.50)$$

где A — постоянная, k — постоянная Больцмана, T — температура. Удельная электропроводность полупроводников:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\Delta E_0 / (kT)}. \quad (3.50a)$$

После перехода электрона в зону проводимости в валентной зоне остаются вакантные уровни. При наличии внешнего электрического

поля будут перемещаться электроны в обеих зонах. Проводимость, обусловленная перемещением электронов в зоне проводимости, называется *электронной проводимостью*; проводимость, обусловленная движением электронов в валентной зоне, называется *дырочной проводимостью*. Перемещение электрона в заполненной зоне можно рассматривать как перемещение положительного заряда в направлении, противоположном движению электрона. Такой положительный заряд условно называется *дыркой*. Проводимость, обусловленная движением электронов и дырок, которые образуются в результате перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости, называется *собственной*.

Полупроводник с электронной проводимостью называется *полупроводником n-типа*; полупроводник с дырочной проводимостью называется *полупроводником p-типа*.

При практическом применении полупроводников наибольшее значение имеет *примесная проводимость*, которая определяется примесями других веществ. Примеси бывают двух видов — донорные и акцепторные. *Донорные примеси* создают дополнительные разрешенные уровни энергии вблизи верхней границы запрещенной зоны; атомы таких примесей отдают электроны в зону проводимости и, таким образом, обеспечивают *примесную электронную проводимость*. *Акцепторные примеси* создают дополнительные уровни вблизи нижней границы запрещенной зоны; атомы акцепторных примесей принимают на свои уровни электроны из валентной зоны и тем самым обеспечивают *примесную дырочную проводимость*.

В германии примеси элементов V группы Периодической системы (например, сурьмы) являются донорными, а примеси элементов III группы (например, галлия) — акцепторными. Возможна примесная проводимость, когда в полупроводник введены и акцепторные, и донорные примеси. Следует заметить, что во всех полупроводниках всегда имеются электроны и дырки, но вклад их в электропроводность может быть неодинаковым за счет различных концентраций или подвижностей.

Термоэлектродвижущая сила. Если в замкнутой цепи, составленной из двух разнородных проводников, поддерживать температуры их спаев различными, то в такой цепи устанавливается электрический ток, обусловленный э. д. с., которая в этом случае называется термоэлектродвижущей силой (т. э. д. с.). Цепь, в которой ток поддерживается т. э. д. с., называется термопарой.

В небольших интервалах температур т. э. д. с. пропорциональна разности температур спаев: $\mathcal{E}_T = \alpha (T_1 - T_2)$; величина α , равная отношению т. э. д. с. к разности температур между спаями, называется *постоянной термопары*.

3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Опыты показывают, что между собой взаимодействуют: а) проводник с током и магнит; б) магнит с магнитом; в) один проводник с током с другим проводником с током. Эти взаимодействия подтверждают существование поля, которое называется *магнитным*. На неподвижные электрические заряды магнитное поле не действует. Для характеристики магнитного поля вводится векторная величина, которая называется *магнитной индукцией* (\mathbf{B}).

Магнитная индукция. Для определения вектора \mathbf{B} используется действие магнитного поля: а) на движущийся заряд, б) на элемент тока, в) на рамку с током.

а) На движущийся со скоростью \mathbf{v} заряд Q в магнитном поле действует сила, которая называется *силой Лоренца*:

$$F_{\text{Л}} = Q [\mathbf{v}\mathbf{B}], \quad F_{\text{Л}} = QvB \sin \alpha, \quad (3.51)$$

где \mathbf{B} — магнитная индукция, α — угол между векторами \mathbf{v} и \mathbf{B} .

Если $\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$, то сила Лоренца имеет максимальное значение $F_{\text{Лм}} = QvB$; если $\mathbf{v} \parallel \mathbf{B}$, то сила Лоренца равна нулю. Как следует из (3.51), модуль $B = F_{\text{Лм}} / |Qv|$.

б) Действующая на проводник с током в магнитном поле сила равна векторной сумме сил Лоренца, действующих на каждый носитель заряда; такая сила называется *силой Ампера* или *амперовой*.

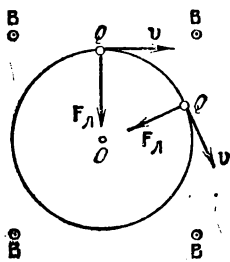


Рис. 3.11. Траектория положительного заряда в магнитном поле (вектор \mathbf{B} перпендикулярен плоскости чертежа)

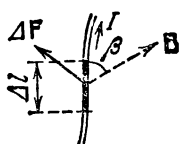


Рис. 3.12. Сила Ампера, действующая на линейный элемент тока; вектор \mathbf{B} направлен за плоскость чертежа

Сила Ампера ΔF , действующая на элементарный отрезок Δl токкого проводника, определяется соотношением (*закон Ампера*):

$$\Delta F = kI [\Delta l \mathbf{B}], \quad \Delta F = kI \Delta l B \sin \alpha, \quad (3.52)$$

где I — сила тока, \mathbf{B} — магнитная индукция, α — угол между векторами Δl и \mathbf{B} ; направление вектора Δl совпадает с направлением вектора плотности тока \mathbf{j} ; векторная величина $I \Delta l$ называется *элементом тока*. Если $\Delta l \perp \mathbf{B}$, то сила Ампера имеет максимальное значение: $\Delta F_{\text{м}} = kIB \Delta l$.

Коэффициент пропорциональности k зависит от выбора системы единиц; в СИ $k=1$, в СГС (система Гаусса) $k=1/c$, где c — скорость света в вакууме. Направление $\Delta \mathbf{F}$ определяется векторным произведением (3.52). На практике используется *правило левой руки*: необходимо ладонь левой руки расположить так, чтобы линии индукции магнитного поля входили в нее, а вытянутые пальцы указывали направление тока; тогда отставленный большой палец указывает направление силы Ампера (рис. 3.13).

В СИ модуль $B = \Delta F_M / (I \Delta l)$.

в) На плоский контур тока малых размеров, помещенный в магнитное поле, действует механический момент сил \mathbf{M} (см. (1.42)):

$$\mathbf{M} = IS [\mathbf{nB}], \quad M = ISB \sin \alpha, \quad (3.53)$$

где I — сила тока, S — площадь контура, \mathbf{B} — магнитная индукция, α — угол между нормалью к плоскости контура и вектором \mathbf{B} , \mathbf{n} — единичный вектор нормали. Векторная величина $\mathbf{p}_m = IS\mathbf{n}$ называется *магнитным моментом контура*; модуль магнитного момента $p_m = IS$. Направление магнитного момента определяется по *правилу правого винта*: если винт вращать по направлению тока в контуре, то поступательное перемещение будет совпадать с направлением \mathbf{p}_m и единичным вектором нормали \mathbf{n} . Магнитный момент нескольких контуров тока равен векторной сумме их

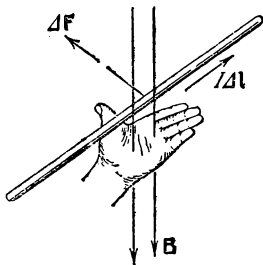


Рис. 3.13. Правило левой руки

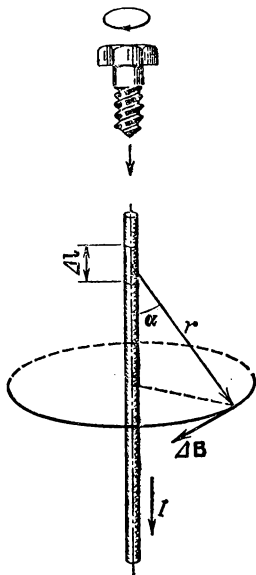
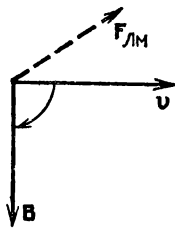
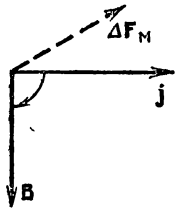
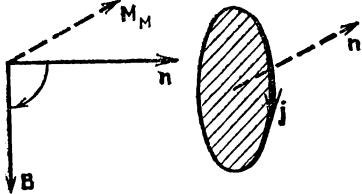


Рис. 3.14. К закону Био — Савара — Лапласа. Правило винта

магнитных моментов. Если $\mathbf{n} \perp \mathbf{B}$, то момент сил имеет максимальное значение $M_M = ISB$. Как следует из (3.53), модуль вектора $B = M_M / (IS)$.

Различные варианты определения магнитной индукции приводятся в таблице:

Определение модуля $ B $	Определение направления B
<p>а) Максимальная сила, действующая в данной точке магнитного поля на движущийся с единичной скоростью единичный положительный заряд, называется <i>магнитной индукцией</i>.</p>	<p>Направление определяется векторным произведением $[vB]$</p> 
<p>б) Максимальная сила, действующая на единичный элемент тока в данной точке магнитного поля, называется <i>магнитной индукцией</i>.</p>	<p>Направление определяется векторным произведением $[jB]$; также применяется правило левой руки</p> 
<p>в) Максимальный механический момент, который действует в данной точке магнитного поля на плоский контур тока с единичным моментом, называется <i>магнитной индукцией</i>.</p>	<p>Направление B определяется векторным произведением $[nB]$; направление n определяется по правилу правого винта</p> 

Примечание. Векторы, изображенные штриховой линией, направлены за плоскость чертежа; векторы B , v , j лежат в плоскости чертежа.

Линиями магнитной индукции называются такие линии, касательные к которым в любой точке этой линии совпадают с направлением вектора магнитной индукции. Линии магнитной индукции замкнуты (в отличие от линий напряженности E); такие поля называются *вихревыми*. Линии магнитной индукции прямого проводника

с постоянным током представляют собой концентрические окружности, лежащие в плоскостях, перпендикулярных к проводнику. Направления линий магнитной индукции определяются по правилу *правого винта*: если винт вращать таким образом, чтобы он поступательно перемещался по направлению текущего по проводнику тока, то направление вращения его головки будет соответствовать направлению линий магнитной индукции (рис. 3.14).

Напряженностью магнитного поля \mathbf{H} в вакууме называется величина, равная отношению магнитной индукции к *магнитной постоянной* μ_0 :

$$\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu_0.$$

Размерность и значение μ_0 зависят от выбора системы единиц. В СИ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м (размерность $\text{LMT}^{-2}\text{I}^2$), в СГС $\mu_0 = 1$ (величина безразмерная).

Напряженностью магнитного поля в любой среде называется величина, равная отношению $\mathbf{B}/(\mu\mu_0)$, где μ — *относительная магнитная проницаемость* среды (см. п. 5 этой главы). В изотропной среде векторы \mathbf{B} и \mathbf{H} имеют одинаковые направления.

Взаимодействие двух проводников с токами. Это взаимодействие обусловлено взаимодействием между движущимися носителями зарядов в проводниках; кулоновское взаимодействие в этом случае равно нулю, так как проводники электрически нейтральны (взаимодействие между зарядами на поверхности не учитывается).

Два длинных прямолинейных и параллельных проводника притягиваются друг к другу, если токи имеют одинаковое направление; если токи имеют противоположные направления, то они отталкиваются. В соответствии с законом Ампера рассчитывается модуль силы:

$$F_M = \mu\mu_0 I_1 I_2 l / (2a), \quad (3.54)$$

где a — расстояние между параллельными проводниками, I_1 и I_2 — силы тока в них, l — их длина, μ_0 — магнитная постоянная, μ — относительная магнитная проницаемость среды.

Магнитная индукция элемента тока $I\Delta l$ (см. рис. 3.14):

$$\left. \begin{aligned} \Delta B &= \mu\mu_0 I [\Delta l \mathbf{r}] / (4\pi r^3), \\ \Delta B &= \frac{\mu\mu_0 I \Delta l \sin \alpha}{4\pi r^2}, \end{aligned} \right\} \quad (3.55)$$

где \mathbf{r} — радиус-вектор, проведенный от элемента тока в точку, в которой определяется магнитная индукция, α — угол между Δl и \mathbf{r} . Это соотношение называется *законом Био — Савара — Лапласа*.

Постоянным током, протекающим по прямому длинному проводнику, имеющему круглое сечение, возбуждается в точках вне проводника ($r \geq R$) магнитная индукция

$$B_c = \mu\mu_0 I / (2\pi r), \quad (3.56)$$

внутри проводника ¹ в этом случае магнитная индукция

$$B_{\text{в}} = \mu\mu_0 I r / (2\pi R^2), \quad (3.57)$$

где I — сила тока, r — расстояние по нормали от оси проводника до точки поля, в которой определяется магнитная индукция, R — радиус поперечного сечения проводника.

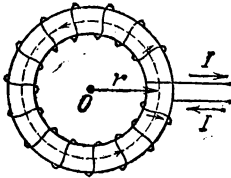


Рис. 3.15. Торoidalная катушка

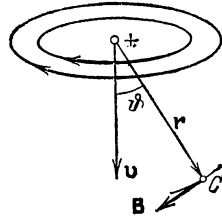


Рис. 3.16. Магнитная индукция движущейся частицы

Модуль магнитной индукции в центре кругового тока:

$$B_{\text{к}} = \mu\mu_0 I / (2R), \quad (3.58)$$

где R — радиус витка.

Модуль магнитной индукции в точках, расположенных на расстоянии r от оси O внутри торoidalной катушки (рис. 3.15),

$$B_{\text{т}} = \mu\mu_0 N I / (2\pi r), \quad (3.59)$$

где N — полное число витков катушки.

Внутри прямого соленоида, длина которого значительно больше диаметра витков, в точках на его оси, удаленных от концов, магнитная индукция

$$B_{\text{ос}} = \mu\mu_0 N I / l, \quad (3.60)$$

где N — количество витков, l — длина соленоида.

Магнитная индукция движущейся заряженной частицы (при условии, что $v/c \ll 1$) определяется следующими соотношениями:

$$\mathbf{B}_Q = \frac{\mu\mu_0 Q [\mathbf{v}\mathbf{r}]}{4\pi r^3}, \quad B_Q = \frac{\mu\mu_0 Q v \sin \phi}{4\pi r^2}, \quad (3.61)$$

где Q — заряд частицы, v — ее скорость, c — скорость света в вакууме, \mathbf{r} — радиус-вектор, проведенный от частицы в точку C , где определяется магнитная индукция, ϕ — угол между \mathbf{v} и \mathbf{r} (рис. 3.16).

4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Магнитный поток. *Магнитным потоком* через плоский контур (в однородном поле) называется произведение модуля магнитной индукции \mathbf{B} на площадь этого контура S и на косинус угла α между вектором \mathbf{B} и нормалью к поверхности контура (рис. 3.17):

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (3.62)$$

При перемещении в магнитном поле контура, в котором сила тока поддерживается постоянной, работа сил Ампера

$$A = I(\Phi_2 - \Phi_1), \quad (3.63)$$

где Φ_1 — магнитный поток через поверхность контура тока в начале перемещения, Φ_2 — магнитный поток в конце перемещения.

Изменяющийся магнитный поток возбуждает электрическое поле с замкнутыми линиями напряженности (*вихревое электрическое поле*). В контуре наведенное поле обуславливает возникновение электрического тока, который называется *индукционным*. Это явление называется *электромагнитной индукцией*.

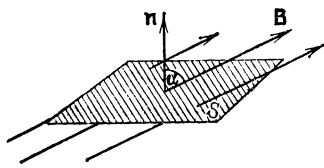


Рис. 3.17. К определению магнитного потока

Электродвижущая сила индукции. Характеристикой наведенного (индуцированного) поля является электродвижущая сила индукции; *э. д. с. индукции* — это работа сил вихревого электрического поля по перемещению положительного заряда 1 кулон.

Электродвижущая сила индукции. Характеристикой наведенного (индуцированного) поля является электродвижущая сила индукции; *э. д. с. индукции* — это работа сил вихревого электрического поля по перемещению положительного заряда 1 кулон.

Индукционный ток имеет такое направление, что создаваемый им магнитный поток препятствует изменению магнитного потока, которое обусловило появление индукционного тока (*правило Ленца*). Другая формулировка правила Ленца: индукционный ток всегда направлен так, чтобы «противодействовать» причине его возникновения.

Электродвижущая сила индукции может быть рассчитана по формуле

$$\mathcal{E} = - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta\Phi/\Delta t = -d\Phi/dt, \quad (3.64)$$

где $\Delta\Phi$ — изменение за время Δt магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром.

Таким образом, *э. д. с. индукции* равна скорости изменения магнитного потока через площадь, ограниченную контуром. Знаки *э. д. с.* и $\Delta\Phi/\Delta t$ противоположны (в соответствии с правилом Ленца).

При изменении тока в проводнике возникает индуцированное (наведенное) поле, которое возбуждается магнитным потоком самого этого тока. Такое явление называется *самоиндукцией*.

Э. д. с. самоиндукции контура определяется по формуле

$$\mathcal{E}_c = - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta\Phi_c/\Delta t = -d\Phi_c/dt, \quad (3.65)$$

где Φ_c — магнитный поток, создаваемый током контура через поверхность, ограниченную этим контуром; этот поток называется *магнитным потоком самоиндукции контура*; $d\Phi_c/dt$ — скорость изменения магнитного потока самоиндукции.

Поток Φ_c пропорционален силе тока I в контуре:

$$\Phi_c = LI. \quad (3.66)$$

Индуктивностью L контура называется положительная скалярная величина, равная отношению потока самоиндукции к силе тока в нем. Если относительная магнитная проницаемость μ постоянна и контур не деформируется, то индуктивность L постоянна; тогда

$$\mathcal{E}_c = -L \, dI/dt, \quad (3.67)$$

где dI/dt — скорость изменения силы тока.

Вследствие самоиндукции плотность тока у поверхности проводника становится больше, чем в середине; изменение плотности тока увеличивается с увеличением частоты. На высоких частотах плотность тока вблизи оси проводника может быть практически равна нулю и отличается от нуля лишь вблизи поверхности проводника. Это явление называется *поверхностным эффектом* (скин-эффектом).

Индуктивность соленоида с сердечником:

$$L = k\mu_0\mu N^2 S/l, \quad (3.68)$$

где μ — относительная магнитная проницаемость, N — число витков, S — площадь поперечного сечения соленоида, l — длина соленоида, k — коэффициент, зависящий от отношения l/d , d — диаметр соленоида. Значения k приводятся в табл. 113.

Индуктивность коаксиального кабеля длиной l :

$$L_k = \mu\mu_0 l \ln (R_2/R_1)/(2\pi), \quad (3.69)$$

где R_2 и R_1 — радиусы внешнего и внутреннего цилиндров.

Индуктивность двухпроводной линии длиной l с радиусом сечения проводов r :

$$L_{\text{л}} = l\mu_0\mu \ln (a/r)/\pi, \quad (3.70)$$

где a — расстояние между осями проводников (при условии $r \ll a$).

Энергия магнитного поля. В пространстве, где имеется магнитное поле, распределена энергия. Энергия W_m магнитного поля вокруг проводника с силой тока I определяется по формуле

$$W_m = LI^2/2, \quad (3.71)$$

где L — индуктивность.

Объемная плотность энергии магнитного поля — величина, равная

$$w_m = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta W_m}{\Delta V} = BH/2 = B^2/(2\mu\mu_0), \quad (3.72)$$

где H — напряженность магнитного поля, равная $B/(\mu\mu_0)$, B — магнитная индукция.

Подъемная сила электромагнита:

$$F = B^2 S / (2\mu_0 \mu), \quad (3.73)$$

где S — площадь поперечного сечения наконечника электромагнита, B — магнитная индукция.

5. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

Диамагнетики и парамагнетики. *Магнетиками* называются вещества, которые во внешнем магнитном поле намагничиваются, т. е. приобретают магнитный момент. Магнетики разделяются на три вида: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

В *диамагнетиках* (инертные газы, золото, цинк, серебро, медь, вода и т. д.) вектор магнитной индукции собственного магнитного поля направлен противоположно вектору магнитной индукции внешнего поля; в *парамагнетиках* (азот, воздух, алюминий, платина и др.) вектор индукции собственного магнитного поля имеет одинаковое направление с вектором магнитной индукции намагничивающего поля.

Диамагнетики и парамагнетики относятся к слабромагнитным веществам, у которых относительная магнитная проницаемость незначительно отличается от единицы: у диамагнетиков $\mu \leq 1$, у парамагнетиков $\mu > 1$.

Количественной мерой намагничивания вещества является *намагниченность* \mathbf{J} — векторная величина, равная отношению векторной суммы магнитных моментов молекул \mathbf{p}_m к объему ΔV , в котором они находятся:

$$\mathbf{J} = \sum \mathbf{p}_m / \Delta V = n \langle \mathbf{p}_m \rangle, \quad (3.74)$$

где n — концентрация молекул, $\langle \mathbf{p}_m \rangle$ — средний магнитный момент одной молекулы, ΔV — малый объем; суммирование проводится по молекулам в объеме ΔV .

В изотропной среде $\mathbf{J} = \kappa \mathbf{H}$. Величина κ называется *магнитной восприимчивостью*; κ — безразмерная величина. В парамагнетиках $\kappa > 0$ (векторы \mathbf{J} и \mathbf{H} параллельны); в диамагнетиках $\kappa < 0$ (векторы \mathbf{J} и \mathbf{H} имеют противоположные направления).

Индукция результирующего поля в магнетиках

$$\mathbf{B} = (1 + \kappa) \mathbf{B}_0 = \mu \mathbf{B}_0, \quad (3.75)$$

т. е. при заполнении пространства однородным магнетиком B увеличивается в μ раз; $\mu = 1 + \kappa$. Величина μ называется *относительной магнитной проницаемостью среды*; эта величина безразмерная и имеет в различных системах единиц одинаковые значения, которые указываются в таблицах; произведение $\mu_0 \mu = \mu_a$ называется *абсолютной магнитной проницаемостью*.

Зависимость J от H (кривая намагничения) для парамагнетиков и диамагнетиков линейная.

Магнитная восприимчивость диамагнетиков (и некоторых парамагнетиков, например, в щелочных металлах) не зависит от температуры. Магнитная восприимчивость парамагнетиков (за немногими исключениями) изменяется обратно пропорционально температуре.

Ферромагнетики. Ферромагнетики (железо, никель, кобальт, некоторые сплавы) относятся к группе сильномагнитных веществ; у них $\mu \gg 1$. Зависимость намагниченности J ферромагнетиков от H нелинейная. Магнитная восприимчивость и проницаемость ферромагнетиков зависят от напряженности поля.

Для ферромагнетиков обычно указывается начальная магнитная проницаемость (μ_n) — предельное значение магнитной проницаемости, т. е. $\mu_n = \lim_{H \rightarrow 0} \mu$.

Зависимость μ от H для ферромагнетиков проходит через максимум (см. рис. 3.19). Обычно указывается и максимальное значение μ_m .

Магнитная восприимчивость ферромагнетиков растет с увеличением температуры. При некоторой температуре θ ферромагнетик превращается в парамагнетик; эта температура называется *температурой (точкой) Кюри*. При температурах выше точки Кюри вещество является парамагнетиком. Вблизи температуры Кюри магнитная восприимчивость ферромагнетика увеличивается. Кривая,

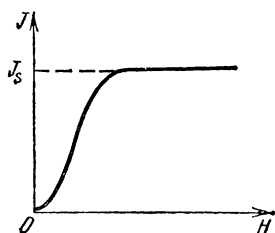


Рис. 3.18. Основная кривая намагничения $J-H$

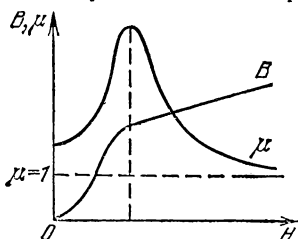


Рис. 3.19. Основная кривая намагничения $B-H$; зависимость μ от H

представляющая зависимость B или J от H , когда ферромагнетик в начальном состоянии был размагничен (т. е. при $H=0$, $J=0$), называется *основной кривой намагничения* (или *начальной кривой намагничения*).

На рис. 3.18, 3.19 показаны основные кривые намагничения на диаграммах $J-H$ и $B-H$.

Намагниченность J увеличивается с увеличением напряженности магнитного поля H , но уже при небольших значениях $H=H_s$

достигается насыщение, т. е. при дальнейшем увеличении $H > H_s$ намагниченность имеет постоянное значение J_s , однако при этом магнитная индукция B продолжает увеличиваться по линейному закону: $B = \mu_0 (H + J_s)$. Величина J_s называется *намагниченностью насыщения*, $B_s = \mu_0 (H_s + J_s)$ называется *магнитной индукцией насыщения*.

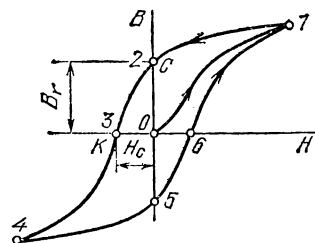


Рис. 3.20. Петля гистерезиса ферромагнетика

На рис. 3.20 основная кривая намагничивания представлена кривой 01.

При уменьшении H до нуля B изменяется по кривой 12; изменение индукции отстает от изменения напряженности поля. Это явление называется *магнитным гистерезисом*.

Магнитная индукция, сохраняющаяся в ферромагнетике после снятия поля (когда $H=0$), называется *остаточной магнитной индукцией* B_r . На рис. 3.20 остаточная индукция B_r определяется отрезком OC . Чтобы размагнитить ферромагнетик, нужно снять остаточную индукцию; для этого необходимо изменить направление H на противоположное. Изменение магнитной индукции в этом случае изобразится кривой 234. Напряженность магнитного поля H_c (отрезок OK на рис. 3.20), при которой магнитная индукция равна нулю, называется *коэрцитивной напряженностью* (*коэрцитивной силой*).

Зависимость B (или J) при изменении напряженности магнитного поля от значений $+H$ до $-H$ выражается замкнутой кривой 1234561. Такая кривая называется *кривой гистерезиса*. За один цикл изменения напряженности от $+H$ до $-H$ в ферромагнетике выделяется количество тепла, пропорциональное площади петли гистерезиса (см. табл. 112).

Свойства ферромагнетиков объясняются наличием в них областей, которые в отсутствие внешнего магнитного поля самопроизвольно намагничены до насыщения; эти области называются *доменами*. Расположение и намагниченность доменов таковы, что в отсутствие поля суммарная намагниченность равна нулю. Когда ферромагнетик помещается в слабое магнитное поле, границы между доменами смещаются; в сильных полях вектор намагниченности доменов поворачивается по направлению намагничивающего поля; в результате ферромагнетик намагничивается.

Ферромагнетик, помещенный в магнитное поле, изменяет свои линейные размеры, т. е. деформируется. Это явление называется *магнитострикцией*. Относительное удлинение зависит от природы ферромагнетика и напряженности магнитного поля. Магнитострикционный эффект не зависит от направления вектора B ; у одних

веществ наблюдается укорочение (никель), у других удлинение (железо в слабых полях) вдоль поля. Это явление используется для получения ультразвуковых колебаний с частотами до 100 кГц.

6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

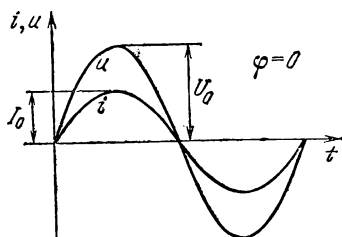
Изменения значений электрических величин (заряда, силы тока, напряжения и т. д.), которые повторяются точно или приблизительно через равные промежутки времени, называются *электрическими колебаниями*. Переменный электрический ток является одним из видов электрических колебаний.

Переменный ток. *Переменным* называется такой ток, сила или направление которого (или то и другое вместе) изменяется во времени. Сила переменного тока в данный момент времени, которая определяется соотношением (3.25), называется *мгновенным значением*. Мгновенные значения силы переменного синусоидального тока и напряжения выражаются формулами:

$$\begin{aligned} i &= I_0 \sin(\omega t + \varphi_1), \\ u &= U_0 \sin(\omega t + \varphi_2), \end{aligned} \quad (3.76)$$

где I_0 и U_0 — наибольшие (амплитудные) значения силы тока и напряжения, ω — угловая частота тока, t — время, $\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi$ — разность фаз между силой тока и напряжением, $\omega = 2\pi f$, f — частота тока, φ_1 , φ_2 — начальные фазы тока и напряжения.

Рис. 3.21. Синусоидальное изменение переменного напряжения и силы электрического тока ($\varphi = 0$)



Графики силы синусоидального тока и напряжения приводятся на рис. 3.21.

Действующим (или *эффeктивным*) значением силы переменного тока называется такая сила постоянного тока, которая на том же самом участке цепи развивает ту же мощность, что и переменный ток. В большинстве случаев (но не всегда) амперметры и вольтметры показывают действующее значение силы тока I или напряжения U . Для синусоидальных токов

$$I = I_0 / \sqrt{2}, \quad U = U_0 / \sqrt{2}, \quad (3.77)$$

где I_0 и U_0 — амплитуды силы тока и напряжения.

Средняя мощность переменного тока в цепи:

$$P = UI \cos \varphi; \quad (3.78)$$

сов φ называется *коэффициентом мощности*.

Величина

$$r_L = \omega L \quad (3.79)$$

называется *индуктивным сопротивлением*. Фаза силы переменного тока на участке цепи с индуктивным сопротивлением отстает на 90° от фазы переменного напряжения на этом участке.

Величина

$$r_C = 1/(\omega C) \quad (3.80)$$

называется *емкостным сопротивлением*. Фаза силы переменного тока на участке цепи с емкостным сопротивлением опережает на 90° фазу переменного напряжения на этом участке.

Колебательный контур. Электрическая цепь, состоящая из катушки индуктивности, конденсатора и резистора, называется *колебательным контуром*. Электрические колебания высокой частоты в большинстве случаев получаются с помощью колебательного контура.

Если конденсатору колебательного контура сообщить электрический заряд, а затем контур замкнуть, то в нем будут происходить колебания тока, напряжения, заряда на конденсаторе. В идеальном случае, когда сопротивление резистора равно нулю, в контуре происходят гармонические колебания.

Период (и угловая частота) свободных колебаний в контуре, в котором нет резистора, определяются по формулам

$$T = 2\pi \sqrt{LC} \quad (\omega_0 = 1/\sqrt{LC}). \quad (3.81)$$

Это соотношение называется *формулой Томсона*.

Если в колебательном контуре имеется резистор сопротивлением r , то свободные колебания в нем будут *затухающими*; в этом случае период колебаний

$$T_3 = 2\pi \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \quad (3.82)$$

ток в контуре изменяется по закону затухающих колебаний (см. гл. I, п. 7):

$$i = I_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t). \quad (3.83)$$

Величина $\delta = r/(2L)$ называется *коэффициентом затухания*.

Вынужденные колебания в контуре. К источнику внешней переменной э. д. с. колебательный контур можно подключить различными способами: а) катушка индуктивности, конденсатор и резистор соединяются последовательно, а концы такой цепи подключаются к источнику переменной э. д. с. (см. рис. 3.22, а); б) катушка индуктивности, конденсатор и резистор соединяются параллельно, а

затем узлы подключаются к источнику переменной э. д. с. (рис. 3.22, б).

В контуре, подключенном к источнику гармонической э. д. с., устанавливаются вынужденные колебания с частотой, равной частоте э. д. с. Отношение амплитуды э. д. с. \mathcal{E}_0 к амплитуде силы тока

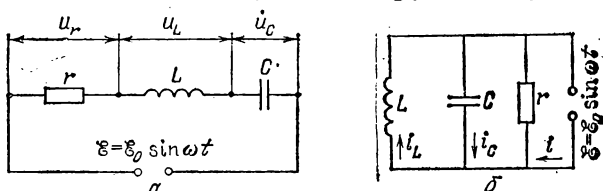


Рис. 3.22. Подключение колебательного контура к источнику э. д. с. последовательное (а) и — параллельное (б)

в общей цепи (при параллельном соединении) называется *полным сопротивлением контура*; величина $X = r_L - r_C$ называется *реактивным сопротивлением*.

Когда частота гармонической э. д. с. ω становится равной $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, амплитуда силы тока в контуре, в котором резистор,

Основные формулы вынужденных электрических колебаний в контуре

Величина	Последовательное соединение (рис. 3.22, а)	Параллельное соединение (рис. 3.22, б)
Полное сопротивление контура	$Z = \sqrt{r^2 + (r_L - r_C)^2}$	$(1/Z')^2 = 1/r^2 + (1/r_L - 1/r_C)^2$
Резонансная частота	$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$	$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$
Сопротивление при резонансе	$Z_p = r$ имеет минимальное значение	$Z'_p = r$ имеет максимальное значение
Амплитуда силы тока	$I_0 = \mathcal{E}_0/Z = I_p/\sqrt{1 + Q^2(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)^2}$	$I'_0 = \mathcal{E}_0/Z'$ I'_0 — амплитуда силы тока в общей цепи
Амплитуда силы тока при резонансе	$I_p = \mathcal{E}_0/r$ — имеет максимальное значение	$I'_p = \mathcal{E}_0/r$ — амплитуда силы тока в общей цепи имеет минимальное значение
Амплитуда напряжения при резонансе на катушке индуктивности и конденсаторе	$U_L = U_C = I_p \sqrt{L/C}$	$\mathcal{E}_0 = I'_p r$
Амплитуда силы тока в катушке индуктивности и конденсаторе	$I_L = I_C = I_p = \mathcal{E}_0/r$	$I'_L = I'_C = \mathcal{E}_0/(\omega L) = \mathcal{E}_0 \sqrt{C/L}$
Разность фаз	$\text{tg } \varphi = (r_L - r_C)/r$	$\text{tg } \varphi' = r(1/r_L - 1/r_C)$

конденсатор и катушка индуктивности соединены последовательно, имеет максимальное значение I_p ; это явление называется *резонансом напряжений*.

В колебательном контуре, элементы которого соединены параллельно, при условии $\omega = \omega_0$ амплитуда силы тока в общей цепи имеет наименьшее значение, а амплитуды силы токов, проходящих через катушку индуктивности и конденсатор, имеют наибольшие значения; это явление называется *резонансом токов*.

Величина $Q = \omega_0 L / r = 1 / (\omega_0 C r)$ называется *добротностью контура*. Основные соотношения между амплитудами э. д. с., сил токов, напряжений и сопротивлений приводятся в таблице на с. 145.

Электромагнитное поле. Согласно закону Био — Савара — Лапласа вокруг проводника с током образуется магнитное поле с замкнутыми линиями магнитной индукции. Такое поле называется *вихревым*. Вокруг провода, по которому течет переменный ток, образуется переменное магнитное поле.

Переменный ток, в отличие от постоянного, проходит через конденсатор, но этот ток не является током проводимости; он называется *током смещения*. Ток смещения представляет собой изменяющееся во времени электрическое поле, которое является источником переменного магнитного поля, как и переменный ток проводимости. В однородной изотропной среде вектор плотности тока смещения:

$$\mathbf{j} = \epsilon \epsilon_0 \frac{d\mathbf{E}}{dt}, \quad (3.84)$$

где $d\mathbf{E}/dt$ — скорость изменения вектора напряженности электрического поля.

