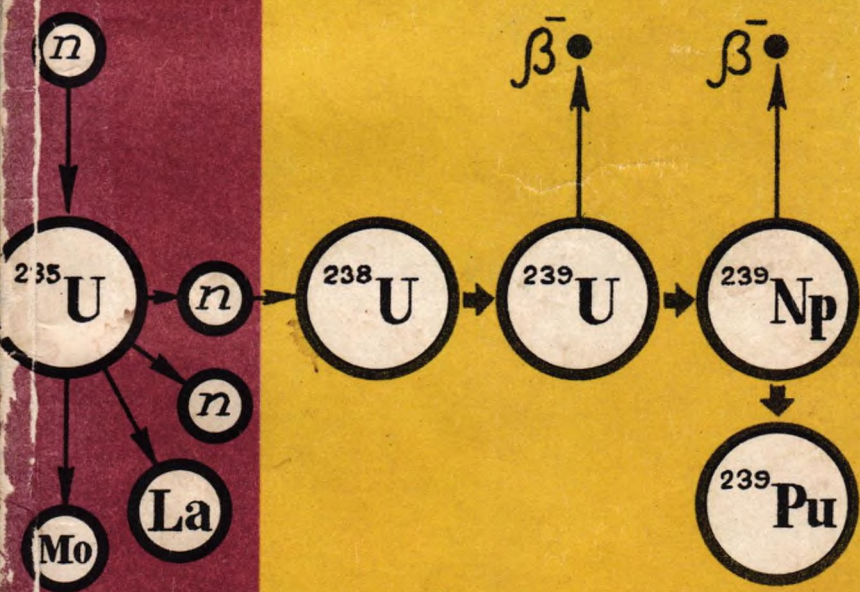


Н. И. КОШКИН
М. Г. ШИРКЕВИЧ

справочник по элементарной физике



Н. И. КОШКИН, М. Г. ШИРКЕВИЧ

СПРАВОЧНИК ПО ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ФИЗИКЕ

ИЗДАНИЕ ДЕВЯТОЕ



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1982

22.31
К 76
УДК 53

Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г. Справочник по элементарной физике.— 9-е изд.— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982.

Справочник охватывает все основные разделы элементарной физики. В нем даны определения основных физических понятий, кратко сформулированы физические законы. Приводятся справочные таблицы и графики. В новом издании уточнены некоторые формулировки, введены современные обозначения.

Справочник рекомендуется учащимся школ, профессионально-технических училищ и техникумов, а также широкому кругу работников различных профессий, где требуется знание различных физических величин.

Николай Иванович Кошкин, Михаил Григорьевич Ширкевич

Справочник по элементарной физике

Редакторы А. Г. Чертов, Л. П. Русакова

Техн. редактор И. Ш. Аксельрод

Корректор Г. В. Подвольская

ИБ № 12161

Печать с матриц. Подписано в печать 14.06.82. Т-06797-Формат 84×108¹/₃₂.
Бумага № 2. Литературная гарнитура. Высокая печать. Услови. печ. л. 10,92.
Уч.-изд. л. 15,08. Тираж 300 000 экз. Заказ № 3750. Цена 75 коп.

Издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени
Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли. Москва, М-54, Валовая, 28

К 1704010000— 088
053(02)-82 108-82

© Издательство «Наука»
Главная редакция
физико-математической
литературы, 1980

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к восьмому изданию	10
Предисловие к пятому изданию	10
Предисловие к первому изданию	10
К сведению пользующихся справочником	12
Введение	13

Глава I

МЕХАНИКА

А. Кинематика

Основные понятия и законы	15
1. Перемещение, скорость, ускорение	15
2. Вращательное движение	17
3. Инерциальные и неинерциальные системы отсчета	19
4. Движение тел в земном поле тяготения	20
Таблицы	22
Табл. 1. Ускорения (примерные значения)	22
Табл. 2. Кинематические параметры планет	22
Табл. 3. Первая и вторая космические скорости	23
Табл. 4. Период обращения спутника Земли на разных высотах	23

Б. Динамика

Основные понятия и законы	23
1. Законы динамики	23
2. Динамика вращательного движения	26
3. Закон всемирного тяготения	27
4. Силы трения	29
5. Плотность вещества	30
6. Работа, мощность, энергия	30
Таблицы	33
Табл. 5. Плотность твердых тел	33
Табл. 6. Плотность жидкостей	34
Табл. 7. Плотность металлов в жидком состоянии	34
Табл. 8. Плотность воды и ртути при различных температурах	35
Табл. 9. Плотность газов и паров	35
Табл. 10. Объемная плотность материалов	36
Табл. 11. Моменты инерции однородных тел	36

Табл. 12. Коэффициенты трения скольжения для различных материалов	37
Табл. 13. Напряженность земного поля тяготения (ускорение свободного падения) для разных широт на уровне моря	37
Табл. 14. Динамические характеристики планет Солнечной системы	38

В. Статика твердого тела

Основные понятия и законы	38
Табл. 15. Центры тяжести однородных тел	41

Г. Элементы теории упругости

Основные понятия и законы	41
Таблицы и графики	44
Табл. 16. Пределы прочности некоторых материалов	44
Табл. 17. Модули упругости и коэффициенты Пуассона	44
Табл. 18. Сжимаемость жидкостей и твердых тел	45
Зависимость предела прочности и модуля Юнга от температуры	46

Д. Механика жидкостей и газов

Основные понятия и законы	46
1. Статика	46
2. Динамика	47
Таблицы	48
Табл. 19. Вязкость жидкостей	48
Табл. 20. Вязкость газов	49
Табл. 21. Вязкость газов при различных давлениях	49
Табл. 22. Вязкость воды при различных температурах	49
Табл. 23. Вязкость жидкостей при различных температурах	50
Табл. 24. Вязкость металлов в жидком состоянии	50

Глава II

ТЕПЛОТА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Основные понятия и законы	51
1. Основы термодинамики. Теплоемкость	51
2. Фазовые превращения	53
3. Тепловое расширение твердых и жидких тел	55
4. Теплопроводность, диффузия, вязкость	56
5. Поверхностное натяжение жидкостей	57
6. Газовые законы	57
7. Основы кинетической теории газов	60
Таблицы и графики	63
Табл. 25. Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ-68)	63
Табл. 26. Удельные теплоемкости, теплоты плавления, теплоты испарения, температуры плавления и кипения некоторых веществ	64
Табл. 27. Относительное изменение объема вещества при плавлении	64
Табл. 28. Температура плавления огнеупорных материалов	65
Теплоемкость воды	65
Табл. 29. Удельная теплоемкость твердых веществ при низких температурах	65
Табл. 30. Удельная теплоемкость жидкого этилового спирта при различных температурах и давлениях	66
Табл. 31. Удельная теплоемкость газов при нормальном давлении	66
Табл. 32. Удельная теплота парообразования	66
Температура кипения воды	67

Табл. 33. Удельная теплота парообразования при различных температурах	67
Табл. 34. Удельная теплота парообразования углекислоты при различных температурах	67
Табл. 35. Температура плавления в тройной точке, молярная теплота плавления, температура кипения при нормальном давлении и теплота парообразования сжиженных газов	68
Табл. 36. Плотность, температура отвердевания и температура кипения водного раствора поваренной соли при различных концентрациях и нормальном давлении	68
Табл. 37. Максимальные температуры кипения водных растворов солей при нормальном давлении	68
Табл. 38. Свойства обычной и тяжелой воды	69
Табл. 39. Критические параметры	69
Табл. 40. Температура и давление тройных точек	69
Табл. 41. Свойства насыщенного водяного пара	70
Табл. 42. Коэффициент объемного расширения жидкостей (для температур около 18 °C)	70
Табл. 43. Коэффициент линейного расширения твердых тел (для температур около 20 °C)	71
Табл. 44. Коэффициент линейного расширения при различных температурах	71
Табл. 45. Поверхностное натяжение жидкостей	72
Табл. 46. Поверхностное натяжение воды и этилового спирта при различных температурах	72
Табл. 47. Поверхностное натяжение металлов в жидком состоянии	72
Табл. 48. Коэффициент теплопроводности материалов	73
Табл. 49. Коэффициент теплопроводности λ асбеста и пенобетона при различных температурах	74
Табл. 50. Коэффициент теплопроводности жидкостей при различных температурах	74
Табл. 51. Коэффициент теплопроводности газов при нормальном давлении	74
Табл. 52. Температурные коэффициенты давления газов	74
Табл. 53. Стандартная атмосфера	75
Табл. 54. Коэффициент диффузии газов и паров в воздухе	75
Табл. 55. Коэффициент диффузии водных растворов	76
Табл. 56. Коэффициент диффузии и самодиффузии в твердых телах	76
Табл. 57. Газокинетические диаметры молекул	77
Табл. 58. Удельная теплота сгорания топлива	77
Табл. 59. Константы Ван-дер-Ваальса	78
Табл. 60. Психрометрическая таблица относительной влажности воздуха	78

Глава III

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Основные понятия и законы	79
1. Гармонические колебания	79
2. Маятники	80
3. Свободные и вынужденные колебания	81
4. Сложение гармонических колебаний	83
5. Волны	84
6. Звук	87
Таблицы и графики	88
Табл. 61. Скорость звука в чистых жидкостях и маслах	88
Табл. 62. Скорость звука в твердых материалах	88
Табл. 63. Свойства Земли на разных глубинах и скорость сейсмических волн	89
Табл. 64. Скорость звука в газах при нормальном давлении	89
Скорость звука в воздухе и азоте	89
Табл. 65. Шкала механических волн	90
Табл. 66. Сила звука и звуковые давления	90
Скорость волн на поверхности воды	91
Уровни громкости звука при слуховом восприятии	91
Табл. 67. Коэффициент отражения звуковых волн на границе раздела различных сред (при нормальном падении) в %	92

Табл. 68. Коэффициент поглощения звука в воздухе	92
Табл. 69. Звукопоглощательная способность материалов	93
Табл. 70. Поглощение звука в жидкостях	93
Табл. 71. Коэффициент поглощения акустических волн в морской воде	93

Глава IV

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

А. Электростатическое поле

✓ Основные понятия и законы	94
Таблицы и графики	100
Табл. 72. Электрическое поле в атмосфере Земли	100
Табл. 73. Электроизолирующие материалы	101
Табл. 74. Диэлектрическая проницаемость чистых жидкостей	102
Табл. 75. Диэлектрическая проницаемость газов (при 18 °С и нормальном давлении)	102
Табл. 76. Свойства сегнетоэлектрических кристаллов	102
Диэлектрическая проницаемость сегнетовой соли и титаната бария	103
Табл. 77. Пьезоэлектрические модули кристаллов	103

Б. Постоянный электрический ток

Основные понятия и законы	103
1. Ток в металлах	103
2. Ток в электролитах	107
3. Ток в газах	109
4. Полупроводники	110
5. Термоэлектричество	112
Таблицы и графики	112
Электрические токи в атмосфере Земли	112
Концентрация электронов в атмосфере	113
Табл. 78. Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления металлов	113
Табл. 79. Температура перехода металлов и сплавов в сверхпроводящее состояние	114
Табл. 80. Сплавы с высоким активным сопротивлением	114
Табл. 81. Допустимые силы тока в изолированных проводах при продолжительной работе	115
Табл. 82. Плавкие предохранители	115
Электропроводность водных растворов	115
Табл. 83. Удельное сопротивление электролитов для различных концентраций	116
Табл. 84. Термоэлектродвижущая сила некоторых пар металлов	116
Табл. 85. Дифференциальная т.э.д.с. относительно платины	117
Дифференциальная т.э.д.с. пары медь-константан	117
Табл. 86. Электрохимические эквиваленты	117
Табл. 87. Нормальные потенциалы металлов	118
Зарядка и разрядка аккумуляторов	118
Табл. 88. Э. д. с. гальванических элементов	119
Табл. 89. Подвижность ионов в водных растворах	120
Табл. 90. Подвижность электронов в металлах	120
Табл. 91. Подвижность ионов в газах	120
Табл. 92. Работа ионизации	121
Табл. 93. Эмиссионные постоянные металлов и полупроводников	121
Табл. 94. Эмиссионные постоянные пленок на металлах	121
Табл. 95. Эмиссионные постоянные оксидных катодов	122
Табл. 96. Свойства полупроводников	122
Удельное сопротивление германия и кремния	123
Напряжение пробоя между плоскими электродами	123
Табл. 97. Искровые промежутки в воздухе	124

В. Магнитное поле. Электромагнитная индукция

Основные понятия и законы	124
1. Магнитная индукция, Взаимодействие токов. Магнитный момент	124
2. Взаимодействие движущихся зарядов	126
3. Магнитное поле в вакууме	127
4. Работа при перемещении проводника с током в магнитном поле. Электромагнитная индукция	129
5. Самоиндукция	129
6. Магнитные поля в веществе	130
Таблицы и графики	133
Магнитное поле Земли	133
Табл. 98. Свойства электротехнических сталей	133
Табл. 99. Свойства железо-никелевых сплавов	134
Табл. 100. Свойства магнитотвердых материалов	134
Табл. 101. Свойства магнитодиэлектриков	135
Табл. 102. Основные свойства ферритов	135
Табл. 103. Магнитная проницаемость парамагнетиков и диамагнетиков	135
Табл. 104. Температура Кюри металлов	136
Табл. 105. Удельная магнитная восприимчивость металлов и полупроводников	136
Магнитная проницаемость, индукция, гистерезис и магнитострикция ферромагнетиков	136
Табл. 106. Индукция и потери на гистерезис в ферромагнетиках и ферритах	136
Табл. 107. Значения коэффициента k для расчета индуктивности	136

Г. Электрические колебания и электромагнитные волны

Основные понятия и законы	138
1. Переменный ток	138
2. Колебательный контур	141
3. Электромагнитное поле	142
4. Излучение электромагнитных волн	143
Таблицы и графики	144
Сопротивления при постоянном и переменном токах	144
Зависимость от частоты индуктивного, емкостного и полного сопротивлений	145
Зависимость от частоты силы тока в последовательном резонансном контуре	146
Табл. 108. Глубина проникновения токов высокой частоты в медный провод	146
Табл. 109. Шкала электромагнитных излучений	147

Глава V

ОПТИКА

Основные понятия и законы	149
1. Энергетические и световые величины. Фотометрия	149
2. Основные законы геометрической оптики	151
3. Линзы. Оптические приборы	152
4. Волновые свойства света	155
5. Квантовые свойства света	160
6. Типы спектров	161
7. Тепловое излучение	162
Таблицы и графики	164
Табл. 110. Относительная видимость дневного зрения	164
Табл. 111. Яркость освещенных поверхностей	164
Табл. 112. Яркость источников света	165

Табл. 113. Освещенность в некоторых типичных случаях	165
Табл. 114. Коэффициент отражения при различных углах падения для стекла и воды	165
Табл. 115. Отражение света при переходе из стекла в воздух	166
Коэффициент отражения поляризованного и неполяризованного света	166
Табл. 116. Длины волн видимой части спектра	166
Табл. 117. Длины волн ультрафиолетовой части спектра	167
Табл. 118. Отражение света металлами	167
Табл. 119. Предельные углы полного отражения	167
Табл. 120. Длины волн главных фраунгоферовых линий	168
Табл. 121. Показатели преломления для длин волн, соответствующих некоторым фраунгоферовым линиям	168
Табл. 122. Показатели преломления газов	169
Табл. 123. Показатели преломления твердых тел и жидкостей (при 15 °С, для D-линии натрия, относительно воздуха)	169
Табл. 124. Зависимость показателя преломления от длины волны	170
Табл. 125. Диффузное отражение материалов в белом свете	170
Табл. 126. Постоянные Керра и Коттона — Мутона	171
Табл. 127. Удельная постоянная вращения при температуре 20 °С	171
Табл. 128. Вращательная дисперсия при 20 °С	171
Табл. 129. Спектры испускания металлов и газов	172
Табл. 130. Световая отдача, к. п. д. и яркость источников света	173
Табл. 131. Работа выхода электронов и красная граница фотоэффекта	173

Глава VI

СТРОЕНИЕ АТОМА И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Основные понятия и законы	174
1. Единицы заряда, массы и энергии в атомной физике	174
2. Модель атома Резерфорда — Бора	174
3. Электронные оболочки в многоэлектронных атомах	176
4. Атомное ядро	177
5. Ядерные превращения	179
6. Волновые свойства частиц	180
7. Взаимодействия ядерных излучений с веществом	181
8. Единицы радиоактивности и ионизирующих излучений	182
9. Систематика элементарных частиц	183
10. Превращение частиц	183
Таблицы и графики	184
Энергетические уровни атома водорода	184
Табл. 132. Схема заполнения слоев и оболочек атома	185
Периодическая система элементов	186
Табл. 133. Распределение электронов во внешних оболочках	188
Табл. 134. Основные линии рентгеновского характеристического спектра некоторых элементов (K-серия)	189
Табл. 135. Относительная атомная масса, процентное содержание и активность легких изотопов	189
Табл. 136. Некоторые радиоактивные изотопы и их характеристики	190
Табл. 137. Некоторые искусственно полученные элементы	191
Табл. 138. Элементарные частицы	192
Табл. 139. Моменты импульсов I и магнитные моменты μ ядер	193
Табл. 140. Массовые коэффициенты поглощения рентгеновских лучей	193
Табл. 141. Источники излучения и детекторы для обнаружения элементарных частиц	194
Табл. 142. Массовые коэффициенты поглощения электронов в алюминии	194
Табл. 143. Эффективные сечения нейтронов	195
Табл. 144. Предельно допустимые дозы облучения	195
Табл. 145. Профог α -частиц в воздухе, биологической ткани и алюминии	196
Компоненты полного поглощения γ -лучей в свинце и алюминии	196
Удельная энергия связи нуклона в ядре	196
Примеры ядерных реакций	197
Деление ядер	197
Синтез ядер	198

ПРИЛОЖЕНИЯ

I.	Некоторые часто встречающиеся числа	199
II.	Формулы для приближенных вычислений	199
III.	Элементы теории ошибок	199
IV.	Множители для образования десятичных кратных и дольных единиц	200
V.	Соотношения между единицами различных систем	201
VI.	Физические константы	202
VII.	Сравнительная таблица размеров единиц Международной системы (СИ) и гауссовой системы (СГС)	202
VIII.	Основные уравнения электродинамики, записанные в Международной системе (СИ) и гауссовой системе (СГС)	204
	Предметный указатель	205

ПРЕДИСЛОВИЕ К ВОСЬМОМУ ИЗДАНИЮ

Со времени выхода первого издания в 1960 г. претерпели значительные изменения многие понятия и наименования единиц физических величин. Поэтому все главы восьмого издания, включая таблицы и графики, переработаны и дополнены, устаревшие понятия заменены современными; используется Международная система единиц (СИ) в соответствии со стандартом СЭВ 1052-78 «Единицы физических величин».

Для справок в приложении даны сведения о гауссовой системе (СГС) и некоторых внесистемных единицах.

Авторы благодарны проф. А. Г. Чертову за ряд замечаний, которые были сделаны им при редактировании рукописи, особенно по применению единиц Международной системы.

Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЯТОМУ ИЗДАНИЮ

Во всех главах пятого издания, особенно в разделах «Основные понятия и законы», проведены значительные изменения и дополнения, которые позволили дать более строгое определение физических понятий, а также сформулировать основные законы.

Во введении даны понятие вектора и сведения о системах единиц.

В главах «Механика» и «Электричество», в отличие от предыдущих изданий, рассматриваются такие векторные величины, как импульс тела, момент импульса, магнитный момент и т. д.

Глава «Строение атома и элементарные частицы» переработана заново; в ней расширена вводная часть, увеличено число таблиц и графиков, устаревшие сведения заменены современными.

Авторы благодарят М. И. Блудова за ряд ценных замечаний, которые были учтены при подготовке этого издания.

Переработка справочника была проведена Н. И. Кошкиным.

Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Предлагаемый справочник охватывает все основные разделы элементарной физики. Каждая глава (или раздел главы) состоит из двух частей. В первой части кратко изложены основные понятия и законы; во второй части приводятся справочные таблицы и графики.

Теоретические сведения, изложенные в первой части, ни в коей мере не претендуют на полноту. Здесь даны основные определения и формулировки законов, иногда сопровождаемые небольшими пояснениями и примерами. Приводимые сведения не могут даже в отдаленной форме заменить учебник или специальное руководство по физике.

Помещенные в справочнике таблицы и графики также не претендуют на полноту охвата всех справочных сведений по тому или иному разделу физики. Из многочисленных сведений сделана попытка отобрать такие, которые наиболее часто используются в современной практике широким кругом специалистов промышленности и сельского хозяйства.

Особое внимание было обращено на подбор справочных сведений по новейшим областям физики (полупроводники, сегнетоэлектрики, физика ядра и т. п.).

Авторы приносят глубокую благодарность сотрудникам кафедр Московского областного педагогического института им. Н. К. Крупской В. Ф. Яковлеву, В. И. Родичеву и М. А. Горбунову за их полезные советы и помощь, которую они оказали при составлении этой книги.

Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич

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 численного значения величин.

Численные значения величин приводятся с точностью до двух-трех десятичных знаков, что вполне достаточно для большинства технических расчетов.

Число десятичных знаков в таблицах неодинаково. Это объясняется тем, что некоторые вещества можно получить в чистом виде, в то время как другие являются сложными смесями. Например, плотность платины дана с точностью до четырех значащих цифр: 21,46, а латуни — с точностью до двух значащих цифр: 8,4—8,7, так как плотность ее колеблется в этих пределах в зависимости от состава данного сорта латуни.

Если в таблицах или графиках имеется множитель типа 10^n , то это означает, что указанная в соответствующей графе таблицы величина в 10^n раз меньше истинной величины.

Например, в таблице 14 в третьем столбце имеется множитель 10^8 , в первой строке этой таблицы указано число 696; это означает, что радиус Солнца равен $696 \cdot 10^8$ м.

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

Если читателю не совсем ясен физический смысл величин в таблицах, то для правильного применения таблиц необходимо обратиться к соответствующему разделу «Основные понятия и законы». Справки по единицам физических величин можно найти в приложениях. В приложениях, кроме того, приведены формулы для приближенных вычислений.

ВВЕДЕНИЕ

Векторы и скаляры

В физике используются *скалярные* и *векторные* величины. Скалярные величины определяются числовым значением; величины, для определения которых необходимо знать числовое значение и направление, называются векторными. Числовое значение вектора называется *модулем*.

Векторы изображаются на чертежах в виде отрезков со стрелками на концах; длина отрезка равна (в определенном масштабе) модулю вектора, а направление отрезка со стрелкой соответствует направлению вектора. Два вектора равны друг другу, если они имеют равные модули и одинаковые направления.

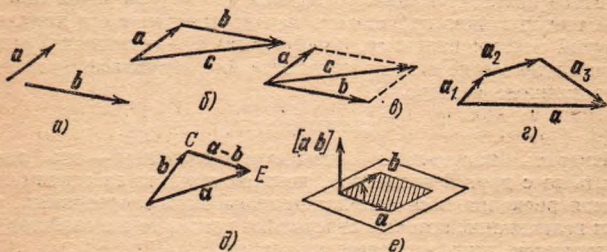


Рис. 1. Действия с векторами: графическое представление векторов (а); сложение векторов (б, в); разложение вектора на его составляющие (г); вычитание векторов (д); векторное произведение векторов (е).

Сложение двух векторов a и b (рис. 1, а) можно провести двумя способами. Первый способ (рис. 1, б); переносятся векторы a и b параллельно самим себе так, чтобы конец одного вектора совпал с началом другого вектора; тогда вектор, проведенный из начала первого вектора в конец другого вектора (c на рис. 1, б), равен сумме этих векторов. Эта сумма называется *векторной*. Вторым способом: переносятся векторы a и b параллельно самим себе так, чтобы начала их совместились (рис. 1, в). Тогда сумма векторов будет равна диагонали параллелограмма, построенного на этих векторах (на рис. 1, в сумма векторов равна c). Поэтому иногда говорят, что векторы складываются по правилу параллелограмма. Каждый вектор a (рис. 1, г) можно разложить на несколько векторов a_1, a_2 и т. д., которые в сумме дадут вектор a . Замена одного вектора суммой других векторов называется *разложением вектора на составляющие*. Например, составляющими вектора a на рис. 1, г являются векторы a_1, a_2, a_3 .

При умножении вектора на скалярную положительную величину получается вектор с тем же направлением, но с другим модулем; при умножении вектора на отрицательную скалярную величину направление его изменится на противоположное.

Определение разности двух векторов сводится к сложению уменьшаемого вектора \mathbf{a} с вектором, противоположным по направлению вычитаемому вектору \mathbf{b} . На рис. 1, δ вектор \mathbf{CE} равен разности $\mathbf{a}-\mathbf{b}$.

Скалярным произведением двух векторов \mathbf{a} и \mathbf{b} называется произведение их модулей $|\mathbf{a}|$ и $|\mathbf{b}|$ на косинус угла между ними, т. е. $\mathbf{ab} = ab \cos(\mathbf{a}, \mathbf{b})$. Угол между векторами всегда определяется 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-сомножители, и равный по модулю произведению модулей сомножителей на синус угла между ними, т. е. $|\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}| \sin(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ (рис. 1, ϵ). Векторное произведение обозначается следующим образом: $[\mathbf{ab}] = \mathbf{c}$.

Направление вектора \mathbf{c} определяется по правилу правого винта: если вращение винта соответствует повороту 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, $\mathbf{b} = |\mathbf{b}| \mathbf{b}_0$, где \mathbf{b}_0 — единичный вектор; единичный вектор не имеет размерности, его направление совпадает с направлением вектора \mathbf{b} .

Системы единиц

Измерить какую-либо физическую величину — это значит сравнить ее с другой величиной, которая принята за единицу. Измеряемая величина и ее единица должны быть однородными, т. е. такими величинами, которые определяют одно и то же свойство тел, но отличаются лишь числовым значением.

Единица физической величины — это физическая величина, которой по определению присвоено числовое значение, равное единице. Единицы разделяются на два вида — *основные* и *производные*. Размер основной единицы выбирается независимо от размеров других величин; размер производной единицы определяется физической зависимостью между этой величиной и другими величинами. Совокупность основных и производных единиц, связанных между собой определенными соотношениями, называется *системой единиц*.

В соответствии со стандартом СЭВ 1052-78 в физике используется Международная система единиц (СИ). Допускается также применение некоторых внесистемных единиц.

В СИ используются 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. Метр — длина, равная 1650763,73 длин волн в вакууме, излучаемых криптоном-86 и соответствующих оранжевому свету (т. е. переходу между уровнями $5d$ и $2p$, см. стр. 185). Килограмм — это масса международного прототипа — килограмма. Секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения атомов цезия-133 для спектральной линии сверхтонкой структуры (длина волны 3,26 см). Определение других основных единиц дано в тексте: ампер — стр. 125, кельвин — стр. 52, кандела — стр. 150, моль — стр. 58.

ГЛАВА I

МЕХАНИКА

Механическое движение — изменение со временем положения тела относительно других тел. Положение тела в пространстве в соответствующий момент времени определяется относительно выбранной системы отсчета. Системой отсчета называется тело, с которым связаны система координат и ряд синхронных часов.

А. КИНЕМАТИКА

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

Кинематика изучает движение тел, не рассматривая причин, вызывающих это движение.

Простейшим движущимся телом является материальная точка. *Материальной точкой* называется тело, размерами которого можно пренебречь при описании его движения. Например, годичное движение Земли вокруг Солнца можно представлять как движение материальной точки, а суточное вращение Земли вокруг своей оси — уже нельзя.

Всякое твердое тело можно рассматривать как систему жестко связанных друг с другом материальных точек.

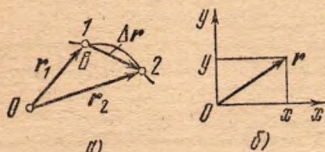
Линия, описываемая движущейся материальной точкой, называется *траекторией*. Движения разделяются по виду траектории на *прямолинейные* (траектория — прямая) и *криволинейные* (траектория — кривая). По своему характеру движение может быть равномерным или переменным.

1. Перемещение, скорость, ускорение

Простейшим видом движения является равномерное движение. *Равномерным* движением называется такое движение, при котором точка в любые равные промежутки времени проходит равные расстояния; в противном случае движение называется *переменным*. *Скоростью* равномерного движения (v) называется величина, измеряемая длиной пути (s), проходимого в единицу времени (t): $v=s/t$. При описании движения материальной точки используются три способа.

Первый способ. Положение точки B определяется радиусом-вектором r_1 , который проводится из неподвижной точки O (рис. 2, а). При движении за промежутков времени Δt точка B смещается из

положения 1 в положение 2, а радиус-вектор точки в новом положении будет r_2 . Разность векторов $r_2 - r_1 = \Delta r$ называется *перемещением*, отношение $\Delta r / \Delta t$ — *средней скоростью*.



Скоростью в данный момент времени (или мгновенной скоростью) называется

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = v. \quad (1.1)$$

Скорость — величина векторная. Единицы скорости — метр в секунду (м/с), сантиметр в секунду (см/с), километр в час (км/ч).

Ускорением движущейся точки называется

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = a, \quad (1.2)$$

где Δv — изменение вектора скорости за промежуток времени Δt . Вектор ускорения определяет скорость изменения вектора скорости.

Рис. 2. Три способа определения положения точки: а — векторный; б — координатный; в — по траектории.

Единицей ускорения является метр на секунду в квадрате (м/с²).

Если при движении точки ускорение остается постоянным ($a = \text{const}$), то такое движение называется *равнопеременным*; в этом случае

$$v = v_0 + at, \quad (1.3)$$

$$r = r_0 + v_0 t + at^2/2, \quad (1.4)$$

где v_0, r_0 — скорость и радиус-вектор в начальный момент времени ($t=0$). При равнопеременном движении точка смещается по прямолинейной траектории, если $v_0 \parallel a$; тогда уравнения (1.3) и (1.4) можно записать в скалярной форме:

$$v_t = v_0 + at, \quad s = v_0 t + at^2/2, \quad (1.5)$$

где v_t — скорость в момент времени t , v_0 — скорость в момент начала отсчета времени ($t=0$), s — пройденный путь за время t .

Ускорение может быть положительным (ускоренное движение) и отрицательным (замедленное движение).

Из (1.5) следует

$$v_t^2 = v_0^2 + 2as. \quad (1.6)$$

Частным случаем прямолинейного движения с постоянным ускорением является падение тел с небольшой высоты (много меньшей радиуса Земли). Если обозначить высоту h , время падения t ($v_0=0$), ускорение свободного падения g , то

$$h = gt^2/2. \quad (1.7)$$

Второй способ. Определяются проекции по осям Ox, Oy, Oz радиуса-вектора r , проведенного из начала координат (рис. 2, б), в зависимости от времени: $x=x(t), y=y(t), z=z(t)$, а затем проекции векторов скорости v_x, v_y, v_z и проекции ускорения a_x, a_y, a_z

на те же самые оси; например: $v_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}$, $a_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_x}{\Delta t}$ и т. д. Модуль вектора скорости $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$, модуль вектора ускорения $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$.