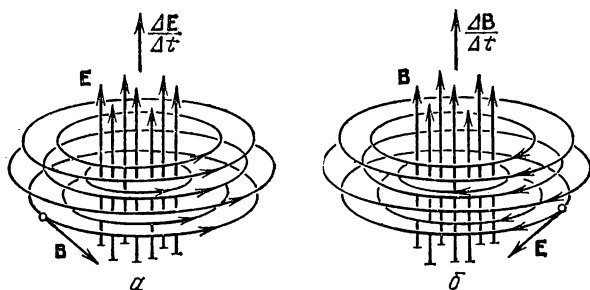
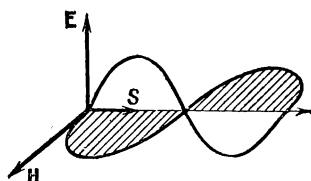


Рис. 3.23. Возникновение электромагнитного поля: *a* — магнитного поля при изменении смещения электрического поля; *b* — вихревого электрического поля при изменении магнитной индукции

В каждой точке пространства вследствие изменения во времени напряженности электрического поля образуется переменное вихревое магнитное поле. Векторы \mathbf{B} возникающего магнитного поля лежат в плоскости, перпендикулярной вектору \mathbf{E} (рис. 3.23, *a*).

Вследствие изменения во времени индукции магнитного поля в каждой точке пространства образуется вихревое электрическое поле. Векторы напряженности возникающего электрического поля \mathbf{E} лежат в плоскости, перпендикулярной вектору магнитной индукции \mathbf{B} (рис. 3.23, б).

Рис. 3.24. Взаимное расположение векторов \mathbf{E} , \mathbf{H} и \mathbf{S} в электромагнитной волне



Совокупность переменных электрического и магнитного полей, которые неразрывно связаны друг с другом, называется *электромагнитным полем*.

Электромагнитная волна — это распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле. Векторы напряженностей электрического и магнитного полей (\mathbf{E} и \mathbf{H}) в электромагнитной волне, распространяющейся в неограниченном пространстве, перпендикулярны друг другу, а направление распространения перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} (рис. 3.24).

Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме не зависит от их длины волны и равна $c = 2,997925 \cdot 10^8$ м/с. Скорость электромагнитных волн в других средах меньше скорости в вакууме:

$$c_1 = c/n, \quad (3.85)$$

где n — показатель преломления среды (см. гл. IV, п. 2).

Электромагнитные волны переносят энергию. *Поверхностная плотность потока излучения* \mathbf{S} — векторная величина, по модулю равная потоку энергии, переносимой волнами через плоскость площадью 1 м^2 , расположенной перпендикулярно направлению их распространения:

$$\mathbf{S} = [\mathbf{E}\mathbf{H}]. \quad (3.86)$$

Вектор \mathbf{S} называется *вектором Пойнтинга*; направление его совпадает с направлением распространения энергии.

Излучение электромагнитных волн. Заряженные частицы, движущиеся с ускорением, излучают электромагнитные волны. Диполь, расстояние между зарядами которого изменяется по гармоническому закону $l_0 \cos \omega t$, излучает электромагнитные волны; поток излучения диполя

$$\Phi_{\text{д}} = Q^2 \omega^4 l_0^2 / (12\pi \epsilon_0 c^3), \quad (3.87)$$

где Q — заряд диполя, ϵ_0 — электрическая постоянная, ω — угловая частота, c — скорость волн в вакууме, Φ_d — средняя энергия, которая излучается за время одна секунда.

Излучателем электромагнитных волн является всякий проводник, по которому проходят переменные токи. Наиболее эффективно

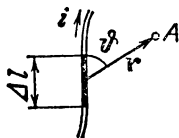


Рис. 3.25. К расчету напряженностей электрического и магнитного полей от элемента тока

излучение происходит тогда, когда размеры излучателя сравнимы с длиной волны излучения. Проводники, эффективно излучающие (или принимающие) электромагнитные волны, называются *антеннами*. Линейным элементом тока $i\Delta l$, в котором сила тока изменяется по гармоническому закону $i = I_0 \cos \omega t$, излучаются электромагнитные волны, в которых напряженности электрического и магнитного полей равны соответственно

$$E = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{I_0 \Delta l}{\lambda r} \sin \vartheta \cos (\omega t - kr), \quad (3.88)$$

$$H = \frac{1}{2} \frac{I_0 \Delta l}{\lambda r} \sin \vartheta \cos (\omega t - kr),$$

где ϑ — угол между прямой, соединяющей элемент тока с точкой наблюдения, и направлением тока в проводнике, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны, r — расстояние между элементом тока и точкой A , в которой определяются напряженности, причем $r \gg \lambda$, $\Delta l \ll r$ (рис. 3.25).

Поток излучения Φ_i , создаваемый линейным элементом тока, рассчитывается по формуле

$$\Phi_i = \frac{2\pi}{3} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left(\frac{i \Delta l}{\lambda} \right)^2. \quad (3.89)$$

ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Таблица 78. Электрическое поле Земли

Высота, км	0	0,5	1,5	3	6	12
Напряженность, В/м	130	50	30	20	10	2,5

Примечания. 1. Заряд грозового облака в большинстве случаев имеет значения $10 \div 20$ Кл, в отдельных случаях до 300 Кл.

2. Средняя поверхностная плотность заряда Земли равна $-1,15$ нКл/м². Земля имеет отрицательный заряд, равный $5,7 \cdot 10^6$ Кл.

Таблица 79. Электроизолирующие материалы

(ϵ —диэлектрическая проницаемость, E —пробивная напряженность, ρ' —плотность, ρ —удельное сопротивление)

Материал	ϵ	E , МВ/м	ρ' , 10^3 кг/м ³	ρ , Ом·м
Асбест	—	2	2,3—2,6	$2 \cdot 10^8$
Бакелит	4—4,6	10—40	1,2	—
Береза сухая	3—4	40—60	0,7	—
Битум	2,6—3,3	6—15	1,2	—
Винилласт	4,1	15	—	—
Воск пчелиный	2,8—2,9	20—35	0,96	$2 \cdot 10^8$ — $2 \cdot 10^{12}$
Гетинакс	5—6,5	10—30	1,3	—
Гуттаперча	4	15	0,95	$2 \cdot 10^7$
Канифоль	3,5	—	1,1	$5 \cdot 10^{14}$
Карболит	—	10—14,5	1,2—1,3	—
Мрамор	8—10	6—10	2,7	$1 \cdot 10^8$
Парафин	2,2—2,3	20—30	0,4—0,91	$3 \cdot 10^{10}$
Плексиглас	3,0—3,6	18,5	1,2	—
Полистирол	2,2—2,8	25—50	1,05—1,65	$5 \cdot 10^{13}$ — $5 \cdot 10^{18}$
Полихлорвинил	3,1—3,5	50	1,38	—
Прессшпан	3—4	9—12	0,9—1,1	$1 \cdot 10^7$
Радиофарфор	6,0	15—20	2,5—2,6	—
Резина мягкая	2,6—3	15—25	1,7—2,0	$4 \cdot 10^{11}$
Слюда мусковит	4,5—8	50—200	2,8—3,2	—
Слюда флогопит	4—5,5	60—125	2,5—2,7	10^{11} — 10^{16}
Стекло	4—10	20—30	2,2—4,0	10^9 — 10^{12}
Текстолит	7	2—8	1,3—1,4	—
Фарфор электротехнический	6,5	20	2,4	$3 \cdot 10^{12}$
Фибра сухая	2,5—8	2—6	1,1—1,94	$5 \cdot 10^7$
Фторопласт-3	2,5—2,7	—	2,14	$1,2 \cdot 10^{11}$
Целлулоид	3—4	30	—	$2 \cdot 10^8$
Шелк натуральный	4—5	—	—	—
Шеллак	3,5	50	1,02	$1 \cdot 10^{14}$
Шифер	6—7	5—14	2,6—2,9	10^9
Эбонит	4—4,5	25	1,3	$1 \cdot 10^{10}$
Янтарь	2,7—2,9	20—30	1,06—1,11	$1 \cdot 10^{10}$

Примечания. 1. Пробивная напряженность—это максимально допустимое значение напряженности; при больших значениях напряженности диэлектрик пробивается.

2. Приведенные значения диэлектрической проницаемости относятся к температурам 18 — 20 °С. Диэлектрическая проницаемость твердых тел мало изменяется с температурой, за исключением сегнетоэлектриков (см. рис. 3.26).

Таблица 80. Диэлектрическая проницаемость жидкостей

Вещество	Температура, °С						
	0	10	20	25	30	40	50
Ацетон	23,3	22,5	21,4	20,9	20,5	19,5	18,7
Бензол	—	2,30	2,29	2,27	2,26	2,25	2,22
Глицерин	—	—	56,2	—	—	—	—
Керосин	—	—	2,0	—	—	—	—
Четыреххлористый углерод	—	—	2,24	2,23	—	2,20	2,18
Этиловый спирт	27,88	26,41	25,00	24,25	23,25	22,16	20,87
Этиловый эфир	4,80	4,58	4,38	4,27	4,15	—	—

Примечание. Примеси в небольших количествах мало влияют на значение диэлектрической проницаемости.

Таблица 81. Диэлектрическая проницаемость газов

(при 18 °С и нормальном давлении)

Вещество	$(\epsilon - 1) \cdot 10^{-5}$	Вещество	$(\epsilon - 1) \cdot 10^{-5}$
Азот	61	Кислород	55
Водород	26	Пары воды	780
Воздух	59	Углекислый газ	97
Гелий	7		

Примечание. Диэлектрическая проницаемость газов уменьшается с повышением температуры и возрастает с увеличением давления.

Таблица 82. Свойства сегнетоэлектриков

Сегнетоэлектрик	T_K , К	$10^{-3} p_s$, Кл/м ²	ϵ
Сегнетова соль	296	2,5	200
	258		
Дигидрофосфат калия (КДР)	123	51	42
Дигидроарсенат калия (КДА)	95,6	—	54
Дигидрофосфат аммония (АДР)	148	48	56
Титанат бария	391	250	3000
Ниобат калия	708	257	—
Ниобат лития	1470	500	29—84

Примечания. I. Обозначения: T_K — точка Кюри, p_s — спонтанная поляризация (поляризованность), ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость.

2. У сегнетовой соли указан интервал температур, в котором проявляются сегнетоэлектрические свойства.

3. Указаны максимальные значения диэлектрической проницаемости и спонтанной поляризации.

Диэлектрическая проницаемость сегнетовой соли и титаната бария

Рис. 3.26. Зависимость диэлектрической проницаемости пластинки сегнетовой соли от температуры. Две кривые соответствуют различным напряженностям поля

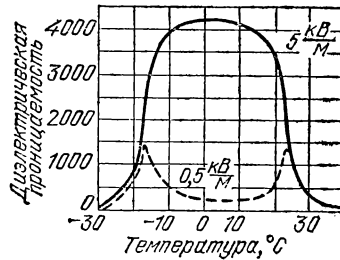


Рис. 3.27. Зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария и сегнетовой соли от напряженности поля (при 20 °С)

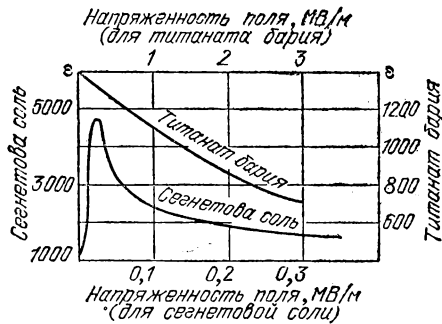


Таблица 83. Пьезоэлектрические модули кристаллов

Кристалл	пКл/Н	Кристалл	пКл/Н
Кварц	2,31 (d_{11})	Дигидрофосфат аммония (АДР)	48 (d_{30})
Титанат бария	3,90 (d_{15})	Дигидрофосфат калия (КДР)	21 (d_{30})
Цинковая обманка	3,3 (d_{14})	Ниобат лития	68 (d_{15})
Сегнетова соль	345 (d_{14})	Сульфат лития	18,3 (d_{22})
Турмалин	3,8 (d_{18})	Сульфид кадмия	14 (d_{18})

Примечание. Некоторые кристаллы имеют различные модули в зависимости от направления деформации; в этом случае приводятся наибольшие значения (в скобках указано обозначение модуля).

Электрические токи в атмосфере Земли

Под действием электрического поля Земли (см. табл. 78) в атмосфере устанавливается ток проводимости, направленный вертикально вниз; плотность этого тока почти не изменяется с высотой и равна в районе «ясной» погоды $(2-3) \cdot 10^{-12}$ А/м². Токи противоположного направления создаются в районах с грозовой деятельностью.

Плотность тока в гидросфере 10 мА/м².

Плотность токов, обусловленных движением зарядов на каплях дождя, снега, града, равна: при спокойных дождях ($10^{-7} + 10^{-6}$) А/м², при грозовых ливнях и граде до 10^{-4} А/м².

Сила тока достигает в молнии 0,5 МА (наиболее часто сила тока в молнии лежит в пределах от 20 до 40 кА); напряжение достигает 10^9 В; длительность молнии—около 1 мс, длина—примерно 10 км, толщина канала—до 20 см.

Концентрация электронов в атмосфере

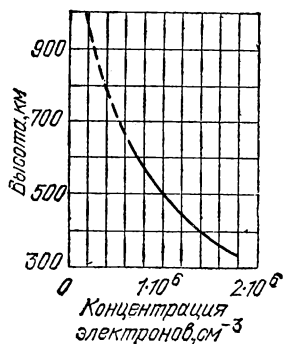


Рис. 3.28. Изменение концентрации электронов в атмосфере с высотой. Штриховая часть кривой соответствует приближенным значениям

Таблица 84. Удельное электрическое сопротивление и температурный коэффициент сопротивления металлов (при 20 °С)

Металл	ρ , 10^{-8} Ом·м	α , 10^{-3} К ⁻¹
Алюминий	2,8	4,9
Бронза фосфористая	8,0	4,0
Вольфрам	5,5	4,5
Железо	9,8	6,2
Латунь	2,5—6,0	2—7
Медь	1,75	3,9
Молибден	5,7	3,3
Никель	10,0	5,0
Олово	11,5	4,2
Свинец	22,1	4,1
Ртуть	95,8	0,9
Серебро	1,6	3,6
Тантал	15,5	3,1
Хром	2,7	—
Цинк	5,9	3,5

Примечание. Указанные в таблице значения являются средними; для различных образцов они зависят от степени чистоты, термообработки и т. д.

Температурный коэффициент сопротивления чистых металлов близок к $(1/273) \text{ К}^{-1} = 0,00367 \text{ К}^{-1}$.

Таблица 85. Температура перехода металлов и сплавов в сверхпроводящее состояние

Вещество	T, К	Вещество	T, К	Вещество	T, К
<i>Металлы</i>		<i>Сплавы</i>		<i>Соединения</i>	
Цирконий	0,3	Вl—Pt	0,16	NiBi	4,2
Кадмий	0,6	Pb—Au	2,0—7,3	PbSe	5,0
Цинк	0,8	Sn—Zn	3,7	NbBi ₂	5,5
Алюминий	1,2	Pb—Hg	4,1—7,3	NbB	6
Олово	3,7	п—Hg	4,2	MoC	7,6—8,3
Ртуть	4,1	б—Ag	5,8—7,3	Nb ₂ O	9,2
Тантал	4,4	Pb—SB	6,6	NbC	10,1—10,5
Свинец	7,3	Pb—Ca	7,0	NbN	15—16
Ниобий	9,2			V ₃ Si	17,1
				Nb ₃ Sn	18

Примечания. 1. Имеется несколько сверхпроводящих сплавов с большим числом компонент: металл Розе (8,5 К), металл Ньютона (8,5 К), металл Вуда (8,2 К), Pb—As—Bi (9,0 К), Pb—As—Bi—Sb (9,0 К).

2. Сопротивление у соединений и сплавов при переходе к сверхпроводимости изменяется в значительном интервале температур (иногда около 2К). Кроме того, температура перехода зависит от способа термической обработки сплава или соединения. В таких случаях в таблице указаны границы изменения температуры перехода.

Таблица 86. Сплавы с высоким активным сопротивлением

Сплав (состав в %)	$10^{-8} \rho, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$10^{-3} \alpha, \text{ К}^{-1}$	t, °C
Константан (58,8 Cu, 40 Ni, 1,2 Mn)	0,44—0,52	0,01	500
Манганин (85Cu, 12Mn, 3Ni)	0,42—0,48	0,03	100
Нейзильбер (65Cu, 20Zn, 15Ni)	0,28—0,35	0,04	150
Никелин (54Cu, 20Zn, 26Ni)	0,39—0,45	0,02	1000
Нихром (67,5Ni, 15Cr, 16Fe, 1,5Mn)	1,0—1,1	0,2	1000
Рсотан (84Cu, 12Mn, 4Zn)	0,45—0,52	0,4	150
Фехраль (80Fe, 14Cr, 6Al)	1,1—1,3	0,1	900

Примечание. Указаны средние значения температурного коэффициента сопротивления α в интервале температур от 0 до 100 °C. В последней графе указаны максимально допустимые температуры.

Значение температурного коэффициента сопротивления для константана изменяется от $-0,00004$ до $+0,00001$ в зависимости от образца. Минус температурного коэффициента указывает на то, что с увеличением температуры сопротивление уменьшается.

Таблица 87. Допустимые силы тока в изолированных проводах при продолжительной работе (в амперах)

Материал	Сечение, мм ²							
	1	1,5	2,5	4	6	10	16	25
Алюминий	8	11	16	20	24	34	60	80
Железо	—	—	8	10	12	17	30	—
Медь	11	14	20	25	31	43	75	100

Таблица 88. Плавкие предохранители

Сила тока, А	5	15	30	60	100
Диаметр медной проволоки, мм	0,213	0,508	0,914	1,42	2,03

Примечание. Номинальная сила тока, указываемая на предохранителе, является предельной, при которой ток может протекать длительное время. Сила тока в 1,8—2 раза больше номинальной быстро расплавляет проволочку в предохранителе.

Электропроводность водных растворов

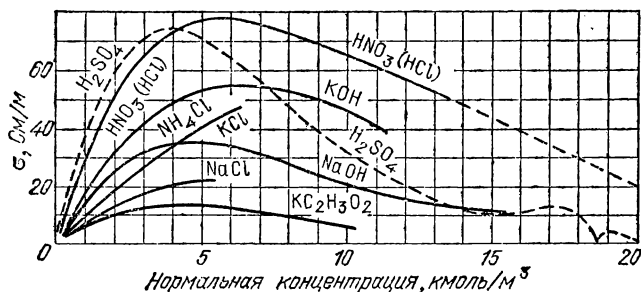


Рис. 3.29. Зависимость электропроводности от концентрации водных растворов некоторых соединений (при 18 °С). Указана нормальная концентрация ионов. Единицей нормальной концентрации ионов является такая концентрация, когда в объеме 1 литр содержится 1/п часть моля ионов (п-валентность иона)

Таблица 89. Удельное сопротивление электролитов для различных концентраций (при 18 °С)

Растворенное вещество	С, %	$\rho', 10^3 \text{ кг/м}^3$	$\rho, 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$	$\kappa, \text{ К}^{-1}$
Азотная кислота	10	1,05	2,1	0,0145
	20	1,12	1,6	0,0137
	30	1,18	1,3	0,0139
	40	1,25	1,4	0,0150
Едкий натр	5	1,05	5,1	0,0201
	10	1,11	3,2	0,0217
	20	1,22	3,0	0,0299
	40	1,43	8,3	0,0648

Таблица 89 (продолжение)

Растворенное вещество	C, %	ρ' , 10^3 кг/м ³	ρ , 10^{-2} Ом·м	μ , К ⁻¹
Медный купорос	5	1,062	52,9	0,0216
	10	1,107	31,8	0,0218
	17,5	1,208	23,8	0,0236
Нашатырь	5	1,014	10,9	0,0198
	10	1,029	8,8	0,0186
	20	1,057	8,0	0,0161
Поваренная соль	5	1,034	14,9	0,0217
	10	1,071	8,3	0,0214
	20	1,148	5,1	0,0716
Серная кислота	5	1,032	4,8	0,0121
	20	1,14	1,6	0,0145
	30	1,22	1,4	0,0162
	40	1,30	1,8	0,0178
Соляная кислота	5	1,023	2,5	0,0158
	20	1,1	1,3	0,0154
	40	1,2	1,9	—
Цинковый купорос	5	1,062	52,4	0,0225
	10	1,107	31,2	0,0223
	20	1,232	21,3	0,0243

Примечание. Удельное сопротивление электролитов с повышением температуры уменьшается (в отличие от металлов). Удельное сопротивление ρ_t при температуре t может быть подсчитано по формуле $\rho_t = \rho_{18} (1 - \mu(t - 18))$, где μ — температурный коэффициент, указанный в таблице, ρ_{18} — удельное сопротивление при 18 °С.

Таблица 90. Термоэлектродвижущая сила пар металлов (мВ)

Температура спая, °С	Платина—платина с 10% родия	Железо—константан	Медь—константан	Температура спая, °С	Платина—платина с 10% родия	Железо—константан
100	0,64	5	4	700	6,26	39
200	1,44	11	9	800	7,33	46
300	2,32	16	15	1000	9,57	58
400	3,25	22	21	1500	15,50	—
500	4,22	27	—	—	—	—

Примечание. Температура другого спая поддерживается при 0 °С.

Таблица 91. Постоянная т.э.д.с. относительно платины (при 0 °С)

Металл	α , мкВ/К	Металл	α , мкВ/К
Висмут	—65,0	Никель	—16,4
Железо	16,0	Сурьма	17,0
Закись меди	1000	Сурьмянистый цинк	200
Константан	—34,4	Теллуристый свинец	—300
Медь	7,4		

Примечание. Знаки указывают, что ток в нагретом спая течет от металла с меньшим алгебраическим значением α . Например, в паре медь—константан ток в нагретом спая будет идти от константана к меди.

Постоянная пары медь — константан

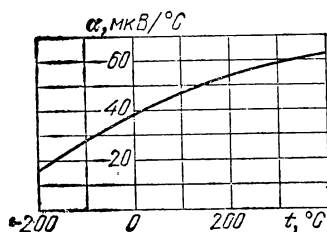


Рис. 3.30. Зависимость постоянной т. э. д. с. от температуры для пары медь — константан

Таблица 92. Электрохимические эквиваленты

Ион	μ/n , г/моль	k , мг/Кл	Ион	μ/n , г/моль	k , мг/Кл
H ⁺	1,008	0,0104	CO ₃ ²⁻	30,0	0,3103
OH ⁻	8,0	0,0829	Cu ⁺⁺	31,8	0,3297
Al ⁺⁺⁺	9,0	0,0936	Zn ⁺⁺	32,7	0,3387
OH ⁻	17,0	0,1762	Cl ⁻	35,5	0,3672
Fe ⁺⁺⁺	18,6	0,1930	SO ₄ ²⁻	48,0	0,4975
Ca ⁺⁺	20,1	0,2077	NO ₃ ⁻	62,0	0,642
Na ⁺	23,0	0,2388	Cu ⁺	63,6	0,6590
Fe ⁺⁺	27,8	0,2895	Ag ⁺	107,9	1,118

Примечание. Количество плюсов или минусов у символов показывает число элементарных зарядов, переносимых одним ионом; μ — молярная масса, n — валентность.

Таблица 93. Стандартные потенциалы при 298 К

Электрод	E° , В	Электрод	E° , В
Li ⁺ , Li	-3,024	H ₂ O ⁺ , Pt, H ₂	0,000
K ⁺ , K	-2,924	AgBr, Ag, Br ⁻	0,073
Na ⁺ , Na	-2,714	AgCl, Ag, Cl ⁻	0,2225
Mg ⁺⁺ , Mg	-2,37	Каломельный (насыщ.)	0,242
Al ⁺⁺⁺ , Al	-1,66	HgCl, Hg, Cl ⁻	0,2681
Zn ⁺⁺ , Zn	-0,761	Cu ²⁺ , Cu	0,339
Fe ⁺⁺ , Fe	-0,441	I ₂ , Pt, I ⁻	0,535
Cd ⁺⁺ , Cd	-0,402	Ag ⁺ , Ag	0,799
PbSO ₄ , Pb, SO ₄ ²⁻	-0,350	Hg ₂ ²⁺ , Hg	0,799
Ni ⁺⁺ , Ni	-0,236	Br ₂ , Pt, Br ⁻	1,065
Pb ⁺⁺ , Pb	-0,126	Cl ₂ , Pt, Cl ⁻	1,358

Зарядка и разрядка аккумуляторов

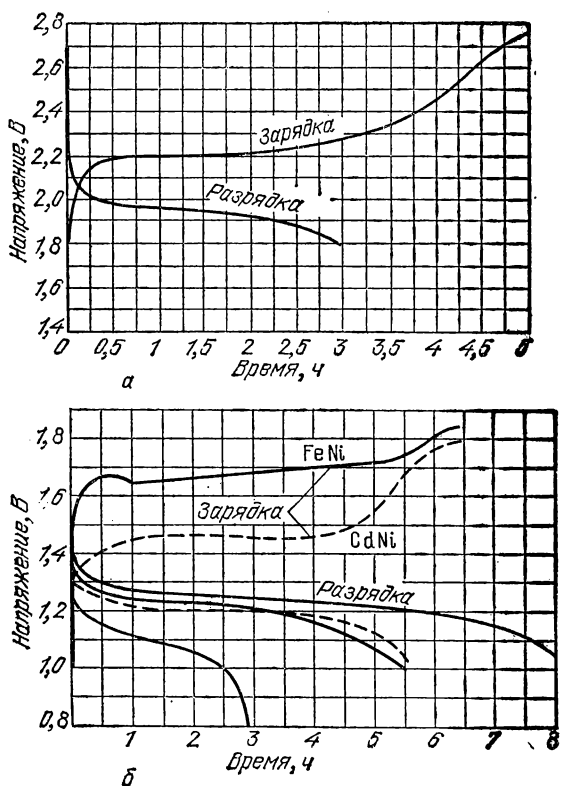


Рис. 3.31. Изменение напряжения аккумулятора: *a* — на одной банке кислотного аккумулятора при зарядке нормальным током, $Q/4$, А ($Q = Q'/3600$, где Q' — емкость аккумулятора, Кл) и при разрядке током для трехчасового режима, $Q/3$, А; *b* — на одной банке при зарядке и разрядке железоникелевых (сплошные линии) и кадмиево-никелевых (штриховая линия) аккумуляторов. Зарядка ведется при нормальном режиме, $Q/6$, А (6 ч), разрядка — при пятичасовом режиме, $Q/5$, А. Для железоникелевых аккумуляторов указаны кривые для *посыпн* часового, $Q/8$, А, и трехчасового, $Q/3$, А, режима разрядки

Таблица 94. Э.д.с. гальванических элементов

Название элемента	Отрицательный электрод	Положительный электрод	Раствор	Э.д.с., В
Аккумулятор кислотный свинцовый	Губчатый свинец	Диоксид свинца (PbO_2)	27—28%-ный раствор H_2SO_4 свободный от хлора, плотность 1,20 (при 20 °С)	2,0—1,9
Аккумулятор щелочной серебряно-цинковый	Оксид цинка (ZnO)	Серебро	Раствор едкого кали (KOH)	1,5
Аккумулятор щелочной железо-никелевый (или кадмиево-никелевый)	Порошкообразное железо (или кадмий с примесью окислов железа)	Гидроксид никеля $Ni(OH)_2$ (после заряда)	20%-ный раствор едкого кали (KOH)	1,4—1,1
Элемент Вестона нормальный	Амальгама кадмия (сплав кадмия со ртутью)	Ртуть	Насыщенный раствор $CdSO_4$, паста из Hg_2SO_4 и $CdSO_4$	1,0183
Элемент Грене	Цинк	Графит	12 частей $K_2Cr_2O_7$, 25 частей H_2SO_4 , 100 частей H_2O	2,01
Элемент Даниэля	Цинк	Медь	Растворы у электродов разделены; цинк в растворе серной кислоты (5—10%), медь в насыщенном растворе медного купороса $CuSO_4$	1,1
Элемент Лекланше	Цинк	Графит	Раствор NH_4Cl в воде, диоксид марганца, угольный порошок	1,3—1,5
Элемент Лекланше сухой	Цинк	Графит, диоксид марганца (MnO_2)	1 часть ZnO , 1 часть NH_4Cl , 3 части $ZnCl_2$ и вода до получения пасты	1,3

Таблица 95. Подвижность ионов в водных растворах (при 18°C)

Катион	$u, 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{с}\cdot\text{В})$	Анион	$u, 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{с}\cdot\text{В})$
H ⁺	32,63	OH ⁻	18,0
K ⁺	6,69	Cl ⁻	6,8
Na ⁺	4,5	NO ₃ ⁻	6,2
Ag ⁺	5,6	SO ₄ ⁻	6,8
Zn ⁺⁺	4,8	CO ₃ ⁻⁻	6,2
Fe ⁺⁺⁺	4,6		

Примечания. 1. При повышении температуры на 1°C подвижности ионов возрастают примерно на 2%.

2. Число плюсов или минусов у символа равно количеству элементарных зарядов, переносимых одним ионом.

Таблица 96. Подвижность электронов в металлах

Металл	Ag	Na	Be	Cu	Au	Li	Al	Cd	Zn
Подвижность, $10^{-4} \text{ м}^2/(\text{с}\cdot\text{В})$	56	48	44	35	30	19	10	7,9	5,8

Примечание. Практически напряженность поля внутри металлов не превышает 0,1 В/м, а поэтому скорости упорядоченного движения электронов имеют малые значения (несколько мм/с).

Таблица 97. Подвижность ионов в газах при нормальном давлении и 20°C ($10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$)

Газ	Положительные ионы	Отрицательные ионы	Газ	Положительные ионы	Отрицательные ионы
Азот	2,7	—	Воздух сухой	1,4	1,9
Аргон	1,5	1,7	Гелий	16,0	—
Водород	6,3	8,1	Кислород	1,3	1,8
Воздух, насыщенный парами воды	1,4	2,1	Ртуть (давл. 133 Па)	220	—
			Углекислый газ	0,8	0,8

Примечания. 1. В общем случае подвижность зависит от отношения напряженности электрического поля в газе E к давлению газа p . При небольших значениях отношения E/p подвижность остается неизменной; при значениях упорядоченных скоростей ионов, сравнимых со скоростями их теплового движения, подвижность ионов изменяется.

2. Подвижность данного вида ионов изменяется обратно пропорционально плотности газа; при постоянной температуре подвижность изменяется обратно пропорционально давлению (в интервале давлений от 13 до $6 \cdot 10^4$ Па). От заряда иона подвижность зависит слабо.

3. Подвижность в сильной степени зависит от чистоты газа. Поэтому приведенные в таблице значения следует рассматривать как ориентировочные.

Таблица 98. Работа ионизации

Ионизация	$E_{и}$, эВ	Ионизация	$E_{и}$, эВ	Ионизация	$E_{и}$, эВ
He-He ⁺	24,5	CO ₂ -CO ₂ ⁺	14,4	Xe-Xe ⁺	12,8
Ne-Ne ⁺	21,5				
N ₂ -N ₂ ⁺⁺	15,8	Kr-Kr ⁺	13,9	O ₂ -O ₂ ⁺	12,5
Ar-Ar ⁺	15,7	H-H ⁺	13,5	Hg-Hg ⁺	10,4
H ₂ -H ₂ ⁺	15,4	O-O ⁺	13,5	Na-Na ⁺	5,1
N-N ⁺	14,5	H ₂ O-H ₂ O ⁺	13,2	K-K ⁺	4,3

Таблица 99. Эмиссионные постоянные металлов и полупроводников

Элемент	A, эВ	B, 10 ⁴ A/(м ² ·К ²)	Элемент	A, эВ	B, 10 ⁴ A/(м ² ·К ²)
Алюминий	3,74	—	Олово	4,31	—
Барий	2,29	—	Платина	5,29	32
Вольфрам	4,50	60—100	Селен	4,72	—
Германий	4,56	—	Сурьма	2,35	—
Железо	4,36	26	Теллур	4,12	—
Кремний	4,10	—	Торий	3,41	70
Медь	4,47	65	Уран	3,74	—
Молибден	4,37	115	Хром	4,51	48
Никель	4,84	30	Цезий	1,89	160

Примечание. Работа выхода сильно зависит от чистоты поверхностей и от примесей. Приведенные данные относятся к чистым образцам.

Таблица 100. Эмиссионные постоянные пленок на металлах

Металл	Пленка	A, эВ	B, 10 ⁴ A/(м ² ·К ²)
Вольфрам	Барий	1,56	1,5
»	Торий	2,63	3,0
»	Уран	2,81	3,2
»	Цезий	1,36	3,2
»	Цирконий	3,14	5,0
Молибден	Торий	2,58	1,5
Тантал	»	2,52	0,6

Таблица 101. Эмиссионные постоянные оксидных катодов

Вид катода	A, эВ	B, 10^4 A/(M ² ·K ²)
Барий на окисленном вольфраме	1,10	0,3
Никель BaO—SrO	1,20	0,96
Барий—кислород—вольфрам	1,34	0,18
Pt—Ni; BaO—SrO	1,37	2,45
BaO на никелевом сплаве	1,50—1,83	0,087—2,18
Ториево-оксидный катод (среднее значение)	2,59	4,35

Таблица 102. Свойства полупроводников

($t_{пл}$ —температура плавления, E_0 —ширина запрещенной зоны, μ_n , μ_p —подвижности электронов и дырок)

Вещество	$t_{пл}$, °C	E_0 , эВ	$10^{-2} \frac{\mu_n}{M^2/(B \cdot c)}$	$10^{-2} \frac{\mu_p}{M^2/(B \cdot c)}$
Бор (B)	2030	1,16	0,01	0,5
Алмаз (C)	4030	5,4	18	14
Фосфор (черный) (P)	44	0,33	2,2	3,5
Мышьяк (серый) (As)	817	1,2	0,65	0,65
Олово (α -Sn)	232	0,08	25	24
Сурьма (Sb)	630	0,13	—	—
Селен (серый) (Se)	217	2,8	—	0,2
Теллур (Te)	450	0,32	17	12
Иод (I)	114	1,3	0,25	—
Кремний (Si)	1414	1,15	19	5
Германий (Ge)	958	0,75	39	19
Селенид свинца (PbSe)	1065	0,5	14	14
Сульфид свинца (PbS)	1114	1,2	6,5	8
Бромистое серебро (AgBr)	430	2,0	2,4	1000 (1,7 K)
Сульфид кадмия (CdS)	1750	2,5	3,5	15—50
Закись меди (Cu ₂ O)	1232	1,5—2,2	—	1
Рубин (α -Al ₂ O ₃)	2050	2,5	—	—
Оксид цинка (цинкит)	1975	3,4	2	—

Примечание. Значения подвижностей указаны для комнатной температуры при напряженностях, которые меньше критического поля.