Третий способ. Положение движущейся точки определяется расстоянием l , которое отсчитывается от выбранного начала отсчета (например, точки l на рис. 2, в) вдоль траектории; расстояние l называется дуговой координатой. Устанавливается положительное направление отсчета дуговой координаты и определяется зависимость ее от времени.

Модуль скорости

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta l}{\Delta t}. \quad (1.8)$$

Вектор скорости \mathbf{v}_τ направлен по касательной к траектории в сторону перемещения точки; скорость изменяется и по модулю, и по направлению. На рис. 2, в указаны вектор скорости \mathbf{v}_1 в момент времени t в точке 1 и вектор скорости \mathbf{v}_2 в точке 2 в момент времени $t + \Delta t$; за промежуток времени Δt полное изменение скорости $\Delta \mathbf{v} = \Delta \mathbf{v}_\tau + \Delta \mathbf{v}_n$; $\Delta \mathbf{v}_\tau$ — изменение скорости по модулю, $\Delta \mathbf{v}_n$ определяет изменение направления скорости.

Ускорение точки можно представить состоящим из двух частей — скорости изменения модуля $\Delta \mathbf{v}_\tau$ и скорости изменения модуля $\Delta \mathbf{v}_n$, т. е.

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}_\tau}{\Delta t} = \mathbf{a}_\tau, \quad \mathbf{a}_\tau = a_\tau \boldsymbol{\tau}, \quad (1.9)$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}_n}{\Delta t} = \mathbf{a}_n, \quad \mathbf{a}_n = a_n \mathbf{n}, \quad (1.10)$$

где $\boldsymbol{\tau}$ — единичный вектор, направленный по касательной, \mathbf{n} — единичный вектор, направленный по нормали к траектории.

Векторы \mathbf{a}_τ , \mathbf{a}_n называются *тангенциальным* и *нормальным* ускорениями соответственно; \mathbf{a}_τ направлен по касательной к траектории, \mathbf{a}_n направлен перпендикулярно \mathbf{a}_τ к центру кривизны;

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

где v_τ — тангенциальная скорость, определяемая по соотношению (1.8), ρ — радиус кривизны траектории.

При движении по криволинейной траектории модуль полного ускорения

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

2. Вращательное движение

Круговым движением точки около некоторой оси называется такое движение, при котором траекторией точки является окружность с центром на этой оси, причем плоскость окружности перпендикулярна к этой оси. Вращательным движением тела вокруг некоторой оси называется такое движение, при котором все точки тела совершают круговое движение около этой оси.

При вращении тела вектор, определяющий положение любой точки тела по отношению к оси вращения (начало отсчета в центре траектории — окружности), поворачивается на угол φ .

Равномерным вращением называется такое движение, при котором тело за любые равные промежутки времени поворачивается на один и тот же угол.

Угловая скорость ω равномерного вращения — величина, измеряемая углом поворота за единицу времени:

$$\omega = \varphi/t, \quad (1.13)$$

где φ — угол поворота за время t , измеряемый в радианах (рад). Угловая скорость может быть выражена через частоту вращения (число оборотов в единицу времени) n или период вращения T :

$$\omega = 2\pi n = 2\pi/T. \quad (1.14)$$

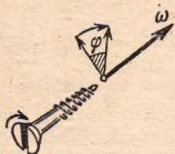


Рис. 3. Правило правого винта для определения направления угловой скорости.

Угловая скорость — величина векторная; направление вектора угловой скорости ω определяется по правилу правого винта (рис. 3): если головку винта вращать по направлению вращения тела, то поступательное перемещение винта соответствует направлению ω ; этот вектор направлен вдоль оси вращения.

Единица угловой скорости — радиан в секунду (рад/с).

Линейной скоростью точки во вращательном движении называется ее мгновенная скорость v_t (см. (1.8)):

$$v_t = [\omega R], \quad \text{модуль } v_t = \omega R, \quad (1.15)$$

где R — радиус-вектор, проходящий через точку перпендикулярно к оси вращения.

В случае неравномерного вращательного движения различают *мгновенную и среднюю угловые скорости*. Если за время от момента t до момента $t + \Delta t$ тело повернулось на угол $\Delta\varphi$, то средней угловой скоростью (ω_c) за промежуток времени Δt называется отношение $\omega_c = \Delta\varphi/\Delta t$.

По определению, мгновенная угловая скорость в момент времени t

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta\varphi/\Delta t. \quad (1.16)$$

Угловым ускорением ε называется величина, измеряемая скоростью изменения угловой скорости; по определению модуль углового ускорения

$$\varepsilon = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta\omega/\Delta t, \quad (1.17)$$

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

Вращение, при котором за любые равные промежутки времени угловая скорость изменяется на одну и ту же величину, называется *равнопеременным*. При равнопеременном вращении $\varepsilon = \text{const}$.

Угловое ускорение — величина векторная. Вектор углового ускорения ε совпадает по направлению с вектором ω , если угловая скорость увеличивается; при уменьшении угловой скорости направление вектора ε противоположно направлению ω .

Единица углового ускорения — радиан на секунду в квадрате (рад/с²).

Если равнопеременное вращательное движение характеризовать частотой вращения n , которая равна количеству оборотов в единицу времени, то угловое ускорение

$$\varepsilon^* = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta n}{\Delta t}, \quad (1.17a)$$

где Δn — изменение частоты вращения за промежуток времени Δt .

Угловая скорость ω равнопеременного вращения и частота оборотов n по истечении времени t после начала вращения равны соответственно

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon t, \quad n = n_0 + \varepsilon^* t, \quad (1.18)$$

где ω_0 и n_0 — угловая скорость и частота вращения в момент начала отсчета времени.

Угол поворота при равнопеременном вращении

$$\varphi = \omega_0 t + \frac{1}{2} \varepsilon t^2. \quad (1.19)$$

При равномерном вращении вокруг неподвижной оси все точки тела движутся с ускорением, так как направление их скорости все время изменяется. Нормальное ускорение в этом случае направлено к оси вращения (т. е. перпендикулярно к направлению линейной скорости); оно называется центростремительным ускорением:

$$a_{ц} = v^2/R = \omega^2 R, \quad (1.20)$$

где v — линейная скорость, ω — угловая скорость, R — радиус окружности, по которой вращается точка.

3. Инерциальные и неинерциальные системы отсчета

Скорость и ускорение зависят в общем случае от системы отсчета. Пусть система отсчета K' движется относительно системы K со скоростью \mathbf{v}_0 и ускорением \mathbf{a}_0 ; если в системе K' скорость точки \mathbf{v}' , а ускорение \mathbf{a}' , то в системе K скорость и ускорение будут выражаться следующими формулами:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}', \quad \mathbf{a} = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}'. \quad (1.21)$$

Если система K' движется относительно системы K с постоянной скоростью ($\mathbf{v}_0 = \text{const}$, $\mathbf{a}_0 = 0$), то $\mathbf{a} = \mathbf{a}'$.

Системы отсчета, которые движутся относительно друг друга с постоянной скоростью, называются *инерциальными системами*; в инерциальных системах ускорения одинаковы. В частном случае, когда \mathbf{v}_0 постоянна и направлена вдоль оси Ox (см. рис. 4), а координатные оси в обеих системах параллельны, координаты связаны согласно *преобразованиям Галилея*:

$$x' = x - v_0 t, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t \quad (1.22)$$

(величины со штрихами относятся к системе K').

При больших скоростях преобразования Галилея оказываются недостаточными; они заменяются *преобразованиями Лоренца*. Для

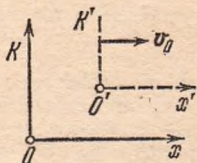


Рис. 4. Схема расположения инерциальных систем отсчета.

частного случая ($v_0 \parallel Ox$), который рассматривается ниже, эти преобразования записываются в следующей форме:

$$x' = \frac{x - v_0 t}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{xv_0}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (1.23)$$

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

При малых скоростях ($v_0 \ll c$) преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея. Согласно преобразованиям Лоренца продольные размеры отрезка в движущейся системе сокращаются:

$$l' = l_0 \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (1.24a)$$

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

Промежутки времени в движущейся системе отсчета увеличиваются:

$$\tau' = \tau_0 / \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (1.24b)$$

где τ_0 — местное время (промежуток времени, измеренный 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)

$$v'_x = \frac{v_x - v_0}{1 - v_x v_0 / c^2}, \quad v'_y = \frac{v_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - v_x v_0 / c^2}. \quad (1.25)$$

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

Если неинерциальная система K' вращается с постоянной угловой скоростью ω вокруг оси, а точка смещается относительно K' со скоростью \mathbf{v}' , то в системе K скорость этой точки

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}' + [\omega, \mathbf{r}], \quad (1.26)$$

ускорение \mathbf{a} точки в системе K состоит из трех частей:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}' + 2[\omega, \mathbf{v}'] - \omega^2 \mathbf{r}, \quad (1.27)$$

где \mathbf{a}' — ускорение в системе K' , \mathbf{r} — радиус-вектор вращающейся точки, проведенный из произвольной точки оси вращения системы K' , \mathbf{r} — радиус-вектор, проведенный перпендикулярно к оси вращения. Вектор $2[\omega, \mathbf{v}']$ определяет *кориолисово (поворотное) ускорение*, вектор $\omega^2 \mathbf{r}$ — *осеостремительное ускорение*.

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

4. Движение тел в земном поле 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 $a_3 = \omega_3^2 R_3$ (см. (1.20)); 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), ею можно пренебречь и считать систему

отсчета, связанную с Землей, инерциальной; ниже используется такая инерциальная система.

На рис. 5, а показаны траектории тел, вылетевших из точки А, лежащей вблизи поверхности Земли, с различными скоростями *). Во всех случаях скорость направлена горизонтально. Траекторией тела является окружность, если скорость тела v в точке А такова, что ускорение свободного падения g равно центростремительному ускорению v^2/R (R — радиус траектории, который при небольшой высоте можно принять равным радиусу земного шара). Отсюда

$$v_1 = \sqrt{Rg} = 7,93 \text{ км/с.}$$

Эта скорость называется *первой космической скоростью*. Если скорость тела в точке А больше 7,93 км/с, но меньше 11,16 км/с, то траектория тела представляет собой эллипс, причем его фокус, ближайший к точке вылета, находится в центре Земли (на рис. 5, а

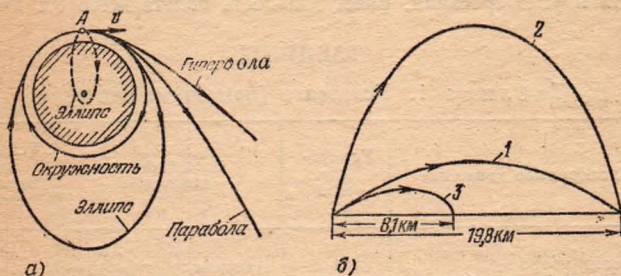


Рис. 5. Траектории движения тел в поле тяготения Земли: а — в неоднородном поле тяготения при больших скоростях; б — в однородном поле тяготения (вблизи поверхности при небольших скоростях). Начальная скорость для указанных траекторий на рис. 5, б $v_0=550$ м/с, кривая 1 относится к случаю $\alpha=20^\circ$, кривая 2 — к случаю $\alpha=70^\circ$, кривая 3 — $\alpha=20^\circ$, но с учетом сопротивления воздуха.

этот эллипс изображен сплошной линией). Если скорость тела $v_2=11,16$ км/с (это — *вторая космическая скорость*), то его траектория — парабола. При начальной скорости, большей 11,16 км/с, траектория тела станет гиперболой. В последних двух случаях тело покинет Землю и уйдет в межпланетное пространство. Наименьшую скорость, при которой тело покинет Землю, иногда называют *скоростью освобождения*. Если скорость тела меньше 16,67 км/с — *третьей космической скорости*, то, покинув Землю, тело останется спутником Солнца. При скоростях больше 16,67 км/с тело может покинуть Солнечную систему. При движении тела со скоростями, меньшими 7,93 км/с, траектории движущегося тела представляют собой отрезки эллипса (изображенного на рис. 5, а пунктиром), дальний фокус которого совпадает с центром Земли.

При движении со скоростями, значительно меньшими 7,93 км/с, эти отрезки можно считать отрезками парабол.

Если тело брошено с поверхности Земли под углом α к ней с начальной скоростью v_0 , значительно меньшей 7,93 км/с, то ускорение свободного падения также можно считать постоянным как

*) Сопротивление воздуха не учитывается.

по величине, так и направлению, а поверхность Земли рассматривать как плоскую. В этом случае траекторией является парабола (рис. 5, б), а дальность полета (s) и наибольшая высота подъема (H) вычисляются по формулам

$$s = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}, \quad H = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}. \quad (1.28)$$

Одна и та же дальность полета может быть получена при двух значениях угла бросания: 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. Если, например, при отсутствии сопротивления воздуха, угле бросания $\alpha = 20^\circ$ и начальной скорости $v_0 = 550$ м/с тело имело бы дальность полета 19,8 км, то снаряд, движущийся в воздухе при таких же значениях начальной скорости и угла бросания, имеет дальность полета всего 8,1 км.

ТАБЛИЦЫ

Таблица 1. Ускорения (примерные значения)

Ускоренное движение	Ускорение, м/с ²	Замедленное движение	Ускорение (отриц.), м/с ²
Поезд метро	1	Аварийное торможение автомобиля	4—6
Гоночный автомобиль	4,5	Реактивный самолет при посадке	5—8
Скоростной пассажирский лифт	0,9—1,6	Парашютист во время наполнения купола парашюта при скорости падения 60 м/с	около 60
Пассажирский поезд	0,35		
Трамвай	0,6		
Запуск ракеты	30—90		
Снаряд в стволе орудия	100 000		

Таблица 2. Кинематические параметры планет

(период обращения вокруг Солнца T_C , период вращения вокруг оси T_0 , орбитальная скорость v_0 , скорость освобождения v , число спутников N)

Планеты	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	247 ± 5 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	57,5	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)		27 сут 7 ч 43 мин 11 с	1,02	2,37	—

Таблица 3. Первая v_1 и вторая v_2 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	H , 10^3 км	v_1 , км/с	v_2 , км/с
0	7,9	11,19	5	5,92	8,37	30	3,31	4,68
0,5	7,62	10,77	10	4,93	6,98	40	2,94	4,15
1	7,35	10,40	20	3,89	5,50	50	2,66	3,76
2	6,90	9,76						

Таблица 4. Период обращения T спутника Земли на разных высотах (H) *)

H , км	T , ч	H , км	T , ч	H , км	T , ч
0	1,41	1000	1,75	5 000	3,35
250	1,49	1500	1,93	10 000	5,78
500	1,58	1690	2,00	35 800 **)	23,935
750	1,68	2000	2,12		

*) 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.

Б. ДИНАМИКА

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

Динамика рассматривает законы движения тел и причины, вызывающие или изменяющие это движение. Изменение движения тел или изменение их формы происходит в результате взаимодействия по меньшей мере двух тел.

Силой называется физическая величина, характеризующая взаимодействие тел; она определяет изменение движения тела, или изменение формы тела, или то и другое вместе.

Сила — величина векторная. Две силы, действующие на тело, складываются по правилу параллелограмма (векторно).