Вследствие зависимости подвижности от напряженности электрического поля, в полупроводниках могут наблюдаться отступления от закона Ома. Наименьшая напряженность поля, начиная с которой наблюдаются отступления от закона Ома, называется *критическим полем*.

При $t=20^\circ\text{C}$ критическое поле в *n*-германии—0,9 кВ/см, *p*-германии—1,4 кВ/см, *n*-кремнии—2,5 кВ/см, *p*-кремнии—7,5 кВ/см. С понижением температуры критическое поле уменьшается.

Удельное электрическое сопротивление германия и кремния

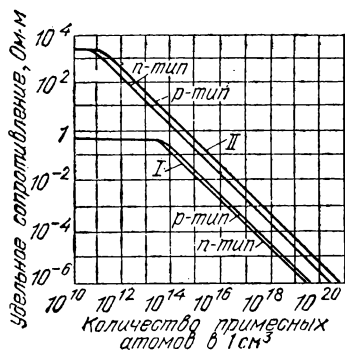


Рис. 3.32. Зависимость удельного сопротивления германия (I) и кремния (II) от концентрации примесных атомов. Температура — около 20 °С

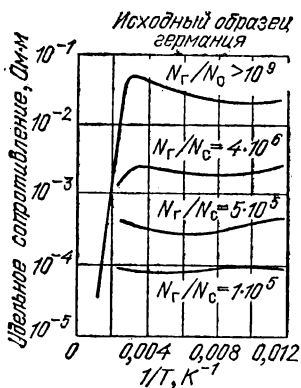


Рис. 3.33. Зависимость удельного сопротивления германия от температуры. По оси ординат отложены значения сопротивления в логарифмическом масштабе, по оси абсцисс — величина, обратная температуре; N_r — число атомов германия, N_c — число атомов сурьмы

Напряжение пробоя между плоскими электродами

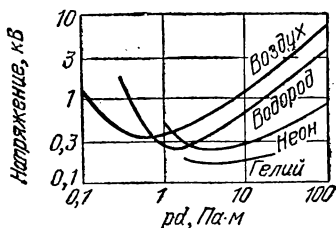


Рис. 3.34. Зависимость напряжения пробоя для плоских металлических электродов от величины rd (p — Давление газа, d — расстояние между электродами)

Таблица 103. Искровые промежутки в воздухе

(в миллиметрах при нормальном давлении)

Напряжение, кВ	Форма металлических электродов			Напряжение, кВ	Форма металлических электродов		
	Два острия	Два шара диаметром 5 см	Две плоскости		Два острия	Два шара диаметром 5 см	Две плоскости
20	15,5	5,8	6,1	200	410	262	75,3
40	45,5	13	13,7	300	600	330	114
100	200	36,7					

Магнитное поле Земли

Земля окружена магнитным полем.

Точки Земли, в которых напряженность магнитного поля имеет вертикальное направление, называются *магнитными полюсами*. Таких точек на Земле две: Северный магнитный полюс, где линии магнитной индукции направлены перпендикулярно горизонтальной плоскости вниз, и Южный магнитный полюс, где линии магнитной индукции направлены перпендикулярно горизонтальной плоскости от центра Земли. Магнитные и географические полюсы Земли не совпадают; Северный магнитный полюс находится в южном полушарии, Южный магнитный полюс — в северном полушарии. Положение магнитных полюсов изменяется с течением времени.

Прямая, проходящая через магнитные полюсы, называется *магнитной осью Земли*. Окружность большого круга в плоскости, которая перпендикулярна магнитной оси, называется *магнитным экватором*. Напряженность магнитного поля в точках магнитного экватора имеет горизонтальное направление. Магнитная ось не совпадает с осью суточного вращения Земли.

Напряженность магнитного поля на магнитном экваторе — около 27,1 А/м, у магнитных полюсов — около 52,5 А/м. В некоторых районах, называемых магнитными аномалиями, напряженность резко возрастает; в районе Курской магнитной аномалии она достигает ~ 160 А/м.

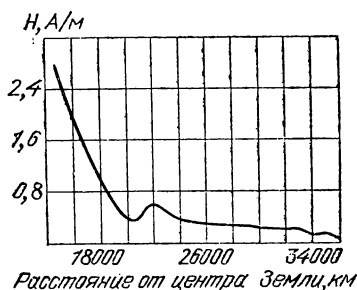


Рис. 3.35. Напряженность магнитного поля Земли на больших высотах

Таблица 104. Свойства электротехнических сталей

Марка стали	μ_H	H_c , А/м	H_0 , А/м	B , Тл	ρ , 10^{-8} Ом·м
Э31	250	5500	43,8	1,46	0,5
Э41	300	6000	35,8	1,46	0,6
Э42	400	7500	31,8	1,45	0,6
Э45	600	10000	19,9	1,46	0,6
Э310	1000	30000	9,6	1,75	0,5

Примечание. μ_H — начальная магнитная проницаемость, H_c — коэрцитивная сила, B — магнитная индукция при напряженности $H = 2$ кА/м.

Электротехнические стали относятся к магнитно-мягким материалам; они содержат 0,3—6% кремния и 0,1—0,3% марганца.

Таблица 105. Свойства магнитных (легированных) сталей

Марка стали	H_c , кА/м	B_r , Тл	ρ , 10^{-7} Ом·м	BH , кДж/м ³
ЕХЗ	4,8	0,95	2,9	2,4
Е7В6	4,8	1,0	3,0	2,6
ЕХ5К5	7,2	0,85	3,0	3,2
ЕХ9К15М	11,9	0,80	2,8	4,1

Примечание. H_c —коэрцитивная сила, B_r —остаточная индукция.

Таблица 106. Свойства магнитно-твердых материалов

Марка материала, состав в % (по массе)	B_r , Тл	H_c , кА/м	BH , кДж/м ³
У 13(1,3С; 98,7Fe)	0,8	4,8	1,8
Е 7В6(0,7С; 0,4Сr; 5,7W; 0,4Si; 92,8Fe)	1,04	5,4	2,9
ЕХ9К 15М (1С; 9Сr; 1,5Мо; 88,5Fe)	0,82	12,7	4,4
12КМВ—комол (12Сo; 6Мо; 12W; 70Fe)	1,05	19,9	8,8
ЮНД 4—ални (25Ni; 12Al; 4Cu; 59Fe)	0,61	39,8	7,2
ЮНДК 24—магнико (14Ni; 8Al; 24Сo; 3Cu; 51Fe)	1,23	47,8	31,8
ЮНДК 35 Т5ВА—тиконал (14Ni; 8Al; 35Сo; 3Cu; 5Ti; Nb < 1)	1,0	119,4	79,6
ПлК 76—платинакс (76Pt; 24Сo)	0,79	318,4	95,5
52КФ13—викалой (52Сo; 13V; 35Fe)	0,6	39,8	—
2 ФК—кобальт-феррит (CoO·Fe ₂ O ₃)	0,3	143,3	15,9
1 БИ—барий-феррит (BaO·6Fe ₂ O ₃), изотропный	0,2	135,3	8,0
3 БА—барий-феррит (BaO·6Fe ₂ O ₃), анизотропный	0,37	159,2	23,8
Co ₅ Sm, анизотропный	0,94	270,6	191,0

Примечания. 1. Эти материалы отличаются высокой коэрцитивной силой и применяются для изготовления постоянных магнитов. Важной характеристикой их является наибольшее значение величины BH , которая пропорциональна максимальной энергии магнитного поля, окружающего ферромагнетик.

2. Обозначения; B_r —остаточная магнитная индукция, H_c —коэрцитивная сила.

Таблица 107. Свойства магнитно-мягких материалов

Марка материала, состав % (по массе)	B_s , 10^{-3} Тл	θ , °С	$10^{-6} \rho$, Ом·м	μ_n , 10^4	H_c , А/м
80 НМ — супермаллой (80Ni, 5Mo, 15Fe)	8	400	0,55	100 (1000)	0,4
79 НМ — молибдено- вый пермаллой (79Ni, 4Mo, 17Fe)	8	450	0,5	40 (200)	1,0
50 Н (50Ni, 50Fe)	15	500	0,45	5 (100)	8,0
40 НКМП — перминвар (40Ni, 25Co, 4Mo, 31Fe)	14	600	0,63	2 (~2)	—
49 КФ-ВИ — пермен- дюр (49Co, 2V, 49Fe)	23,5	930	0,4	1 (50)	40
10 СЮ — альсифер (5,4Al; 9,6Si; 0,005— 0,08Ge; ~85Fe)	—	500	0,7	15—20 (50—70)	0,4—3,3
Железо армко (100Fe)	21,5	768	0,12	0,5 (10)	63,7
Железо карбонильное (96,8Fe; 1,2O ₂)	0,8—1,1	768	—	10—20	8—40
Ni — Zn феррит	2—3	150—500	10^6	50—500	39,8—
(Ni, Zn) O·Fe ₂ O ₃					119,4
Mn — Zn феррит	3,5—4	170	10^6	1000	47,8
(Mn, Zn) O·Fe ₂ O ₃				(2500)	

Примечания. 1. Обозначения: B_s — индукция насыщения; μ_n — начальная магнитная проницаемость (в скобках указаны максимальные значения магнитной проницаемости); θ — температура Кюри; H_c — коэрцитивная сила.

2. Ферриты представляют собой окислы металлов (никеля, цинка, железа и др.), подвергаемые специальной термической обработке, в результате которой они приобретают большое удельное сопротивление.

3. Для перминвара приведены значения для образцов, обработанных в продольном магнитном поле.

Таблица 108. Свойства магнитодиэлектриков

Марка	μ	β , 10^{-6} К ⁻¹	Марка	μ	β , 10^{-6} К ⁻¹
П-250	230—270	200	ТЧ-90	82—94	—400; —500
П-140	130—140	120	ТЧ-60	55—65	—300; —400
П-100	90—110	100	ТЧ-50	50—60	—150; +50
Р-10	10—11	150—200	ВЧ-32	30—34	—200; —250
Р-20	10—11	100—150	ВЧ-22	22—24	—150; —200
Р-100	9—10	50—100	ВЧК-22	20—24	+10; —50

Примечание. 1. Магнитодиэлектрики состоят из электрически изолированных друг от друга ферромагнитных частей, связанных диэлектрическим материалом (бакелитом, полистиролом, резиной). В качестве магнитных наполнителей используются альсифер, молибденовый пермаллой, карбонильное железо, ферриты (см. табл. 107).

2. В магнитодиэлектриках марки П используется наполнитель из молибденового пермаллоя, марки Р — из карбонильного железа, марки ТЧ, ВЧ, ВЧК — из альсифера.

3. Удельное сопротивление магнитодиэлектриков заключено в пределах от 0,01 до 4 Ом·м; β — температурный коэффициент сопротивления.

Таблица 109. Удельная магнитная восприимчивость и относительная магнитная проницаемость парамагнетиков и диамагнетиков

Парамагнетики	T, К	$\chi_p, 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}$	$(\mu-1), 10^{-6}$	Диамагнетики	T, К	$\chi_p, 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}$	$(1-\mu), 10^{-6}$
Кислород (г)	293	1320	1,7	Водо-вод (г)	293	-25	0,0021
Кислород (ж)	77	3300	3800	Азот (г)	293	-5,3	0,0074
Воздух (г)	293	270	0,3	Гелий (г)	293	-24	0,004
Платина	293	12	260	Неон (г)	293	-4,1	0,0034
Золото	296	1,8	34	Углекислый газ	293	-5,3	0,0022
Магний	293	5,8	10	Аргон (г)	293	-6,0	0,010
				Вода (ж)	293	-9,1	9,1
				Графит	289	-38	84
				Каменная соль	291	-6,3	13,7
				Кварц	293	-6,2	16,4
				Висмут	294	-16,8	165

Примечание. В скобках указаны состояния: газообразное (г), жидкое (ж).

Таблица 110. Температура Кюри металлов

Вещество	$\theta, ^\circ\text{C}$
Гадолиний	20
30-процентный пермаллой	70
Сплав Гейслера	200
Никель	353
78-процентный пермаллой	550
Магнетит	585
Железо электролитическое	769
Железо, переплавленное в водороде	774
Кобальт	1140

Таблица 111. Удельная магнитная восприимчивость металлов и полупроводников

Металл	$\chi_p, 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}$	Металл	$\chi_p, 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}$
Алюминий	7,3	Ниобий	29
Ванадий	17,6	Олово	0,33
Вольфрам	3,5	Ртуть	-2,1
Германий	-1,5	Свинец	-1,5
Индий	-1,4	Селен (аморфный)	-3,9
Кадмий	-2,3	Серебро	-2,4
Кальций	14	Сурьма	-10
Литий	45,2	Теллур	-36,4
Марганец	110-120	Хром	45,2
Медь	-1,1	Цинк	-1,8
Натрий	7,7		

Магнитная проницаемость, индукция
и гистерезис ферромагнетиков

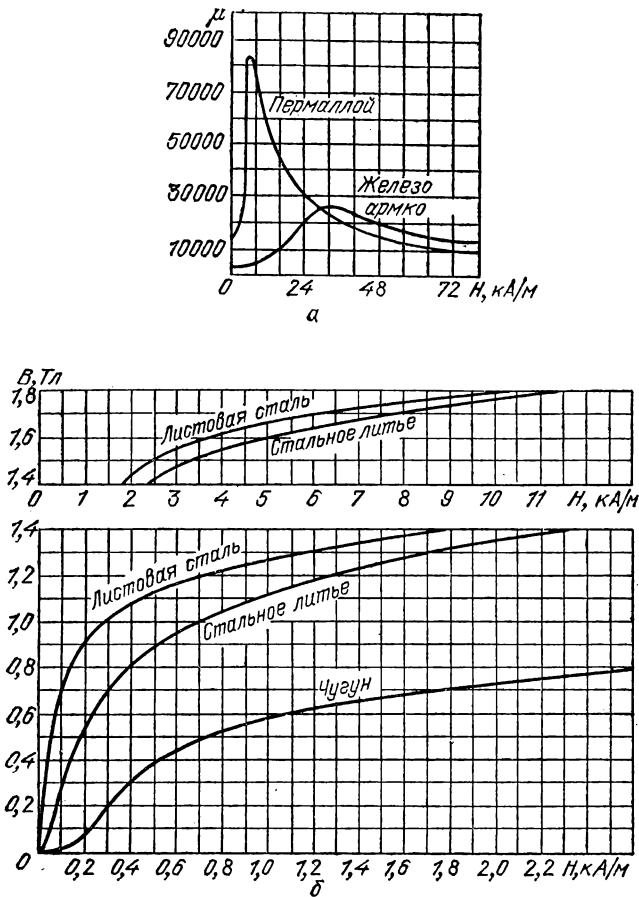


Рис. 3.36. Зависимости от напряженности поля: а — магнитной проницаемости железа и пермаллоя (в слабых полях), б — магнитной индукции в стали и чугуне

Магнитострикция ферромагнетиков

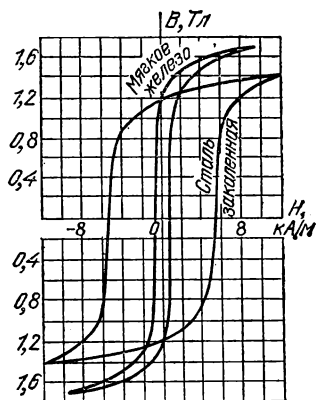


Рис. 3.37. Петля гистерезиса для мягкого железа и закаленной стали (~1% С)

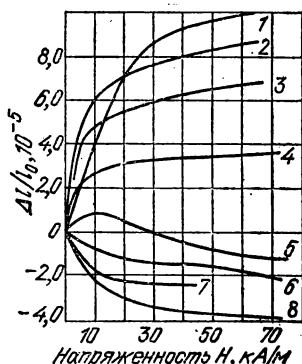


Рис. 3.38. Зависимость относительной продольной деформации при магнитострикции от напряженности магнитного поля: 1 — 54% Pt, 46% Fe; 2 — 70% Co, 30% Fe; 3 — 50% Co, 50% Fe; 4 — 50% Ni, 50% Fe; 5 — железо; 6 — кобальт (отожженный); 7 — феррит 20% Ni, 80% Zn; 8 — никель. В редкоземельных и урановых соединениях $\Delta l/l_0$ на 2—3 порядка больше

Таблица 112. Магнитная индукция в ферромагнетиках и ферритах

Материалы	H, А/м						Количество теплоты, Дж/м³
	8	40	160	800	4000	40000	
Железо электролитическое	0,004	0,05	1,1	1,5	1,7	2,1	250
Железо отожженное	0,01	0,075	1,4	1,6	1,72	2,1	60
Железо кремнистое листовое (4,3% Si)	0,02	0,45	1,0	1,35	1,53	1,95	69
Железо кобальтовое (35% Co)	—	—	0,4	1,5	2,1	2,4	350
Чугун отожженный	—	—	0,06	0,5	0,85	1,4	1000
Сталь мягкая (0,1% С)	0,003	0,03	0,6	1,4	1,7	2,1	500
Сталь листовая	0,004	0,04	0,9	1,45	1,65	2,1	250
Феррит Mn — Zn	0,008	0,05	0,23	0,36	—	—	—
Феррит Ni — Zn	0,0005	0,008	0,01	0,15	0,24	—	—
Феррит Mg — Mn	—	0,01	0,2	0,23	—	—	—
Феррит 30% Ni — Fe	—	—	—	0,25	0,31	—	—
Феррит 70% Ni — Cu	—	—	—	0,06	0,1	—	—

Примечания. 1. Числовые значения следует рассматривать как ориентировочные, так как для различных образцов они могут изменяться; значения B приведены в теслах.

2. В последней графе указана теплота, которую получает за один цикл перемагничивания 1 м³ вещества (для петли гистерезиса с максимальным значением индукции 0,1 Тл).

Таблица 113. Коэффициенты k для расчета индуктивности соленоида

Отношение длины намотки к диаметру (l/d)	0,1	0,5	1	5	10
Коэффициент k	0,2	0,5	0,6	0,9	1,0

Примечание. Для $l/d \geq 10$ коэффициент равен 1.

Зависимость сопротивления проводников от частоты переменного тока

Сопротивление проводников R зависит от параметра $\xi = d \sqrt{\mu_0 \mu \sigma f}$, где d — диаметр сечения, μ — относительная проницаемость материала, σ — удельная проводимость, f — частота. По оси ординат отложены значения R/R_0 (R_0 — сопротивление проводника постоянному току, которое рассчитывается по формуле (3.33)).

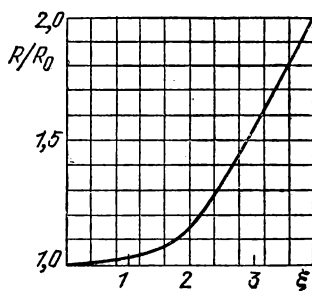


Рис. 3.39. Зависимость сопротивления проводников от параметра ξ

Зависимость силы тока в колебательном контуре от частоты внешней э. д. с.

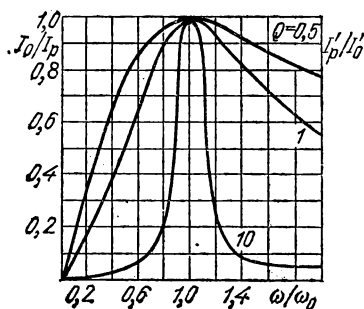


Рис. 3.40. Значения I_0 (и Z) рассчитаны в относительных единицах по формулам таблицы на с. 146. По горизонтальной оси отложены отношения частот ω/ω_0 , по вертикальной оси — отношения $I_0/I_p = r/Z$ (для контура, схема которого приведена на рис. 3.22, а), $I_p/I_0 = Z/r$ (для контура, схема которого представлена на рис. 3.22, б)

Таблица 114. Глубина проникновения токов высокой частоты в медный провод

Частота, МГц	0,01	0,1	1	10	100
l , мм	0,65	0,21	0,065	0,021	0,006

Примечания. 1. Расчет l для других значений частоты и различных материалов может быть произведен по формуле

$$l = (\pi \mu_0 \mu \gamma f)^{-1/2},$$

где l — глубина проникновения (м), γ — удельная проводимость (См/м), μ — относительная магнитная проницаемость материала, f — частота (Гц).

2. Глубиной проникновения называется такое расстояние от поверхности проводника, на котором плотность тока уменьшается по сравнению с плотностью его на поверхности в e раз ($e \approx 2,72$).

Таблица 115. Шкала электромагнитных излучений

Частота, Гц	Длина волны, м	Название диапазона	Основные источники возбуждения
10^{-3} 10^3	$3 \cdot 10^{11}$ $3 \cdot 10^8$	Низкочастотные (сверхдлинные) волны	Генераторы специальных конструкций; генераторы промышленных частот 50—60 Гц; генераторы звуковых частот до 20 кГц
10^8 10^{12}	$3 \cdot 10^3$ $3 \cdot 10^{-4}$	Радиоволны	Генераторы радиочастот до 300 МГц; генераторы сверхвысоких частот (СВЧ)
10^{13} $4 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{-4}$ $8 \cdot 10^{-7}$	Инфракрасное излучение	Излучение молекул и атомов при тепловых и электрохимических воздействиях
$4 \cdot 10^{14}$ $8 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^{-7}$ $4 \cdot 10^{-7}$	Видимое излучение (с длинами волн от 800 до 400 нм)	
$8 \cdot 10^{14}$ $3 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{-7}$ 10^{-9}	Ультрафиолетовое излучение; мягкое рентгеновское излучение	Излучение атомов при облучении вещества электронами с энергией до 15 кэВ
$3 \cdot 10^{17}$ $3 \cdot 10^{20}$	10^{-9} 10^{-12}	Рентгеновское излучение, гамма-излучение	Атомные процессы, которые возбуждаются электронами с энергиями от 20 кэВ до нескольких сотен МэВ
$3 \cdot 10^{20}$ 10^{22}	10^{-12} $3 \cdot 10^{-13}$	Гамма-излучение	Ядерные процессы, радиоактивные распады

Примечание. Между соседними диапазонами реально нет резких границ.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

Оптическое излучение (свет) представляет собой электромагнитное излучение с длиной волны от 0,01 нм до 1 см. Источником таких волн являются атомы и молекулы, в которых происходит изменение энергетических состояний электронов (см. гл. V). В оптическом излучении выделяется диапазон *видимого излучения* с длинами волн от 400 до 760 нм.

1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И СВЕТОВЫЕ ВЕЛИЧИНЫ. ФОТОМЕТРИЯ

Энергия излучения — это энергия фотонов (см. ниже п. 5) или энергия электромагнитных волн (см. гл. III), излучаемых телом. *Потоком излучения* называется величина, равная энергии, переносимой электромагнитными волнами за время одна секунда через произвольную поверхность. Поток излучения, оцениваемый по его воздействию на человеческий глаз, называется *световым потоком*.

Энергетические характеристики потока излучения. *Энергетическая сила света (сила излучения)* — величина, равная отношению потока излучения $\Delta\Phi_{\Omega}$ к телесному углу $\Delta\Omega$, в котором распространяется это излучение:

$$I_{\Omega} = \Delta\Phi_{\Omega} / \Delta\Omega. \quad (4.1)$$

Энергетическая освещенность (облученность) — величина, равная отношению потока излучения $\Delta\Phi_{\Omega}$ к площади ΔS равномерно облучаемой им поверхности:

$$E_{\Omega} = \Delta\Phi_{\Omega} / \Delta S. \quad (4.2)$$

Энергетическая светимость — величина, равная отношению потока излучения $\Delta\Phi_{\Omega}$ к площади ΔS_{Ω} излучающей поверхности:

$$R_{\Omega} = \Delta\Phi_{\Omega} / \Delta S_{\Omega}. \quad (4.3)$$

Световые характеристики потоков излучения. Глаз неодинаково чувствителен к потокам света с различными длинами волн. Обычно при дневном освещении глаз наиболее чувствителен к свету с длиной волны 555 нм; отношение потока излучения Φ_{555} с длиной волны 555 нм к потоку излучения Φ_{λ} с длиной волны λ , который вы-

зывает такое же зрительное ощущение, что и поток излучения Φ_{555} , называется *относительной спектральной чувствительностью глаза* или *относительной видностью* (K_λ):

$$K_\lambda = \Phi_{555} / \Phi_\lambda.$$

Графическая зависимость K_λ от λ называется *кривой относительной спектральной чувствительности*. Максимальная чувствительность при сумеречном зрении соответствует длине волны 507 нм. При дневном зрении энергетическому потоку излучения 1 Вт с длиной волны 555 нм соответствует световой поток 683 люмена (см. ниже); при сумеречном зрении потоку излучения 1 Вт с длиной волны 507 нм соответствует световой поток 1745 лм.

Источник, линейными размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстоянием от него до точки наблюдения, называется *точечным*.

Световой поток — величина, равная произведению силы света I точечного источника на телесный угол Ω :

$$\Phi = I\Omega.$$

Излучаемый точечным источником полный световой поток

$$\Phi_T = 4\pi I. \quad (4.4)$$

Освещенность — величина, равная отношению светового потока $\Delta\Phi$, падающего на поверхность, к площади ΔS этой поверхности:

$$E = \Delta\Phi / \Delta S. \quad (4.5)$$

Освещенность E_T плоской поверхности, создаваемая точечным источником, определяется по формуле

$$E_T = I \cos \varphi / r^2, \quad (4.6)$$

где I — сила света, r — расстояние от источника до поверхности, φ — угол между нормалью к поверхности и направлением распространения волн.

Светимость — величина, равная отношению светового потока $\Delta\Phi$, излучаемого поверхностью источника, к площади $\Delta S_{\text{и}}$ этой поверхности:

$$R = \Delta\Phi / \Delta S_{\text{и}}. \quad (4.7)$$

Яркостью V_φ в направлении φ называется величина, равная отношению силы света I_φ в этом направлении к площади проекции S_Π светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения:

$$V_\varphi = I_\varphi / (S_0 \cos \varphi), \quad (4.8)$$

где площадь проекции $S_\Pi = S_0 \cos \varphi$, S_0 — площадь поверхности источника.

Световая энергия — это величина, равная произведению светового потока Φ на время t действия или излучения этого потока:

$$Q = \Phi t. \quad (4.9)$$

2. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Луч (световой луч) — геометрическая линия, вдоль которой распространяется энергия, переносимая электромагнитными волнами. В однородной среде лучи являются прямыми линиями.

Если прямолинейные лучи (или их продолжение) пересекаются в одной точке, то такая совокупность лучей называется *гомоцентрическим пучком*; параллельные лучи образуют *гомоцентрический пучок*, центр которого находится в бесконечности. Лучи, которые с оптической осью линзы (см. ниже) составляют малый угол, называются *параксиальными*; лучи, параллельные оптической оси, являются параксиальными, если они проходят на малом расстоянии от оси линзы.

Точки предмета принимаются за центры гомоцентрических расходящихся пучков лучей. При отражении от плоскости гомоцентрический пучок остается гомоцентрическим; при преломлении на плоской поверхности гомоцентричность сохраняется только у параксиальных пучков.

Законы геометрической оптики можно использовать в том случае, когда площадь фронта волны значительно больше произведения $b\lambda$ (b — расстояние от линзы до точки наблюдения, λ — длина волны).

Закон отражения. *Углом падения* называется угол между направлением падающего луча и перпендикуляром к границе раздела в точке падения; угол между этим перпендикуляром и направлением отраженного луча называется *углом отражения*.

При падении луча на границу раздела двух изотропных сред угол отражения равен углу падения; падающий и отраженный лучи и перпендикуляр к поверхности в точке падения лежат в одной плоскости (*закон отражения*).

Отношение потока излучения, отраженного поверхностью тела, к падающему на эту поверхность потоку называется *коэффициентом отражения*.

В зависимости от свойств границы раздела различают два вида отражения света. Если поверхность раздела имеет неровности, размеры которых значительно меньше длины волны света, то происходит *правильное (или зеркальное) отражение*. В этом случае падающие параллельные лучи света после отражения остаются параллельными. Если неровности расположены на отражающей поверхности хаотично и имеют размеры, сравнимые с длиной волны, то происходит *диффузное отражение*. В этом случае параллельные лучи света после отражения перестают быть параллельными, однако при условии $h \cos i \ll \lambda$ (h — размеры неровностей, i — угол падения лучей) отраженные лучи становятся почти параллельными, т. е. отражение можно считать зеркальным.

Закон преломления. Угол между перпендикуляром к границе раздела сред в точке падения луча и направлением преломленного луча называется *углом преломления*.

При преломлении светового луча на границе раздела двух данных изотропных сред отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данной длины волны:

$$\sin i / \sin r = n; \quad (4.10)$$

падающий и преломленный лучи и перпендикуляр в точке падения лежат в одной плоскости.

Эти два экспериментально установленных факта составляют содержание *закона преломления* (для изотропных сред). Величина n называется *относительным показателем преломления* второй среды относительно первой. Относительный показатель преломления равен отношению скоростей света в соответствующих средах: $n = c_1/c_2$.

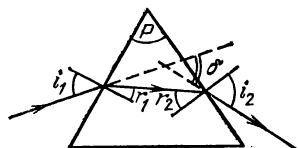


Рис. 4.1. Ход монохроматического луча в призме

Показатель преломления среды относительно вакуума называется *абсолютным показателем преломления* среды; n зависит от длины волны. Среда, в которой скорость света меньше, называется *оптически более плотной*.

При переходе из среды, оптически более плотной, в среду, оптически менее плотную, луч может полностью отражаться. Это явление называется *полным отражением*. Угол падения $i_{\text{пр}}$, начиная с которого электромагнитное излучение полностью отражается от границы раздела, называется *предельным углом* полного отражения, который определяется из соотношения

$$\sin i_{\text{пр}} = 1/n, \quad (4.11)$$

где $n = c_1/c_2$, c_2 — скорость света в оптически более плотной среде.

Призма. Проходящие через призму лучи света преломляются (рис. 4.1). Угол P призмы называется *преломляющим углом*. Продолжения входящего и выходящего лучей образуют угол δ , который называется *углом отклонения*; $\delta = i_1 + i_2 - P$, $P = r_1 + r_2$. Если $i_1 = i_2$, то угол δ имеет наименьшее значение (для данного значения угла P); $\delta_{\text{м}} = 2i_1 - P$.

Показатель преломления n стекла, из которого сделана призма, можно рассчитать по формуле

$$n = \sin(\delta_{\text{м}}/2 + P/2) / (\sin(P/2)). \quad (4.12)$$

Наибольший преломляющий угол призмы, при котором лучи еще проходят через преломляющие грани, $P_m = 2i_{\text{пр}}$ ($i_{\text{пр}}$ — предельный угол полного отражения на границе стекло — воздух).

3. ЛИНЗЫ. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Линзой называется прозрачное для оптического излучения тело, у которого две противоположные стороны ограничены криволинейными поверхностями; одна из поверхностей может быть плоской. Наибольшее применение имеют линзы со сферическими поверхностями. Ниже рассматриваются свойства таких линз.

Прямая, проходящая через центры кривизны сферических поверхностей линзы, называется *главной оптической осью* (рис. 4.2). Если одна из поверхностей линзы плоская, то оптическая ось проходит перпендикулярно к ней. Точки пересечения поверхностей линзы с главной оптической осью (рис. 4.2, точки O_1, O_2) называются *вершинами*. Расстояние между вершинами называется *толщиной линзы*.

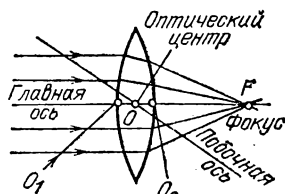


Рис. 4.2. Основные точки и оси тонкой линзы

Тонкая линза. Линза называется тонкой, если ее толщина значительно меньше радиусов кривизны ее поверхностей. Точка тонкой линзы, через которую лучи проходят без изменения своего направления, называется *оптическим центром линзы*. Главная оптическая ось проходит через оптический центр. Любая другая прямая, проходящая через оптический центр линзы, называется *побочной осью линзы*.

Фокусы линзы. Линза называется *собирающей*, если она преобразует падающий на нее параксиальный пучок лучей, параллельный главной оптической оси, в сходящийся гомоцентрический пучок; в противном случае линза называется *рассеивающей*.

Точка на главной оптической оси, в которой пересекаются параксиальные лучи, параллельные главной оптической оси собирающей линзы, называется *фокусом*.

В рассеивающей линзе параксиальный пучок лучей, параллельный главной оптической оси, преобразуется в расходящийся пучок; продолжения этих лучей пересекаются в точке, лежащей на главной оптической оси; эта точка называется *фокусом рассеивающей линзы*.

У любой линзы имеется два фокуса. Расстояние от оптического центра тонкой линзы до фокуса называется *фокусным расстоянием*. Плоскости, проходящие через фокусы перпендикулярно главной оптической оси, называются *фокальными плоскостями*. Если среда

по обе стороны линзы одна и та же, то модули ее фокусных расстояний равны.

Формула тонкой линзы. Для параксиальных пучков лучей, которые преобразуются тонкой линзой, выполняется соотношение

$$-\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (4.13)$$

где a_1 — расстояние от линзы до предмета, a_2 — расстояние от линзы до изображения, f — фокусное расстояние линзы, R_1 и R_2 — радиусы кривизны сферических поверхностей, ограничивающих линзу, n — относительный показатель преломления вещества, из которого изготовлена линза, $-f_1 = f_2 = f$.

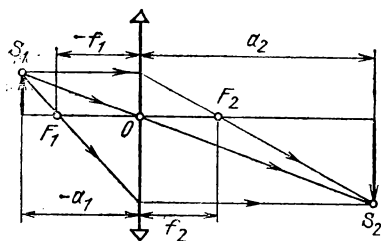


Рис. 4.3. Ход лучей в тонкой собирающей линзе

называется *формулой тонкой линзы*. Построение изображения приводится на рис. 4.3.

При расчетах по формуле (4.13) значения a_1 или a_2 подставляются со знаком плюс, если направления их отсчета от оптического центра линзы совпадают с направлением распространения света; значе-

ния R_1 и R_2 также подставляются со знаком плюс, если их направления отсчета от вершин сферических поверхностей совпадают с направлением распространения света; в противном случае эти значения подставляются со знаками минус; радиус кривизны R_1 относится к той поверхности линзы, которая первой пересекается светом; значения f собирающей линзы подставляются со знаком плюс, рассеивающей — со знаком минус.

Оптическая сила. Отношение показателя преломления окружающей линзу среды к ее фокусному расстоянию называется *оптической силой*.

Единица оптической силы — *диоптрия* (дптр). 1 *диоптрия* — это оптическая сила линзы, расположенной в воздухе, с фокусным расстоянием 1 м. Оптическая сила — величина алгебраическая; собирающая линза имеет положительную оптическую силу, рассеивающая — отрицательную.