1. Законы динамики

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

Свойство тел сохранять скорость (по модулю и направлению), когда на них не действуют силы (или действуют уравновешенные силы), называется *инерцией* (или *инертностью*). Изменение движения тела определяется не только действующей на него силой,

но и свойствами самого тела. Физическая величина, характеризующая меру инерции (инертности) тела, называется *массой*. Кроме того, масса входит в закон всемирного тяготения (см. стр. 27), где она характеризует меру гравитационного взаимодействия тел. Следовательно, можно различать массу *инертную* и массу *гравитационную*. Однако все опытные факты говорят о том, что инертная масса тела равна его гравитационной массе. Поэтому говорят, что масса тела является мерой как инерционных, так и гравитационных свойств тела.

Второй закон Ньютона. Ускорение тела в результате действия на него силы F пропорционально величине этой силы и обратно пропорционально массе тела m . Направление ускорения совпадает с направлением силы:

$$a = k \frac{F}{m}. \quad (1.29)$$

Единицы силы или массы выбирают таким образом, чтобы коэффициент k был равен единице.

В СИ за единицу силы принимается такая сила, которая телу массой в 1 кг сообщает ускорение 1 м/с². Эта единица называется ньютоном (Н).

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

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n. \quad (1.30)$$

Произведение массы тела на его скорость называется *импульсом* тела (или *количеством движения*): $p = mv$. Импульс — величина векторная, совпадающая по направлению со скоростью. Единица импульса — килограмм-метр в секунду (кг·м/с). Второй закон Ньютона можно записать через импульс тела:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta p}{\Delta t} = F, \text{ или } \frac{dp}{dt} = F, \quad (1.31)$$

где Δp — изменение импульса тела за промежуток времени Δt под действием силы F .

Таким образом, изменение импульса тела за единицу времени равно действующей силе (и по модулю, и по направлению).

Третий закон Ньютона. Силы, с которыми два тела действуют друг на друга, направлены по одной прямой, равны по модулю, но противоположны по направлению:

$$F_{12} = -F_{21}, \text{ или } m_1 a_1 = -m_2 a_2, \quad (1.32)$$

где F_{12} — сила, приложенная к первому телу, F_{21} — ко второму телу, m_1, m_2 — массы соответственно первого и второго тел, a_1, a_2 — их ускорения.

Законы Ньютона справедливы лишь в инерциальных системах. Математическое выражение второго закона Ньютона является *основным уравнением динамики материальной точки*:

$$F = ma. \quad (1.33)$$

В неинерциальных системах в основном законе динамики материальной точки, кроме силы F , учитываются *силы инерции*. Например, если неинерциальная система K' вращается вокруг оси с постоянной

угловой скоростью ω , а ось перемещается поступательно с ускорением a_0 относительно K -системы, то ускорение в K' -системе (см. (1.27))

$$a' = a - a_0 + \omega^2 \rho + 2[\mathbf{v}'\omega], \quad (1.34)$$

где \mathbf{v}' — скорость точки относительно K' -системы, a — ускорение в K -системе. После умножения (1.34) на m получаем основное уравнение движения материальной точки в неинерциальной системе отсчета:

$$ma' = F - ma_0 + m\omega^2 \rho + 2m[\mathbf{v}'\omega], \quad (1.35)$$

где $F_{\text{и}} = -ma_0$ — сила инерции, обусловленная поступательным движением неинерциальной системы отсчета, $F_{\text{цб}} = m\omega^2 \rho$ — центробежная сила инерции, $F_{\text{к}} = 2m[\mathbf{v}'\omega]$ — сила Кориолиса.

Силы инерции имеют характерные особенности: они не отражают взаимодействия тел, а обусловлены характером неинерциальных систем. Поэтому для сил 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. Физические процессы в однородном поле тяготения происходят так же, как в однородном поле сил инерции такой же величины (принцип эквивалентности общей теории относительности).

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 импульса: векторная сумма импульсов тел в замкнутой системе является величиной постоянной: $\sum \mathbf{p}_i = \text{const}$. Например, для 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 — после взаимодействия.

Закон сохранения импульса 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 (например, в условиях невесомости). Такие специальные случаи имеют частный характер.

Закон сохранения импульса является фундаментальным законом природы; он применяется не только для изучения механических систем, но и при исследовании электромагнитного излучения (см. стр. 143). В последнем случае необходимо учитывать импульсы фотонов электромагнитного поля.

При небольших скоростях движения ($v \ll c$) справедливы преобразования Галилея, законы Ньютона одинаковы во всех инерциальных системах отсчета; массы, ускорения и силы в таких системах одинаковы. При больших скоростях ($v \sim c$) следует учитывать зависимость массы от скорости:

$$m = m_0 / \sqrt{1 - \beta^2},$$

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 сила F преобразуется согласно преобразованиям Лоренца (см. стр. 20) следующим образом: проекции силы, перпендикулярные вектору относительной скорости систем отсчета, различны, параллельные проекции остаются неизменными, т. е. $F'_x = F_x$, $F'_z = F_z \sqrt{1-\beta^2}$, $F'_y = F_y \sqrt{1-\beta^2}$ (относительная скорость параллельна оси Ox , $Ox \parallel Ox'$, $Oy \parallel Oy'$, $Oz \parallel Oz'$).

Максимальное значение проекция имеет в той системе, относительно которой тело находится в покое. Вектор ускорения и вектор силы в общем случае не совпадают по направлению.

2. Динамика вращательного движения

Для описания вращательного движения вводятся следующие понятия: *момент силы*, *момент импульса*, *момент инерции*. Указанные величины определяются или относительно точки, или относительно оси.

Моментом силы относительно точки O называется вектор (рис. 6,а)

$$M = [r, F]; \text{ его модуль } M = Fr \sin \beta, \quad (1.36)$$

где 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 r и F).

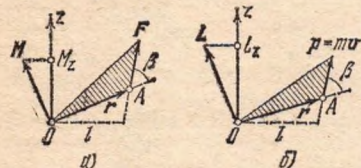


Рис. 6. К определению момента силы (а) и момента импульса (б).

Моментом импульса частицы относительно точки O называется вектор (рис. 6,б) $L = [rp]$; его модуль

$$L = pr \sin \beta, \quad (1.37)$$

где $p = mv$ — импульс частицы; модуль L равен произведению модуля p на плечо $l = r \sin \beta$, β — угол между r и v .

Моментом инерции материальной точки (частицы) относительно точки O называется скалярная величина mr^2 (m — масса частицы).

Единицы момента силы — ньютон-метр (Н·м), момента импульса — килограмм-метр в квадрате на секунду ($\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$), момента инерции — килограмм-метр в квадрате ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$).

Основной закон вращательного движения частицы относительно точки можно сформулировать следующим образом: скорость изменения момента импульса равна моменту сил, действующих на частицу, т. е.

$$M = \Delta L / \Delta t; \text{ более строго, } M = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{dL}{dt}. \quad (1.38)$$

Это уравнение называется *уравнением моментов*. В неинерциальной системе отсчета в момент M включаются и моменты сил инерции.

Моментом силы относительно оси Oz называется проекция момента силы M на эту ось (обозначается M_z , см. рис. 6,а).

Моментом импульса относительно оси Oz называется проекция момента импульса L на эту ось (обозначается L_z см. рис. 6,б).

Моменты силы и импульса относительно оси не зависят от выбора точки O на оси; это — величины скалярные.

Пример. Равномерное движение точки по окружности характеризуется центростремительным ускорением (обуславливающим изменение направления скорости) и может существовать только при наличии силы, создающей это ускорение. Эта сила приложена к движущейся по окружности точке и называется *центростремительной*; модуль центростремительной силы

$$F_{\text{ц}} = mv^2/R = m\omega^2 R. \quad (1.39)$$

Центростремительная сила направлена по радиусу к оси вращения; ее момент относительно оси вращения равен нулю (равно нулю плечо этой силы).

Основное уравнение динамики вращения твердого тела (для неподвижной оси):

$$I\varepsilon_z = M_z, \quad (1.40)$$

где M_z — момент всех внешних сил относительно оси вращения, ε_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 рассчитывается по *теореме Штейнера*:

$$I = I_{\text{ц}} + mb^2, \quad (1.41)$$

где $I_{\text{ц}}$ — момент инерции этого тела относительно оси, параллельной данной и проходящей через центр тяжести тела (см. стр. 38), b — 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 угла и направление оси Oz связаны правилом правого винта. Если момент силы производит вращение по направлению угла φ , то момент считается положительным.

В инерциальных системах отсчета векторная сумма моментов импульсов замкнутой системы частиц является постоянной величиной (*закон сохранения момента импульса*):

$$\sum L_i = \text{const.} \quad (1.42)$$

Этот закон распространяется и на другие физические процессы. Закон сохранения момента импульса наряду с другими законами сохранения является фундаментальным законом.

3. Закон всемирного тяготения

Две материальные точки, имеющие массы m_1 и m_2 , притягиваются друг к другу с силой

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{R^2}, \quad (1.43)$$

где R — расстояние между точками, а γ — гравитационная постоянная, равная $6,67 \cdot 10^{-11}$ м³/(кг·с²). Гравитационная постоянная численно равна силе притяжения двух материальных точек, которые

имеют массы, равные единице, и находятся на расстоянии, равном единице. В случае однородных шаров с массами m_1 и m_2 сила взаимодействия выражается той же формулой, причем R означает расстояние между центрами шаров.

Сила тяготения между телом массы m , расположенном на поверхности Земли, и Землей

$$F = \gamma \frac{Mm}{R_3^2}, \quad (1.44)$$

где M — масса Земли, а R_3 — радиус земного шара.

Притяжение тел осуществляется посредством *гравитационного поля* (поля тяготения). *Напряженностью поля тяготения* G_r называется физическая величина, численно равная силе, действующей на тело массой в 1 кг, помещенное в данную точку поля: $G_r = F/m$.

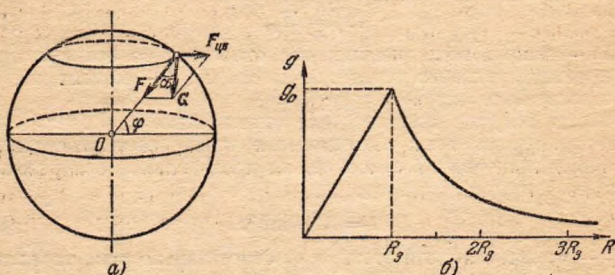


Рис. 7. а) Направление силы тяготения F и силы тяжести G Земли. б) Ускорение свободного падения на различных расстояниях от центра Земли; последняя принята за однородный шар.

Все тела в данной точке Земли падают с одинаковыми ускорениями относительно ее поверхности; ускорение g при свободном падении приблизительно равно G_r . Вследствие суточного вращения Земли, ускорение g будет обусловлено векторной суммой двух сил — силой притяжения Земли F (см. (1.44)) и центробежной силой инерции $F_{цб} = m\omega^2\rho$ (см. (1.35)); система отсчета, связанная с Землей, будет неинерциальной. Равнодействующая $F + F_{цб} = G$ называется *силой тяжести*; ускорение свободного падения совпадает с направлением этой равнодействующей (рис. 7, а).

Сила тяжести тела с массой m определяется следующим выражением:

$$G = mg. \quad (1.45)$$

Сила тяжести G и сила тяготения F незначительно отличаются друг от друга, угол α между ними (см. рис. 7, а) равен $\sim 0,0018 \sin 2\varphi$ (φ — широта). Вес $P = G - ma$, где a — ускорение тела (с опорой) относительно Земли; если $a = 0$, то $P = G$; в невесомости $a = g$, $P = 0$, но $G \neq 0$.

Направление G совпадает с направлением отвеса; сила тяготения F всегда направлена к центру Земли; обе силы совпадают по направлению лишь на полюсах, где $G = F$, и на экваторе, где $G = F - F_{цб}$. Вследствие этого и ввиду отличия Земли от шарообразной формы, ускорение свободного падения зависит от широты (см. табл. 13). Ускорение свободного падения (напряженность поля

тяготения) на высоте H от поверхности Земли выражается формулой

$$g = \gamma \frac{M_3}{(R_3 + H)^2},$$

или

$$g = g_0 \frac{R_3^2}{(R_3 + H)^2}, \quad (1.46)$$

где g_0 — ускорение на поверхности Земли.

В первом приближении при $H \ll R_3$

$$g = g_0 \left(1 - 2 \frac{H}{R_3} \right). \quad (1.47)$$

В центре Земли напряженность поля тяготения равна нулю. Если Землю принять за однородный шар, то по мере удаления от центра Земли g растет. Вне Земли по мере удаления от центра Земли g убывает; зависимость ускорения g от расстояния до центра Земли изображена графиком (рис. 7,б).

4. Силы трения

Если твердое тело перемещается относительно другого твердого тела, причем их поверхности соприкасаются, то возникает сила, препятствующая этому перемещению. Такая сила называется *силой трения*. Она объясняется неровностью трущихся поверхностей, а также силами молекулярного взаимодействия. Если между поверхностями соприкасающихся твердых тел отсутствует прослойка жидкости, то такое трение называется *сухим*.

Если на покоящееся на плоской поверхности тело действует сила, направленная параллельно поверхности соприкосновения тел, то движение тела начинается только при определенной величине действующей силы. Эта величина

силы определяет максимальное значение силы трения покоя.

Сухое трение разделяется по характеру движения на *трение скольжения* (одно тело скользит по поверхности другого) и *трение качения* (одно тело катится по поверхности другого).

Сила трения F_T скольжения зависит от природы и качества обработки соприкасающихся поверхностей, а также от силы, прижимающей трущиеся поверхности (силы нормального давления F_N):

$$F_T = f F_N, \quad (1.48)$$

где f — коэффициент трения, зависящий от природы и качества обработки трущихся поверхностей; незначительно f зависит и от относительной скорости движения (этой зависимостью обычно пренебрегают). Коэффициент трения покоя f_n меняет свое значение с изменением абсолютного значения приложенной к телу силы, однако $0 \leq f_n \leq f$, где f — коэффициент трения скольжения.

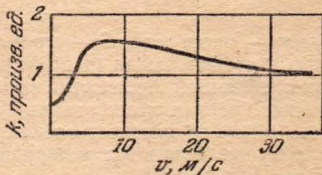


Рис. 8. Зависимость силы трения от скорости движения стальной пластинки по стальной поверхности.

На рис. 8 приводится примерная зависимость силы трения от скорости стальной пластинки по стальной поверхности. Значения величины f приведены в табл. 12.

Трение качения меньше, чем трение скольжения. Сила трения качения зависит от радиуса R катящегося тела, силы нормального давления и качества соприкасающихся поверхностей:

$$F_T = k \frac{F_H}{R}, \quad (1.49)$$

где k — величина, характеризующая соприкасающиеся поверхности; она имеет размерность длины.

В качестве примера можно привести следующие значения k (см.):

Колесо со стальным бандажом по стальному рельсу... 0,05

Чугунное колесо по стальному рельсу... 0,12

5. Плотность вещества

Плотностью ρ вещества называется физическая величина, равная массе, заключенной в единице объема. Иногда пользуются величиной, которая называется *удельным весом*. Удельный вес (d) — физическая величина, равная весу единицы объема вещества,

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1.50)$$

$$d = \frac{G}{V}, \quad (1.51)$$

где m — масса тела, G — его вес, V — объем. В технике по отношению к неоднородным (например, сыпучим) телам пользуются понятием *объемной плотности*. *Объемной плотностью* называется величина, равная массе единицы объема данного вещества. При расчете объемной плотности объем определяется, включая промежутки в сыпучих и рыхлых материалах (песок, зерно, каменный уголь, дрова и т. д.).

Единица плотности — килограмм на кубический метр (кг/м^3), удельного веса — ньютон на кубический метр (Н/м^3).

6. Работа, мощность, энергия

Работа силы — физическая величина, равная произведению силы на перемещение; она является мерой передачи движения от одного тела к другому. Если направление силы F не совпадает с перемещением s , то работа

$$A = Fs = F_s \cos \alpha, \quad (1.52)$$

где α — угол между векторами F и s .

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

Работа при повороте на угол φ при вращательном движении в случае постоянного момента силы M равна

$$A_B = M\varphi. \quad (1.53)$$

Мощностью (N) называется величина, равная работе, совершаемой в единицу времени:

$$N = A/t = Fv, \quad (1.54)$$

где F — сила, v — скорость.

Мощность вращающегося тела

$$N_B = M\omega, \quad (1.55)$$

где ω — угловая скорость, M — момент силы.

Область пространства, где обнаруживается действие сил, изменяющихся по определенному закону, называется *полем сил*; независимое от времени поле сил называется *стационарным*.

Если работа сил при перемещении между двумя любыми точками стационарного поля не зависит от формы пути, а зависит лишь от положения этих точек, то такое поле называется *потенциальным*, а силы — *консервативными*; силы тяжести, кулоновские силы взаимодействия точечных зарядов (см. стр. 94) являются консервативными силами; силы трения и сопротивления — неконсервативные силы; они называются *диссипативными* силами. Суммарная работа всех внутренних диссипативных сил системы всегда отрицательна.

В потенциальном поле при перемещении частицы из различных точек B_i в фиксированную точку O совершается работа, которая зависит только от радиусов-векторов r_i точек B_i . Функция $U(r)$, 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 в потенциальном поле равна разности потенциальных энергий в начальном и конечном положениях частицы.

Другим видом механической энергии является кинетическая энергия. *Кинетическая энергия* — физическая величина, определяемая работой, которую должны совершить силы при торможении движущегося тела. Кинетическая энергия является количественной мерой механического движения; она зависит от относительной скорости. При малых скоростях v , когда отношение $v/c = \beta$ (c — скорость света в вакууме) значительно меньше единицы, кинетическая энергия

$$E_k = \frac{1}{2} m_0 v^2, \quad (1.56)$$

где m_0 — масса покоя тела. При больших скоростях, когда β приближается к единице, кинетическая энергия

$$E_k = m_0 c^2 (1/\sqrt{1-\beta^2} - 1). \quad (1.57)$$

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

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

сил:

$$E_2 - E_1 = A + A_D, \quad (1.58)$$

где E_2 — конечное значение энергии системы, E_1 — ее начальная энергия, A — работа внешних сил, A_D — суммарная работа внутренних диссипативных сил (всегда отрицательна!).

Закон сохранения механической энергии: в инерциальной системе отсчета механическая энергия замкнутой системы, в которой нет диссипативных сил, остается постоянной в процессе движения.

В общем случае *энергией* называется единая количественная мера различных форм движения (не только механических). Закон сохранения энергии является фундаментальным законом природы для всех форм энергии: механической, внутренней (см. стр. 52), ядерной (стр. 179) и т. д.

Энергия не создается и не уничтожается; она может переходить из одной формы в другую; возможен обмен энергии между различными частями материи.

Кинетическая энергия тела

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2, \quad (1.59)$$

где m — масса тела, а v — его скорость.

Кинетическая энергия вращающегося тела

$$E_k = \frac{1}{2} I\omega^2, \quad (1.60)$$

где I — момент инерции, ω — угловая скорость.

Потенциальная энергия тела в поле тяготения Земли

$$E_p = -\gamma \frac{Mm}{R}, \quad (1.61)$$

где γ — гравитационная постоянная (стр. 27), M — масса Земли, m — масса тела, а R — расстояние от центра Земли до центра тяжести тела.

В физике принято считать потенциальную энергию сил притяжения отрицательной, а потенциальную энергию сил отталкивания — положительной; поэтому в выражении (1.61) поставлен знак минус.

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

$$E_p = mgh, \quad (1.62)$$

где m — масса тела, g — ускорение свободного падения, h — высота тела, отсчитываемая от некоторого условного уровня, на котором значение потенциальной энергии принято равным нулю. Таким условным уровнем может служить, например, поверхность Земли.

Единицы энергии и работы — джоуль (Дж), мощности — ватт (Вт). 1 Дж равен работе, совершаемой силой 1 Н при поступательном перемещении тела на 1 м. 1 Вт равен мощности, при которой совершается работа в 1 Дж за 1 с.

ТАБЛИЦЫ

Таблица 5. Плотность твердых тел
(при 20 °С)

Вещество	ρ , Мг/м³	Вещество	ρ , Мг/м³
<i>Металлы, сплавы, полупроводники</i>		<i>Минералы</i>	
Алюминий	2,7	Алмаз	3,51
Бронза	8,7—8,9	Апатит	3,16—3,22
Ванадий	6,02	Асбест	2,35—2,6
Висмут	9,8	Барит	4,48
Вольфрам	19,34	Берилл	2,67—2,72
Германий	5,3	Графит	2,21—2,25
Дюралюминий	2,79	Кальцит	2,6—2,8
Железо	7,88	Каолинит	2,54—2,60
Золото	19,31	Кварц	2,65
Кобальт	8,8	Корунд	4,00
Константан	8,88	Слюда	2,6—3,2
Кремний	2,3	<i>Горные породы</i>	
Латунь	8,4—8,7	Базальт	2,8—3,2
Магний	1,76	Бокситы	2,9—3,5
Манганин	8,5	Граниты	2,5—3,0
Медь	8,93	Каменный уголь (сухой)	1,2—1,5
Молибден	10,2	Мел (воздушно-сухой)	2,0
Натрий	0,975	Мрамор	2,5—2,8
Никелин	8,77	<i>Различные материалы</i>	
Никель	8,9	Бакелитовый лак	1,4
Ниобий	8,57	Воск пчелиный белый	0,95—0,96
Олово	7,29	Кость	1,8—2,0
Пермаллой	8,6	Лед (при 0 °С)	0,917
Пермендур	8,2—8,3	Резина твердая обыкновенная	1,2
Платина	21,46	Стекло зеркальное	2,55
Плутоний	19,25	Стекло кварцевое	2,21
Свинец	11,35	Стекло пирекс	2,59
Серебро	10,5	» обыкновенное	2,5
Сталь	7,7—7,9	» термометрическое	2,59
Супермаллой	8,87	Фарфор	2,2—2,4
Таллий	11,86	Эбонит	1,2
Тантал	16,6	Янтарь	1,1
Титан	4,5	<i>Пластмассы и слоистые пластики</i>	
Торий	11,71	Аминопласты слоистые	1,4
Уран	19,1	Винипласт	1,38—1,4
Хром	7,15	Плексиглас	1,18
Цинк	7,15	Поливиниловый пластикат	1,34—1,4
Цирконий	6,5	Полистирол	1,06
Чугун	7,0	Текстолит	1,3—1,4
<i>Дерево (воздушно-сухое)</i>		Фенопласт текстолитовый	1,34—1,4
Бальса	0,12	Фторопласты	2,1—2,4
Бамбук	0,4	Целлон	1,3
Береза	0,7		
Дуб, бук	0,7—0,9		
Железное дерево (бакаут)	1,1—1,4		
Кедр	0,5—0,6		
Орех	0,6—0,7		
Сосна, ель	0,4—0,5		
Черное дерево	1,1—1,3		
Ясень, красное дерево	0,6—0,8		

Таблица 6. Плотность жидкостей
(при 20 °C)

Вещество	ρ , Мг/м ³	Вещество	ρ , Мг/м ³
Азотная кислота	1,51	Молоко средней жирности	1,03
Анилин	1,02	Морская вода	1,01—1,03
Ацетон	0,791	Муравьиная кислота	1,22
Бензин	0,68—0,72	Нефть	0,76—0,85
Бензол	0,879	Нитробензол	1,2
Бром	3,12	Нитроглицерин	1,6
Вода	0,99823	Ртуть	13,55
» тяжелая (D ₂ O)	1,1086	Серная кислота	1,83
Гексан	0,660	Соляная кислота	1,19
Гептан	0,684	» (38%)	
Глицерин	1,26	Хлороформ	1,489
Масло вазелиновое	0,8	Толуол	0,866
» машинное	0,9	Уксусная кислота	1,049
Метиловый спирт	0,792	Этиловый спирт	0,79

Таблица 7. Плотность металлов в жидком состоянии

Вещество	Темпера- тура, °C	ρ , Мг/м³	Вещество	Темпера- тура, °C	ρ , Мг/м³
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 8. Плотности воды и ртути при различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{Мг/М}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{Мг/М}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{Мг/М}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{Мг/М}^3$
а) Плотность воды							
-10	0,99815	6	0,99997	50	0,98807	250	0,794
-5	0,99930	7	0,99993	60	0,98324	300	0,710
0	0,99987	8	0,99988	70	0,97781	350	0,574
1	0,99993	9	0,99981	80	0,97183	374,15 *)	0,307
2	0,99997	10	0,99973	90	0,96534		
3	0,99999	20	0,99823	100	0,95838		
4	1,00000	30	0,99567	150	0,9173		
5	0,99999	40	0,99224	200	0,8690		
б) Плотность ртути (при нормальном давлении)							
0	13,5951	25	13,5335	50	13,4723	75	13,4116
5	13,5827	30	13,5212	55	13,4601	80	13,3995
10	13,5704	35	13,5090	60	13,4480	90	13,3753
15	13,5580	40	13,4967	65	13,4358	100	13,3514
20	13,5457	45	13,4845	70	13,4237	300	12,875

*) Критическая температура — см. стр. 55, 59.

*) Критическая температура — см. стр. 55, 59.

Таблица 9. Плотность газов и паров
(при 0 °C и нормальном давлении)

Вещество	$\rho, \text{кг/М}^3$	Вещество	$\rho, \text{кг/М}^3$
Азот	1,251	Неон	0,900
Аммиак	0,771	Озон	2,139
Аргон	1,783	Оксись углерода	1,25
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
Двуокись углерода	1,977	Этиловый спирт	0,083
Кислород	1,429	Этиловый эфир	0,83
Криптон	3,74		

Примечание. О насыщенных парах воды см. гл. II.

Таблица 10. Объемная плотность материалов

Материал	Объемная плотность, кг/м ³	Материал	Объемная плотность, кг/м ³
Асбестовая бумага	850—900	Кукуруза (зерно)	750
Асбестовый войлок	600	Мипора	не более 20
Асфальт	2120	Пенобетон	300—1200
Бетон с каменным щебнем, 8% вес. влажн.	2000	Песок	1200—1600
Бетон сухой	1600	Песчаник	2600
Вата хлопчатобумажная воздушно-сухая	80	Свекла	650
Войлок шерстяной	300	Сено свежескошенное	50
Глина, 15—20% вес. влажн.	1600—2000	» слежавшееся	100
Горох	700	Снег свежевывпавший	80—190
Гравий воздушно-сухой	1840	» слежавшийся	200—400
Железобетон, 8% вес. влажн.	2200	Сукно	250
Известь (в порошке)	500	Цемент (в порошке)	1400
Камышит (плиты)	260—360	Шелк	100
Картофель	670	Шерстяная ткань	240
Кладка из красного кирпича	1600—1700	Шлакобетон, 18% вес. влажн.	1500
Кладка из силикатного кирпича	1700—1900	Шлак доменный	600—800
		» котельный	900—1300
		Штукатурка известковая, 6—8% вес. влажн.	1100

Таблица 11. Моменты инерции однородных тел

Тело	Относительно оси	I
Тонкий стержень длины l	перпендикулярной стержню и проходящей через его середину	$\frac{1}{12} ml^2$
Круглый диск или цилиндр радиуса r	перпендикулярной плоскости диска и проходящей через его центр	$\frac{1}{2} mr^2$
Шар радиуса r	совпадающей с диаметром	$0,4 mr^2$
Тонкая труба или кольцо радиуса r	совпадающей с осью трубы	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. Моменты инерции любой оси могут быть найдены по формуле (1.30). Так, момент инерции тонкого стержня относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его конец, равен $I = \frac{1}{12} ml^2 + \frac{1}{4} ml^2 = \frac{1}{3} ml^2$.

**Таблица 12. Коэффициенты трения скольжения
для различных материалов**

Соприкасающиеся поверхности	f
Бронза по бронзе	0,2
» » стали	0,18
Дерево сухое по дереву	0,25—0,5
Дуб по дубу вдоль волокон	0,48
то же поперек волокон одного тела и вдоль волокон другого	0,34
Деревянные полозья по снегу и льду	0,035
то же, но полозья обиты железом	0,02
Канат пеньковый мокрый по дубу	0,33
» » сухой » »	0,53
Кожаный ремень влажный по металлу	0,36
» » по дубу	0,27—0,38
» » сухой по металлу	0,56
Колесо со стальным бандажом по стальному рельсу	0,16
Лед по льду	0,028
Медь по чугуну	0,27
Металл влажный по дубу	0,24—0,26
» сухой » »	0,5—0,6
Подшипник скольжения при смазке	0,02—0,08
Резина (шины) по твердому грунту	0,4—0,6
» по чугуну	0,83
Смазанный жиром кожаный ремень по металлу	0,23
Сталь (или чугун) по феродо * и райбесту *	0,25—0,45
Сталь по железу	0,19
» » льду (коньки)	0,02—0,03
» » стали	0,18
» » чугуну	0,16
Фторопласт по нержавеющей стали	0,064—0,080
Фторопласт-4 по фторопласту	0,052—0,086
Чугун по бронзе	0,21
» » чугуну	0,16

Примечание. Звездочкой отмечены материалы, применяемые в тормозных и фрикционных устройствах

**Таблица 13. Напряженность земного поля тяготения
(ускорение свободного падения) для разных широт
на уровне моря**

Широта	$g, \text{ м/с}^2$	Широта	$g, \text{ м/с}^2$
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

**Т а б л и ц а 14. Динамические характеристики
планет Солнечной системы**

Расстояние от Солнца D , экваториальный радиус планеты R ,
плотность вещества планеты ρ , ускорение свободного падения
на поверхности планеты g , масса M

Небесное тело	$D, 10^{10} \text{ м}$	$R, 10^6 \text{ м}$	$\rho, \text{ Мг/м}^3$	$g, \text{ м/с}^2$	$M, 10^{24} \text{ кг}$
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

В. СТАТИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

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

Центр тяжести твердого тела или системы тел. В любой системе частиц имеется характерная точка, которая определяется радиусом-вектором

$$r_c = \frac{1}{m} \sum m_i r_i \quad (1.63)$$

где m_i и r_i — массы и радиусы-векторы частиц, m — масса всей системы. Эта точка называется *центром инерции или центром масс*.

В однородном поле сил тяжести центр масс совпадает с центром тяжести; *центр тяжести* — точка, в которой приложена равнодействующая всех сил тяжести, действующих на отдельные точки тела (или системы). Сумма моментов сил тяжести всех частиц тела относительно центра тяжести тела равна нулю.

Виды равновесия тел. Если при достаточно малом отклонении тела от положения равновесия возникают силы, стремящиеся вернуть тело в первоначальное положение, то такое равновесие называется *устойчивым*.

Обычно после действия малых возмущений (смещений, толчков) на тело, находящееся в устойчивом равновесии, оно начинает совершать колебания с малой амплитудой около положения равновесия; эти колебания затем затухают вследствие трения (см. стр. 81) и равновесие восстанавливается.

В положении устойчивого равновесия потенциальная энергия тела имеет минимальное значение (при действии консервативных сил).