Оптическая сила сферической границы раздела двух сред с показателями преломления n_1 и n_2 :

$$\Phi = (n_2 - n_1)/R, \quad (4.14)$$

где n_1 — показатель преломления той среды, которую свет проходит первой, n_2 — показатель преломления второй среды, R — радиус кривизны.

Оптическая сила линзы со сферическими поверхностями:

$$\Phi_d = \Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2/n, \quad (4.15)$$

где Φ_1 и Φ_2 — оптические силы сферических границ раздела на поверхностях линзы, d — ее толщина, n — показатель преломления стекла; Φ_1 и Φ_2 рассчитываются по формуле (4.14).

Оптическая сила двух тонких линз равна сумме их оптических сил при условии, что $d < |f|$, где d — расстояние между оптическими центрами линз, $|f|$ — модуль наименьшего фокусного расстояния одной из линз.

Многие оптические приборы предназначены для получения изображений предметов на экранах, на светочувствительных пленках или на сетчатке глаза.

Глаз как оптическая система. На рис. 4.4 представлен горизонтальный разрез глазного яблока. Впереди находится прозрачная

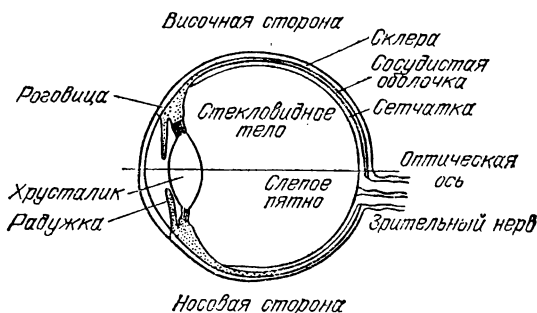


Рис. 4.4. Горизонтальный разрез правого глаза

оболочка — роговица, образующая почти сферическую поверхность (1/6 часть всей поверхности). По краям роговица переходит в склеру (белок глаза). Пространство между хрусталиком и роговицей заполнено водянистой влагой. За хрусталиком находится стекловидное тело, состоящее в основном из воды. Форма глазного яблока почти сферическая с радиусом кривизны около 12 мм. Имеется радужная оболочка с отверстием (зрачком); диаметр зрачка изменяется от 2 до 8 мм. На противоположной стороне от зрачка расположена сетчатка, где находятся светочувствительные рецепторы — палочки и колбочки (около $1,2 \cdot 10^8$ палочек, $7 \cdot 10^6$ колбочек). Палочки реагируют на дневное свечение, колбочки обеспечивают сумеречное зрение. Приблизительно можно считать, что оптический центр расположен вблизи роговицы, фокусные расстояния $f_1 = 17$ мм, $f_2 = 23$ мм. Оптическая сила глаза равна приблизительно 58 дптр. Кривизна поверхности хрусталика может изменяться мышцами глаза, вследствие чего изменяется и оптическая сила; в молодом воз-

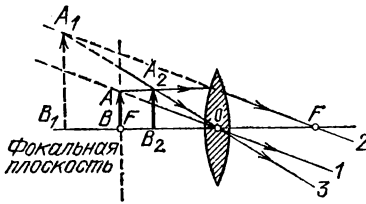


Рис. 4.5. Ход лучей в лупе. Предмет AB находится в фокальной плоскости. Изображение получается в бесконечности (лучи $1, 2$ идут параллельно). Возможно и такое расположение, когда предмет размещается вблизи фокальной плоскости ближе к линзе в положении A_2B_2 . Изображение A_1B_1 получается мнимым (на пересечении продолжений лучей $2, 3$); оно находится на таком расстоянии от глаза, которое является наиболее удобным для зрения

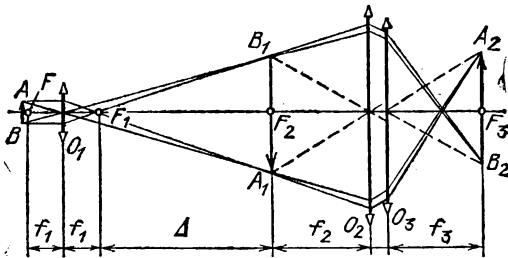


Рис. 4.6. Ход лучей в микроскопе. AB — предмет, O_1 — объектив микроскопа, который дает увеличенное, обратное и действительное изображение A_1B_1 предмета. Изображение предмета находится в фокальной плоскости F_2 окуляра микроскопа O_2 , через который оно рассматривается, как в лупу. В фокальной плоскости F_3 глаза O_3 получается действительное изображение A_2B_2 предмета

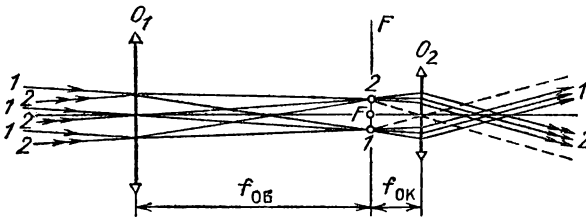


Рис. 4.7. Ход лучей в зрительной трубе. Лучи $1, 1, 1$ выходят из одной точки предмета, удаленного в бесконечность; эта точка находится выше главной оптической оси, ее изображение получается в точке 1 фокальной плоскости F объектива O_1 и окуляра O_2 . Параллельные лучи $2, 2, 2$ от второй точки того же предмета, расположенной ниже главной оптической оси, падают на объектив под другим углом. Эти лучи пересекаются в точке 2 фокальной плоскости. Изображения точек 1 и 2 рассматриваются через окуляр O_2 , как в лупу

расте изменение может осуществляться в пределах 10 дптр, в старческом возрасте — около 2 дптр.

Изменение оптической силы позволяет получать на сетчатке изображения предметов, расположенных на различных расстояниях от глаза; это свойство глаза называется *аккомодацией*.

Увеличение оптических приборов. Углом зрения называется угол, образованный лучами, которые выходят из крайних точек предмета (или его изображения) и проходят через оптический центр глаза.

По определению, *видимое увеличение* оптического прибора $\Gamma = \text{tg } \varphi_2 / \text{tg } \varphi_1$; φ_2 — угол зрения при наблюдении предмета через прибор, φ_1 — угол зрения при наблюдении невооруженным глазом предмета, который должен быть расположен на расстоянии 25 см от глаза (для лупы и микроскопа) или на том же самом расстоянии, что и при наблюдении через прибор (для зрительных труб).

В оптическом приборе линза, обращенная к предмету (объекту), называется *объективом*; линза, обращенная к глазу, называется окуляром. В большинстве случаев объективы и окуляры приборов состоят из нескольких линз. Этим частично устраняются погрешности в изображениях.

Видимое увеличение лупы (рис. 4.5):

$$\Gamma_{\text{л}} = 250/f, \quad (4.16)$$

где f — фокусное расстояние лупы (мм).

Видимое увеличение микроскопа:

$$\Gamma_{\text{м}} = 250\Delta / (f_1 f_2), \quad (4.17)$$

где f_1, f_2 — фокусные расстояния объектива и окуляра (мм), Δ — расстояние между фокусами объектива и окуляра (мм) (см. рис. 4.6).

Видимое увеличение зрительной трубы:

$$\Gamma_{\text{т}} = f_{\text{об}} / f_{\text{ок}}, \quad (4.18)$$

где $f_{\text{об}}$ и $f_{\text{ок}}$ — фокусные расстояния объектива и окуляра (рис. 4.7).

Линейным увеличением называется отношение поперечного размера изображения к поперечному размеру предмета.

4. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Интерференция. При распространении нескольких электромагнитных волн векторы напряженности электрического (а также и магнитного) поля суммируются в каждой точке пространства.

Сложение двух (или нескольких) волн с одинаковыми периодами, в результате которого в одних точках пространства происходит увеличение, а в других — уменьшение амплитуды результирующей волны, называется *интерференцией*.

Уравнения двух плоских гармонических электромагнитных волн, которые распространяются в одном направлении вдоль оси Ox , можно записать в следующей форме:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{01} \sin(\omega t - k_1 x_1 + \varphi_1), \\ E_2 &= E_{02} \sin(\omega t - k_2 x_2 + \varphi_2). \end{aligned} \quad (4.19)$$

Если векторы E в этих волнах имеют одинаковые направления, то в результате интерференции образуется результирующая гармоническая волна (см. гл. I, (1.87)) с амплитудой

$$E_{0p} = \sqrt{E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \theta}, \quad (4.20)$$

где разность фаз $\theta = k_2 x_2 - k_1 x_1 + \varphi_2 - \varphi_1$, x_1 и x_2 — расстояния, которые проходят волны от источников до точки наблюдения в средах с показателями преломления n_1 и n_2 ;

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_2 x_2 - n_1 x_1) + \varphi_2 - \varphi_1,$$

где λ — длина волны в вакууме.

Среднее значение поверхностной плотности потока излучения (см. гл. III п. 6) называется *интенсивностью* (I); она пропорциональна квадрату амплитуды напряженности E_0^2 (или H_0^2). Оптические приборы, в том числе и глаз, обычно фиксируют усредненные значения квадрата амплитуды, т. е. интенсивность.

Если разность фаз изменяется хаотически, то среднее значение $\langle \cos \theta \rangle = 0$, $E_{0p}^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2$, результирующая интенсивность $I_p = I_1 + I_2$, т. е. интенсивности I_1 и I_2 суммируются; интерференция в этом случае отсутствует.

При постоянной разности фаз возможны два предельных случая:

а) если $\cos \theta = 1$, то $E_{0p}^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_1 E_2$, результирующая интенсивность $I_p = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$;

б) если $\cos \theta = -1$, то $I_p = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$. Таким образом, результирующая интенсивность в одних точках будет больше, в других — меньше суммы интенсивностей взаимодействующих волн. Если $\varphi_1 = \varphi_2$, то минимальная результирующая интенсивность определяется условием

$$|n_2 x_2 - n_1 x_1| = (2m + 1) \lambda / 2,$$

максимальная —

$$|n_2 x_2 - n_1 x_1| = 2m \lambda / 2$$

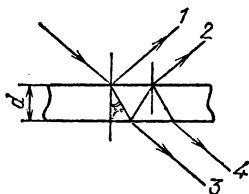
($m = 0, 1, 2, \dots$).

Произведение геометрического пути на показатель преломления называется *оптической длиной пути*; разность оптических путей называется *оптической разностью хода* волн.

Интерференция наблюдается при взаимодействии таких волн, у которых разность фаз в точках наблюдения не зависит от времени.

Для интерференции поляризованных волн (см. ниже) необходимо, кроме того, чтобы их плоскости поляризации были параллельны. Волны, у которых разность фаз остается постоянной за время, достаточное для наблюдения, называются *когерентными*, и соответствующие источники также называются *когерентными*. В большинстве случаев когерентные источники в оптике получают искусственно путем разделения одной волны на несколько частей.

Рис. 4.8. Получение когерентных волн с помощью плоскопараллельной пластинки



При освещении плоскопараллельной пластинки происходит интерференция волн 1, 2 (в отраженном свете) или волн 3, 4 (в проходящем свете) (рис. 4.8). Оптическая разность хода между отраженными волнами 1, 2:

$$\Delta_{12} = 2dn \cos r + \lambda/2; \quad (4.21)$$

оптическая разность хода между проходящими через пластинку волнами 3, 4:

$$\Delta_{34} = 2dn \cos r.$$

Изменение на π фазы волны напряженности электрического поля при отражении от оптически более плотной среды (при углах падения, которые меньше угла полной поляризации, см. ниже (4.28)) учитывается введением в (4.21) добавочного члена, равного $\lambda/2$.

Дифракция. Отклонение световых волн от прямолинейного пути при прохождении вблизи краев экранов, отверстий или других неоднородностей называется *дифракцией*.

Интенсивность дифрагированных волн можно приближенно рассчитать, пользуясь *принципом Гюйгенса — Френеля*. Согласно этому принципу точки волновой поверхности являются центрами воображаемых когерентных источников, которые излучают в однородной среде сферические волны; эти волны называются *вторичными*. Огибающая вторичных волн представляет собой волновую поверхность для последующего момента времени; она возникает в результате интерференции вторичных волн. Предполагается, что вторичные волны распространяются лишь в одну сторону от волновой поверхности (по направлению распространения волны).

Дифракция на щели. При дифракции плоских волн, падающих нормально на узкую длинную щель (рис. 4.9), интенсивность I_β волн, распространяющихся под углом β , определяется следующим

соотношением:

$$I_{\beta} = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi a \sin \beta}{\lambda} \right) / \left(\frac{\pi a \sin \beta}{\lambda} \right)^2, \quad (4.22)$$

где I_0 — интенсивность волн, распространяющихся в направлении $\beta=0$, a — ширина щели, β — угол между перпендикуляром к плоскости щели и направлением распространения дифрагированных волн, λ — длина волны.

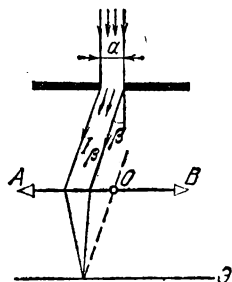


Рис. 4.9. Схема наблюдения дифракции плоских волн на щели: AB — линза, O — ее оптический центр, \mathcal{E} — экран, расположенный в фокальной плоскости линзы

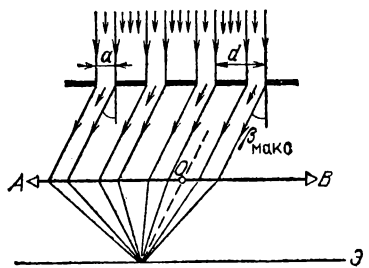


Рис. 4.10. Схема наблюдения дифракции плоских волн на дифракционной решетке: AB — линза, O — ее оптический центр, \mathcal{E} — экран, расположенный в фокальной плоскости линзы

Направления, в которых интенсивность дифрагированного на одной щели света равна нулю, определяются из условия:

$$a \sin \beta_{\min} = m\lambda \quad (m = \pm 1, \pm 2, \dots), \quad (4.23)$$

Дифракционная решетка. Совокупность большого числа узких параллельных щелей, имеющих одинаковую ширину и расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга, называется *дифракционной решеткой*. Расстояние $d = a + b$ (a — ширина одной щели, b — расстояние между соседними щелями) называется *постоянной* (или *периодом*) *дифракционной решетки*. На рис. 4.10 приведена схема дифракционной решетки.

При нормальном падении плоских волн на решетку направления, в которых наблюдается максимальная интенсивность дифрагированных волн, определяются выражением, которое называется условием главных максимумов:

$$d \sin \beta_{\max} = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots), \quad (4.24)$$

где d — период решетки.

Главные минимумы определяются соотношением (4.23). Имеется ряд других направлений, в которых интенсивность дифрагированного на решетке света равна нулю (дополнительные минимумы);

дополнительные минимумы определяются соотношением

$$d \sin \beta_{\text{дм}} = m' \lambda \quad \left(m' = \frac{1}{N}, \frac{2}{N}, \dots, \frac{N-1}{N}, \frac{N+1}{N}, \dots \right), \quad (4.25)$$

где N — число щелей в решетке, m' не кратно N .

Разрешающая способность. Разрешающей способностью дифракционной решетки называется безразмерная величина

$$R = \lambda / \Delta \lambda = m \lambda, \quad (4.26)$$

где $\Delta \lambda$ — разность длин волн, для которых главные максимумы наблюдаются раздельно.

Дифракция световых волн не позволяет различать мельчайшие детали предметов с помощью оптических приборов, как бы велико ни было их увеличение. Наименьшее расстояние между двумя точками, при котором их изображения не сливаются, называется *разрешимым расстоянием (пределом разрешения) оптического прибора* (δ).

Для микроскопа разрешимое расстояние

$$\delta \geq \lambda / (2n \sin u), \quad (4.27)$$

где u — *апертурный угол* (половина угла между крайними лучами, падающими от точки предмета на объектив и достигающими глаза наблюдателя или экрана), n — показатель преломления среды.

Дисперсия. Скорость света в данной среде зависит от длины волны. Это явление называют *дисперсией скорости*. Показатель преломления также меняется с изменением длины волны (*дисперсия показателя преломления*). В результате дисперсии параллельный пучок монохроматического излучения после преломления стеклянной призмой становится расходящимся: излучение с меньшей длиной волны отклоняется к основанию призмы на больший угол по сравнению с отклонением излучения, имеющего большую длину волны (см. рис. 4.11).

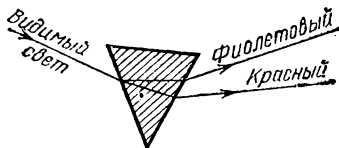


Рис. 4.11. Преломление видимого света стеклянной призмой

Поляризация света. Свет, излучаемый обычным (нелазерным) источником, называется *естественным*; в естественном свете ориентация векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} изменяется хаотически в плоскости, перпендикулярной направлению распространения. В отличие от естественного света, свет, у которого ориентации векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} в любой

точке пространства остаются неизменными с течением времени, называется *линейно поляризованным*. Плоскость, проходящая через вектор \mathbf{E} и нормаль к фронту линейно поляризованной волны, называется *плоскостью поляризации* (или *плоскостью колебаний*).

Устройства, которые преобразуют естественный свет в поляризованный, называются *поляризаторами*.

Естественный свет при отражении от поверхности диэлектриков частично поляризуется. Отраженный свет поляризован полностью при угле падения, определяемом соотношением

$$\operatorname{tg} i_B = n, \quad (4.28)$$

где n — относительный показатель преломления второй среды. Угол i_B называется *углом Брюстера*. Проходящий через диэлектрик свет также частично поляризуется.

Двойное лучепреломление. В некоторых монокристаллах (например, кварц, исландский шпат, слюда, гипс) естественный свет разделяется на две линейно поляризованные в различных плоскостях волны, которые распространяются с различными скоростями. Это явление называется *двойным лучепреломлением*.

В одноосных кристаллах (типа кварца) имеется одно направление, в котором не наблюдается двойного лучепреломления. Это направление называется *оптической осью*. Волна, в которой вектор \mathbf{E} совершает колебания перпендикулярно оптической оси кристалла, называется *обыкновенной*; ее скорость по различным направлениям в кристалле одинакова. Вторая волна, у которой направления колебаний вектора \mathbf{E} составляют различные углы с оптической осью (в зависимости от угла падения и положения плоскости падения), называется *необыкновенной*. Скорость необыкновенной волны в кристалле зависит от направления; она может быть или больше скорости обыкновенного луча (как в исландском шпате), или меньше (как в кварце). В направлении оптической оси скорости обыкновенной и необыкновенной волн равны.

Искусственная оптическая анизотропия. Двойное лучепреломление наблюдается в изотропных средах при воздействии на них внешних сил (*фотоупругость*), электрического поля (*электрическое двойное лучепреломление*), магнитного поля (*магнитное двойное лучепреломление*).

При одностороннем сжатии или растяжении изотропного тела в направлении оси Oz оно приобретает оптические свойства одноосного кристалла, оптическая ось которого направлена параллельно оси Oz . При распространении света в направлении, перпендикулярном оси Oz , разность хода между обыкновенной и необыкновенной волнами

$$\Delta\sigma = K\sigma l, \quad (4.29)$$

где K — *постоянная фотоупругости*, зависящая от природы вещества, σ — механическое напряжение, l — толщина деформируемого образца, λ — длина волны в вакууме.

При электрическом и магнитном двойном лучепреломлении, когда свет распространяется перпендикулярно к направлениям векторов E или H , разности хода между обыкновенной и необыкновенной волнами соответственно равны:

$$\Delta_E = 1,11 \cdot 10^{-7} BE^2 l \lambda, \quad (4.30)$$

$$\Delta_H = 1,58 \cdot 10^{-2} CH^2 l \lambda, \quad (4.31)$$

где B и C — соответственно *постоянные Керра* и *Коттона* — *Мутсона*, E — напряженность электрического поля (В/м), H — напряженность магнитного поля (А/м), l — геометрический путь волны в веществе.

Вращение плоскости поляризации. При распространении через некоторые вещества (например, кварц, раствор сахара в воде) линейно поляризованного света изменяется исходное положение плоскости поляризации. Это явление называется *вращением плоскости поляризации*, а вещества, в которых происходит вращение плоскости поляризации, называются *оптически активными*. Вращение плоскости поляризации характеризуется постоянной вращения (для чистых веществ) и удельной постоянной вращения (для растворов). *Постоянная вращения* $\alpha = \varphi/l$, *удельная постоянная вращения* $[\alpha] = \varphi/(lC)$, где φ — угол поворота плоскости поляризации (град), l — толщина слоя оптически активного вещества (м), C — концентрация раствора (кг/м³). Значение $[\alpha]$ зависит от концентрации, температуры, длины волны и растворителя.

Зависимость угла поворота плоскости поляризации от длины волны называется *вращательной дисперсией*.

Давление света. Электромагнитные волны, падающие на поверхность тела, производят механическое давление (называемое *радиационным* или *давлением излучения*). Давление электромагнитных волн на плоскость, расположенную перпендикулярно направлению их распространения, определяется соотношением

$$p = E_0 (1 + \rho)/c, \quad (4.32)$$

где E_0 — энергетическая освещенность, c — скорость света в вакууме, ρ — коэффициент отражения (см. п. 2 этой главы).

Давление, которое производит на земную поверхность излучение Солнца в яркий день, равно приблизительно 4 мкПа.

5. КВАНТОВАЯ ОПТИКА

Электромагнитное излучение, в том числе и световое, состоит из дискретных порций энергии, которые называются *квантами излучения* или *фотонами*; *фотон* — элементарная частица (см. гл. V).

Энергия фотона ϵ зависит от частоты излучения ν :

$$\epsilon = h\nu, \quad (4.33)$$

где $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с называется *постоянной Планка*; $h/(2\pi)$ обозначается \hbar .

Согласно основным положениям современной физики изменение энергии какой-либо системы на величину ΔW соответствует изменению ее массы на $\Delta W/c^2$ (c — скорость света в вакууме). Поэтому при излучении одного фотона масса тела уменьшается на величину

$$\Delta m = h\nu/c^2. \quad (4.34)$$

Свету, как и всем другим видам электромагнитного излучения, присущи как волновые, так и корпускулярные свойства.

Фотоэффект. *Фотоэффектом* называются электрические явления, происходящие при освещении вещества светом, а именно: выход электронов из металлов (*фотоэлектронная эмиссия* или *внешний фотоэффект*), перемещение зарядов через границу раздела полупроводников с различными типами проводимости (*вентильный фотоэффект*), изменение электрической проводимости (*фотопроводимость*). Фотоэффект является одним из примеров проявления корпускулярных свойств света.

Законы внешнего фотоэффекта. 1. Число электронов, освобожденных светом за время одна секунда (или ток насыщения), прямо пропорционально световому потоку при неизменном его спектральном составе (*закон Столетова*). 2. Наибольшая скорость v_m вылетевших при фотоэффекте электронов не зависит от силы света, а определяется частотой падающего света. 3. Энергетический баланс при фотоэффекте определяется уравнением Эйнштейна (*основное уравнение фотоэффекта*):

$$h\nu = A + m_e v_m^2/2, \quad (4.35)$$

где $h\nu$ — энергия фотона, v_m — максимальная скорость электрона, A — работа выхода (см. гл. III), m_e — масса электрона. 4. Фотоэффект происходит при освещении вещества светом, частота которого больше некоторого значения ν_k . Эта частота называется *красной границей* фотоэффекта; она зависит от работы выхода:

$$\nu_k = A/h. \quad (4.36)$$

Сущность *внутреннего фотоэффекта* состоит в том, что при освещении полупроводников и диэлектриков из некоторых атомов вырываются электроны, которые, однако, в отличие от внешнего фотоэффекта, не выходят через поверхность тела, а остаются внутри него. В результате внутреннего фотоэффекта электроны перемещаются из валентной зоны в зону проводимости (см. гл. III), поэтому сопротивление полупроводников и диэлектриков уменьшается.

При освещении границы раздела полупроводников с различным типом проводимости между ними устанавливается разность по-

тенциалов (фото-э.д.с.). Это явление называется *вентильным фотоэффектом*.

На фотоэффекте основано устройство фотозлементов, фоторезисторов, вентильных фотозлементов и солнечных батарей.

6. СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ

Любое колебание можно представить как результат сложения (суперпозицию) гармонических колебаний (кратко их называют *гармониками*) с различными амплитудами и частотами. Совокупность амплитуд и частот гармоник, из которых состоит сложное колебание (или волна), называется *спектром амплитуд и частот* (или, кратко, *спектром*). *Спектром* (в узком смысле слова) иногда называют цветные изображения щели, получающиеся в результате разложения монохроматического света призмой (или другим прибором) по длинам волн. Совокупность частот (или длин волн) гармоник, которые входят в состав излучения, называется *спектром излучения*.

Излучение нагретых твердых тел и жидкостей состоит из совокупности гармонических волн с частотами, непрерывно переходящими друг в друга. Такой спектр называется *сплошным*.

В *линейчатом* спектре поток излучения сосредоточен в очень узких пределах вблизи некоторых определенных длин волн, а для всех прочих длин волн он равен нулю. Излучение невзаимодействующих атомов имеет линейчатый спектр. Линейчатый спектр, полученный с помощью призмы (или другого прибора) в диапазоне длин волн от 400 до 800 нм, представляет собой тонкие линии, имеющие различную окраску. Число и расположение линий по длинам волн характерны для атомов данного элемента.

Излучение молекул имеет спектр, состоящий из большого числа близко расположенных друг к другу линий, которые группируются в отдельные полосы. Такие спектры называются *полосатыми*.

Совокупность частот (длин волн) гармоник, которые поглощаются данным веществом, называется *спектром поглощения*. Спектр поглощения, занимающий узкий интервал, ширина которого много меньше средней частоты интервала, называется *спектральной линией поглощения*. Атомы поглощают гармоники таких частот, которые они излучают, будучи источниками света (*закон Кирхгофа — Бунзена*). Это явление называется *обращением спектральных линий*.

Спектральные линии поглощения, наблюдаемые в спектре излучения Солнца, называются *линиями Фраунгофера*; они образуются вследствие поглощения атмосферой Солнца некоторых участков спектра.

7. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Электромагнитное излучение, которое возбуждается тепловым движением атомов и молекул, называется *тепловым излучением*.

Распределение энергии излучения по длинам волн (или частотам) определяется *спектральной плотностью энергетической светимости (испускательной способностью)*. Эта величина равна отношению энергетической светимости $\Delta R_{\text{э}}$, которая соответствует малому интервалу длин волн $\Delta\lambda$ (или частот $\Delta\nu$), к ширине этого интервала:

$$r_{\lambda} = \Delta R_{\text{э}} / \Delta\lambda \quad \text{или} \quad r_{\nu} = \Delta R_{\text{э}} / \Delta\nu.$$

Отношение поглощенного телом потока излучения $\Delta\Phi'_{\lambda}$, которому соответствует малый интервал волн $\Delta\lambda$, к падающему на это

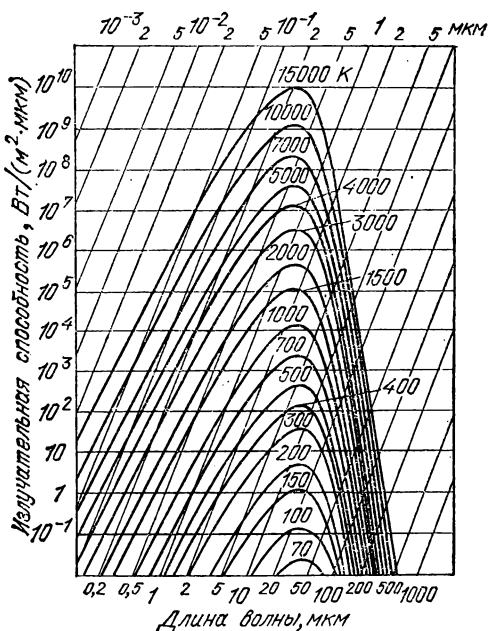


Рис. 4.12. Излучение черного тела при различных температурах

телу потоку $\Delta\Phi_{\lambda}$ с тем же самым интервалом волн $\Delta\lambda$ называется *спектральной поглощательной способностью*: $A_{\lambda} = \Delta\Phi'_{\lambda} / \Delta\Phi_{\lambda}$; A_{λ} — величина безразмерная.

Тело, которое поглощает полностью все падающее на него излучение независимо от направления, длины волны, поляризации,

называется *черным телом* (*абсолютно черным телом* или *полным излучателем*). Моделью такого тела может служить малое отверстие в стенке полого ящика; у черного тела поглощательная способность $A_\lambda = 1$ (для всех длин волн).

Закон Кирхгофа. Отношение спектральной плотности энергетической светимости теплового излучения для данной длины волны и температуры к спектральной поглощательной способности для той же длины волны и температуры есть величина постоянная для всех тел, т. е.

$$r_{\lambda T} / A_{\lambda T} = \epsilon_{\lambda T}; \quad (4.37)$$

$\epsilon_{\lambda T}$ является универсальной функцией длины волны (или частоты) и температуры; она равна *спектральной плотности энергетической светимости черного тела*.

На рис. 4.12 приводится распределение спектральной плотности энергетической светимости в спектре излучения черного тела; для построения использована косоугольная система координат с логарифмическими шкалами; по горизонтальной оси отложены длины волн, по наклонной оси — значения $\epsilon_{\lambda T}$; цифры у кривых указывают температуру.

Закон Стефана — Больцмана. Энергетическая светимость черного тела пропорциональна четвертой степени температуры T :

$$R_0 = \sigma T^4, \quad (4.38)$$

где σ — коэффициент пропорциональности (*постоянная Стефана — Больцмана*); $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Закон смещения Вина. Наибольшая спектральная плотность энергетической светимости соответствует определенной длине волны λ_m . Длина волны, которой соответствует максимальная спектральная плотность энергетической светимости черного тела, обратно пропорциональна температуре T :

$$\lambda_m = b/T. \quad (4.39)$$

Постоянная $b = 0,2898$ см·К; она называется *постоянной Вина*.

Формула Планка. Спектральная плотность энергетической светимости черного тела:

$$\epsilon_{\lambda T} = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{hc/(k\lambda T)} - 1}, \quad (4.40)$$

где c — скорость света в вакууме, λ — длина волны, h — постоянная Больцмана, h — постоянная Планка. Графически функция (4.40) представлена на рис. 4.12 (для различных температур).

ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Таблица 116. Относительная видность K_λ дневного зрения

Длина волны, нм	K_λ	Длина волны, нм	K_λ	Длина волны, нм	K_λ
400	0,0004	520	0,710	640	0,175
420	0,0040	540	0,954	660	0,061
440	0,023	560	0,995	680	0,017
460	0,060	580	0,870	700	0,0041
480	0,139	600	0,631	720	0,00105
500	0,323	620	0,381	740	0,00025
				760	0,00006

Примечание. Значения относительной видности различны для разных людей. Однако эти значения не очень сильно отличаются для людей с нормальным зрением. В таблице приведены средние значения.

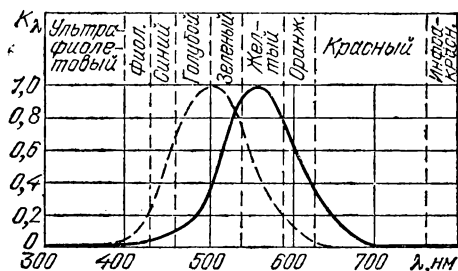


Рис. 4.13. График относительной видности при дневном (сплошная кривая) и сумеречном зрении (штриховая кривая)

Таблица 117. Яркость освещенных поверхностей

Освещенная поверхность	Яркость, кд/м ²
Экран в кинотеатре	25—50
Лист белой бумаги (при освещенности 30 — 50 лк)	10—15
Снег под прямыми солнечными лучами	3·10 ⁴
Поверхность Луны	2,5·10 ³

Таблица 118. Яркость источников света

Источник	Яркость, кд/м ²
Солнце	15·10 ⁸
Капилляр ртутной дуги сверхвысокого давления	12·10 ⁸ —15·10 ⁸
Кратер угольной дуги	15·10 ⁷
Металлический волосок лампы накаливания	1,5·10 ⁸ —2·10 ⁸
Ночное безлунное небо	10
Искра при разряде в атмосфере ксенона	1,1·10 ¹⁴
» » » » аргона	1,5·10 ¹⁴
» » » » воздуха (азота)	2,1·10 ¹⁴
» » » » гелия	1,5·10 ¹⁸
Экраны телевизионных кинескопов	100—200

Таблица 119. Освещенность, создаваемая различными источниками

Источники	Освещенность, лк
Солнечный свет в полдень (средние широты)	100000
Светильники при кино съемке в студии	10000
Солнечный свет зимой	10000
Облачное небо летом	5000—20000
Облачное небо зимой	1000—2000
Рассеянный свет в светлой комнате (вблизи окна)	100
Светильник для освещения стола при тонких работах	100—200
Кинопроекторы в кинотеатрах	85—120
Светильники, создающие необходимую для чтения освещенность	30—50
Полная Луна, облучающая поверхность Земли	~0,2
Ночное небо в безлунную ночь	~0,0003

Таблица 120. Отражение солнечной радиации

Поверхность	Альbedo
Водная поверхность	0,03—0,04
Влажные свежие паханые черноземы	0,05
Поверхность с растительным покровом	0,13—0,25
Бесснежная поверхность суши	0,15—0,17
Поверхность пустыни	0,25—0,30
Поверхность лугников	0,5
Снежный покров	0,5—0,6
Наземные и плавучие морские и озерные льды	0,5—0,6
Сплошной паковый лед со снегом	0,8
Поверхность Земли (среднее значение)	0,34
Безоблачная Земля (среднее значение)	0,09
Поверхность облаков	0,01—0,8

Примечания. 1. Отношение потока энергии, который рассеивается поверхностью, к потоку, который падает на эту поверхность, называется альbedo.

2. Указанные значения альbedo относятся к случаю нормального падения на поверхность солнечной радиации. Среднее альbedo по северному полушарию равно 0,08—0,14, по южному — 0,06—0,08.

3. Среднее значение альbedo Меркурия — 0,09, Венеры — 0,77, Марса — 0,20, Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна — около 0,5

Таблица 121. Радиационный баланс атмосферы Северного полушария

В метеорологии *радиационным балансом* называется соотношение между поступлением и расходом лучистой энергии.

Поступление лучистой энергии в атмосферу обеспечивается: солнечной радиацией в диапазоне от ультрафиолетового излучения до инфракрасного (коротковолновое излучение), незначительной рассеянной радиацией, поглощением атмосферой излучения земной поверхности.

Расходная часть баланса определяется излучением атмосферы в направлении к земной поверхности, которое называется *противоизлучением атмосферы*, и излучением в мировое пространство.

Разность между тепловым излучением земной поверхности и противоизлучением на уровне земной поверхности называется *эффективным излучением*.