Если же при сколь угодно малом отклонении тела от положения равновесия возникают силы, стремящиеся увеличить это отклонение, то такое положение равновесия называется *неустойчивым*.

В безразличном положении равновесия при отклонении тела не возникает никаких сил, и новое положение также является положением равновесия.

Условия равновесия тела на наклонной плоскости. Для равновесия тела на наклонной плоскости, составляющей угол α с горизонтом, нужно приложить силу F , равную по модулю F_1 , причем $F_1 = G \sin \alpha$; сила F должна быть направлена вверх вдоль наклонной плоскости (рис. 9). При этом тело давит на наклонную плоскость с силой $F_2 = G \cos \alpha$, а наклонная плоскость с такой же силой действует на тело. Свободно лежащее тело будет поконяться на наклонной плоскости, пока скатывающая сила не станет больше силы трения покоя. Это произойдет, когда $\operatorname{tg} \alpha > f_{\text{п}}$, где $f_{\text{п}}$ — коэффициент трения покоя.

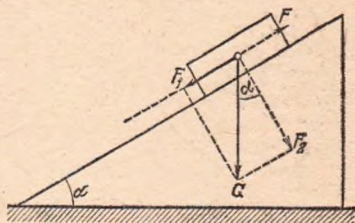


Рис. 9. Равновесие тела на наклонной плоскости; $G = mg$ — сила тяжести.

Рычаг. Рычаг находится в равновесии, если сумма моментов действующих на него сил равна нулю (рис. 10):

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

где a и b — плечи (см. стр. 26) сил F_1 и F_2 .

Условия равенства моментов сил применяются также к равновесию ворот (рис. 11, а) или лебедки.

Блоки. Неподвижный блок (рис. 11, б) служит только для изменения направления действующей силы. Подвижный блок

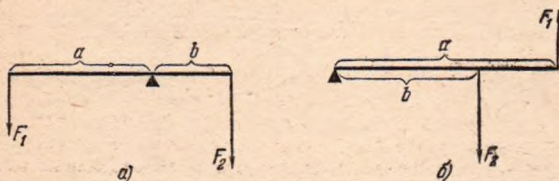


Рис. 10. Рычаги: а) рычаг с точкой опоры, находящейся между точками приложения действующих на него сил; б) рычаг, в котором точки приложения действующих сил находятся по одну сторону от точки опоры.

(рис. 11, в) позволяет получить выигрыш в силе. При покоящемся или равномерно вращающемся подвижном блоке сумма всех действующих сил и сумма всех моментов сил равны нулю:

$$P + 2F = 0.$$

Отсюда следует, что

$$P = 2F, \text{ или } F = \frac{1}{2} P.$$

Полиспаст. Полиспаст (рис. 12, а) представляет собой систему подвижных и неподвижных блоков, соединенных в общем держателе. Если полиспаст имеет n подвижных и n неподвижных блоков, то

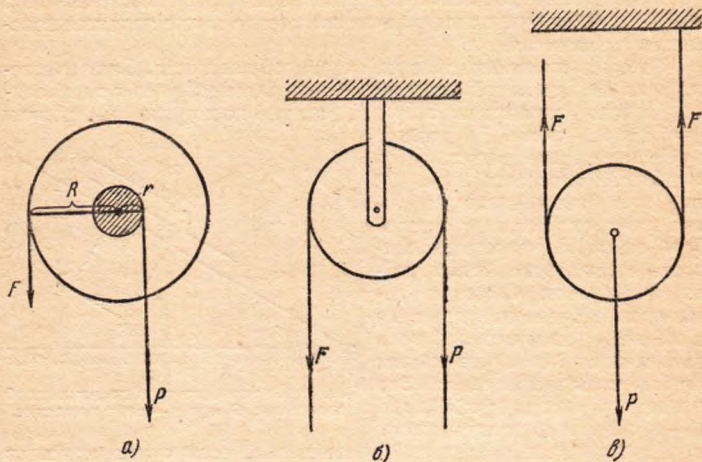


Рис. 11. Схема ворота (а), неподвижного блока (б) и подвижного блока (в)

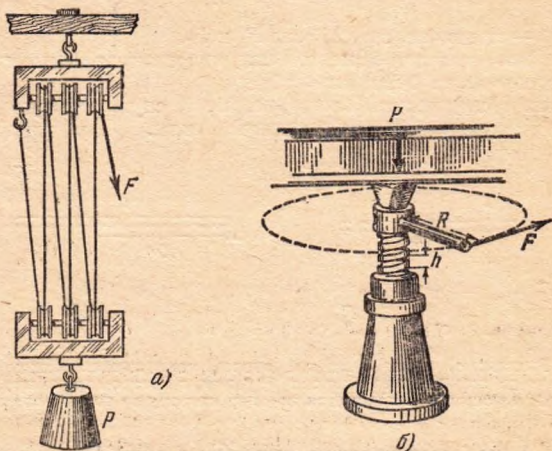


Рис. 12. Полиспаст (а) и винт (б).

для уравнивания силы P необходимо приложить силу

$$F = P/2n.$$

Винт. При отсутствии трения сила P , действующая по оси винта, уравнивается силой F , приложенной к рукоятке (рис. 12, б): $F = Ph/2\pi R$, где R — расстояние от оси вращения до точки приложения силы, h — шаг винта.

Таблица 15. Центры тяжести однородных тел
(см. рис. 13)

Тело	Положение центра тяжести
Тонкий стержень	На середине стержня
Цилиндр или призма	На середине прямой, соединяющей центры оснований цилиндра или призмы
Шар	В центре
Плоский сегмент малой толщины	На оси симметрии, смещен от основания на $2/5$ его высоты
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

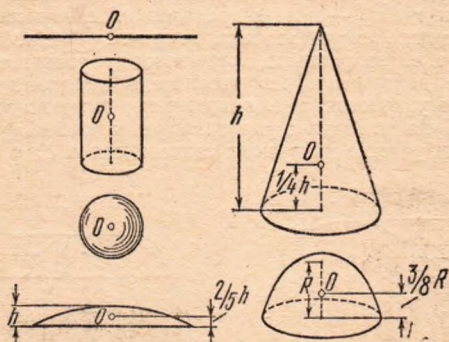


Рис. 13. Положение центра тяжести тел правильной геометрической формы.

Г. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

Изменение расстояния между точками тела под воздействием внешних сил или других факторов (например, нагревания) 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; силы упругости при упругой деформации пропорциональны деформации (*закон Гука*).

Величина σ , равная отношению силы упругости F к площади S , на которой распределена эта сила, называемая *напряжением*, т. е. $\sigma = F/S$.

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:

$$\Delta l = lF/(ES), \quad (1.64)$$

где S и l — площадь поперечного сечения и длина стержня до деформации, $1/E$ — коэффициент пропорциональности; E называется *модулем продольной упругости* или *модулем Юнга*. Отношение $\Delta l/l = \varepsilon$ называется *относительной продольной деформацией* (или просто продольной деформацией).

Формула (1.64) выражает закон Гука для продольной деформации. Закон Гука для продольных деформаций можно записать в следующей форме:

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (1.65)$$

Модуль Юнга численно равен напряжению, увеличивающему длину образца в два раза. Однако разрыв образца наступает при значительно меньших напряжениях:

На рис. 14 графически изображена экспериментальная зависимость σ от ε , где 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 равен тангенсу угла наклона на линейном участке диаграммы зависимости σ от ε (см. рис. 14).

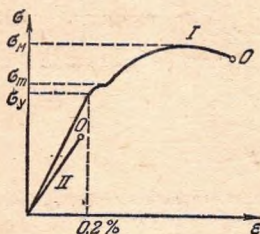


Рис. 14. Зависимость напряжения от относительной продольной деформации. Кривая I относится к пластичному материалу, кривая II — к хрупкому. В точках O происходит разрушение материала.

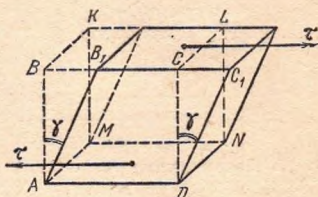


Рис. 15. Деформация — простой сдвиг.

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

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

*) Имеется в виду кратковременное действие силы.

Деформация сдвига. Напряжения, возникающие в деформированном теле, можно разделить на два вида — *нормальные* и *сдвиговые*; нормальные напряжения σ действуют перпендикулярно поверхности, сдвиговые напряжения τ — параллельно поверхности.

Деформация малого элемента объема $ABCDKLMN$ в форме куба под воздействием сдвиговых напряжений показана на рис. 15. При отсутствии нормальных напряжений сдвиговые напряжения не изменяют длину ребер AB , 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 $90^\circ + \gamma$.

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.

Сжимаемость вещества. Всестороннее сжатие тела приводит к уменьшению объема тела на ΔV и возникновению упругих сил, стремящихся вернуть телу первоначальный объем. *Сжимаемостью* β называется величина, численно равная отношению изменению объема тела $\Delta V/V$ при изменении действующего давления Δp на единицу.

Величина, обратная сжимаемости, носит название *модуля объемной упругости* K .

Изменение объема тела ΔV при всестороннем увеличении давления на Δp вычисляется по формуле

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

где V — первоначальный объем тела.

Соотношения между упругими постоянными. Модуль Юнга E , коэффициент Пуассона μ , модуль объемной упругости K и модуль сдвига G связаны между собой уравнениями

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad (1.68)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)}, \quad (1.69)$$

которые по двум известным упругим модулям позволяют, в первом приближении, рассчитать остальные.

Потенциальная энергия упругой деформации определяется по формуле

$$E_n = \frac{1}{2} F_y \Delta l, \quad (1.70)$$

где F_y — сила упругости, Δl — абсолютная деформация. Все модули упругости выражаются в паскалях (Па); механическое напряжение и давление также выражаются в паскалях (см. стр. 46).

ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Таблица 16. Пределы прочности некоторых материалов (МПа)

Материал	Предел прочности	
	при растяжении	при сжатии
Аминопласты слоистые	78	196
Бакелиты	19,6—29,4	78—98
Бетон	—	4,9—34
Винипласт	39	78
Гетинакс	147—167	147—177
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 °C)	1	1—2
Пенопласт плиточный	0,59	—
Полиакрилат (оргстекло)	49	68,6
Полистирол	39	98
Сосна (15% влажности)		
вдоль волокон	78	39
поперек волокон	—	4,9
Сталь для конструкций	373—412	—
кремнехромомарганцовистая	1520	—
машиноподелочная (углеродистая)	314—785	—

Таблица 17. Модули упругости и коэффициенты Пуассона

Материал	Модуль Юнга, ГПа	Модуль сдвига, ГПа	Коэффициент Пуассона
Алюминиевая бронза, литые	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 плотный	35	15	0,2
Инвар	135	55	0,25 *)
Кадмий	50	19 *)	0,3
Каучук	0,008	0,003	0,46
Кварцевая нить (плавленная)	73	31	0,17
Константан	160	61	0,33
Латунь корабельная катаная	98	36 *)	0,36
Латунь холодноотянутая	89—97	34—36	0,32—0,42
Манганин	123	46	0,33
Медь, литые	82	—	—
» катаная	108	39	0,31—0,34
» холодноотянутая	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

Таблица 17 (продолжение)

Материал	Модуль Юнга, ГПа	Модуль сдвига, ГПа	Коэффициент Пуассона
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
Целлулоид	1,7—1,9	0,65	0,39
Цинк катаный	82	31	0,27
Чугун белый, серый	113—116	44	0,23—0,27
Чугун ковкий	150	—	—

*) Расчетные значения.

Таблица 18. Сжимаемость жидкостей и твердых тел

Вещество	Температура, °C	В интервале давления, МПа	Сжимаемость, 10^{-11} Па $^{-1}$
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
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
Кислота серная	0	0,1—1,6	305,3
Кислота уксусная	25	9,3	82,2
Ксилол	10	0,1—5	75
	100	0,1—5	133
Оливковое масло	20	0,1—1	64
Ртуть	20	0,1—1	3,96
Спирт этиловый	20	0,1—5	113
	20	20—40	84
	100	90—100	74
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

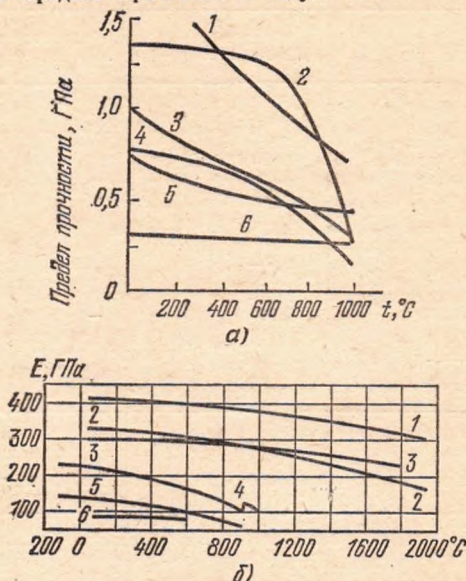


Рис. 16. а) Зависимость предела прочности от температуры: 1 — вольфрам, 2 — никелевая сталь, 3 — кобальтовая сталь, 4 — сталь N-155, 5 — Mo 0,5 Ti, 6 — Ti 36 Al; б) зависимость модуля Юнга от температуры: 1 — вольфрам, 2 — молибден, 3 — карбид кремния, 4 — железо, 5 — медь, 6 — стекло.

Д. МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

Жидкости и газы, в отличие от твердых тел, не обнаруживают сопротивления изменению их формы при сохранении их объема постоянным. Для изменения объема жидкости или уменьшения объема газа нужно прикладывать внешние силы. Это свойство жидкости называется *упругостью объема*.

Давление (p) есть величина, измеряемая силой, действующей перпендикулярно поверхности на единицу площади. Единица давления — паскаль (Па). 1 Па равен давлению, которое создает равномерно распределенная сила 1 Н на нормальной к ней поверхности площадью 1 м².

1. Статика

Внешнее давление на жидкость или газ передается во все стороны равномерно (*закон Паскаля*).

Столб жидкости или газа, находясь в однородном поле тяготения, создает давление, обусловленное весом этого столба. Если жидкость и газ считать несжимаемыми, то давление

$$p = \rho gh, \quad (1.71)$$

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:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}. \quad (1.72)$$

Тело, погруженное в жидкость или газ, испытывает действие выталкивающей силы, равное весу вытесненной им жидкости или газа (*закон Архимеда*).

2. Динамика

При движении жидкости или газа со скоростями, значительно меньшими, чем скорость звука в этих средах, можно пренебречь их сжимаемостями. При движении жидкостей и газов возникают силы трения. Если эти силы невелики, ими пренебрегают и рассматриваемый газ или жидкость называют *идеальной жидкостью*. В противном случае говорят о *вязкой жидкости*.

Движение идеальной жидкости. Течение жидкости или газа называют *стационарным*, если скорость и давление остаются постоянными в каждой точке пространства, где протекает жидкость или газ.

В этом случае через любое поперечное сечение трубы в единицу времени проходят равные объемы жидкости:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2, \quad (1.73)$$

где S_1 и S_2 — площади двух разных сечений трубы, а v_1 и v_2 — скорости жидкости в этих сечениях. При изменении сечения трубы меняется не только скорость движущейся жидкости, но и давление, так что в любом сечении (при стационарном движении идеальной жидкости) выполняется условие

$$\left. \begin{aligned} p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 &= \text{const}, \\ \text{или} \\ p_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 &= p_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2. \end{aligned} \right\} \quad (1.74)$$

где p — давление, ρ — плотность жидкости, h — высота данного сечения трубы над некоторым уровнем, v — скорость движения жидкости в данном сечении трубы (рис. 17, а).