Тепловое излучение земной поверхности, облаков и атмосферы в метеорологии называется *длинноволновым излучением*, спектр которого лежит в диапазоне 4—40 мкм.

Составляющие	Плотность потока, Вт/м ²
<i>Коротковолновая радиация</i>	
Поток солнечной радиации на верхней границе атмосферы	34,9
Поглощение в атмосферы (общее)	6,1
Отражение и рассеяние в мировое пространство	12,8
Поглощение земной поверхностью	16,5
<i>Длинноволновая радиация (4—40 мкм)</i>	
Общее излучение	22,6
Излучение земной поверхностью:	
Тепловое излучение	39,9
Противоизлучение атмосферы	33,7
Эффективное излучение	6,2
Тепловое излучение тропосферы:	
Тепловое излучение, поглощаемое тропосферой	38,7
Собственное тепловое излучение	53,4
Тепловое излучение в мировое пространство:	
Земной поверхностью	1,9
Тропосферой	19,7
Стратосферой	1,0

Спектры солнечного излучения

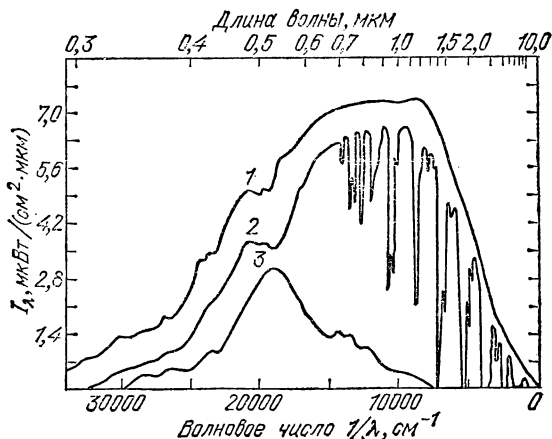


Рис. 4.14. Спектр солнечного излучения: 1 — на верхней границе атмосферы; 2 — на уровне моря в ясный день; 3 — прошедшего через сплошную облачность. Верхняя шкала — для длин волн — логарифмическая; нижняя шкала — для волновых чисел $1/\lambda$. По вертикальной шкале отложены значения спектральной плотности мощности излучения I_λ , которая равна энергии, переносимой солнечным излучением в интервале длин волн 1 мкм через поверхность площадью 1 м^2 за 1 с

Таблица 122. Коэффициент отражения при различных углах падения для стекла и воды (ρ , %)

Вещество	Угол падения, град.									
	0	20	30	40	50	60	70	80	89	90
Вода	2	2,1	2,2	2,5	3,4	6,0	13,5	34,5	90,5	100
Стекло	4,7	4,7	4,9	5,3	6,6	9,8	18	39	91	100

Примечание. Для стекла с просветляющей пленкой и показателем преломления 1,5 при нормальном падении $\rho \approx 2,5\%$. Для стекла с просветляющей пленкой и показателем преломления 1,9 при нормальном падении $\rho = 0,8\%$.

Таблица 123. Отражение света при переходе из стекла в воздух

Угол падения, град.	0	10	20	30	35	36	39,5	40	60
Угол преломления, град.	0	15,66	32	51	63	79	82	90	—
Доля отраженной энергии, %	4,7	4,7	5,0	6,8	12	36	47	100	100

Примечание. Таблица составлена для стекла с показателем преломления 1,56, для которого предельный угол полного отражения равен 40° .

**Коэффициент отражения поляризованного
и естественного света**

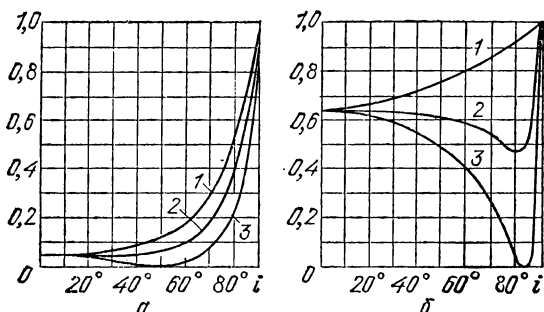


Рис. 4.15. Зависимость коэффициента отражения от угла падения: *a* — видимого света на границе раздела воздух — стекло ($n=1,5$); *b* — радиоволн от поверхности воды ($n=\sqrt{\epsilon}=9$).

1 — отражение линейно поляризованных волн (вектор E перпендикулярен плоскости падения); 2 — отражение естественного света; 3 — отражение линейно поляризованных волн (вектор E параллелен плоскости падения)

**Таблица 124. Коэффициент отражения света
полированными поверхностями металлов
(при нормальном падении)**

Излучение	Длина волны, нм	Алюминий	Медь	Сталь (1%С)	Серебро	Никель	Хром	Цинк	Кремний
Ультрафиолетовое	188	—	—	22	22	—	33	17	64
	200	—	—	27	25	—	36	22	73
	251	80	26	38	34	38	—	39	75
	305	—	25	44	9	44	37	48	73
	357	84	27	50	75	49	41	51	60
Видимое	500	88	44	56	91	61	55	55	34
	600	89	72	57	93	65	—	58	32
	700	87	83	58	95	69	56	61	—
Инфракрасное	900	85	89	61	97	70	—	62	—
	1000	93	90	63	97	72	57	69	—
	5000	94	98	90	99	94	81	97	—
	10 000	97	98	94	99	—	93	—	—

Примечание. Коэффициенты отражения указаны в процентах.

Таблица 125. Предельные углы полного отражения, градусы

Вещество	$i_{\text{пр}}$	Вещество	$i_{\text{пр}}$
Вода	49	Сероуглерод	38
Глицерин	43	Стекло (тяжелый флинт)	34
Стекло (легкий крон)	40	Алмаз	24

Примечание. В таблице приведены значения на границе с воздухом (для линии натрия D , $\lambda = 589,3$ нм).

Таблица 126. Длины волн, соответствующие главным фраунгоферовым линиям

Обозначение линий	Элемент	λ , нм	Обозначение линий	Элемент	λ , нм
A	Кислород	759,4	b_4	Железо, магний	516,74
a	»	718,5	c	»	495,76
B	»	687,0	F	Водород	486,13
C	Водород	656,3	d	Железо	466,8
α	Кислород	627,81	e	»	438,36
D_1	Натрий	589,59	f	Водород	434,05
D_2	»	589,0	G'	Железо	432,58
D_3	Гелий	587,56	G	Железо, кальций	430,79
E	Железо	526,96	g	Кальций	422,67
b_1	Магний	518,36	h	Водород	410,17
b_2	»	517,27	H	Кальций	396,8
b_3	Железо	516,9	k	»	393,36

Таблица 127. Показатели преломления для длин волн, соответствующих некоторым фраунгоферовым линиям

Фраунгоферовы линии	A	B	D	F	H	
Длина волны, нм	759	687	589	486	397	
Вещество	Вода	1,329	1,331	1,333	1,337	1,344
	Сероуглерод	1,610	1,617	1,629	1,654	1,702
	Спирт этиловый	1,359	1,360	1,363	1,367	1,374
	Стекло (легкий крон)	1,510	1,512	1,515	1,521	1,531

Т а б л и ц а 128. Показатели преломления газов

Газ или пар	$(n-1) \cdot 10^{-4}$	Газ или пар	$(n-1) \cdot 10^{-4}$
Азот	2,97	Ртуть	9,33
Аммиак	3,77	Селен	8,95
Ацетилен	6,06	Сернистый ангидрид	7,37
Бензол	7,88	Сероуглерод	6,19
Водород	1,38	Теллур	9,91
Водяной пар	2,57	Углекислый газ	4,50
Воздух	2,92	Хлороформ	14,55
Гелий	0,35	Цинк	20,50
Кислород	2,72	Четыреххлористый углерод	17,63
Метан	4,41		

Примечание. Значения показателей преломления, указанные в таблице, относятся к длине волны, соответствующей желтой линии натрия (D), температуре 0°C и нормальному давлению (101 325 Па); по формуле $(n-1)/\rho = \text{const}$ (для данного газа) можно рассчитать показатель преломления n для других плотностей ρ .

Т а б л и ц а 129. Показатели преломления твердых тел и жидкостей (при 15°C , для D -линии натрия, относительно воздуха)

Вещество	n	Вещество	n
<i>Твердые тела</i>		Сероуглерод	1,632
Алмаз	2,417	Скипидар	1,47
Лед	1,31	Спирт метиловый	1,33
Сахар	1,56	» этиловый	1,362
Слюда	1,56—1,60	Хлороформ	1,449
Топаз	1,63	Эфир этиловый	1,354
<i>Жидкости</i>		<i>Масла</i>	
Анилин	1,586	Гвоздичное	1,532
Бензол	1,504	Кедровое	1,516
Вода (20°C)	1,333	Коричное	1,601
Глицерин	1,47	Оливковое	1,46
Канадский бальзам	1,53	Парафиновое	1,44
Серная кислота	1,43		

Таблица 130. Дисперсия показателя преломления

Излучение	Длина волны, нм	Стекло (15 °С)		Кварц (18 °С)		Плавленый кварц	Вода при 20 °С	Сильвин при 18 °С
		Легкий крон	Тяжелый крон	Обыкновенная волна	Необыкновенная волна			
Инфракрасное	22 300	—	—	—	—	—	—	1,3712
	9429	—	—	—	—	—	—	1,4587
	4200	—	—	1,4569	—	—	—	1,4720
	2172	1,4946	1,6153	1,5180	1,5261	—	—	1,4750
	1256	1,5042	1,6268	1,5316	1,5402	—	1,3210	1,477
Видимое	670,8	1,5140	1,6434	1,5415	1,5505	1,4561	1,3308	1,4866
	643,8	1,5149	1,6453	1,5423	1,5514	1,4568	1,3314	1,4877
	589,3	1,5170	1,6499	1,5443	1,5534	1,4585	1,3330	1,4904
	486,4	1,5230	1,6637	1,5497	1,5590	1,4632	1,3371	1,4983
	404,7	1,5318	1,6852	1,5572	1,5567	1,4697	1,3428	1,5097
Ультрафиолетовое	303,4	1,5552	—	1,5770	1,5872	1,4869	1,3581	1,5440
	214,4	—	—	1,6305	1,6428	1,5339	1,4032	1,6618
	185,2	—	—	1,6759	1,6901	1,5743	—	1,8270
$\alpha, 10^{-6} \text{K}^{-1}$		-1	3	-5	-6	-3	-80	-40

Примечания. 1. Показатели преломления даны относительно воздуха.

2. Температурный коэффициент α — изменение показателя преломления при повышении температуры на 1 К. Минус указывает, что при увеличении температуры показатель преломления уменьшается.

3. В кристалле кварца свет расщепляется на две поляризованные волны. В таблице приводятся значения показателя преломления для обеих волн; для необыкновенной волны указаны наибольшие значения n_e .

Таблица 131. Коэффициент отражения дневного света

Материал	Коэффициент отражения, %
Бумага голубая	25
» желтая	25
» коричневая	13
» обычная белая	60—70
» шоколадного цвета	4
Вельвет черный	0,4
Дерево (сосна)	40
Глина	24—26
Калька	~22
Картон белый	60—70
» желтый	30
Марля	16
Белила на окрашенной поверхности	50
Желтая краска (крон) на окрашенной поверхности	40
Почва влажная	8

Таблица 132. Постоянные электрического и магнитного двойного лучепреломления

Вещество	$B, 10^{-9}$ м/В ²	$C, 10^{-15}$ м/А ²
Бензол	0,60	7,5 (26 °С, 580 нм)
Сероуглерод	3,21	-4,0 (28 °С, 540 нм)
Хлороформ	-3,46	-0,8 (20 °С, 546 нм)
Вода	4,7	-0,014 (20 °С, 546 нм)
Хлорбензол	10,0	10,2 (25 °С, 546 нм)
Нитротолуол	123	
Нитробензол	220	24,1 (20 °С, 589 нм)

Примечания. 1. Значения B указаны для температуры 20 °С и длины волны 589 нм.

2. Знак минус указывает на то, что скорость необыкновенной волны больше скорости обыкновенной волны.

Таблица 133. Удельная постоянная вращения (при температуре 20 °С)

Вещество	Растворитель	$[\alpha]$ ($\lambda=589,3$ нм)	$C, \text{кг/м}^3$
Сахар: тростниковый	Вода	$66,47 + 1,27 \cdot 10^{-2} C +$ $+ 3,77 \cdot 10^{-4} C^2$	0—50
виноградный	Вода	52,5	
фруктовый	Вода	-91,9	
Глюкоза	Вода	$52,50 + 1,88 \cdot 10^{-2} C +$ $+ 5,17 \cdot 10^{-4} C^2$	0—35
Виннокаменная кислота	Вода	$14,83 - 0,146 C$	0—50
Скипидар	Чистый	-37	—
Камфора	Спирт (этил.)	$40,9 + 0,135 C$	10—50
Хинин	Спирт (этил.)	-169	2
Никотин	Вода	-79,4	0—10

Примечание. Значения концентрации C приведены в килограммах на кубический метр. Минус указывает, что вращение происходит против часовой стрелки, если смотреть на вещество против хода лучей. В последней графе указаны пределы изменения концентрации C ; $[\alpha]$ — угл. градусы·м³/(кг·м).

Таблица 134. Вращательная дисперсия (при 20 °С)

Тростниковый сахар в воде ($C=10-26$ кг/м ³)		Винная кислота в воде ($C=28,62$ кг/м ³)		Кварц (вдоль оптической оси)	
$\lambda, \text{нм}$	$[\alpha]$	$\lambda, \text{нм}$	$[\alpha]$	$\lambda, \text{нм}$	$\alpha, \text{град/мм}$
300	309	275	-296,8	185,4	370,9
486,1	100,3	300	-166,0	193,5	322,8
535,1	81,8	350	-16,8	257,1	143,3
589,3	66,5	450	6,6	434,0	41,92
656,3	52,9	550	8,4	486,1	32,76
		589	9,8	589,3	21,72
				656,3	17,32

Примечание. При повышении температуры на 1 °С $[\alpha]$ увеличивается на 0,003 первоначального значения (для $\lambda=589$ нм); значения $[\alpha]$ указаны в град·м³/(кг·м).

Таблица 135. Спектры испускания металлов (λ , нм)

Алюминий (дуга)	Медь (дуга в вакууме)	Ртуть (ртут- ная лампа)	Натрий (в пламе- ни)	Кадмий (дуга)	Цинк (дуга в вакууме)
308,3	324,8	312,6	588,997	326,1	303,6
309,3	327,4	313,1	<u>589,593</u>	340,4	307,2
394,4	402,3	365,0		346,6	334,5
396,2	406,3	404,68		861,1	468,0
<u>466,3</u>	510,55	435,83		398,2	472,2
505,7	<u>515,33</u>	491,64		441,3	481,1
569,6	<u>521,82</u>	495,97		467,8	491,2
572,3	570,0	546,07		479,99	492,5
	578,21	<u>576,96</u>		<u>508,58</u>	610,3
	<u>578,22</u>	579,07		533,8	536,2
		615,20		537,9	
		623,20		<u>643,85</u>	

Примечания. 1. Длины волн измерены в воздухе при 15°C и нормальном давлении (101 325 Па).

2. Подчеркнуты длины волн, соответствующие наиболее ярким линиям спектра.

Таблица 136. Спектры испускания газов (λ , нм)

Азот	Аргон	Водород	Гелий	Кислород	Неон
575,4	394,90	410,17	388,86	520,0	453,78
580,3	404,44	434,04	402,62	530,0	457,59
585,3	<u>415,86</u>	434,05	412,08	(полоса)	470,44
590,4	416,42	<u>486,128</u>	501,57	555,0	470,89
595,7	418,19	<u>486,136</u>	587,56	564,0	471,53
601,2	419,0	656,271	<u>667,81</u>	(полоса)	478,89
606,8	419,10	656,285	706,52		533,03
632,1	<u>420,07</u>				535,80
639,3	425,12				540,05
646,7	<u>425,94</u>				<u>585,25</u>
654,3	426,63				588,19
662,2	<u>427,22</u>				596,54
670,3	<u>430,01</u>				614,31
678,7	433,36				626,65
	433,54				638,30
					640,22
					<u>650,65</u>
					717,39
					724,52

См. примечание к табл. 135.

Таблица 137. Световая отдача, к. п. д. и яркость источников света

Тип лампы	Световая отдача, лм/Вт	к. п. д., %	T, К	Яркость, 10^5 кд/м ²
50 Вт, пустотная угольная	2,5	0,4	2095	5
50 Вт, пустотная вольфрамовая	10	1,6	2460	15—20
50 Вт, газонаполненная вольфрамовая	10	1,6	2685	5·10
500 Вт, газонаполненная вольфрамовая	17,5	2,8	2900	10 ²
2000 Вт, газонаполненная вольфрамовая	21,2	3,5	3020	13·10—15·10
Вольтова дуга	25	4	4000	15·10 ² (в кратере)
Люминесцентная лампа	40—60	6,4	—	1,5·10 ⁻¹

Примечание. Световая отдача есть отношение полного светового потока к мощности тока, питающего источник света.

К. п. д. есть отношение светового потока для длины волны 555 нм к мощности, потребляемой источником света:

$$\eta = \Phi / (683 P),$$

где Φ — световой поток (лм), P — мощность (Вт), потребляемая источником.

Таблица 138. Работа выхода электронов и красная граница фотоэффекта

Вещество	Подложка	A, эВ	λ , нм
Закись меди	—	5,15	250
Слюда	—	4,8	255
Хлористый натрий	—	4,2	295
Бромистое серебро	—	3,7—5,14	335—240
Торий	Вольфрам	2,62	473
Натрий	Вольфрам	2,10	590
Цезий	Вольфрам	1,36	909
Цезий	Платина	1,31	895
Барий	Вольфрам	1,1	1130
Оксид бария	Оксид вольфрама	1,0—1,1	1240—1130

Глава V. СТРОЕНИЕ АТОМА. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

1. ЕДИНИЦЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

Физическая величина	Наименование единицы	Обозначение	Определение	Значение в единицах СИ
Масса	Атомная единица массы	а. е. м.	1/12 часть массы ядра изотопа углерода-12	$1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Энергия	Электрон-вольт	эВ	$A = QU$ ($Q = e$, $U = 1$ В)	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж
Заряд	Элементарный заряд	e	Заряд электрона	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Момент количества движения (импульс) частицы		\hbar	$\hbar = h/2\pi$	$1,055 \times 10^{-34}$ Дж·с
Магнитный момент электрона	Магнетон Бора	μ_B	$eh/(4\pi m_e)$	$9,274 \times 10^{-24}$ Дж/Тл
Магнитный момент ядра	Ядерный магнетон	μ_N	$eh/(4\pi m_p)$	$5,051 \times 10^{-27}$ Дж/Тл

2. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА ЧАСТИЦ

Электромагнитное излучение имеет как волновые, так и корпускулярные свойства (*корпускулярно-волновой дуализм*). Движущиеся частицы обладают также волновыми и корпускулярными свойствами. Например, электроны, проходящие через тонкую металлическую фольгу, дают дифракционную картину, подобную дифракционной картине от рентгеновского и γ -излучений (рис. 5.1).

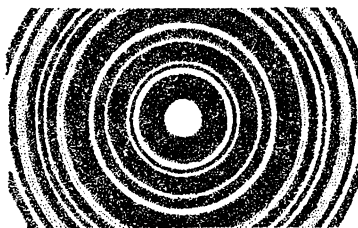


Рис. 5.1. Дифракция электронов на тонкой серебряной фольге

Корпускулярные и волновые характеристики связаны следующими соотношениями:

$$\nu = E/h, \quad \lambda = h/p, \quad (5.1)$$

где ν — частота, E — энергия, соответствующая определенному состоянию или частоте излучения при переходе из одного состояния в другое с изменением энергии, равным E , p — импульс частицы; величина λ называется *длиной волны де-Бройля*.

3. МОДЕЛЬ АТОМА РЕЗЕРФОРДА — БОРА — ЗОММЕРФЕЛЬДА

Любая модель лишь приближенно позволяет описать некоторые свойства атома; модели следует рассматривать как один из способов расчета некоторых величин.

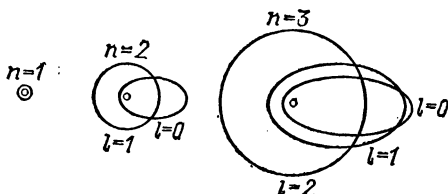


Рис. 5.2. Возможные орбиты электронов в атоме водорода (для различных квантовых чисел). Большие полуоси эллипсов относятся как квадраты целых чисел 1^2 ; 2^2 ; 3^2 ; 4^2 и т. д.

В простейшей модели Резерфорда — Бора — Зоммерфельда предполагается, что в центре атома находится ядро, имеющее положительный заряд; вокруг ядра по орбитам, имеющим форму окружности или эллипса (рис. 5.2), движутся электроны; ядро разме-

щается в одном из фокусов эллиптической орбиты (или в центре окружности); основная масса атома сосредоточена в ядре.

Состояние атома в рассматриваемой модели определяется двумя постулатами Бора.

1-й постулат. Электроны в атоме движутся по стационарным орбитам; при движении по таким орбитам электрон не излучает электромагнитные волны, что находится в противоречии с классической теорией излучения электромагнитных волн (см. (3.87)). Различным стационарным орбитам соответствуют возможные дискретные значения энергии атома.

2-й постулат. Атом поглощает или излучает квант энергии при переходе из одного стационарного состояния в другое:

$$h\nu = E_n - E_m, \quad (5.2)$$

при этом электрон с одной стационарной орбиты скачком переходит на другую. Если атом переходит из состояния с большим значением энергии в состояние с меньшей энергией, то он излучает фотон. Поглощение фотона атомом ведет к возрастанию его энергии.

Стационарные орбиты, имеющие форму окружности, определяются условием:

$$m_e v_n r_n = nh/(2\pi), \quad (5.3)$$

где m_e — масса электрона, v_n — его линейная скорость на стационарной орбите, r_n — радиус стационарной орбиты, h — постоянная Планка, $n=1, 2, 3, \dots$

На основе постулатов рассчитываются энергетические уровни E_n водородоподобных атомов; их значения согласуются с соотношением (5.7).

4. СТРОЕНИЕ АТОМА. ЭЛЕКТРОННЫЕ ОБОЛОЧКИ

Модель многоэлектронного атома. В центре атома находится положительно заряженное ядро, окруженное электронами. Заряд ядра равен Ze (Z — порядковый номер элемента в Периодической системе Д. И. Менделеева); количество электронов в нейтральном атоме равно Z .

Основная масса атома сосредоточена в ядре. Ядро самого легкого атома водорода состоит из одного протона. Масса протона $m_p \approx 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг, масса электрона $m_e \approx 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг, $m_p \approx 1836 m_e$. Более точные значения см. в Приложении VI.

Атом, у которого количество электронов не равно Z , называется *ионом*. У положительного иона электронов меньше, а у отрицательного иона — больше, чем у нейтрального атома.

Энергия, которая потребуется для удаления внешнего электрона от ядра атома (без сообщения кинетической энергии), называется

энергией ионизации. Ее часто выражают в *электронвольтах*. Энергия, необходимая для отрыва электрона от отрицательного иона, называется *сродством электрона* (или *энергией сродства*).

Атомы не имеют четких границ, поэтому их размеры оцениваются приближенно по межатомным расстояниям, которые рассчитываются или по длинам средних пробегов, или по расстояниям между узлами кристаллических решеток (см. гл. II); рассчитанные таким образом радиусы атомов называются *эффективными*. Радиус атома (иона), который оценивается по линейному размеру внешней электронной оболочки (см. ниже), называется *орбитальным радиусом* (см. табл. 146).

Квантовые числа. Состояние электрона в атоме (точнее, состояние атома в целом) определяется четырьмя квантовыми числами: *главным квантовым числом n* , *орбитальным* (или *азимутальным*) *квантовым числом l* , *магнитным квантовым числом m_l* и *спиновым числом m_s* . Значения первых трех квантовых чисел связаны между собой. При заданном главном квантовом числе n орбитальное квантовое число l может принимать целочисленные значения от нуля до $n-1$, а магнитное квантовое число m_l — целочисленные значения от $-l$ до l . Спиновое число m_s имеет значение $1/2$.

Главное квантовое число определяет (в основном) энергетические уровни энергии в атоме.

Орбитальное квантовое число определяет *орбитальный момент импульса M_l электрона* в данном состоянии, а магнитное квантовое число m_l — его проекции M_{lz} на выделенное (например, внешним магнитным полем) направление:

$$M_l = \hbar \sqrt{l(l+1)}, \quad (5.4)$$

$$M_{lz} = m_l \hbar. \quad (5.5)$$

Спиновым квантовым числом определяется *собственный момент количества движения (спин) M_s электрона* и его возможные проекции M_{sz} :

$$M_s = \hbar \sqrt{m_s(m_s+1)}, \quad M_{sz} = \pm m_s \hbar. \quad (5.6)$$

Принято говорить, что спин электрона (или другой частицы) равен одной второй ($1/2$); при этом подразумевается, что проекции собственного момента импульса равны $+\hbar/2$ или $-\hbar/2$.

Вырожденные состояния. Если в электрическом поле ядра находится только один электрон, то все состояния с одинаковым значением главного квантового числа n , но различными значениями l и m_l , соответствуют одному значению энергии; такие состояния называются *вырожденными*, а их число — *степенью вырождения*.

Водородоподобными называются ионы He^{+1e} , Li^{+2e} , Be^{+3e} и т. д.

Энергетические уровни вырожденных состояний водородоподобных атомов определяются следующим выражением:

$$E_n = -\frac{m_e Z^2 e^4}{8\epsilon_0^2 n^2 h^2}, \quad (5.7)$$

где m_e — масса электрона, ϵ_0 — электрическая постоянная, Z — атомный номер ядра (зарядовое число), n — главное квантовое число, h — постоянная Планка. Если в поле ядра находится несколько электронов, происходит расщепление вырожденного уровня энергии. Разность значений энергии между расщепленными уровнями мала по сравнению с разностями энергий вырожденных состояний, поэтому в первом приближении принимается, что главные квантовые числа определяют в основном энергетические уровни атома.

Оболочки и подоболочки. Электроны, энергетические состояния которых описываются одинаковыми числами n и l , образуют подоболочки; подоболочки обозначаются цифрой, которая соответствует квантовому числу n , и одной из букв s, p, d, f и т. д., что соответствует состояниям с орбитальными квантовыми числами $l=0, 1, 2, 3, \dots$

Электроны, энергетические состояния которых определяются одинаковыми главными числами (но различными значениями l), образуют оболочку. Оболочки обозначаются большими латинскими буквами, как указано в таблице.

Главное квантовое число n	1	2	3	4
Оболочки	K	L	M	N
Подоболочки	1s	2s, 2p	3s, 3p, 3d	4s, 4p 4d, 4f

Состояния электронов, входящих в состав одного и того же атома, отличаются друг от друга хотя бы одним значением квантового числа. Эта закономерность называется *принципом Паули*, которому подчиняются все частицы, имеющие полуцелый спин. Частицы с полуцелым спином называются *фермионами*.

Излучение атомов. При переходе электрона с одного энергетического уровня на другой изменяются квантовые числа, определяющие его состояния. Как показывают теория и опыт, переход электрона возможен на такие уровни, когда изменение $\Delta m_l = 0, \mp 1$, изменение $\Delta l = \pm 1$; при этом происходит либо излучение, либо поглощение фотона.

При переходах электронов между внешними оболочками образуется видимое и ультрафиолетовое излучения. Если из внутренней

оболочки атома удалить электрон, то на эту оболочку будут самопроизвольно переходить электроны из других оболочек с большими значениями n . При таких переходах образуется коротковолновое электромагнитное излучение с линейчатым спектром. Это излучение называется *характеристическим рентгеновским излучением*.

Если линии спектра характеристического рентгеновского излучения образуются в результате переходов электронов с более высоких энергетических уровней на вакантные места в оболочке K , то они относятся к K -серии; излучение K -серии является самым коротковолновым. При переходах электронов на L -оболочку излучаются линии L -серии и т. д. Серии характеристического рентгеновского излучения обозначаются теми же латинскими буквами, что и соответствующие оболочки, т. е. K, L, M, \dots Распределение электронов по оболочкам и подоболочкам приводится в табл. 140. Заполнение оболочек осуществляется в следующей последовательности: $1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d, 4p, 5s, 4d, 5p, 6s, 4f, 5d, 6p, 7s, 5f, 6d$.

5. АТОМНОЕ ЯДРО

Модель атомного ядра. Атомное ядро состоит из *протонов* и *нейтронов*. Протон и нейтрон можно рассматривать как два различных зарядовых состояния одной частицы — *нуклона*. Поэтому часто говорят, что ядро состоит из нуклонов, одна часть которых находится в протонном состоянии, другая — в нейтронном.

Количество протонов равно порядковому номеру Z (*зарядовое число*) элемента в Периодической системе. Количество нуклонов в ядре называется *массовым числом* A . Количество нейтронов N в ядре равно разности $A - Z$. Ядро обозначается символом химического элемента с указанием зарядового и массового чисел в виде нижнего и верхнего индексов слева от символа элемента (например, ${}^{14}_7\text{N}$ — ядро азота с зарядовым числом 7 и массовым числом 14).

Ядра с одинаковым количеством протонов и различным количеством нейтронов называются *изотопами*. Ядра с одинаковым количеством нуклонов, но различным количеством протонов, называются *изобарами*. Электрический заряд ядра Q равен сумме электрических зарядов протонов, входящих в его состав, т. е. $Q = Ze$.

Размер ядра зависит от количества нуклонов, входящих в его состав; в нем отчетливо выделяются внутренняя область и поверхностный слой. Концентрация нуклонов во внутренней области примерно постоянна и для всех ядер с $A > 10$ равна $1,68 \cdot 10^{14}$ нуклон/ м^3 . В поверхностном слое, толщина которого примерно одинакова для всех ядер и составляет $(1,5 - 2) \cdot 10^{-15}$ м, концентрация нуклонов уменьшается до нуля.

От концентрации нуклонов зависит плотность электрического заряда. *Радиусом ядра* принято считать расстояние от центра до слоя, в котором плотность заряда равна половине его максимального значения. Радиус ядра R увеличивается с ростом числа нуклонов, его приближенное значение рассчитывается по формуле:

$$R = R_0 A^{1/3}, \quad (5.8)$$

где $R_0 = (1,2-1,3) \cdot 10^{-16}$ м, A — массовое число.

На рис. 5.3 представлено распределение плотности электрического заряда в ядре золота.

Ядерные силы. Нуклоны внутри ядра связаны особыми силами, которые называются *ядерными* (см. п. 9 этой главы). Ядерные силы проявляются только на малых расстояниях, сравнимых с межнуклонными расстояниями в ядре. Они не зависят от электрического заряда нуклонов (*принцип зарядовой независимости*) и обладают свойством насыщения. Ядерные силы имеют три составляющие: центральные силы, зависящие от расстояния, спин-спиновые, которые зависят от ориентации спинов, и спин-орбитальные, которые зависят от ориентации спинов относительно прямой, соединяющей нуклоны.

На рис. 5.4 графически изображены кривые зависимости составляющих потенциальной энергии взаимодействия двух одинаковых нуклонов (протон — протон или нейтрон — нейтрон) для случая, когда общий спин нуклонов перпендикулярен прямой, соединяющей эти нуклоны.

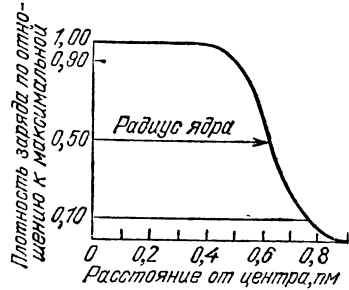
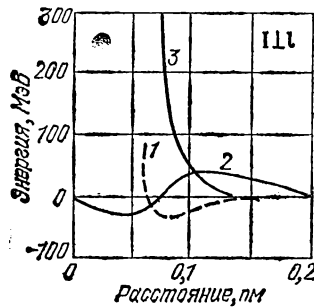


Рис. 5.3. Распределение заряда в ядре золота

Рис. 5.4. Составляющие потенциальной энергии взаимодействия двух одинаковых нуклонов: кривая 1 соответствует центральным силам, кривая 2 — спин-спиновой силе, кривая 3 — спин-орбитальной силе



Дефект масс и энергия связи. Масса ядра M всегда меньше суммы масс покоя нуклонов, входящих в его состав. Разность между суммой масс покоя нуклонов и массой ядра называется *дефектом*

масс:

$$\Delta M = Zm_p + (A - Z)m_n - M, \quad (5.9)$$

Дефектом масс определяется энергия связи нуклонов, входящих в состав ядра. *Энергией связи нуклона* называется работа, необходимая для удаления нуклона из ядра таким образом, чтобы его кинетическая энергия была равна нулю. *Энергией связи ядра* называется работа, которую необходимо совершить для расщепления ядра на взаимодействующие между собой нуклоны, при этом их кинетическая энергия должна быть равной нулю. На основании закона взаимосвязи массы и энергии энергия взаимодействующих нуклонов определяется соотношением

$$E_2 = Zm_p c^2 + (A - Z)m_n c^2, \quad (5.10)$$

а энергия покоя ядра — соотношением $E_1 = Mc^2$. Разность энергий

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \Delta M c^2 \quad (5.11)$$

равна энергии связи ядра.

Энергия связи ядра оказывается примерно пропорциональной числу нуклонов в ядре, поэтому определяется средняя энергия связи ядра, приходящаяся на один нуклон; она называется *удельной энергией связи*. На рис. 5.8 (см. с. 231) графически представлена зависимость удельной энергии связи ядер от массовых чисел.

Энергетические уровни ядра. Ядро может находиться в различных состояниях с дискретными значениями (уровнями) энергии. Состояние с наименьшей энергией называется *основным*, а соответствующее значение энергии в этом состоянии называется *основным уровнем энергии ядра*. Другие состояния являются *возбужденными*. Энергия первого возбужденного уровня для различных ядер изменяется в широких пределах — от 0,1 МэВ до 3 МэВ. Переход ядра из возбужденного в основное состояние сопровождается излучением γ -кванта.

Спин ядра. Момент импульса (спин) ядра определяется спинами входящих в ядро нуклонов и их орбитальными моментами, обусловленными движениями нуклонов. Спин ядра с четным числом нуклонов имеет целочисленное значение (в единицах \hbar).

6. ЯДЕРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

Радиоактивность. Тяжелые ядра в основном состоянии часто оказываются неустойчивыми и самопроизвольно распадаются, образуя новые ядра (дочерние) и другие частицы. Такое свойство ядер называется *радиоактивностью*, а сами ядра — *радиоактивными*.

Радиоактивность ядер, которые существуют в природе, называется *естественной*; радиоактивность ядер, которые получены в лабораторных условиях, называется *искусственной*.

К радиоактивным процессам относятся: *альфа-распад*, все виды *бета-распада*, *гамма-излучение*, *самопроизвольное деление ядер (спонтанное деление)*, *протонная радиоактивность*.

При α -распаде выбрасываются ядра гелия ${}^4_2\text{He}$, которые называются α -частицами; β -радиоактивность имеет три разновидности: β^- -испускание электронов (e^-), β^+ -испускание позитронов (e^+) и К-захват (захватывается с ближайшей к ядру оболочки К один электрон). При К-захвате один из протонов ядра превращается в нейтрон, а излучается нейтрино и характеристическое рентгеновское излучение.

В таблице представлены основные типы радиоактивных превращений.

Тип превращения	Процесс	Изменение A и Z		
		ΔZ	ΔA	
α -распад	${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$	-2	-4	
β -превращения	β^- -распад	${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^- + \bar{\nu}_e$	+1	0
	β^+ -распад	${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + e^+ + \nu_e$	-1	0
	К-захват	${}^A_Z X + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + \nu_e$	-1	0
γ -излучение	${}^A_Z X \rightarrow {}^A_Z X + \gamma$	0	0	
Спонтанное деление		$\sim Z/2$	$\frac{2}{5}A \div \frac{3}{5}A$	
Протонная радиоактивность	${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-1}_{Z-1} Y + {}^1_1 \text{H}$	-1	-1	

γ -излучение представляет собой кванты электромагнитного излучения, которое образуется при переходах между различными состояниями одного и того же возбужденного ядра.

Основные закономерности радиоактивных распадов. 1. Радиоактивный распад не зависит от внешних условий (температуры, давления, химических воздействий). 2. α - и γ -частицы имеют дискретные значения энергии, энергия β -частиц изменяется непрерывно от

значений, близких к нулю, до некоторого максимального значения.

3. Изменение количества радиоактивных ядер рассчитывается по формуле

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 2^{-t/T}, \quad (5.12)$$

где N_0 — начальное число ядер в момент времени $t=0$, N — оставшееся количество ядер в момент времени t , T — *период полураспада* — интервал времени, в течение которого распадается половина ядер, λ — вероятность распада одного ядра за 1 с (*постоянная распада*). *Средним временем жизни ядра* называется величина $\tau = 1/\lambda$; $T = \ln 2/\lambda$.

Правило смещения. После радиоактивного распада образуются новые ядра, у которых изменяется порядковый номер Z (за исключением γ -излучения). Изменение ΔZ указано в таблице (см. выше), там же указаны изменения массового числа ΔA .

Ядерные реакции. Сильное взаимодействие атомного ядра с элементарными частицами или другими ядрами, в результате которого происходит возбуждение или преобразование ядер, называется *ядерной реакцией*. Для ее осуществления необходимо сближение атомного ядра и частицы на расстояния порядка 10^{-15} м, при которых проявляется сильное взаимодействие. Для этого атомное ядро, как мишень, облучается потоком частиц с большой кинетической энергией.

Эффективное сечение ядерной реакции. Пусть на неподвижную мишень падает параллельный пучок частиц, которые движутся вдоль оси Oz ; количество частиц, проходящих за время 1 с через плоскость, перпендикулярную оси Oz , площадью 1 м², называется *плотностью потока*.

Величина $\sigma = \Delta N / (N n_0 \Delta z)$ называется *эффективным сечением ядерной реакции*. В этом выражении N — плотность потока облучающих мишень частиц, n_0 — количество атомов (или других частиц) в единичном объеме мишени, Δz — элементарная толщина мишени, ΔN — количество частиц, вступивших в реакцию.

Единица эффективного сечения — квадратный метр (м²). Часто используется единица 1 барн = 10^{-28} м².

Энергия, выделяющаяся при каждом ядерном превращении, называется *энергией ядерной реакции*. Минимальная энергия бомбардирующих частиц, при которой происходит ядерное превращение, называется *энергетическим порогом реакции*.

Ядерные реакции используются для получения ядерной энергии путем деления тяжелых ядер (например, урана-235) или путем синтеза (слияния) легких ядер (например, водорода). Синтез легких ядер может быть осуществлен только при очень высоких температурах (порядка 10^8 К); такие реакции называются *термоядерными*.

7. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ВЕЩЕСТВОМ

При движении заряженной частицы в веществе происходит поглощение ее энергии за счет взаимодействия с электронными оболочками и ядрами атомов. При этом происходит рассеяние частиц, а также ионизация или возбуждение атомов вещества. Потери энергии частицей за счет ионизации атомов и молекул вещества называются *ионизационными потерями*.

Торможение легких частиц. При взаимодействии электронов и позитронов с ядрами происходит их торможение, сопровождаемое электромагнитным излучением, которое называется *тормозным излучением*; оно имеет сплошной спектр. При торможении быстрых электронов образуется рентгеновское излучение. Общие потери энергии за счет излучения при торможении частиц называются *радиационными*. Если энергия частицы достаточна для выбивания электронов из внутренних слоев оболочки атома, то возникает характеристическое рентгеновское излучение с линейчатым спектром. При движении электронов со скоростями, превышающими фазовую скорость света в веществе (т. е. когда $v > c/n$, n — показатель преломления вещества), возникает *свечение Вавилова — Черенкова*. Оно соответствует видимому диапазону и имеет сплошной спектр, но основная доля его приходится на коротковолновое излучение.

Параллельный пучок электронов, имеющих одинаковую энергию, при взаимодействии с веществом превращается в расходящийся пучок электронов, которые имеют различную энергию.

Ослабление потока β -частиц определяется соотношением:

$$N = N_0 e^{-\mu z} = N e^{-\mu' \rho z}, \quad (5.13)$$

где N_0 — поток входящих в вещество электронов, N — поток после прохождения ими расстояния z , μ — *линейный коэффициент ослабления*, $\mu' = \mu/\rho$ — *массовый коэффициент ослабления*, имеющих приблизительно одинаковые значения в различных веществах, ρ — плотность. Единица линейного коэффициента ослабления — метр в минус первой степени — это такое ослабление потока, при котором на расстоянии один метр поток уменьшается в e раз.

Торможение нуклонов и ядер. При торможении ядер и нуклонов главную роль играют ионизационные потери, которые зависят от заряда и скорости частиц, но не зависят от их массы; радиационные потери при этом малы. Параллельный пучок ядер или нуклонов, проходя через вещество, практически не рассеивается. Некоторая часть электронов, выбитых из оболочек атомов, обладает достаточно высокой энергией и производит ионизацию, называемую *вторичной*. Среднее расстояние, которое может пройти ядро в веществе, называется *средней длиной пробега ядра*. Средняя длина пробега α -ча-

стиц (в метрах) в воздухе (при нормальных условиях) определяется выражением:

$$R_B = 3,18 \cdot 10^{-3} E^{3/2}, \quad (5.14)$$

где E — энергия в МэВ (в пределах от 4 до 7 МэВ). Величина, равная произведению длины среднего пробега на плотность вещества, называется средним массовым пробегом. Средний массовый пробег α -частиц в любом веществе (в кг/м²) может быть определен по длине среднего пробега α -частиц данной энергии в воздухе R_B :

$$R_M = 0,56 R_B A^{1/3}, \quad (5.15)$$

где A — массовое число атомов вещества, R_B — средняя длина пробега в воздухе (в метрах) при нормальных условиях.

Поглощение γ -излучения. Ослабление потока γ -частиц определяется соотношением:

$$I = I_0 e^{-\mu z} = I_0 e^{-\mu' \rho z}, \quad (5.16)$$

где I_0 — поток при входе в слой вещества, I — поток после прохождения слоя толщиной z , μ — линейный коэффициент ослабления, $\mu' = \mu/\rho$ — массовый коэффициент ослабления.

Линейный коэффициент ослабления $\mu = \sigma + \tau + \kappa$; σ , τ , κ — линейные коэффициенты ослабления, учитывающие соответственно рассеяние, поглощение энергии при фотоэффекте, а также поглощение энергии при образовании электронов и позитронов.

8. ЕДИНИЦЫ РАДИОАКТИВНОСТИ И ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Активность. Активностью A радиоактивного источника называется величина, равная отношению количества распавшихся ядер ΔN к промежутку времени Δt , в течение которого происходит распад:

$$A = \Delta N / \Delta t. \quad (5.17)$$

Единица активности — беккерель (Бк); один беккерель равен активности такого источника, в котором за время 1 с происходит один распад. Массу радиоактивного источника, активность которого равна 1 Бк, можно рассчитать по формуле

$$M = 2,41 \cdot 10^{-27} A_i T, \quad (5.18)$$

где M — масса (кг), T — период полураспада (с), A_i — массовое число ядер радиоактивного вещества.

Поглощенная доза и мощность поглощенной дозы. Величина, равная энергии, поглощенной массой 1 кг данного вещества, называется поглощенной дозой излучения; единицей этой величины является грэй (Гр), 1 Гр равен такой дозе излучения, при которой веществом массой 1 кг поглощается энергия ионизирующего излучения 1 Дж. Применяется также внесистемная единица поглощенной дозы — рад; 1 рад = 0,01 грэй.

Доза излучения за время одна секунда называется мощностью поглощенной дозы; единица мощности дозы — грэй в секунду (Гр/с).

Экспозиционная доза. Для характеристики излучения по производимой им ионизации вводится величина, которая называется *экспозиционной дозой фотонного излучения (экспозиционной дозой гамма- и рентгеновского излучения)*. Экспозиционная доза X фотонного излучения — это величина, равная отношению суммы электрических зарядов ΔQ всех ионов одного знака, которые возникают под действием электронов, образующихся в облучаемом воздухе, к массе Δm этого воздуха:

$$X = \Delta Q / \Delta m, \quad (5.19)$$

при этом предполагается, что полностью используется ионизирующая способность электронов. Единица экспозиционной дозы фотонного излучения — кулон на килограмм (Кл/кг); 1 Кл/кг — это такая экспозиционная доза, при которой сумма зарядов всех ионов одного знака в 1 кг воздуха равна 1 Кл. Также используется внесистемная единица экспозиционной дозы фотонного излучения — рентген; 1 рентген = $2,58 \cdot 10^{-4}$ кулон на килограмм.

Коэффициент качества и эквивалентная доза. При одинаковых поглощенных дозах различные виды излучения производят различные биологические воздействия на живые организмы. Коэффициент, показывающий, во сколько раз радиационная опасность данного излучения больше по сравнению с рентгеновским излучением при одинаковых поглощенных дозах, называется *коэффициентом качества* излучения. Коэффициенты качества Q приводятся в таблице.

Вид излучения	Q
Рентгеновское и гамма-излучение	1
Электроны, позитроны, бета-излучение	1
Протоны с энергией меньше 10 МэВ	10
Нейтроны с энергией меньше 20 КэВ	3
Нейтроны с энергией 0,1—10 МэВ	10
Альфа-излучение с энергией меньше 10 МэВ	20
Тяжелые ядра	20

Эквивалентная доза излучения H равна произведению поглощенной дозы D на коэффициент качества Q : $H = DQ$.

Единица эквивалентной дозы — зиверт (Зв). 1 зиверт соответствует поглощенной дозе 1 грэй при коэффициенте качества излучения $Q = 1$.

Используется также внесистемная единица эквивалентной дозы — бэр (биологический эквивалент рентгена); 1 бэр = 0,01 Зв.

Керма. При прохождении ионизирующего излучения в веществе образуются заряженные частицы, которые в свою очередь могут производить ионизацию атомов (косвенная ионизация). Характеристикой косвенной ионизации является керма. Керма K равна отношению суммы первоначальных кинетических энергий W всех заряженных частиц, образующихся при косвенной ионизации, к массе этого вещества:

$$K = W/m. \quad (5.20)$$

Единица кермы — грэй (Гр); 1 Гр — это такая керма, при которой сумма всех первоначальных кинетических энергий заряженных частиц, образующихся при косвенной ионизации в веществе массой 1 кг, равна 1 Дж.

9. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ИХ КОНСТАНТЫ

Все взаимодействия, встречающиеся в различных физических явлениях, можно свести к основным или *фундаментальным взаимодействиям*: *сильному, электромагнитному, слабому и гравитационному.*

Сильное или ядерное взаимодействие определяет структуру ядра и взаимодействие нуклонов, входящих в его состав. В обычном стабильном веществе при не слишком высокой температуре сильное взаимодействие обеспечивает прочную связь между нуклонами. *Сильным взаимодействием* называется взаимодействие между истинно элементарными частицами — *кварками*; оно обусловлено обменом *глюонами* — гипотетическими частицами, которые не имеют электрического заряда.

Электромагнитное взаимодействие — взаимодействие заряженных частиц посредством электрического и магнитного полей. Электромагнитное взаимодействие объясняется как процесс обмена фотонами.

Слабое взаимодействие свойственно всем частицам; примером слабого взаимодействия является β -распад. Слабое взаимодействие объясняется обменом *промежуточными бозонами* — частицами, которые имеют большую массу покоя (около 100 ГэВ) и спин $\frac{1}{2}$.

Гравитационное взаимодействие определяет взаимодействие тел в астрономических масштабах; подобно электромагнитному оно дальнедействующее, т. е. его радиус действия равен бесконечности. Гравитационное взаимодействие объясняется обменом гипотетическими частицами — *гравитонами* с нулевой массой покоя и спином $2\hbar$.

В таблице приводятся основные характеристики фундаментальных взаимодействий.

Взаимодействие	Радиус взаимодействия, м	Интенсивность	Частицы, участвующие в обмене	Характерное время, с	Спин
Сильное	10^{-15}	0,1—1	Глюоны	10^{-23}	$\frac{1}{2}\hbar$
Электромагнитное	∞	$1/137$	Фотоны	10^{-20}	\hbar
Слабое	10^{-17}	10^{-10}	Промежуточные бозоны	10^{-10}	$\frac{1}{2}\hbar$
Гравитационное	∞	$\sim 10^{-38}$	Гравитоны	Неизвестно	$2\hbar$

10. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Элементарные в точном смысле этого слова — это первичные, неразложимые частицы, из которых построены все вещества.

В настоящее время этот термин применяется для обозначения большой группы микрочастиц, которые не являются атомами или их ядрами. Исключение представляет протон, который является и элементарной частицей, и ядром легкого изотопа водорода. Основные характеристики элементарных частиц — масса, электрический заряд, собственный момент количества движения (спин), собственный магнитный момент, взаимная ориентация спина и магнитного момента, время жизни.

Большинство элементарных частиц существует в двух разновидностях. Одну из них, чаще всего встречающуюся в окружающем нас мире, называют *частицей*, вторую — ее *античастицей*. Основной отличительной особенностью пары частица — античастица является *реакция аннигиляции* (исчезновения) — реакция превращения их в частицы, не имеющие массы покоя.

Частица и ее античастица имеют одинаковые массы, спин и время жизни. Частица и ее античастица имеют равные по модулю, но противоположные по знаку электрические заряды, направления спиновых и магнитных моментов, барионные или лептонные «заряды» (числа) и странности. Частицы, у которых античастица отсутствует, считают тождественными со своими античастицами: они называются *абсолютно нейтральными*; к ним относятся фотон, λ^0 -мезоны и η -мезоны.

Собственный момент импульса частицы (спин) может быть целым или полуцелым (в единицах \hbar). Частицы, которые имеют спины, равные 0, \hbar , $2\hbar$, называются *бозонами*.

По видам взаимодействий, в которых участвуют частицы, их подразделяют на классы. Возможно существование четырех классов элементарных частиц. К настоящему времени экспериментально подтверждено существование представителей только трех классов. К первому классу частиц, получивших название *адронов*, относятся

частицы, участвующие во всех видах фундаментальных взаимодействий. В этот класс объединяются барионы и мезоны. *Барионы* имеют полуцелые спины, а *мезоны* имеют целочисленные спины. Принадлежность к барионам отмечается присвоением им *барионного числа* (*заряда*) B , равного $+1$ для частицы и -1 для античастицы; для мезонов барионный заряд равен нулю.

К барионам относятся нуклоны и более тяжелые частицы (*адроны*), распадающиеся на нуклоны. Тяжелые барионы, массы которых больше массы нуклона, называются *гиперонами*.

Во второй класс объединяются частицы, не участвующие в сильном взаимодействии, но способные к трем остальным; они называются *лептонами*. Принадлежность к этому классу частиц отмечается присвоением каждому члену *лептонного «заряда»*, для частиц $+1$, для античастиц -1 .

К третьему классу частиц, участвующих в электромагнитных и гравитационных взаимодействиях, относятся *фотоны*.

Среди разнообразных элементарных частиц с одинаковыми спинами встречаются группы с незначительно различающимися массами, но различными электрическими зарядами. Такие группы принято называть *изотопическими мультиплетами*. К ним относятся протон и нейтрон, π -мезоны, сигма-гипероны, кси-гипероны и т. д.

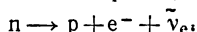
Частицы, входящие в такие группы, рассматриваются как различные состояния одной и той же частицы. *Средний заряд* $\langle Q \rangle$ частиц, входящих в мультиплет, называется также *зарядовым центром* изотопического мультиплета. Средний заряд нуклонного дублета равен $+1/2$, π -мезонного триплета — нулю.

Средние заряды мультиплетов адронов смещены относительно среднего заряда нуклонного дублета. Это смещение определяется квантовым числом, которое называется *странностью*.

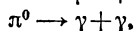
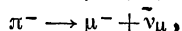
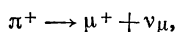
Странность $S=2\langle Q \rangle - B$, где B — барионное число, $\langle Q \rangle$ — средний заряд мультиплета. Для π -мезонов и нуклонов странность равна нулю. Странности сохраняются в сильных и электромагнитных взаимодействиях.

11. ПРЕВРАЩЕНИЕ ЧАСТИЦ

При различных видах взаимодействий одни элементарные частицы могут превращаться в другие. Например, при слабом взаимодействии нейтрон превращается в протон, электрон в антинейтрино:



Мезоны распадаются по схемам



12. КВАРКИ И СТРУКТУРА АДРОНОВ

Образовавшиеся лептоны — *мюоны* — продолжают **каскад превращений**:

$$\begin{aligned}\mu^+ &\longrightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu, \\ \mu^- &\longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.\end{aligned}$$

Пучки элементарных частиц с большой энергией при встрече с ядрами или нуклонами мишени приводят к реакциям образования (рождения) тяжелых элементарных частиц:

$$\begin{aligned}p + N &\longrightarrow \Lambda + K^0, \\ p + n &\longrightarrow p + n + \Sigma^- + K^+, \\ p + p &\longrightarrow p + n + \Sigma^+ + K^0, \\ p + p &\longrightarrow p + n + \Sigma^0 + K^0.\end{aligned}$$

В указанных реакциях обозначены:

π^+ , π^- , π^0 — положительный, отрицательный и нейтральный π -мезоны; μ^+ , μ^- — положительный и отрицательный мюоны; ν_e , $\bar{\nu}_e$, ν_μ , $\bar{\nu}_\mu$ — электронное и мюонное нейтрино и их античастицы; e^- — электрон, e^+ — позитрон, p — протон, n — нейтрон, N — ядро, Σ^- , Σ^+ , Σ^0 — отрицательный, положительный и нейтральный сигма-гипероны, Λ — лямбда-гиперон, K^0 — ка-нуль-мезон, K^+ — ка-плюс-мезон, γ — фотон.

При встрече частицы с античастицей происходит **реакция аннигиляции**:

$$\begin{aligned}e^- + e^+ &\longrightarrow 2\gamma, \\ p + \bar{p} &\longrightarrow 2\pi^+ + 2\pi^- + \pi^0.\end{aligned}$$

При торможении γ -квантов большой энергии образуются пары электрон — позитрон:

$$\gamma \longrightarrow e^- + e^+.$$

12. КВАРКИ И СТРУКТУРА АДРОНОВ

Свойства адронов и их превращения можно объяснить, если допустить, что они состоят из более «элементарных» частиц, которые называются *кварками*.

К настоящему времени известны пять сортов («ароматов») кварков (u , d , s , c , b), каждый из которых существует в трех «цветовых» разновидностях («желтый», «синий», «красный»). Кварки имеют полуцелый спин. Свойства, которыми наделены кварки, необычны. Допускается возможность существования дробного электрического и барионного зарядов.

Некоторые характеристики кварков приводятся в таблице.

Кварк	Электрический заряд, в единицах e	Барионный заряд	Спин, \hbar
u	$2/3$	$1/3$	$1/2$
d	$-1/3$	$1/3$	$1/2$
s	$-1/3$	$1/3$	$1/2$
c	$2/3$	$1/3$	$1/2$
b	$-1/3$	$1/3$	$1/2$

Предполагаемая структура протона и нейтрона представлена в таблице.

Частица	Состав	Электрические заряды кварков, в единицах e	Ориентация спинов кварков
Протон	uud	$2/3, 2/3, -1/3$	$\uparrow \downarrow \uparrow$
Нейтрон	udd	$2/3, -1/3, -1/3$	$\uparrow \downarrow \downarrow$

ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Энергетические уровни атома водорода

Энергетические уровни рассчитываются по формуле (5.7). Используя схему уровней, легко рассчитать частоты спектральных линий в спектре атома водорода из соотношения (5.2).

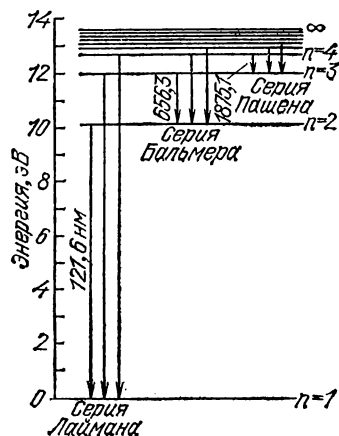


Рис. 5.5. Схема энергетических уровней и спектр излучения атома водорода

При переходе электронов на уровень $n=1$ излучается система линий, называемая *серией Лаймана* (рис. 5.5); линии этой серии находятся в ультрафиолетовой области.

При переходе на уровень $n=2$ излучаются линии *серии Бальмера* (четыре линии этой серии находятся в видимой части спектра, остальные — в ультрафиолете), при переходе на уровень $n=3$ — линии *серии Пашена* (инфракрасная область).

Числа у самых коротких стрелок каждой серии на рис. 5.5 указывают наибольшую длину волны (нм) в данной серии.

Таблица 140. Распределение электронов во внешних оболочках

Элемент	Внешние оболочки	Элемент	Внешние оболочки
Водород	$1s^1$	Ксенон	$5s^2 5p^6$
Гелий	$1s^2$	Цезий	$6s^1$
Литий	$2s^1$	Барий	$6s^2$
Бериллий	$2s^2$	Лантан	$5d^1 6s^2$
Вор	$2s^2 2p^1$	Церий	$4f^1 5d^1 6s^2$
Углерод	$2s^2 2p^2$	Празеодим	$4f^3 6s^2$
Азот	$2s^2 2p^3$	Неодим	$4f^4 6s^2$
Кислород	$2s^2 2p^4$	Прометий	$4f^5 6s^2$
Фтор	$2s^2 2p^5$	Самарий	$4f^6 6s^2$
Неон	$2s^2 2p^6$	Европий	$4f^7 6s^2$
Натрий	$3s^1$	Гадолиний	$4f^7 5d^1 6s^2$
Магний	$3s^2$	Тербий	$4f^9 6s^2$
Алюминий	$3s^2 3p^1$	Диспрозий	$4f^{10} 6s^2$
Кремний	$3s^2 3p^2$	Гольмий	$4f^{11} 6s^2$
Фосфор	$3s^2 3p^3$	Эрбий	$4f^{12} 6s^2$
Сера	$3s^2 3p^4$	Тулий	$4f^{13} 6s^2$
Хлор	$3s^2 3p^5$	Иттербий	$4f^{14} 6s^2$
Аргон	$3s^2 3p^6$	Лютеций	$4f^{14} 5d^1 6s^2$
Калий	$4s^1$	Гафний	$5d^2 6s^2$
Кальций	$4s^2$	Тантал	$5d^3 6s^2$
Скапдий	$3d^1 4s^2$	Вольфрам	$5d^4 6s^2$
Титан	$3d^2 4s^2$	Рений	$5d^5 6s^2$
Ванадий	$3d^3 4s^2$	Осмий	$5d^6 6s^2$
Хром	$3d^5 4s^1$	Иридий	$5d^7 6s^2$
Марганец	$3d^5 4s^2$	Платина	$5d^9 6s^1$
Железо	$3d^6 4s^2$	Золото	$5d^{10} 6s^1$
Кобальт	$3d^7 4s^2$	Ртуть	$5d^{10} 6s^2$
Никель	$3d^8 4s^2$	Таллий	$6s^2 6p^1$
Медь	$3d^{10} 4s^1$	Свинец	$6s^2 6p^2$
Цинк	$3d^{10} 4s^2$	Висмут	$6s^2 6p^3$
Галлий	$4s^2 4p^1$	Полоний	$6s^2 6p^4$
Германий	$4s^2 4p^2$	Астат	$6s^2 6p^5$
Мышьяк	$4s^2 4p^3$	Радон	$6s^2 6p^6$
Селен	$4s^2 4p^4$	Франций	$7s^1$
Бром	$4s^2 4p^5$	Радий	$7s^2$
Криптон	$4s^2 4p^6$	Актиний	$6d^1 7s^2$
Рубидий	$5s^1$	Торий	$6d^2 7s^2$
Стронций	$5s^2$	Протактиний	$5f^2 6d^1 7s^2$
Иттрий	$4d^1 5s^2$	Уран	$5f^3 6d^1 7s^2$
Цирконий	$4d^2 5s^2$	Нептуний	$5f^4 6d^1 7s^2$
Ниобий	$4d^4 5s^1$	Плутоний	$5f^7 7s^2$
Молибден	$4d^5 5s^1$	Америций	$5f^7 7s^2$
Технеций	$4d^5 5s^2$	Кюрий	$5f^7 6d^1 7s^2$
Рутений	$4d^7 5s^1$	Берклий	$5f^9 6d^1 7s^2$
Родий	$4d^8 5s^1$	Калифорний	$5f^{10} 7s^2$
Палладий	$4d^{10} 5s^0$	Эйнштейний	$5f^{11} 7s^2$
Серебро	$4d^{10} 5s^1$	Фермий	$5f^{12} 7s^2$
Кадмий	$4d^{10} 5s^2$	Менделевий	$6f^{13} 7s^2$
Индий	$5s^2 5p^1$	Нобелий	$5f^{14} 7s^2$
Олово	$5s^2 5p^2$	Лоуренсий	$5f^{14} 6d^1 7s^2$
Сурьма	$5s^2 5p^3$	Курчатовий	$6d^2 7s^2$
Теллур	$5s^2 5p^4$	Нильсборий	$6d^3 7s^2$
Иод	$5s^2 5p^5$		

Таблица 141. Основные линии K-серии рентгеновского характеристического спектра и K-край поглощения

Элемент	Длина волны, пм			
	α_2	α_1	β	K-край
Алюминий	989		956	795
Кремний	712,8	712,5	676,8	672,8
Хром	229,4	229,0	208,5	207,0
Марганец	210,6	210,2	191,0	189,6
Железо	194,0	193,6	175,7	174,3
Кобальт	179,3	178,9	162,1	160,8
Никель	166,2	165,8	150,0	148,8
Медь	154,4	154,1	139,2	138,0
Цинк	143,9	143,6	129,5	128,3
Германий	125,8	125,4	112,9	111,6
Селен	110,9	110,5	99,2	98,0
Вольфрам	21,4	20,9	18,4	17,9
Золото	18,5	18,0	15,9	15,3
Свинец	17,0	16,5	14,6	14,1
Уран	13,1	12,6	11,1	10,7

Таблица 142. Основные характеристики легких ядер

Элемент	Число протонов	Число нейтронов	Относит. атомная масса	Содержание, %	Период полураспада	Активность
H	1	0	1,0077	99,98	стабилен	
D	1	1	2,0139	0,02	»	
T	1	2	3,0159	10^{-12}	12,26 лет	β^-
He	2	1	3,01588	$1,3 \cdot 10^{-4}$	стабилен	α, n β^-
		2	4,0024	100	»	
		3	5,0118	—	$6 \cdot 10^{-20}$ с	
		4	6,0183	—	0,8 с	
C	6	4	10,0169	—	19,5 с	β^+, γ
		5	11,0109	—	20,3 мин	
		6	12,0000	98,9	стабилен	β^-
		7	13,0027	1,1	»	
		8	14,0026	—	5730 лет	
O	8	7	15,0023	—	2,1 мин	β^+
		8	15,9942	99,76	стабилен	
		9	16,9983	0,04	»	β^-, γ
		10	17,9984	0,20	»	
		11	19,0026	—	29,1 с	
		12	—	—	—	
Al	13	13	25,9868	—	6,4 с	β^+
		14	26,9803	100	стабилен	
		15	27,9807	—	2,3 мин	β^-, γ
		16	28,9792	—	6,6 мин	
		17	—	—	—	

Примечание. β^- —излучение электронов, β^+ —излучение позитронов, γ —гамма-излучение, α —ядро гелия, n —нейтрон. Указано содержание изотопа (в процентах) в земной коре относительно общего количества изотопов данного элемента.

Таблица 143. Бета- и гамма-радиоактивные ядра

Элемент	Массовое число	Период полураспада	Энергия излучения, МэВ	
			β -частицы	β -излучение
Углерод	14	5568 лет	0,155	—
Натрий	24	15,0 ч	1,39	1,38; 2,76
Фосфор	32	14,3 сут	1,71	—
Сера	35	87,1 сут	0,167	—
Хлор	36	$3,1 \cdot 10^6$ лет	0,714	—
Кальций	45	152 сут	0,254	—
Титан	51	5,8 мин	2,13	0,32; 0,61; 0,93
Хром	51	28 сут	—	0,32; 0,57
Железо	55	2,9 г	—	0,21
Железо	59	45 сут	0,46; 0,27	1,1; 1,29
Кобальт	60	5,3 г	0,3	1,17; 1,33
Селен	75	127 сут	—	0,2—0,4
Стронций	89	51 сут	1,46	—
Цирконий	95	65 сут	0,36; 0,40; 0,88	0,23; 0,72; 0,75
Технеций	99	$2,12 \cdot 10^5$ лет	0,3	—
Серебро	110	270 сут	0,087; 0,53; 2,12; 2,86	0,1—2,5
Серебро	111	7,5 сут	0,7; 0,8; 1,0	0,25; 0,34
Кадмий	109	43 сут	0,7; 1,61	0,5—1,3
Кадмий	115	470 сут	—	0,087
Иод	131	8,14 сут	0,25; 0,34; 0,61; 0,82	0,08—0,73
Цезий	137	27 лет	0,51; 1,17	0,66
Прометий	147	2,6 г	0,22	0,121
Европий	155	1,7 г	0,15; 0,24	0,06—0,132
Тулий	170	129 сут	0,88; 0,97	0,08
Тантал	182	111 сут	0,53	0,06—1,6
Вольфрам	185	73,2 сут	0,37; 0,43	0,056; 0,57; 0,77
Иридий	192	74,4 сут	0,10; 0,26; 0,54; 0,67	0,2—0,9
Золото	198	2,7 сут	0,29; 0,96; 1,37	0,41—1,09
Золото	199	3,15 сут	0,29; 0,44; 0,47	0,05; 0,16; 0,21
Ртуть	205	5,6 мин	1,8	0,23

Таблица 144. Искусственно полученные элементы

Атомный номер	Название	Символ	Массовые числа изотопов	Период полураспада
61	Прометий	Pm	141—154; <u>145</u>	~18 лет
85	Астат	At	<u>210</u> —219	8,3 ч
87	Франций	Fr	203—220; <u>223</u>	21,8 мин
93	Нептуний	Np	227—241; <u>237</u>	$2,14 \cdot 10^6$ лет
94	Плутоний	Pu	232—246; <u>244</u>	$7,5 \cdot 10^7$ лет
95	Америций	Am	237—247; <u>243</u>	7370 лет

Таблица 144 (продолжение)

Атомный номер	Название	Символ	Массовые числа изотопов	Период полураспада
96	Кюрий	Cm	238—251; <u>247</u>	$1,64 \cdot 10^7$ лет
97	Берклий	Bk	242—251; <u>247</u>	1360 лет
98	Калифорний	Cf	242—256; <u>251</u>	900 лет
99	Эйнштейний	Es	245—256; <u>254</u>	276 сут
100	Фермий	Fm	244—258; <u>257</u>	97 сут
101	Менделевий	Md	252; 254— <u>258</u>	56 сут
102	Нобелий	No	251— <u>259</u>	1,5 ч
103	Лоуренсий	Lw	255— <u>260</u>	3 мин
104	Курчатовий	Ku	254— <u>261</u>	70 с
105	Нильсборий	Ns	257; 260— <u>262</u>	40 с

Примечание. 1. Подчеркнуты массовые числа изотопов с наибольшим периодом полураспада; в таблице указаны значения наибольших периодов полураспада.

2. Предполагается существование элементов с атомными номерами от 105 до 118.

Таблица 145. Массовые коэффициенты поглощения рентгеновского излучения ($\text{см}^2/\text{г}$)

Длина волны, нм	Элементы							
	C	N	O	Al	Fe	Cu	Ag	Pb
0,02	0,167	0,177	0,183	0,27	1,06	1,45	5,4	4,6
0,04	0,243	0,34	0,336	1,05	7,1	10	37	33
0,06	0,40	0,73	0,730	3,3	23,5	32	17	77
0,08	0,80	1,51	1,53	7,3	50,7	71	39	147
0,10	1,40	2,6	—	14,0	95	134	71	77
0,12	2,5	—	—	24	170	218	120	123
0,14	3,9	—	—	36	270	42	174	110
0,16	5,8	—	—	55	390	60	250	258
0,18	7,9	—	—	79	61	85	354	300
0,20	10,0	—	—	106	78	119	436	—

Таблица 146. Атомные и ионные радиусы
(в пикометрах — пм)

Элемент	Радиус, пм					
	положительный ион		нейтральный атом		отрицательный ион	
	заряд, e	радиус	Радиус		заряд, e	радиус
эфф.			орбит.			
Li	1	70	155	159		
Be	2	34	113	101		
B	3	20	91	78		
C	4	20	77	62	4	260
N	5	15	71	52	3	148
O	6	9		45	2	136
F	7	19		40	1	129
Ne			160	35		
Na	1	98	189	171		
Mg	2	74	160	128		
Al	3	57	143	131		
Si	4	39	134	107	4	271
P	5	35	130	92	3	186
S	6	29		81	2	182
Cl	7	26		72	1	181
Ar			192	66		
K	1	133	236	216		
Ca	2	104	197	169		
Sc	3	83	164	157		
Ti	4	64	146	148		
V	5	40	134	140		
Cr	6	35	127	145		
Mn	7	46	130	128		
Fe	3	67	126	123		
Co	3	64	125	118		
Ni	3	35	124	114		
Cu	2	80	128	119		
Zn	2	83	139	106		
Ga	3	62	139	125		
Ge	4	44	139	109		
As	5	47	148	100	3	191
Se	6	35	160	92	2	193
Br	7	39		85	1	196
Kr			198	79		
Rb	1	149	248	229		
Sr	2	120	215	184		
Cs	1	165	268	252		
Ba	2	138	221	206		
Fr			280	245		
Ra	2	144	235	204		

Примечание. Пустые места в таблице означают отсутствие соответствующего иона.