Уравнение (1.74) называется *уравнением Бернулли*. Из этого уравнения следует *закон Торричелли*:

$$v^2 = 2gH, \quad (1.75)$$

где v — скорость частиц жидкости при вытекании из малого отверстия в сосуде, H — высота поверхности жидкости над отверстием (рис. 17, б).

Движение вязкой жидкости. При движении в жидкости твердого тела (например, шара) ближайший слой жидкости прилипает к нему и движется вместе с ним; остальные слои скользят друг относительно друга. Сила, действующая на твердое тело, движущееся внутри вязкой среды (жидкости или газа), и направленная противоположно скорости тела, называется *сопротивлением среды*. Если при движении тела за ним не возникает завихрений, то сопротивление среды пропорционально скорости тела v . В частном случае

при движении шара радиуса R сопротивление среды

$$F = 6\pi\eta Rv, \quad (1.76)$$

где η — коэффициент внутреннего трения (см. стр. 57), или вязкость.

Единица коэффициента внутреннего трения — паскаль-секунда (Па·с) (см. стр. 57). Соотношение (1.76) называется *формулой Стокса*.

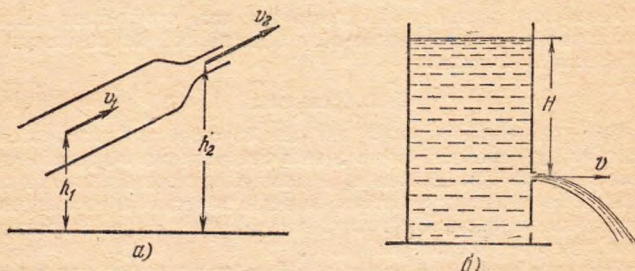


Рис. 17. а) Пояснение к формуле (1.74). б) Вытекание жидкости из малого отверстия.

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

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

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

При разности давлений $p_1 - p_2$ на концах капиллярной трубки, которая имеет радиус R и длину l , протекающий в единицу времени объем жидкости

$$V = \frac{1}{\eta} \frac{\pi R^4}{8l} (p_1 - p_2). \quad (1.78)$$

Вязкость жидкости и газа в значительной степени зависит от температуры.

ТАБЛИЦЫ

Таблица 19. Вязкость жидкостей (при 18°C)

Вещество	$10^{-2} \eta, \text{Па} \cdot \text{с}$	Вещество	$10^{-2} \eta, \text{Па} \cdot \text{с}$
Анилин	0,46	Масло цилиндрическое очищенное (40°C)	0,109
Ацетон	0,0337	Масло цилиндрическое темное	24,0
Бензол	0,0673	Пентан	0,0244
Бром	0,102	Ртуть	0,159
Вода	0,105	Сероуглерод	0,0382
Глицерин	139,3	Спирт этиловый	0,122
Касторовое масло	120,0	Толуол	0,0613
Ксилол (м)	0,0647	Уксусная кислота	0,127
Масло машинное легкое	11,3	Хлороформ	0,0579
Масло машинное тяжелое	66,0	Эфир этиловый	0,0238

Таблица 20. Вязкость газов (при 0°C)

Вещество	$10^{-6} \eta, \text{Па}\cdot\text{с}$	Вещество	$10^{-6} \eta, \text{Па}\cdot\text{с}$
Азот	1,67	Кислород	1,92
Аммиак	0,93	Метан	1,04
Водород	0,84	Окись азота	1,72
Воздух (своб. от CO ₂)	1,72	» углерода	1,67
Гелий	1,89	Углекислый газ	1,40
Закись азота	1,38	Хлор	1,29

Таблица 21. 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	—	—
Этилен	40	13,4	28,8	—	—

Таблица 22. 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 23. Вязкость жидкостей при различных температурах
(η , 10^{-2} Па·с)

Жидкость	t , °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 24. Вязкость металлов в жидком состоянии

Вещество	t , °C	η , мПа·с	Вещество	t , °C	η , мПа·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

ГЛАВА II

ТЕПЛОТА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

1. Основы термодинамики. Теплоемкость

Всякое тело (объект), которое состоит из большого числа частиц, называется *макроскопической системой*; размеры макроскопических систем значительно больше размеров атомов и молекул. Макроскопическая система и ее взаимодействие с окружающими телами определяется физическими величинами, которые называются макроскопическими параметрами; например, такими параметрами являются объем, плотность, давление, намагниченность и т. д.

Если в системе параметры не изменяются во времени, а также нет потоков вещества, теплоты и т. д. за счет каких-либо внешних воздействий, то такое состояние называется *равновесным (термодинамическое равновесие)*.

Термодинамическими называются такие макроскопические системы, которые находятся в термодинамическом равновесии; величины, характеризующие состояние термодинамической системы, называются *термодинамическими параметрами*.

Система, которая не обменивается ни энергией, ни веществом с другими системами, называется *изолированной*. Изолированная система в течение времени приходит в состояние термодинамического равновесия и не может самопроизвольно выйти из этого состояния (основной постулат термодинамики). Основной постулат определяет лишь наиболее вероятное состояние системы; непрерывное движение частиц приводит к отклонениям (флуктуациям) от равновесных состояний.

Скалярная величина, характеризующая движение внутри равновесной системы, 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 (см. стр. 61). Для неравновесной системы понятие температуры не имеет смысла. Положение о существовании температуры равновесной системы составляет основу второго постулата термодинамики.

Изменение температуры тела вызывает изменения различных свойств тел (размеров, плотности, упругости, электропроводности и т. д.). Температура, которая определяется по термодинамической шкале температур, называется *термодинамической*.

Единицей термодинамической температуры является кельвин (К). Кельвин равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды. Нижней точкой термодинамической шкалы температур является абсолютный нуль. Допускается применение температуры Цельсия (t), которая определяется выражением $t = T - T_0$, где $T_0 = 273,15$ К по определению. По размеру градус Цельсия равен кельвину.

Термодинамическая температура, выраженная в кельвинах, обозначается символом T , температура Цельсия обозначается символом t .

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. 25. Если необходимо указать, что температура определена по МПТШ-68, то в обозначениях температуры добавляется индекс 68 (например, T_{68} или t_{68}).

Внутренней энергией тела (системы) называется сумма кинетической энергии хаотического движения молекул, потенциальной энергии их взаимодействия и внутримолекулярной энергии.

Передача энергии от одного тела к другому может быть осуществлена двумя способами: первый способ — посредством механического взаимодействия, когда совершается работа механическими или электромагнитными силами (см. гл. IV); второй способ — посредством теплового взаимодействия, когда энергия передается хаотическим движением молекул за счет теплопроводности (см. стр. 56) или теплового излучения (см. стр. 162). Количество энергии, передаваемое при тепловом взаимодействии тел, называется *количеством теплоты* (или просто *теплотой*); теплота выражается в джоулях.

При нагревании тела массы m от температуры t_0 до температуры $t = t_0 + \Delta t$ необходимо сообщить ему количество теплоты ΔQ . *Средней удельной теплоемкостью* в данном интервале температур ($t - t_0$) называется величина $\Delta Q / (m \Delta t)$. Предел этого отношения

$$c_{\text{и}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{m \Delta t} = \frac{dQ}{mdt} \quad (2.1)$$

есть, по определению, *истинная удельная теплоемкость* или просто *удельная теплоемкость* при температуре t_0 . Удельная теплоемкость зависит от температуры. Однако в большинстве случаев этой зависимостью пренебрегают и считают, что удельная теплоемкость численно равна количеству теплоты, которое необходимо сообщить телу единичной массы для повышения его температуры от t °С до $(t+1)$ °С при любом t .

Количество теплоты, полученное телом массы m при увеличении его температуры на Δt ,

$$\Delta Q = cm \Delta t, \quad (2.2)$$

где c — удельная теплоемкость.

Теплоемкость веществ 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 *теплоем-*

костью 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.

Единица удельной теплоемкости — джоуль на килограмм-кельвин (Дж/(кг·К)).

Сумма количества теплоты ΔQ , получаемого системой при нагревании, и работы ΔA , которая совершается над ней внешними силами в этом процессе, равна изменению внутренней энергии ΔU (первый закон термодинамики):

$$\Delta Q + \Delta A = \Delta U. \quad (2.3)$$

Изменение ΔU внутренней энергии определяется конечным и начальным состояниями и не зависит от процесса нагревания; ΔQ и ΔA зависят от процесса перехода.

Теплота не может самопроизвольно перейти от более холодного тела к более горячему без каких-либо других изменений в системе (второй закон термодинамики).

Теплоемкость любого тела при приближении к абсолютному нулю стремится к нулю (третий закон термодинамики).

2. Фазовые превращения

Фазой называется совокупность одинаковых по физическим свойствам и разграниченных поверхностями раздела частей системы. Например: лед, вода, водяной пар, составляющие систему, являются различными фазами; графит и алмаз — различные фазы твердого вещества.

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

Фазовый переход вещества из кристаллического твердого состояния в жидкое называется *плавлением*; обратный переход — из жидкого состояния в твердое — 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 (теплота плавления)

$$Q_{пл} = \lambda m, \quad (2.4)$$

где m — масса расплавленного вещества, λ — *удельная теплота плавления* — количество теплоты, которое нужно сообщить единице массы твердого тела при температуре плавления для того, чтобы перевести его в жидкое состояние. При кристаллизации происходит выделение теплоты. Теплота плавления равна теплоте кристаллизации*); во время плавления температура не изменяется.

При плавлении происходит увеличение объема (исключение составляют вода, галлий, сурьма, чугун и висмут, у которых происходит уменьшение объема).

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

*) Все сказанное о температуре и теплоте плавления относится к кристаллическим и поликристаллическим телам. Кристаллическим называется тело, свойства которого различны для разных направлений. Тело, состоящее из многих хаотично ориентированных мелких кристаллов, называется поликристаллическим.

Фазовый переход из парового состояния в жидкое или кристаллическое называется *конденсацией*.

Фазовый переход из жидкости в пар называется *парообразованием*, обратный переход называется *сжижением*; парообразование, происходящее со свободной поверхности жидкости или твердого тела, называется *испарением*; если парообразование происходит как со свободной поверхности жидкости, так и внутри нее, 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 $2,8 \cdot 10^{-4}$ К/Па.

Теплота фазового перехода при парообразовании (теплота парообразования)

$$Q_{\text{п}} = r m, \quad (2.5)$$

где m — масса вещества, переходящего в пар, r — *удельная теплота парообразования* — количество теплоты, необходимое для перехода в пар единицы массы жидкости (при постоянных температуре и давлении).

Испарение жидкости в открытом сосуде может продолжаться до полного исчезновения жидкости. В закрытом сосуде испарение жидкости продолжается до установления равновесия между массой вещества, находящегося в жидком состоянии, и массой пара. При этом равновесии будут наблюдаться процессы испарения и конденсации, компенсирующие друг друга. Такое равновесие называется динамическим. Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называется *насыщающим* (или *насыщенным*).

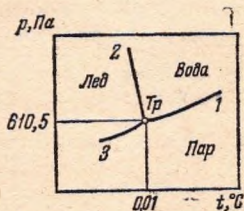


Рис. 18. Кривые испарения — 1, плавления — 2, сублимации — 3, вблизи тройной точки T_r воды.

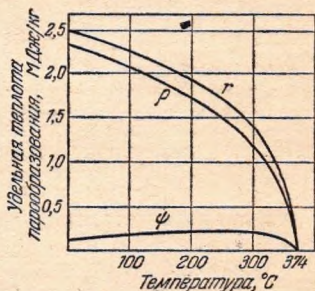


Рис. 19. Зависимость внешней (ψ), внутренней (ρ) и полной (r) теплоты парообразования от температуры для воды.

Кипение происходит при такой температуре, когда давление насыщающих паров жидкости равно внешнему давлению.

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

Кривая плавления определяет условия равновесия твердой и жидкой фаз, кривая испарения — условия равновесия жидкой и

газообразной фаз, кривая сублимации — условия равновесия твердой и газообразной фаз. Точка пересечения этих кривых называется *тройной точкой* (рис. 18). Тройная точка определяет условие (давление, температуру и плотность) одновременного равновесия трех фаз.

Кривая равновесия жидкости и насыщенного пара будет продолжаться до такой температуры, при которой их плотности будут равны; при этом исчезает граница между ними. Такое состояние называется *критическим*, а соответствующие этому состоянию плотность, давление и температура называются *критическими параметрами* (см. стр. 59).

Удельная теплота парообразования зависит от температуры. С увеличением температуры удельная теплота парообразования уменьшается. При критической температуре она равна нулю. Теплота парообразования r идет на работу, совершаемую молекулами при прохождении поверхностного слоя жидкости (внутренняя теплота парообразования ρ), и на работу, связанную с увеличением объема вещества при переходе в газообразное состояние (внешняя теплота парообразования ψ). На рис. 19 показаны зависимости r , ρ и ψ от температуры t для воды.

3. Тепловое расширение твердых и жидких тел

С изменением температуры твердых и жидких тел изменяются их размеры и объем. Длина l_t твердого тела при температуре $t^\circ\text{C}$ определяется его длиной l_0 при 0°C , температурой t и коэффициентом линейного расширения α :

$$l_t = l_0(1 + \alpha t). \quad (2.6)$$

Коэффициентом линейного расширения называется величина, равная среднему (в интервале температур от 0°C до $t^\circ\text{C}$) относительному удлинению тела при изменении температуры на 1 градус: $\alpha = (l_t - l_0)/(l_0 t)$.

Аналогично (2.6) при температуре t объем тела

$$V_t = V_0(1 + \beta t), \quad (2.7)$$

где β — коэффициент объемного расширения, V_0 — объем при 0°C .

Коэффициентом объемного расширения называется величина, равная среднему (в данном интервале температур) относительному изменению объема тела при изменении температуры на 1 градус: $\beta = (V_t - V_0)/(V_0 t)$. Для твердого изотропного тела (свойства которого одинаковы по всем направлениям) $\beta = 3\alpha$.

Коэффициенты объемного и линейного расширения выражаются в кельвинах в минус первой степени (K^{-1}).

Более точными являются формулы

$$\Delta l = l_0(at + bt^2), \quad l_t = l_0(1 + at + bt^2),$$

где a и b — коэффициенты, определяемые экспериментально для каждого вещества.

Коэффициенты линейного расширения изменяются с изменением температурного интервала нагрева тела.

Так, для железа $l_t = l_0(1 + 117 \cdot 10^{-7}t + 4,7 \cdot 10^{-9}t^2)$; коэффициент линейного расширения железа при нагревании от 0°C до 75°C равен $1,21 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, а для интервала $0^\circ\text{C} - 750^\circ\text{C}$ равен $1,52 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

При нагревании тел происходит изменение их плотности. При температуре t плотность

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta t}, \quad (2.8)$$

где ρ_0 — плотность тела при 0°C , β — коэффициент объемного расширения.

4. Теплопроводность, диффузия, вязкость

Теплота передается посредством конвекции, теплопроводности и излучения (см. тепловое излучение).

Выравнивание температур в жидкостях и газах в основном вызвано *конвекцией* — направленным потоком более теплой жидкости или газа к более холодным частям. В твердых телах конвекция отсутствует.

Теплопроводность. *Теплопроводностью* называется процесс передачи теплоты вследствие хаотического теплового движения молекул или атомов.

Проходящее за время t через поверхность площадью S количество теплоты

$$Q = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta l} St, \quad (2.9)$$

где λ — коэффициент теплопроводности, ΔT — разность температур между двумя точками, расстояние между которыми по направлению наибольшего изменения температуры равно Δl ; $\Delta T/\Delta l$ называется *градиентом температур*.