Таблица 147. Элементарные частицы

Частица	Символ	Заряд, e	Масса покоя, МэВ	Спин, \hbar	Баронное число	Странность	Среднее время жизни, с	Типичные продукты распада
<i>Гипероны</i>								
кси-минус-гиперон	Ξ^-	-1	1319	1/2	+1	-2	$2 \cdot 10^{-10}$	$\pi^- + \Lambda$
кси-нуль-гиперон	Ξ^0	0	1311	1/2	+1	-2	$2 \cdot 10^{-10}$	$\pi^0 + \Lambda$
сигма-минус-гиперон	Σ^-	-1	1196	1/2	+1	-1	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$\pi^- + n$
сигма-нуль-гиперон	Σ^0	0	1192	1/2	+1	-1	10^{-20}	$\nu + \Lambda$
сигма-плюс-гиперон	Σ^+	+1	1190	1/2	+1	-1	$0,8 \cdot 10^{-10}$	$\left\{ \begin{array}{l} \pi^+ + n \\ \pi^0 + p \end{array} \right.$
лямбда-гиперон	Λ	0	1115	1/2	+1	-1	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$\pi^- + p$
<i>Нуклоны</i>								
нейтрон	n	0	940	1/2	+1	0	$1,0 \cdot 10^8$	$e^- + \nu + p$
протон	p	+1	938	1/2	+1	0	стабилен	
<i>Мезоны</i>								
ка-нуль-мезон	K^0	0	498	0	0	+1	$1 \cdot 10^{-10}$ или $6 \cdot 10^{-8}$	$\left\{ \begin{array}{l} \pi^+ + \pi^- \\ \pi^0 + \pi^0 \\ \pi^+ + \mu^- + \bar{\nu} \end{array} \right.$
ка-плюс-мезон	K^+	+1	494	0	0	+1	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$\left\{ \begin{array}{l} \mu^+ + \nu \\ \pi^+ + \pi^0 \end{array} \right.$
пи-плюс-мезон	π^+	+1	140	0	0	0	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu$
пи-нуль-мезон	π^0	0	135	0	0	0	$8 \cdot 10^{-17}$	$\gamma + \gamma$
<i>Фотон</i>								
Фотон		0	0	1	0	0	стабилен	
<i>Лептоны</i>								
мю-минус-мезон	μ^-	-1	106	1/2	0	-	$2,26 \cdot 10^{-6}$	$e^- + \nu + \bar{\nu}$
электрон	e^-	-1	0,511	1/2	0	-	стабилен	
нейтрино	ν	0	0	1/2	0	-		

Таблица 148. Источники излучения и детекторы для обнаружения элементарных частиц

Частицы	Источники излучения	Что было измерено или наблюдалось	Приборы для наблюдения
$\bar{\nu}$	Ядерный реактор	$p + \bar{\nu} \rightarrow n + e^+$, аннигиляции e^+ , захват n	Счетчики
e^-	Катодно-лучевая трубка	Отношение заряда к массе	Флуоресцентный экран
e^+	Космические лучи	Отношение варяда к массе	Камера Вильсона
μ^+	Космические лучи	Поглощение излучения при прохождении через свинец не наблюдалось; распадается в состоянии покоя	Камера Вильсона
μ^-			
π^+	Космические лучи	Распад в состоянии покоя	Эмульсия
π^-	Космические лучи	Ядерное взаимодействие в состоянии покоя	Эмульсия
π^0	Ускоритель	Распад с образованием нейтрино	Счетчики
K^+	Космические лучи	Распад	Эмульсия
K^-	Космические лучи	Ядерное взаимодействие в состоянии покоя	Эмульсия
K^0	Космические лучи	Распад на $\pi^+ + \pi^-$	Камера Вильсона
p	Полоний-бериллиевый источник	Реакция ${}^{10}_5\text{B} + p \rightarrow {}^7_3\text{Li} + \alpha$	Ионизационная камера
\bar{p}	Ускоритель	Отношение варяда к массе и аннигиляции	Счетчики
\bar{n}	Ускоритель	Аннигиляция	Счетчики
Λ^0	Космические лучи	Распад на $p + \pi^-$	Камера Вильсона
$\bar{\Lambda}^0$	Ускоритель	Распад на $p + \pi^+$	Эмульсия
Σ^+	Космические лучи	Распад в состоянии покоя	Эмульсия
Σ^-	Ускоритель	Распад на $\pi^- + p$	Диффузионная камера
Σ^0	Ускоритель	Распад на $\Lambda^0 + \gamma$	Пузырьковая камера
Ξ^-	Космические лучи	Распад на $\pi^- + \Lambda^0$	Камера Вильсона
Ξ^0	Ускоритель	Распад на $\pi^0 + \Lambda^0$	Пузырьковая камера
$\bar{\nu}$	Ускоритель	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_e$ $\nu + p \rightarrow p + \mu^-$	Искровая камера

Таблица 149. Ионизационные потери α -частицы в газах

Газ	H_2	He	O_2	N_2	Ne	Ar	Kr
Потери, эВ	35,0	30,2	32,3	36,2	27,1	24,3	22,3
Газ	Xe	CO	CO_2	Воздух	CH_4	C_2H_6	
Потери, эВ	21,3	33,9	33,8	34,7	29,3	26,9	

Таблица 150. Массовые коэффициенты ослабления электронов в алюминии

Энергия, эВ	μ/ρ , см ² /г	Энергия, эВ	μ/ρ , см ² /г
$9 \cdot 10^2$	$2,5 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^5$	130
$5,8 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^5$	29
$1,05 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^4$	$4,6 \cdot 10^5$	9,0
$4,66 \cdot 10^4$	740	$6,6 \cdot 10^5$	6,0

Таблица 151. Средний массовый пробег протонов высокой энергии (г/см²)

Энергия, МэВ	Бериллий	Углерод	Воздух	Алюминий	Медь	Свинец
50	2,722	2,488	2,557	2,928	3,599	5,275
75	5,655	5,160	5,293	6,021	7,321	10,52
100	9,461	8,623	8,835	10,01	12,01	17,17
500	144,4	131,3	133,3	148,9	174,9	237,6
1000	404,0	365,3	370,0	412,0	479,4	642,2
5000	2879	2584	2543	2587	3248	4185
10 000	5889	5270	5081	5777	6512	8234

Таблица 152. Моменты импульсов и магнитные моменты нуклонов и ядер некоторых элементов

Z	Ядро	Массовое число	I, \hbar	Магнитный момент, μ_N
0	n	1	1/2	-1,9125
1	p	1	1/2	2,7928
1	D	2	1	0,8565
2	He	3	1/2	-2,131
		4	0	0
3	Li	6	1	0,821
		7	3/2	3,2532
4	Be	9	3/2	-1,176
5	B	11	3/2	2,686
6	C	12	0	0
		13	1/2	0,701
7	N	14	1	0,403
		15	1/2	-0,280
8	O	16	0	0
17	Cl	35	5/2	1,368
29	Cu	63	3/2	2,2265
		65	3/2	2,3847
48	Cd	111, 113	1/2	-0,65
		110, 112	0	0
		114, 116		
80	Hg	199	1/2	0,5
		201	3/2	-0,6
		198, 200		0
		200, 204	0	
82	Pb	207	1/2	0,6
		204, 206, 208	0	0

Примечание. Знак минус в последнем столбце указывает на то, что направления магнитного и механического моментов противоположны.

Таблица 153. Дозовые пределы облучения

«Нормами радиационной безопасности НРБ-76» устанавливаются следующие категории облучаемых лиц: категория А — персонал; категория Б — ограниченная часть населения; категория В — население области, края, республики, страны.

В порядке убывания чувствительности к облучению устанавливается три группы критических органов:

I группа — все тело, гонады, красный костный мозг;

II группа — мышцы, щитовидная железа, жировая ткань, печень, почки, селезенка, желудочно-кишечный тракт, легкие, хрусталик глаза;

III группа — кожный покров, костная ткань, кисти, предплечья, лодыжки, стопа.

Дозовые пределы внешнего и внутреннего облучения, зиверт за год	Группы критических органов		
	I	II	III
Предельно допустимая доза для категории А, ПДД	0,05	0,15	0,3
Предел дозы для категории В, ПД	0,005	0,015	0,03

Примечание. 1. Для категории А (за исключением женщин до 40 лет) распределение дозы излучения в течение года не регламентируется.

2. В любом случае доза, накопленная к 30 годам, не должна превышать 12 ПДД.

3. Для женщин до 40 лет доза облучения на область таза не должна превышать 0,01 зиверт за любые 2 месяца.

4. Регламентация облучения категории В устанавливается Министерством здравоохранения СССР.

Таблица 154. Термоядерные реакции во Вселенной

Реакция	Энергия, МэВ	Среднее время реакции
<i>Водородный цикл</i>		
$p + p \rightarrow d + \beta^+ + \nu$	0,33 (0,51)	$1,4 \cdot 10^{10}$ лет
$\beta^+ + \beta^- \rightarrow 2\gamma$	2,04	—
$p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	10,98	5,7 с
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$	12,85	10^8 лет
<i>Углеродный цикл</i>		
$p + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma$	1,95	$1,3 \cdot 10^7$ лет
${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + \beta^+ + \nu$	1,5 (0,7)	7, мин
$p + {}^{13}\text{C} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma$	7,54	$2,7 \cdot 10^8$ лет
$p + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$	7,35	$3,3 \cdot 10^8$ лет
${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + \beta^+ + \nu$	1,73 (0,98)	82 с
$p + {}^{15}\text{N} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^3\text{He}$	4,96	$1,1 \cdot 10^8$ лет

Примечание. В скобках указана энергия нейтрино. Времена реакций рассчитаны для условий в центре Солнца ($T \approx 1,3 \cdot 10^7$ К, плотность водорода 100 г/см³).

Таблица 155. Реакции синтеза и энерговыделение

	Реакция	Энергия, МэВ	σ_m , барн	Энергия частиц, МэВ
1	$p+p \rightarrow d+\beta^++\nu$	2,2	10^{-23}	—
2	$p+d \rightarrow {}^3\text{He}+\gamma$	5,5	10^{-4}	—
3	$p+t \rightarrow {}^4\text{He}+\gamma$	19,7	10^{-4}	—
4	$d+d \rightarrow t+p$	4,0	0,16	2
5	$d+d \rightarrow {}^3\text{He}+n$	3,3	0,09	1
6	$d+d \rightarrow {}^4\text{He}+\gamma$	24,0	—	—
7	$d+t \rightarrow {}^4\text{He}+n$	17,6	5,0	0,13
8	$t+d \rightarrow {}^4\text{He}+n$	17,6	5,0	0,195
9	$t+t \rightarrow {}^4\text{He}+2n$	11,3	0,10	1,0
10	$d+{}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He}+p$	18,4	0,71	0,47
11	${}^3\text{He}+{}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He}+2p$	12,8	—	—
12	$n+{}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He}+t$	4,8	2,6	0,28
13	$p+{}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He}+{}^3\text{He}$	4,0	10^{-4}	0,3
14	$p+{}^7\text{Li} \rightarrow 2{}^4\text{He}+\gamma$	17,3	$6 \cdot 10^{-3}$	0,44
15	$d+{}^6\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Li}+p$	5,0	0,01	1,0
16	$d+{}^6\text{Li} \rightarrow 2{}^4\text{He}$	22,4	0,026	0,6
17	$d+{}^7\text{Li} \rightarrow 2{}^4\text{He}+n$	15,0	10^{-3}	0,2
18	$p+{}^9\text{Be} \rightarrow 2{}^4\text{He}+d$	0,56	0,46	0,33
19	$p+{}^9\text{Be} \rightarrow {}^6\text{Li}+{}^4\text{He}$	2,1	0,35	0,33
20	$p+{}^{11}\text{B} \rightarrow 3{}^4\text{He}$	8,7	0,6	0,675
21	$p+{}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{12}\text{C}+{}^4\text{He}$	5,0	0,69	1,2

Примечание. d—дейтрон (ядро дейтерия D), t—тритон (ядро трития T), σ_m —максимальное значение эффективного сечения. В последней графе указаны энергии бомбардирующих частиц, соответствующие максимальным значениям σ_m .

Таблица 156. Эффективные сечения нейтронов

В первом столбце указан элемент, во втором—полное сечение σ поглощения и рассеяния быстрых нейтронов (3—10 МэВ); в третьем, четвертом и пятом столбцах указаны сечения для тепловых нейтронов (0,025 эВ): σ_p —сечение рассеяния, σ_n —сечение поглощения, σ_a —сечение образования искусственного элемента (сечение активации) для различных изотопов; эффективные сечения указаны в барнах; 1 барн = 10^{-28} м².

Элемент	Быстрые нейтроны	Тепловые нейтроны		
		σ_p	σ_n	σ_a
H	0,9	38	0,33	—
He	1,4	0,8	—	—
Al	1,7	1,4	0,23	0,23
Fe	3,0	11,4	2,53	0,003
Ni	3,2	17,5	4,6	0,03
Cu	3,2	7,8	3,7	0,64; 2,9
Ge	3,4	9	2,4	0,002; 0,02; 0,2; 0,6
Cd	4,3	7	2600	0,1; 0,3; 0,04
Hg	4,8	21	380	0,025; 1,0
Pb	4,7	11,4	0,17	0,0003
Th—232	7,2	12,6	7,4	7,4
U	5,2	8,3	7,68	2,73; 0,76
U-235	1,3	—	687	107; 580 (деление)
Pu-239	2,0	—	1065	315; 750 (деление)

Примечание. В последнем столбце для некоторых элементов указываются значения σ_a для различных изотопов; для урана-235 и плутония-239 указаны эффективные сечения реакции деления.

Таблица 157. Длина среднего пробега α -частиц

Энергия, МэВ		4	5	6	7	8	9	10
Длина пробега	в воздухе (при 20 °С и норм. давлении), см	2,5	3,5	4,6	5,9	7,4	8,9	10,6
	в алюминии, мкм	16	23	30	38	48	58	69
	в биологической ткани, мкм	31	43	56	72	91	110	130

Компоненты линейного коэффициента ослабления γ -излучения в алюминии и свинце

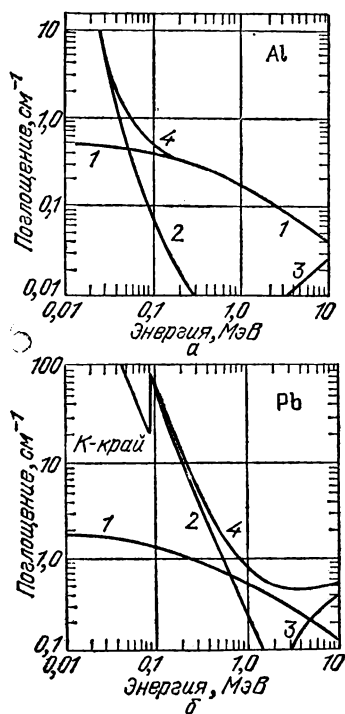
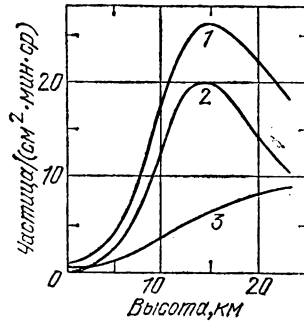


Рис. 5.6. Поглощение γ -излучения в алюминии (а) и свинце (б); кривая 1 — рассеяние (σ), 2 — фотоэффект (τ), 3 — образование пар электрон — позитрон (μ), 4 — полное поглощение (μ); шкалы логарифмические

Ионизирующее космическое излучение

Рис. 5.7. Ионизирующее космическое излучение на 51° северной широты: кривая 1 — общая интенсивность, 2 — мягкая (электрон-протонная) компонента, 3 — жесткая компонента



Удельная энергия связи нуклонов в ядре.

По оси абсцисс (рис. 5.8) отложены массовые числа, по оси ординат — удельная энергия связи (МэВ). Значения энергии связи легких ядер указаны особо; сплошная кривая представляет собой усредненные значения по изобарам; подъемы и впадины на кривой наблюдаются в эксперименте.

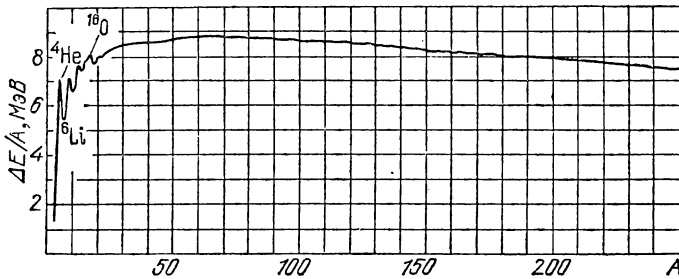


Рис. 5.8. Кривая удельной энергии связи

Получение ядерной энергии возможно или путем деления тяжелых ядер, или путем синтеза легких ядер; в обоих случаях получаются новые ядра с большей энергией связи, чем энергия связи ядер до превращения.

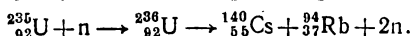
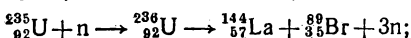
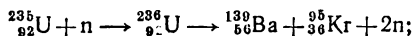
Деление ядер.

Ядро урана-235 делится тепловыми нейтронами (0,025 эВ) на два неравных по массе осколка; кроме того, образуются 2—3 нейтрона. Наиболее вероятными значениями массовых чисел ядер-осколков являются 92—94 и 138—140; деление на равные части происходит очень редко (всего около 1% общего числа делений). Осколки в большинстве случаев радиоактивны (β^- -распад). Деление ядра может осуществляться многими путями; например, при делении урана-235 тепловыми нейтронами обнаружено более 80 различных ядер-осколков.

Таблица 158.

ПЕРИОДЫ	ГРУППЫ	ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ				
		I	II	III	IV	V
1	I	(H)				
2	II	3Li ЛИТИЙ 6,941	4Be ВЕРИЛЛИЙ 9,01218	БОР 5B 10,81	УГЛЕРОД 6C 12,011	АЗОТ 7N 14,0067
3	III	11Na НАТРИЙ 22,98977	12Mg МАГНИЙ 24,305	АЛЮМИНИЙ 13Al 26,98154	КРЕМНИЙ 14Si 28,0855	ФОСФОР 15P 30,97376
4	IV	19K КАЛИЙ 39,0983	20Ca КАЛЬЦИЙ 40,08	21Sc СКАНДИЙ 44,9559	22Ti ТИТАН 47,90	23V ВАНАДИЙ 50,9415
	V	МЕДЬ 29Cu 63,546	ЦИНК 30Zn 65,38	ГАЛЛИЙ 31Ga 69,72	ГЕРМАНИЙ 32Ge 72,59	МЫШЬЯК 33As 74,9216
5	VI	37Rb РУБИДИЙ 85,468	38Sr СТРОНЦИЙ 87,62	39Y ИТТРИЙ 88,9059	40Zr ЦИРКОНИЙ 91,22	41Nb НИОБИЙ 92,9064
	VII	СЕРЕБРО 47Ag 107,868	КАДМИЙ 48Cd 112,41	ИНДИЙ 49In 114,82	ОЛОВО 50Sn 118,69	СУРЬМА 51Sb 121,75
6	VIII	55Cs ЦЕЗИЙ 132,9054	56Ba БАРИЙ 137,33	57La* ЛАНТАН 138,9055	72Hf ГАФНИЙ 178,49	73Ta ТАНАЛ 180,9479
	IX	ЗОЛОТО 79Au 196,9665	РТУТЬ 80Hg 200,59	ТАЛЛИЙ 81Tl 204,37	СВИНЕЦ 82Pb 207,2	ВИСМУТ 83Bi 208,9804
7	X	87Fr ФРАНЦИЙ [223]	88Ra РАДИЙ 226,0254	89Ac** АКТИНИЙ [227]	104Ku [261] КУРАТОВИЙ	105 (Ns) [НИЛЬСБОРИЙ]
* ЛАНТА						
58Ce ЦЕРИЙ 140,12	59Pr ПРАЗЕОДИМ 140,9077	60Nd НЕОДИМ 144,24	61Pm ПРОМЕТИЙ [145]	62Sm САМАРИЙ 150,4	63Eu ЕВРОПИЙ 151,96	64Gd ГАДОЛИНИЙ 157,25
** АКТИ						
90Th ТОРИЙ 232,0381	91Pa ПРОТАКТИНИЙ 231,0359	92U УРАН 238,029	93Np НЕПУНИЙ 237,0482	94Pu ПУТОНИЙ [244]	95Am АМЕРИЦИЙ [243]	96Cm КЮРИЙ [247]

Некоторые реакции деления урана-235:



Примерное распределение энергии при делении одного ядра урана-235 (МэВ):

Кинетическая энергия осколков	168
Энергия жесткого γ -излучения	6
Кинетическая энергия нейтронов	5

ДИ.МЕНДЕЛЕЕВА

VI		VII	VIII			
ВОДОРОД 1 H 1,0079	ГЕЛИЙ 2 He 4,00260					
КИСЛОРОД 8 O 15,9994	ФТОР 9 F 18,998403	НЕОН 10 Ne 20,179				
СЕРА 16 S 32,06	ХЛОР 17 Cl 35,453	АРГОН 18 Ar 39,948				
24 Cr ХРОМ 51,996	25 Mn МАРГАНЕЦ 54,9380	26 Fe ЖЕЛЕЗО 55,847	27 Co КОБАЛЬТ 58,9332	28 Ni НИКЕЛЬ 58,70		
СЕЛЕН 34 Se 78,96	БРОМ 35 Br 79,904	КРИПТОН 36 Kr 83,80				
42 Mo МОЛИБДЕН 95,94	43 Tc ТЕХНЕЦИЙ 98,9062	44 Ru РУТЕНИЙ 101,07	45 Rh РОДИЙ 102,9055	46 Pd ПАЛЛАДИЙ 106,4		
ТЕЛЛУР 52 Te 127,60	ИОД 53 I 126,9045	КСЕНОН 54 Xe 131,30				
74 W ВОЛЬФРАМ 183,85	75 Re РЕНИЙ 186,207	76 Os ОСМИЙ 190,22	77 Ir ИРИДИЙ 192,2	78 Pt ПЛАТИНА 195,09		
ПОЛОНИЙ 84 Po [209]	АСТАТ 85 At [210]	РАДОН 86 Rn [222]				
106 (Ew) ЭКАВОЛЬФРАМ	107 (Ere) ЭКАРЕНИЙ	АТОМНЫЙ НОМЕР		81 Tl ТАЛЛИЙ 204,37		
		АТОМНАЯ МАССА [ОТНОСИТ.]				
НОИДЫ						
65 Tb ТЕРБИЙ 158,9254	66 Dy ДИСПРОЗИЙ 162,50	67 Ho ГОЛЬМИЙ 164,9304	68 Er ЭРБИЙ 167,26	69 Tm ТУЛИЙ 168,9342	70 Yb ИТТЕРБИЙ 173,04	71 Lu ЛЮТЕЦИЙ 174,967
НОИДЫ						
97 Bk [247] БЕРКЛИЙ	98 Cf [251] КАЛИФОРНИЙ	99 Es [254] ЭЙНШТЕЙНИЙ	100 Fm [257] ФЕРМИЙ	101 Md [258] МЕНДЕЛЕВИЙ	102 (No) [259] (НОБЕЛИЙ)	103 (Lr) [258] (ЛОУРЕНСИЙ)

Энергия нейтрино	10
Кинетическая энергия β ⁻ -частиц	5
Энергия γ-излучения, испускаемого осколками деления	7

При делении 1г урана-235 освобождается энергии около 7,2 ГДж.

Деление ядер используется в ядерных реакторах; в качестве ядерного горючего применяются изотопы: уран-235, уран-233, плутоний-239.

ПРИЛОЖЕНИЯ

I. Некоторые часто встречающиеся числа

$$\begin{array}{lll} \pi = 3,141593 & \sqrt{\pi} = 1,77245 & 1^\circ = 0,017453 \text{ рад} \\ 4\pi = 12,56637 & e = 2,718282 & 1' = 0,000291 \text{ рад} \\ \frac{2}{\pi} = 0,63662 & \sqrt{2} = 1,41421 & 1'' = 0,000048 \text{ рад} \\ \pi^2 = 9,86960 & \sqrt{3} = 1,73205 & \end{array}$$

II. Формулы для приближенных вычислений

$$\begin{array}{ll} 1/(1+\alpha) = 1-\alpha & -0,031 < \alpha < 0,031 \\ \sqrt{1+\alpha} = 1+\alpha/2 & -0,085 < \alpha < 0,093 \\ 1/\sqrt{1+\alpha} = 1-\alpha/2 & -0,052 < \alpha < 0,052 \\ \sin \alpha = \alpha & -0,077 < \alpha < 0,077 \\ e^\alpha = 1+\alpha & -0,045 < \alpha < 0,045 \end{array}$$

Неравенства показывают те пределы величины α , при которых расчет по приближенным формулам приводит к погрешностям, не превышающим 0,1%.

III. Элементы теории погрешностей

Измерить физическую величину — это значит сравнить ее с другой величиной, которая принимается за единицу; иногда сравнение производится с однородной величиной, которая не является единицей.

Результат измерения представляется в следующем виде:

$$A = \{A\} [A],$$

где $\{A\}$ — безразмерное число, которое называется *числовым значением величины A*, $[A]$ — *единица величины A*.

Если значение величины определяется прибором непосредственно (например, измерение длины линейкой, определение времени секундомером, силы тока — амперметром), то такие измерения называются *прямыми*.

Если значение измеряемой величины определяется посредством прямых измерений других величин, которые связаны с измеряемой величиной определенной зависимостью, то такие измерения называются *косвенными*. Примером косвенных измерений может служить

определение сопротивления участка цепи путем измерения силы тока и напряжения, определение плотности по прямым измерениям массы и объема.

Результат отдельного измерения отличается от *истинного значения*. Разность между отдельным результатом измерения величины и ее истинным значением называется *погрешностью измерения*.

Различают три вида погрешностей — *грубые ошибки (промахи)*, *систематические* и *случайные погрешности*.

Грубые ошибки обусловлены либо ошибками экспериментатора при неправильных отсчетах, либо неисправностями приборов. Результаты измерения с грубыми ошибками отбрасываются, и производятся новые измерения.

Систематические погрешности — это такие погрешности, которые при повторных измерениях остаются постоянными или изменяются по определенному закону; они могут быть обусловлены недостатками методики измерения или неточностью расчетных формул (*методические погрешности*), а также несовершенством измерительных приборов (*приборные погрешности*).

Случайные погрешности — это такие погрешности, которые при многократных измерениях изменяются как по абсолютной величине, так и по знаку.

Расчет погрешностей при прямых измерениях. Измеряются n значений A_1, A_2, \dots, A_n величины A ; затем расчет проводится по схеме:

- а) определяется *среднее значение* измеряемой величины

$$A_{\text{ср}} = (A_1 + A_2 + \dots + A_n) / n;$$

- б) определяются *абсолютные погрешности* каждого измерения

$$\Delta A_1 = |A_{\text{ср}} - A_1|, \quad \Delta A_2 = |A_{\text{ср}} - A_2|, \quad \dots, \quad \Delta A_n = |A_{\text{ср}} - A_n|;$$

- в) рассчитывается *средняя абсолютная погрешность*

$$\Delta A_{\text{ср}} = (\Delta A_1 + \Delta A_2 + \dots + \Delta A_n) / n;$$

- г) результат измерения записывается в следующей форме:

$$A = A_{\text{ср}} \pm \Delta A,$$

где ΔA — полная абсолютная погрешность, определяемая из соотношения $\Delta A = \sqrt{(\Delta A_{\text{ср}})^2 + (\Delta A_{\text{пр}})^2}$ ($\Delta A_{\text{пр}}$ — приборная погрешность). Отношение $\Delta A / A_{\text{ср}}$ называется *относительной погрешностью*.

Расчет погрешности при косвенных измерениях. Измеряются непосредственно величины B_1, B_2, \dots, B_n , от которых зависит величина A . Далее расчет проводится по следующей схеме:

а) рассчитываются средние значения $\langle B_1 \rangle, \langle B_2 \rangle, \dots, \langle B_n \rangle$ (по схеме расчета средних значений при прямых измерениях, см. выше);

б) средние значения $\langle B_1 \rangle, \langle B_2 \rangle, \dots, \langle B_n \rangle$ подставляются в соответствующую расчетную формулу; определяется среднее значение величины $\langle A \rangle$;

в) в зависимости от вида формулы (см. таблицу), определяется абсолютная (или относительная) погрешность ΔA величины A ;

г) результат записывается в следующей форме:

$$A = \langle A \rangle \pm \Delta A.$$

При записи числового значения результата необходимо руководствоваться следующими правилами:

а) значение абсолютной погрешности определяется до двух значащих цифр, если первая значащая цифра является единицей; во всех других случаях удерживается одна значащая цифра;

б) при записи среднего значения указываются все цифры до последнего десятичного разряда, который используется при записи абсолютной погрешности.

Формула	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
$A+B$	$\Delta A + \Delta B$	$(\Delta A + \Delta B) / A+B $
$A-B$	$\Delta A + \Delta B$	$(\Delta A + \Delta B) / A-B $
$A \cdot B$	$A\Delta B + B\Delta A$	$\Delta A / A + \Delta B / B $
A/B	$(A\Delta B + B\Delta A) / B^2$	$\Delta A / A + \Delta B / B $
A^n	$nA^{n-1}\Delta A$	$n\Delta A / A $
$\sqrt[n]{A}$	$A(1-n)/n\Delta A/n$	$\Delta A / (n A)$
$\sin A$	$ \cos A \Delta A$	$ \operatorname{ctg} A \Delta A$
$\cos A$	$ \sin A \Delta A$	$ \operatorname{tg} A \Delta A$

Пример. Для определения плотности твердого тела необходимо измерить объем тела и его массу. Пусть измерение объема тела проводилось с относительной погрешностью 1,5%, а массы тела — с относительной погрешностью 1%. Тогда относительная погрешность измерения плотности тела составит 2,5%. Таким образом, можно положить, что точное значение плотности ρ находится в пределах

$$\langle \rho \rangle (1 - 0,025) < \rho < \langle \rho \rangle (1 + 0,025).$$

IV. Множители для образования десятичных кратных и дольных единиц

Наименование	Множитель	Обозначение		Наименование	Множитель	Обозначение	
		русское	между-народное			русское	между-народное
экса	10^{18}	Э	E	деци	10^{-1}	д	d
пета	10^{15}	П	P	санти	10^{-2}	с	s
тера	10^{12}	Т	T	милли	10^{-3}	м	m
гига	10^9	Г	G	микро	10^{-6}	мк	μ
мега	10^6	М	M	нано	10^{-9}	н	n
кило	10^3	к	k	пико	10^{-12}	п	p
гекто	10^2	г	h	фемто	10^{-15}	ф	f
дека	10	да	da	атто	10^{-18}	а	a

V. Соотношения между внесистемными единицами и единицами СИ

Единицы длины и площади

1 ангстрем (Å) = 10^{-10} м	1 дюйм = 2,54 · 10^{-2} м
1 икс-единица (X) = 10^{-13} м	1 ферми = 10^{-15} м
1 астрономическая единица (а. е.) = $1,49 \cdot 10^{11}$ м	1 миля = $1,61 \cdot 10^3$ м
1 световой год (св. год) = $9,46 \cdot 10^{15}$ м	1 морская миля = $1,85 \cdot 10^3$ м
	1 гектар (га) = 10^4 м ²
	1 барн (б) = 10^{-28} м ²

Единицы массы

1 тонна (т) = 1000 кг	1 фунт = 0,454 кг
1 центнер (ц) = 100 кг	1 а. е. м. = $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
1 карат (кар) = $2 \cdot 10^{-4}$ кг	1 унция (тройская) = 31,103 г

Единицы силы

1 дин = 10^{-5} Н	1 килограмм-сила (кгс) = 9,81 Н
---------------------	---------------------------------

Единицы работы и энергии

1 эрг = 10^{-7} Дж	1 эВ = $1,60 \cdot 10^{-19}$ Дж
1 кгс·м = 9,81 Дж	1 ватт·час (Вт·ч) = $3,6 \cdot 10^3$ Дж
1 калория (кал) = 4,19 Дж	

Единицы мощности

1 эрг/с = 10^{-7} Вт	1 лошадиная сила (л.с.) = 736 Вт
1 килокалория в час (ккал/ч) = 1,16 Вт	

Единицы давления

1 дин/см ² =0,1 Па	1 атм=1,01·10 ⁵ Па
1 кгс/м ² =9,81 Па	1 мм рт. ст.=133 Па
1 ат=1 кгс/см ² =9,81·10 ⁴ Па	

Единицы силы тока и электрического заряда

1 ед. СГС _I =(10/с) А=1/(3·10 ⁹) А	1 ед. СГСМ _I =10 А
1 ед. СГС _Q =(10/с) Кл=	1 ед. СГСМ _Q =10 Кл
=1/(3·10 ⁹) Кл	

(См. приложение VII).

Единицы напряженности электрического поля

1 ед. СГС _E =с·10 ⁻⁶ В/м=3·10 ⁴ В/м	1 В/см=100 В/м
--	----------------

Единицы электрической емкости

$$1 \text{ ед. СГС}_C=(1/c^2)\cdot 10^9 \text{ Ф}=(1/9)\cdot 10^{-11} \text{ Ф}$$

Единицы электрического сопротивления и удельного сопротивления

1 ед. СГС _R =с ² ·10 ⁻⁹ Ом=9·10 ¹¹ Ом	1 Ом·мм ² /м=10 ⁻⁶ Ом·м
1 Ом·см=10 ⁻² Ом·м	1 ед. СГС _ρ =9·10 ⁹ Ом·м

Единицы магнитной индукции и магнитного потока

$$1 \text{ гаусс (Гс)}=10^{-4} \text{ Тл}$$

$$1 \text{ Вб/см}^2=10^4 \text{ Тл}$$

$$1 \text{ максвелл (Мкс)}=10^{-8} \text{ Вб}$$

Единицы напряженности магнитного поля

1 эрстед (Э)=1/(4π)·10 ³ А/м	1 А/см=100 А/м
---	----------------

Единицы индуктивности

$$1 \text{ ед. СГС}_L=10^{-9} \text{ Гн}$$

Единицы яркости и освещенности

1 кд/см ² =10 ⁴ кд/м ²	
1 стильб (сб)=1,005·10 ⁴ кд/м ²	1 фот=10 ⁴ лк;

Единицы активности нуклидов (ядер)

1 кюри (Ки)=3,7·10 ¹⁰ Бк	1 резерфорд (Рд)=10 ⁶ Бк
-------------------------------------	-------------------------------------

Единицы дозы и мощности дозы излучения

1 рад=10 ⁻² Гр	1 эрг/г=10 ⁻⁴ Гр
1 рад/с=10 ⁻² Гр/с	1 эрг/(с·г)=10 ⁻⁴ Гр/с

Единицы экспозиционной дозы фотонного излучения

$$1 \text{ рентген (Р)}=2,58\cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$$

VI. Универсальные физические константы

Скорость света в вакууме, c	$2,99792 \cdot 10^8$ м/с
Гравитационная постоянная γ	$6,672 \cdot 10^{-11}$ Н·м ² /кг ²
Молярный объем идеального газа V_M ($T_0=273,15$ К, $p_0=1,01 \cdot 10^5$ Па)	$0,022,4138$ м ³ /моль
Молярная газовая постоянная R	$8,314$ Дж/(К·моль)
Постоянная Фарадея F	96485 Кл/моль
Постоянная Авогадро N_A	$6,02204 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Постоянная Больцмана k	$1,38066 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Масса покоя протона m_p	$1,67265 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя электрона m_e	$9,10953 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя нейтрона m_n	$1,67495 \cdot 10^{-27}$ кг
Отношение масс покоя протона и электрона m_p/m_e	$1836,1515$
Заряд электрона e	$1,60219 \cdot 10^{-19}$ Кл
Постоянная Вина b	$0,0028978$ м·К
Постоянная Планка h	$6,6262 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Стефана — Больцмана σ	$5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м·К ⁴)
Постоянная Ридберга R_∞	$1,09737318 \cdot 10^7$ м ⁻¹
Магнетон Бора μ_B	$9,27408 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл
Магнетон ядерный μ_N	$5,05082 \cdot 10^{-27}$ Дж/Тл
Магнитный момент электрона μ_e	$9,28483 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл
Магнитный момент протона μ_p	$1,4106171 \cdot 10^{-26}$ Дж/Тл

Пр и м е ч а н и е. Указаны значения констант по ГСССД 1-75.

VII. Сравнительная таблица размеров единиц Международной системы (СИ) и гауссовой системы (СГС)

Система Гаусса образуется из систем СГСЭ и СГСМ. В системе СГС основными единицами являются сантиметр ($1 \text{ см} = 10^{-2}$ м), грамм ($1 \text{ г} = 10^{-3}$ кг), секунда (с). Различие в системах СГС имеет место для электрических величин. Это обусловлено тем, что четвертой основной единицей в СГСЭ принята электрическая постоянная $\epsilon_0 = 1$, а в СГСМ — магнитная постоянная $\mu_0 = 1$.

В системе Гаусса (СГС) основными единицами являются грамм, сантиметр, секунда, $\epsilon_0 = 1$, $\mu_0 = 1$; в системе СГС электрические величины (заряд, напряженность электрического поля, напряжение, сила тока, поляризованность, электрическая емкость) выражаются, как в системе СГСЭ, магнитные величины (магнитная индукция, поток магнитной индукции, магнитный момент, индуктивность и т. д.) выражаются, как в системе СГСМ.

В таблице указаны соотношения между единицами физических величин, выраженными в различных системах.

Величина	Наименование	Обозначение		Содержит единиц системы СГС	
		русское	между-народное	СГСЭ	СГСМ

1. Основные единицы

Длина	метр	м	m	10^3 см	10^3 см
Масса	килограмм	кг	kg	10^3 г	10^3 г
Время	секунда	с	s	1 с	1 с
Сила электрического тока	ампер	А	A	$3 \cdot 10^9$	10^{-9}
Термодинамическая температура	кельвин	К	K	—	—
Количество вещества	моль	моль	mol	—	—
Сила света	кандела	кд	cd	—	—

2. Механические величины

Скорость	метр в секунду	м/с	m/s	10^3 см/с	10^3 см/с
Ускорение	метр на секунду в квадрате	м/с ²	m/s ²	10^3 см/с ²	10^3 см/с ²
Энергия и работа	джоуль	Дж	J	10^7 эрг	10^7 эрг
Сила	ньютон	Н	N	10^5 дин	10^5 дин
Мощность	ватт	Вт	W	10^7 эрг/с	10^7 эрг/с

3. Электрические величины

Количество электричества	кулон	Кл	C	$3 \cdot 10^9$	10^{-9}
Напряжение, э. д. с.	вольт	В	V	1/300	10^9
Напряженность электрического поля	вольт на метр	В/м	V/m	$1/3 \cdot 10^{-4}$	10^6
Электрическая емкость	фарад	Ф	F	$9 \cdot 10^{11}$ см	10^{-9}
Электрическое сопротивление	ом	Ом	Ω	$1/9 \cdot 10^{-11}$	10^9
Удельное сопротивление	ом на метр	Ом·м	$\Omega \cdot m$	$1/9 \cdot 10^{-9}$	10^{11}
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	фарад на метр	Ф/м	F/m	$36\pi \cdot 10^9$	$4\pi \cdot 10^{-19}$

4. Магнитные величины

Магнитный поток	вебер	Вб	Wb	1/300	10^8 максвелл (Мкс)
Магнитная индукция	тесла	Тл	T	$1/3 \cdot 10^{-8}$	10^4 гаусс (Гс)
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	А/м	A/m	$12 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^{-3}$ эрстед (Э)
Индуктивность	генри	Гн	H	$1/9 \cdot 10^{-11}$	10^9 см
Абсолютная магнитная проницаемость	генри на метр	Гн/м	H/m	$1/(36\pi \times 10^{13})$	$10^7/(4\pi)$

5. Оптические величины

Световой поток	люмен	лм	lm	—	—
Яркость	кандела на квадратный метр	кд/м ²	cd/m ²	—	—
Освещенность	люкс	лк	lx	—	—

VIII. Основные формулы и законы *)

Механика

Перемещение	$\Delta r = r_2 - r_1$	(1.1)
Путь	$\Delta l = l_2 - l_1$	(1.1a)
Средняя скорость	$v_{cp} = \frac{\Delta r}{\Delta t}$	(1.2)
Мгновенная скорость	$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt}$	(1.3)
Модуль мгновенной скорости, определяемый по дуговым координатам	$v_\tau = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{dl}{dt}$	(1.9)
Среднее ускорение	$a_{cp} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	
Мгновенное ускорение (ускорение)	$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}$	(1.4)
Проекция скорости на оси прямоугольной системы координат	$v_x = \frac{dx}{dt}, v_y = \frac{dy}{dt}, v_z = \frac{dz}{dt}$	(1.5)
Проекция ускорения на оси прямоугольной системы координат	$a_x = \frac{dv_x}{dt}, a_y = \frac{dv_y}{dt}, a_z = \frac{dv_z}{dt}$	(1.6)
Тангенциальное ускорение	$a_\tau = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_\tau}{\Delta t} = \frac{dv_\tau}{dt}$	(1.10)
Нормальное ускорение	$a_n = \frac{v_\tau^2}{\rho}$	(1.11)
Модуль вектора скорости	$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$	(1.7)
Модуль вектора ускорения	$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$	(1.8) (1.12)
Уравнения скорости и пути равнопеременного движения	$v_t = v_0 \pm at, s = v_0 t \pm \frac{at^2}{2}$	(1.15)– (1.17)
Средняя угловая скорость	$\omega_{cp} = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$	(1.18)
Мгновенная угловая скорость (угловая скорость)	$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt}$	(1.19)
Угловое ускорение	$\beta = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt}$	(1.20)
Линейная скорость (движение материальной точки по окружности)	$v = R\omega$	(1.21a)

*) Запись некоторых формул для удобства пользования здесь приводится в иной форме по сравнению с основным текстом справочника.

Линейное ускорение

$$a = \beta R \quad (1.21a)$$

Центростремительное ускорение

$$a_{ц} = \omega^2 R \quad (1.22)$$

Космические скорости (гл. I, п. 1)

$$v_1 = \sqrt{Rg}, \quad v_2 = v_1 \sqrt{2},$$

Количество движения (импульс) (с. 32)

$$v_3 = \sqrt{2\gamma M/R_G}$$

$$p = mv$$

Основной закон движения (второй закон Ньютона) в инерциальной системе отсчета

$$F = ma = \frac{dp}{dt} \quad (1.33), \quad (1.34)$$

Основной закон движения в неинерциальной системе отсчета

$$F + F_{и} + F_{цб} + F_{к} = ma' \quad (1.38)$$

Момент силы относительно точки

$$M = [rF] \quad (1.42)$$

Момент импульса (количества движения) относительно точки

$$L = [rp] \quad (1.43)$$

Момент инерции материальной точки (с. 35)

$$I = mr^2$$

Основной закон вращательного движения материальной точки

$$M = \frac{dL}{dt} \quad (1.44)$$

Основное уравнение вращательного движения твердого тела вокруг неподвижной оси

$$I\beta_z = M_z \quad (1.45)$$

Закон всемирного тяготения

$$F = \frac{\gamma m_1 m_2}{R^2} \quad (1.48)$$

Сила тяготения

$$F_T = \frac{\gamma m M}{R_3^2} \quad (1.49)$$

Сила тяжести (с. 37)

$$G = F_T + F_{к}$$

Вес тела (с. 37)

$$P = G - ma$$

Сила трения скольжения

$$F_{тр} = fN \quad (1.51)$$

Сила трения качения

$$F_{к} = f_{к} \frac{N}{R} \quad (1.52)$$

Элементарная работа силы

$$\Delta A = F \Delta s \cos \varphi \quad (1.54)$$

Работа переменной силы

$$A = \int_s F \cos \varphi ds \quad (1.55)$$

Кинетическая энергия (при малых скоростях)

$$E_{к} = \frac{1}{2} mv^2 \quad (1.58)$$

Кинетическая энергия (при больших скоростях)

$$E_{к} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - m_0 c^2 \quad (1.59)$$

Кинетическая энергия вращающегося тела

$$E_{к} = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (1.60)$$

Потенциальная энергия тела в поле тяготения $E_n = -\frac{\gamma m M}{R}$ (1.61)

Закон Гука $\sigma_n = E\varepsilon$ (1.65a)

$\tau = G\gamma$ (1.66)

Законы сохранения в замкнутой системе:

— энергии (с. 41) $E_k + E_n = \text{const}$

— импульса (количества движения) $\sum p_i = \text{const}$ (1.41)

— момента импульса (количества движения) $\sum L_i = \text{const}$ (1.47)

Давление столба жидкости $p = \rho gh$ (1.70)

Уравнение Бернулли $\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const}$ (1.73)

Внутреннее трение жидкостей $F_T = -\eta S \frac{\Delta v}{\Delta l}$ (1.75)

Уравнение гармонических колебаний $x = A_0 \sin(\omega t + \varphi)$ (1.79)

Период колебаний:

— математического маятника $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ (1.82)

— маятника с упругой связью $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ (1.83)

— крутильного маятника $T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{D}}$ (1.84)

— физического маятника $T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mga}}$ (1.85)

Амплитуда результирующего смещения двух гармонических волн, имеющих одинаковые частоты и направления $A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}$ (1.87)

Длина волны $\lambda = vT = \frac{v}{f}$ (1.90)

Уравнения волн:

— плоских гармонических $\xi = A \sin(\omega t - kr + \varphi)$ (1.91)

— цилиндрических гармонических $\xi_{ц} = \frac{A}{\sqrt{r}} \sin(\omega t - kr + \varphi)$ (1.92)

— сферических гармонических $\xi_{с} = \frac{A}{r} \sin(\omega t - kr + \varphi)$ (1.93)

— стоячих плоских гармонических $u = 2A \cos(kx) \cos(\omega t)$ (1.100)

Интенсивность гармонических волн $I = \frac{1}{2} \rho v \omega_0^2$ (1.96)

Термодинамика и молекулярная физика

Средняя удельная теплоемкость $c_{cp} = \frac{\Delta Q}{m \Delta T}$ (2.1)

Удельная теплоемкость $c = \frac{1}{m} \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT}$ (2.2)

Молярная теплоемкость $C = \mu c$ (2.3)

Первый закон термодинамики $\Delta Q + \Delta A = \delta U$ (2.5)

Коэффициент полезного действия тепловых машин $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ (2.8)

Работа термодинамической системы $A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$ (2.7)

Работа идеального газа (с. 88):

— при изобарическом процессе

$$A_p = \frac{m}{\mu} R \Delta T$$

— при изотермическом процессе

$$A_T = \frac{1}{\mu} R T \ln \frac{p_1}{p_2}$$

— при адиабатическом процессе

$$A_Q = \frac{m}{\mu} C_V (T_1 - T_2)$$

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева — Клапейрона)

$$pV = \frac{m}{\mu} RT \quad (2.14)$$

Уравнение Ван-дер-Ваальса

$$\left(p + \frac{m^2 a}{\mu^2 V^2} \right) \left(V - \frac{m}{\mu} b \right) = \frac{m}{\mu} RT \quad (2.18)$$

Уравнение теплопроводности

$$\Delta Q = -\lambda S \Delta t \frac{\Delta T}{\Delta l} \quad (2.19)$$

Уравнение диффузии

$$\Delta M = -DS \Delta t \frac{\Delta \rho}{\Delta l} \quad (2.20)$$

Средняя скорость молекул идеального газа

$$v_{cp} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}} \quad (2.24)$$

Средняя квадратичная скорость молекул идеального газа

$$v_k = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \quad (2.24)$$

Наиболее вероятная скорость молекул идеального газа

$$v_B = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} \quad (2.24)$$

Средняя длина свободного пробега молекулы идеального газа

$$l = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 p} \quad (2.22)$$

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов

$$pV = \frac{2}{3} E = \frac{1}{3} M v_k^2 \quad (2.26)$$

Теплопроводность идеального газа

$$\lambda = \frac{1}{3} \rho v_{cp} l c_V \quad (2.30)$$

Вязкость идеального газа

$$\eta = \frac{1}{3} \rho v_{cp} l \quad (2.30)$$

Коэффициент диффузии идеального газа

$$D = \frac{1}{3} v_{cp} l \quad (2.30)$$

Электродинамика (единицы СИ и СГС)

Закон Кулона

$$F = \frac{Q_1 Q_2 r}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r^3}, \quad F = \frac{Q_1 Q_2}{\epsilon r^2} \quad (3.1)$$

Напряженность поля точечного заряда

$$E = \frac{Qr}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r^3}, \quad E = \frac{Qr}{\epsilon r^3} \quad (3.3)$$

Напряженность поля заряженной бесконечной плоскости

$$E = \frac{\sigma n}{2\epsilon_0 \epsilon}, \quad E = \frac{2\pi \sigma}{\epsilon} n \quad (3.4)$$

Сила, действующая на заряд в электрическом поле

$$F = QE \quad (3.2)$$

Работа по перемещению в электрическом поле

$$A = QU \quad (3.8)$$

Электрическая емкость

$$C = \frac{Q}{\Phi_1 - \Phi_2} \quad (3.10)$$

Емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad C = \frac{\epsilon S}{4\pi d} \quad (3.11)$$

Электрический момент диполя (с. 117)

$$p = Ql$$

Поляризованность

$$P = \chi \epsilon_0 E, \quad P = \chi E \quad (3.22)$$

Электрическое смещение

$$D = \epsilon_0 E + P, \quad D = E + 4\pi P \quad (3.23)$$

Зависимость между ϵ и χ (с. 122)

$$\epsilon = 1 + \chi, \quad \epsilon = 1 + 4\pi \chi$$

Плотность энергии электрического поля

$$w = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2}, \quad w = \frac{e E^2}{8\pi} \quad (3.19)$$

Закон Ома для участка цепи без в. д. с.

$$I = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{r} \quad (3.32)$$

Обобщенный закон Ома

$$I = \frac{\Phi_1 - \Phi_2 + \mathcal{E}}{r} \quad (3.37)$$

Работа электрического тока

$$A = IUt \quad (3.40)$$

Электрическое сопротивление

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (3.33)$$

Взаимодействие параллельных проводников с токами

$$F = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a}, \quad F = \frac{1}{c^2} \frac{2\mu I_1 I_2 l}{a} \quad (3.54)$$

Магнитный поток

$$\Phi = BS \cos \alpha \quad (3.62)$$

Магнитная индукция (с. 136)

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

Зависимость между μ и κ

$$\mu = 1 + \kappa, \quad \mu = 1 + 4\pi\kappa \quad (3.75)$$

Закон Био—Савара—Лапласа

$$\Delta B = \frac{\mu\mu_0 I \Delta l \sin \alpha}{4\pi r^2}, \quad (3.55)$$

$$\Delta B = \frac{\mu I \Delta l \sin \alpha}{c^2 r^2}$$

Магнитная индукция прямого тока

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r}, \quad B = \frac{2\mu I}{cr} \quad (3.56)$$

Закон Ампера

$$\Delta F = I [\Delta l \mathbf{B}], \quad \Delta F = \frac{1}{c} I [\Delta l \mathbf{B}] \quad (3.52)$$

Сила Лоренца

$$\mathbf{F} = Q [\mathbf{vB}], \quad \mathbf{F} = \frac{Q [\mathbf{vB}]}{c} \quad (3.51)$$

Закон электромагнитной индукции

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad \mathcal{E} = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.64)$$

Индуктивность соленоида

$$L = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{l}, \quad L = \frac{4\pi\mu N^2 S}{l} \quad (3.68)$$

Плотность энергии магнитного поля

$$\omega = \frac{1}{2} \mu\mu_0 H^2, \quad \omega = \frac{1}{8\pi} \mu H^2 \quad (3.72)$$

Формула Томсона

$$T = 2\pi \sqrt{LC}, \quad T = \frac{2\pi}{c} \sqrt{LC} \quad (3.81)$$

Реактивное сопротивление (с. 145)

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C}, \quad X = \frac{1}{c^2} \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

Вектор Пойнтинга

$$\mathbf{S} = [\mathbf{EH}], \quad \mathbf{S} = \frac{c}{4\pi} [\mathbf{EH}] \quad (3.86)$$

Скорость света

$$c_1 = \frac{1}{\sqrt{\mu\mu_0 \epsilon\epsilon_0}}, \quad c_1 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

Оптика, атомная и ядерная физика

Закон отражения (с. 173)

$$i = i^r$$

Закон преломления

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n \quad (4.10)$$

Предельный угол полного отражения

$$\sin i_{\text{np}} = \frac{1}{n} \quad (4.11)$$

Показатель преломления стекла, из которого изготовлена призма

$$n = \frac{\sin \left(\frac{\delta_M}{2} + \frac{P}{2} \right)}{\sin \frac{P}{2}} \quad (4.12)$$

Формула тонкой линзы
$$-\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f} =$$

$$= (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.13)$$

Видимое увеличение:

— лупы
$$\Gamma_{\text{л}} = \frac{250}{f} \quad (4.16)$$

— микроскопа
$$\Gamma_{\text{м}} = \frac{250\Delta}{f_1 f_2} \quad (4.17)$$

— зрительной трубы
$$\Gamma_{\text{т}} = \frac{f_{\text{об}}}{f_{\text{ок}}} \quad (4.18)$$

Результирующая амплитуда E двух плоских гармонических волн
$$F_{\text{ор}} = \sqrt{E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \theta} \quad (4.20)$$

Дифракция света на дифракционной решетке (при нормальном падении):

— условие главных минимумов
$$a \sin \beta_{\text{мин}} = m\lambda \quad (4.23)$$

$$(m = \pm 1, \pm 2, \dots)$$

— условие главных максимумов
$$d \sin \beta_{\text{макс}} = m\lambda$$

$$(m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (4.24)$$

— условие дополнительных минимумов
$$d \sin \beta_{\text{дм}} = m'\lambda \quad (4.25)$$

$$m' = \frac{1}{N}, \dots, \frac{N-1}{N}, \frac{N+1}{N}, \dots$$

Разрешаемое микроскопом расстояние
$$\delta \gg \frac{\lambda}{2n \sin u} \quad (4.27)$$

Давление электромагнитных волн
$$p = \frac{E_{\text{э}}}{c} (1 + \rho) \quad (4.32)$$

Основное уравнение фотоэффекта
$$h\nu = A + \frac{1}{2} m_e v_{\text{эм}}^2 \quad (4.35)$$

Законы теплового излучения:

— закон Кирхгофа
$$\frac{r_{\lambda T}}{A_{\lambda T}} = \varepsilon_{\lambda T} \quad (4.37)$$

— закон Стефана — Больцмана
$$R_{\text{э}} = \sigma T^4 \quad (4.38)$$

— закон смещения Вина
$$\lambda_{\text{м}} = \frac{b}{T} \quad (4.39)$$

— формула Планка
$$\varepsilon_{\lambda T} = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{hc/(k\lambda T)} - 1} \quad (4.40)$$

Длина волны де-Бройля
$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (5.1)$$

Энергетические уровни водородоподобных атомов
$$E_n = \frac{m_e Z^2 e^4}{8\varepsilon_0^2 n^2 h^2} \quad (5.7)$$

Орбитальный момент импульса
электрона $M_l = \hbar \sqrt{l(l+1)}$ (5.4)

Собственный момент импульса
(спин) электрона $M_s = \hbar \sqrt{s(s+1)}$ (5.6)

Энергия связи ядра $\Delta E = \Delta M c^2$ (5.11)

Радиоактивный распад ядер $N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$ (5.12)

Эффективное сечение ядерной
реакции (с. 210) $\sigma = \frac{\Delta N}{N n_0 \Delta z}$

Ослабление потока β -частиц $N = N_0 e^{-\mu z}$ (5.13)

Поглощение γ -излучения $I = I_0 e^{-\mu z}$ (5.16)

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абсолютно черное тело 188
Адиабата 88
Адроны 215
Аккумулятор 128
Активность 212
Альфа-частица 209
Амплитуда волны 56
— колебаний 51, 53
Анион 127
Аннигиляция 215
Анод 127
Антенна 148
Античастица 215
- Барions 216
Барометрическая формула 94
Беккерель 212
Блок 43
- Вакуум 95
Вектор Пойнтинга 147
Векторы 11—12
Взаимодействие зарядов 116
— фундаментальное 214
Влажность 90
Волна 55
— линейно поляризованная 184
— плоская 56
— поперечная 56
— продольная 56
— синусоидальная 56
— сферическая 56
— цилиндрическая 56
— электромагнитная 147
Восприимчивость диэлектрическая 122
— магнитная 140
Вращение плоскости поляризации 185
Время собственное 29
Вязкость 49, 95
- Газ идеальный 87, 92
Гипероны 216
Гистерезис магнитный 142
Глюоны 214
Гравитоны 214
Градиент плотности 91
— потенциала 119
— скорости 49
— температуры 91
Громкость звука 57
Грэй 212, 214
- Давление звуковое 58
— критическое 90
— парциальное 87
— радиационное 185
Движение жидкости 48
— — вязкой 49
— — идеальной 48
— криволинейное 26
— механическое 23
— прямолинейное 25
— равнозамедленное 26
— равномерное 25
— равноускоренное 26
— тела в поле тяготения 30, 31
Дефект массы 207
Деформация 44
— относительная поперечная 46
— — продольная 45
— сдвига 46
— упругая 44
Децибел 58
Диаманетики 140
Динамика 31
— вращательного движения 34
Диоптрия 176
Диполь электрический 117
Дисперсия 55, 183
— вращательная 185
Дифракционная решетка 182
Дифракция 181

- Диффузия 91, 95
 Длина волны 56
 — — де-Бройля 202
 — свободного пробега 92
 Добротность контура 145
 Доза поглощенная 212
 — экспозиционная 213
 Домены 122, 142
 Домкрат винтовой 44
- Единицы физических величин
 16—22
- Жидкий кристалл 96
 Жидкость вязкая 48
 — идеальная 48
 — перегретая 90
- Закон Ампера 133
 — Архимеда 48
 — Био—Савара—Лапласа 136
 — Бойля—Мариотта 88
 — всемирного тяготения 36
 — Гей-Люссака 88
 — Гука 45
 — Дальтона 87
 — Кирхгофа 189
 — Кирхгофа—Бунзена 187
 — Кулона 116
 — Ома 119
 — Паскаля 47
 — сохранения зарядов 115
 — — импульса 34
 — — момента импульса 36
 — — энергии 41
 — Стефана—Больцмана 189
 — Столетова 186
 — Шарля 88
- Законы внешнего фотоэффекта
 186
 — Ньютона 31—33
 — термодинамики 83
 — Фарадея 128
- Заряд электрический 115
 — элементарный 115
- Звук 57
 Зона валентная 131
 — запрещенная 131
 — проводимости 131
- Излучение тепловое 188
 Изобары 206
 Изотопы 206
 Импульс 32
 Индукция магнитная 133
 — насыщения 142
 — электромагнитная 138
 — электростатическая 121
 Инертность 32
 Интенсивность волн 57, 180
 Интерференция 179
 Инфразвук 57
 Ионизация газов 129
 Ионы 115, 127
 Искровой промежуток 130
 Испарение 84
 Испускательная способность 188
 Источник тока 124
 Источники когерентные 181
- Катионы 127
 Катод 127
 Катоды оксидные 129
 Квант излучения 185
 Квантовые числа 204
 Кварки 214
 Керма 214
 Кинематика 23
 Кинетическая теория газов 92
 Кипение 84
 Колебания вынужденные 53
 — гармонические 51
 — затухающие 53
 — свободные 52
 — электрические 143
 Количество движения 32
 Конденсатор 120
 Конденсация 84
 Контур колебательный 144
 Коэффициент затухания 53
 — качества 213
 — квазиупругой силы 51
 — мощности 144
 — ослабления линейный 211
 — — массовый 211
 — отражения звука 58
 — — света 173
 — поглощения звука 58
 — пропускания 58
 — Пуассона 46
 Кривая намагничивания 141
 — плавления 85
 — сублимации 85
 — фазовых переходов 85

- Кристалл 96
 Кристаллизация 83
- Лептоны 216
 Линза 175
 Линии магнитной индукции 135
 — напряженности 117
 — спектра 187
 — Фраунгофера 187
 Лучепреломление двойное 184
- Магнетики 140
 Магнетон Бора 201
 — ядерный 201
 Магнитострикция 142
 Максвелла распределение 93
 Масса 32
 — молярная 81
 Массовое число 206
 Маятник крутильный 52
 — математический 52
 — с упругой связью 52
 — физический 51
 Мезоны 216
 Модель атома 202
 — идеального газа 92
 Модуль объемной упругости 47
 — сдвига 47
 — Юнга 45
 Моль 14
 Момент диполя электрический 117
 — импульса 35
 — инерции 35
 — контура магнитный 134
 — силы 34
 Мощность 40
 — поглощенной дозы 212
- Намагниченность 140
 Напряжение механическое 45
 — электрическое 126
 Напряженность коэрцитивная 142
 — поля магнитного 136
 — — тяготения 37
 — — электрического 116
 Нейтрон 206, 225
 Нуклоны 206
- Оболочки электронные 205
 Оптика геометрическая 173
- Орбита стационарная 203
 Освещенность 171, 172
 Отражение диффузное 173
 — полное 174
 — света 173
- Пар насыщенный 84
 Парамагнетики 140
 Параметры критические 86
 — термодинамические 80
 Перемещение 24
 — угловое 26
 Период вращения 27
 — колебаний 50
 — — контура 144
 — полураспада 210
 Петля гистерезиса 142
 Плотность вещества 39
 — заряда поверхностная 117
 — критическая 86
 — тока электрического 123
 — энергии магнитного поля 139
 — — электрического поля 121
 Поверхность волновая 56
 — эквипотенциальная 119
 Поглощательная способность 188
 Погрешность измерений 234—
 236
 Подвижность носителей заряда 124
 Показатель поглощения 58
 — преломления 174
 Поле гравитационное 37
 — магнитное 133
 — потенциальное 40
 — электрическое 116
 — — вихревое 138
 — электромагнитное 147
 Полимеры 98
 Полиспаст 44
 Полный излучатель 189
 Полупроводники 130
 Полюсы магнитные 163
 Поляризация диэлектрика 121
 — света 183
 Порог болевого ощущения 58
 — слышимости 57
 Постоянная Авогадро 92
 — Больцмана 92
 — вращения 185
 — — удельная 185
 — гравитационная 36, 238
 — Планка 186
 Постоянные эмиссионные 129

- Потенциал электрического поля** 119
 — электрохимический 128
Поток излучения 171
 — магнитный 137
 — световой 172
 — тепловой 90
Правила Кирхгофа 126
Правило винта (правого) 12, 134
 — левой руки 134
 — Ленца 138
Предел прочности 45
 — текучести 45
 — упругости 45
Преобразования Галилея 28
 — Лоренца 29
Приборы оптические 177—179
Примеси акцепторные 132
 — донорные 132
Принцип Гюйгенса — Френеля 181
 — Паули 205
Проводимость дырочная 132
 — самостоятельная 129
 — самостоятельная 129
 — удельная 129
 — электрическая 125
 — электронная 132
Проницаемость диэлектрическая 116
 — магнитная 136, 140
 — — начальная 141
Протон 206, 225
Процесс необратимый 83
 — обратимый 83
Пьезоэлектрический модуль 123
 — эффект 122
- Работа** 39, 82, 83
 — выхода 129
 — ионизации 129
 — сил Ампера 138
Равновесие безразличное 42
 — динамическое 84
 — на наклонной плоскости 43
 — неустойчивое 42
 — устойчивое 42
Радиоактивность естественная 208
 — искусственная 208
Реакция термоядерная 210
 — ядерная 210
Резонанс 54
- Резонанс напряжений** 145
 — токов 145
Рычаг 43
- Самоиндукция** 138
Сверхпроводимость 125
Свет естественный 183
Светимость 171, 172
Свечение Вавилова — Черенкова 211
Сегнетоэлектрики 122
Серия Бальмера 218
 — Лаймана 218
 — Пашена 218
Сечение эффективное ядерной реакции 210
Сжижение 84
Сжимаемость 47
Сила 23
 — Ампера 133
 — внешняя 34
 — внутренняя 34
 — гидродинамическая 50
 — диссипативная 40
 — инерции 83
 — квазиупругая 51
 — консервативная 40
 — Кориолиса 33
 — коэрцитивная 142
 — Лоренца 133
 — равнодействующая 32
 — света 170
 — тока электрического 123
 — трения 38
 — тяготения 36
 — тяжести 37
 — упругости 44
 — центробежная 33
Силы сторонние 124
 — ядерные 207
Система замкнутая 34
 — отсчета 23
 — — инерциальная 28
 — — неинерциальная 28
 — термодинамическая 80
Скаляры 11
Скин-эффект 139
Скорость колебаний частиц 55
 — космическая 30
 — линейная 27
 — мгновенная 24
 — молекул 33
 — освобождения 30
 — равномерного движения 25

- Скорость средняя 24
 — угловая 27
 — электромагнитных волн 147
 Смещение электрическое 117
 Сопротивление емкостное 144
 — индуктивное 144
 — полное 145
 — электрическое 125
 — — удельное 125
 Спектральная плотность энергетической светимости 188
 Спектры 187
 — испускания 187
 — линейчатые 187
 — поглощения 187
 — характеристические рентгеновские 206
 Спин 204, 208
 Странность 216
 Сублимация 84
- Тело твердое 41
 Температура 80, 81
 — кипения 84
 — критическая 90
 — Кюри 122, 141
 — стеклования 98
 — текучести 98
 Температурный коэффициент длины 86
 — — объема 86
 — — сопротивления 125
 Тепловое расширение 86
 Теплоемкость 81
 — молярная 86
 — удельная 81
 Теплопроводность 92, 95
 Теплота 81
 — парообразования 84
 — плавления 84
 — фазового перехода 84
 Термозлектродвижущая сила 132
 Ток индукционный 138
 — насыщения 129
 — переменный 143
 — постоянный 123
 — смещения 145
 — эффективный 143
 Точка материальная 23
 — тройная 85
 Траектория 23
 Трение качения 38
 — покоя 38
- Трения скольжения 38
 — сухое 38
- Увеличение оптических приборов 179
 Угол апертурный 183
 — Брюстера 184
 — отражения 173
 — — предельный 174
 — падения 173
 — преломления 174
 Ультразвук 57
 Уравнение адиабаты 88
 — Бернулли 49
 — Ван-дер-Ваальса 89
 — волны 56, 59
 — Менделеева — Клапейрона 87
 — фотоэффекта 186
 Уровни энергии 131, 205, 218
 Ускорение кориолисово 30
 — нормальное 25
 — полное 25
 — тангенциальное 25
 — угловое 27
 — центростремительное 27, 30
- Фаза колебаний 51
 — начальная 51
 — термодинамическая 83
 Ферромагнетика 141
 Фигуры Лиссажу 54
 Физические константы универсальные 238
 Фокусы линзы 175
 Формула Планка 189
 — Стокса 50
 — Томсона 144
 — тонкой линзы 176
 Фотометрия 171, 172
 Фотон 185
 Фотоэффект 186
 Функция распределения 93
- Центр инерции (масс) 42
 — тяжести 42
- Частицы элементарные 215, 225
 Частота вращения 27
 — угловая 27
 Черное тело 188

- Числа квантовые 204
Число барионное 216
— волновое 56
— массовое 206
Чувствительность глаза 172
- Шкала механических волн 75
— электромагнитных излучений 170
- Экватор магнитный 163
Эквивалент электрохимический 128
Эквивалентная доза 213
Электрическая цепь 124
Электродвижущая сила 125
Електроемкость 119
- Электролиз 128
Электролиты 127
Электронвольт 201
Электропроводность плазмы 130
Элемент тока 133
Элементы гальванические 128
Эмиссия термоэлектронная 129
Энергия 41
— внутренняя 82
— излучения 171
— кинетическая 40
— потенциальная 40
— — деформированного стержня 47
— связи ядра 208
- Явления переноса 90
Ядро атома 206
Яркость 172

**Николай Иванович Кошкин,
Михаил Григорьевич Ширевич**

СПРАВОЧНИК ПО ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ФИЗИКЕ

Редактор **В. Я. Дубнова**
Технический редактор **С. Я. Шкляр**
Корректоры **Т. С. Вайсберг, Л. С. Сомова**

ИБ № 32430

Сдано в набор 23.04.87. Подписано в печать 30.10.87. Формат 84×108^{1/32}. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 13,44. Усл. кр.-отг. 13,65. Уч.-изд. л. 17,72. Тираж 300 000 экз. (3-й завод 200 001—300 000). Заказ № 8165. Цена 1 р. 10 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»
Главная редакция
физико-математической литературы,
117071, Москва В-71, Ленинский проспект, 15.

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография» имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 113054, Москва, Валовая, 39.

Отпечатано в типографии издательства «Коммуна», 394000, г. Воронеж, проспект Революции, 39.

1 руб. 10 коп.