Коэффициентом теплопроводности называется величина, равная переносимому за единицу времени количеству теплоты через единичную площадь при градиенте температур, равном единице.

Единица коэффициента теплопроводности — ватт на метр-кельвин ($\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$). $1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ равен коэффициенту теплопроводности такой среды, в которой при градиенте температур $1 \text{ К}/\text{м}$ проходит за 1 с через площадь 1 м^2 количество тепла 1 Дж (поверхность расположена перпендикулярно к направлению переноса тепла).

Диффузия. *Диффузией* называется процесс выравнивания плотностей, обусловленный переносом вещества посредством молекулярного движения. Переносимая через поверхность площадью S за время t масса вещества

$$M = D \frac{\Delta \rho}{\Delta l} St, \quad (2.10)$$

где $\Delta \rho$ — разность плотностей между двумя точками, расстояние между которыми по направлению наибольшего изменения плотности равно Δl ; $\Delta \rho/\Delta l$ называется *градиентом плотности*; D — коэффициент диффузии.

Коэффициентом диффузии называется величина, равная массе диффундирующего вещества через единичную поверхность за единицу времени при градиенте плотности, равном единице. Единица коэффициента диффузии — квадратный метр в секунду ($\text{м}^2/\text{с}$). $1 \text{ м}^2/\text{с}$ равен коэффициенту диффузии такой среды, в которой при градиенте плотности $1 \text{ кг}/\text{м}^3$ за 1 с через площадь 1 м^2 переносится масса вещества в 1 кг (поверхность располагается перпендикулярно к направлению переноса массы).

Внутреннее трение (вязкость). При относительном смещении слоев жидкости или газа возникают силы трения, тормозящие движение слоев, движущихся с большей скоростью, и ускоряющие слои с меньшей скоростью. Причиной вязкости является перенос количества движения (импульса) упорядоченного движения молекулами, переходящими из одного слоя в другой.

Сила внутреннего трения

$$F_{\tau} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta l} S, \quad (2.11)$$

где Δv — разность скоростей движущихся слоев, Δl — расстояние между этими слоями по направлению, перпендикулярному скорости; $\Delta v / \Delta l$ называется градиентом скорости; η — коэффициент внутреннего трения. Коэффициентом внутреннего трения называется величина, равная силе внутреннего трения, которая возникает между двумя слоями площадью, равной единице, при градиенте скорости, равном единице.

Единица коэффициента вязкости — паскаль-секунда (Па·с). 1 Па·с равна коэффициенту вязкости такой среды, в которой касательное напряжение при ламинарном течении равно 1 Па при разности скоростей слоев в 1 м/с, находящихся на расстоянии 1 м (по перпендикулярному скорости направлению).

Соотношения (2.9) — (2.11) применимы при условии, что длина свободного пробега молекул жидкости или газа (см. стр. 60) меньше размеров сосуда.

5. Поверхностное натяжение жидкостей

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

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

Сила поверхностного натяжения определяется по формуле

$$F = \alpha l, \quad (2.12)$$

где l — длина края (периметр) поверхностного слоя жидкости, α — коэффициент поверхностного натяжения.

Коэффициентом поверхностного натяжения (или просто *поверхностным натяжением*) называется величина, численно равная силе, приложенной к единице длины прямолинейного края поверхностного слоя жидкости.

Единица поверхностного натяжения — ньютон на метр (Н/м).

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

6. Газовые законы

Свойства большинства веществ, находящихся в газообразном состоянии, при обычных условиях могут быть описаны уравнением

$$pV = \frac{m}{\mu} RT, \quad (2.13)$$

Это уравнение называется *уравнением состояния идеального газа* или *уравнением Клапейрона—Менделеева*. Здесь p —давление газа, V —объем газа массы m , μ —молярная масса, равная отношению m/ν , ν —количество вещества, R —универсальная газовая постоянная, T —абсолютная температура.

Единицей количества вещества является моль. *Моль*—такое количество вещества, в котором находится столько же частиц, сколько содержится атомов в 0,012 кг изотопа углерода-12 (см. стр. 177). Частицами могут быть атомы, молекулы, ионы, электроны или другие группы частиц.

Молярные массы можно приближенно определять по относительной молекулярной массе M_r , которая равна отношению массы m_m молекулы данного вещества к $1/12$ части массы m_C атома изотопа углерода-12: $M_r = m_m / [(1/12)m_C]$. Например, относительная молекулярная масса кислорода (O_2) равна 32, углекислого газа (CO_2)—44, а соответствующие молекулярные массы будут равны 0,032 кг/моль и 0,044 кг/моль.

В одном моле вещества содержится одинаковое число частиц; это число называется *числом Авогадро* N_A : $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$.

Уравнение Клапейрона—Менделеева можно применять (в первом приближении) к любым веществам в газовом состоянии, если плотность этих веществ меньше плотности их насыщенных паров при тех же температурах.

Из уравнения (2.13) получаются *законы Гей-Люссака, Шарля и Бойля—Мариотта*. При постоянных p и m (так как $R = \text{const}$, а μ постоянно для данного вещества)

$$V_1 = V_0 \frac{T_1}{T_0}, \quad (2.14)$$

где V_0 и T_0 —объем и температура газа при 0 °С. Отсюда следует закон Гей-Люссака (уравнение *изобарического процесса*):

$$V_t = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} t \right), \quad (2.15)$$

где t —температура Цельсия.

При постоянных V и m получается закон Шарля (уравнение *изохорического процесса*):

$$p = p_0 \left(1 + \frac{1}{273} t \right). \quad (2.16)$$

При постоянных T и m (*изотермический процесс*) получается закон Бойля—Мариотта:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2. \quad (2.17)$$

Величина $\alpha = 1/273,15 \text{ K}^{-1}$ называется *коэффициентом объемного расширения* или *температурным коэффициентом давления* идеального газа. Для реальных газов при давлениях, близких к атмосферному или больших, соответствующие коэффициенты несколько отличаются от этой величины.

Плотность газа ρ может быть найдена из уравнения (2.13), если известны давление p , температура T и молярная масса μ газа:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\mu p}{RT}. \quad (2.18)$$

При изотермическом расширении газ производит работу против внешних сил давления; эта работа производится в основном за счет подводимой из окружающей среды теплоты; температура газа и окружающей среды не изменяется. При изотермическом сжатии газа теплота передается в окружающую среду.

При изменении объема газа без теплообмена с окружающей средой (*адиабатический процесс*) давление и объем постоянной массы газа связаны уравнением адиабаты:

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad (2.19)$$

где $\gamma = c_p/c_v$ — показатель политропы.

Если плотность газа становится сравнимой с плотностью насыщенного пара при данной температуре, то наблюдаются значительные отступления от уравнения состояния идеального газа. В этом случае необходимо учитывать силы взаимодействия молекул газа и занимаемый ими объем. Такой учет приводит к уравнению реального газа. Наиболее широко используется уравнение Ван-дер-Ваальса:

$$\left[p + \left(\frac{m}{\mu} \right)^2 \frac{a}{V^2} \right] \times \\ \times \left(V - \frac{m}{\mu} b \right) = \frac{m}{\mu} RT, \quad (2.20)$$

где V — объем, занимаемый массой m газа, μ — молярная масса, a и b — постоянные Ван-дер-Ваальса, которые могут быть определены по критическим параметрам для одного моля газа — объему V_k , давлению p_k и температуре T_k вещества:

$$a = 3p_k V_k^2, \quad b = \frac{1}{3} V_k, \quad (2.21) \\ R = \frac{8}{3} \frac{V_k p_k}{T_k}.$$

В действительности константы a и b зависят от температуры.

Изотермы Ван-дер-Ваальса приведены на рис. 20. По осям отложены относительные значения объема (V/V_k) и давления (p/p_k); цифры у кривых указывают температуру в относительных единицах (T/T_k). 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 ее изотермы не имеют S-образного изгиба. Температура T_k является *критической температурой* (см. также стр. 55); соответствующие ей значения давления p_k и объема V_k называются *критическим давлением* и *критическим объемом*. Состояние вещества, которому соответствуют T_k, p_k и V_k , является *критическим состоянием*.

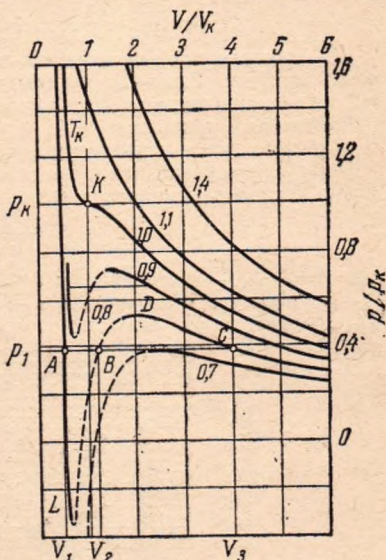


Рис. 20. Изотермы Ван-дер-Ваальса. По осям отложены относительные значения объема (V/V_k) и давления (p/p_k); цифры у кривых указывают температуру в относительных единицах (T/T_k).

В действительности на участке S-образного изгиба изотермы идут горизонтально, т. е. параллельно оси абсцисс (для давления p_1 изотерма проходит через точки A, B, C). Эти участки соответствуют равновесию между жидкостью и газом. Газ (или пар), находящийся в состоянии равновесия со своей жидкостью, является насыщенным паром (см. стр. 54). При некоторых условиях изотерма может проходить по участкам AL (перегретая жидкость) и CD (пересыщенный пар), но такие состояния являются неустойчивыми.

Для сжижения газов посредством увеличения давления необходимо охладить их ниже критической температуры. Температура сжиженного газа определяется давлением, под которым он находится. В табл. 35 приводятся температуры кипения сжиженных газов. Понижая давление (например, откачивая образующиеся пары), можно понижать температуру кипения.

Уравнение Ван-дер-Ваальса описывает в некоторых случаях и жидкое состояние вещества.

7. Основы кинетической теории газов

С молекулярной точки зрения газ представляет собой большое число свободно перемещающихся частиц (молекул или атомов). Эти частицы движутся с различными скоростями; сталкиваясь, они изменяют свои скорости.

Средняя длина пути, проходимого молекулой между двумя ближайшими соударениями, называется *длиной свободного пробега*. Длина свободного пробега в газе:

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

где $k=R/N_A$ — постоянная Больцмана, σ — диаметр молекул, T — температура Кельвина, N_A — число Авогадро, p — давление, Q — универсальная газовая постоянная.

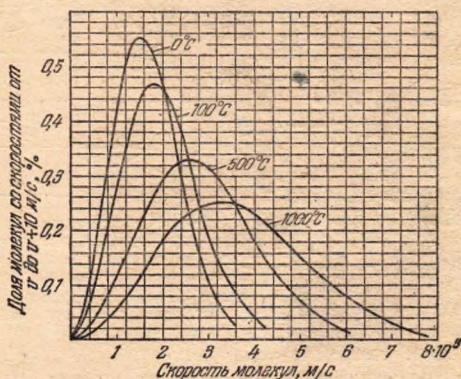


Рис. 21. Распределение молекул водорода по скоростям для различных температур.

Закон, который описывает распределение молекул по скоростям, называется *функцией распределения*. Функция распределения молекул идеального газа (*распределение Максвелла*) представлена на рис. 21. На оси ординат указано относительное число молекул

$\Delta n/n$, которые имеют скорости от v до $v+\Delta v$; на другой оси отложены значения скоростей.

Скорость, соответствующая максимуму на рис. 21, называется наиболее вероятной скоростью v_B .

Средней скоростью молекул называется скорость

$$v_c = \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_n}{n}, \quad (2.23)$$

где v_1, v_2, \dots, v_n — скорости молекул; значения скоростей берутся по абсолютной величине.

Средней квадратичной скоростью называется скорость

$$v_k = \left(\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{n} \right)^{1/2}. \quad (2.24)$$

Из распределения Максвелла получаются следующие выражения для расчета скоростей:

$$v_B^2 = \frac{2kT}{m}, \quad v_c^2 = \frac{8kT}{\pi m}, \quad v_k^2 = \frac{3kT}{m}, \quad (2.25)$$

где m — масса одной молекулы, причем $v_k > v_c > v_B$.

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

$$p = \frac{1}{3} n m v_k^2 = n k T, \quad (2.26)$$

где n — концентрация молекул (число молекул в единице объема).

Парциальным давлением газа, входящего в состав смеси, называется такое давление, которое давал бы этот газ, находясь один в данном объеме при той же самой температуре.

В смеси идеальных газов, которые не вступают в химическую реакцию, общее давление равно сумме парциальных давлений составляющих смесь газов (закон Дальтона):

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n. \quad (2.27)$$

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

$$E = \frac{1}{2} i k T, \quad (2.28)$$

где $i=3$ для одноатомных, $i=5$ для двухатомных, $i=6$ для многоатомных газов. Кинетическая энергия молекул одного моля идеального газа

$$E_M = \frac{1}{2} i R T. \quad (2.29)$$

Молекулы, которые обладают скоростями, большими скорости освобождения (см. стр. 21), могут покинуть верхние слои атмосферы и уйти в мировое пространство.

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

$$p = p_0 e^{-\mu g h / (RT)}, \quad (2.30)$$

где μ — средняя молярная масса смеси газов, составляющих атмосферу, g — ускорение свободного падения вблизи поверхности планеты, R — универсальная газовая постоянная, T — температура по шкале Кельвина, p_0 — давление атмосферы у поверхности планеты, e — основание натуральных логарифмов ($e \approx 2,72$). Соотношение (2.30) называется *барометрической формулой*.

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

$$h \approx \frac{18400T}{T_0} \lg \frac{p_0}{p},$$

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

Многими странами, в том числе и СССР, принята как основа для сравнения стандартная атмосфера, расчет которой ведется в предположении, что давление на уровне моря при 15°C составляет 101325 Па и падение температуры с высотой равно 6,5 К на 1000 м. Параметры стандартной атмосферы приведены в табл. 53.

В окружающем нас воздухе всегда находится некоторое количество водяного пара. Масса водяного пара, находящегося в 1 м³ воздуха, называется *абсолютной влажностью*. Абсолютную влажность можно измерять парциальным давлением водяного пара.

С повышением абсолютной влажности пары воды все ближе подходят к состоянию насыщающего пара. *Максимальной абсолютной влажностью* *) при данной температуре является масса насыщающего водяного пара в 1 м³ воздуха.

Относительной влажностью называется отношение абсолютной влажности к максимальной абсолютной влажности при данной температуре, выраженное в процентах.

Коэффициенты теплопроводности, вязкости и диффузии газа (λ , η , D) вычисляются по формулам:

$$\lambda = \frac{1}{3} \rho v_c l c_V, \quad (2.31)$$

$$\eta = \frac{1}{3} \rho v_c l, \quad (2.32)$$

$$D = \frac{1}{3} v_c l, \quad (2.33)$$

где ρ — плотность газа, v_c — средняя скорость молекул газа, c_V — удельная теплоемкость при постоянном объеме, l — длина свободного пробега молекул.

Если длина свободного пробега становится больше размеров сосуда, в котором находится газ, то такое разрежение называется вакуумом, в вакууме теряют смысл такие понятия, как гра-

*) В определенных условиях может произойти пересыщение паров.

диенты скорости и температуры, а, следовательно, внутреннего трения и теплопроводности. Однако и в вакууме при движении двух пластин параллельно друг другу с относительной скоростью Δv возникает сила трения F_B ; кроме того осуществляется перенос тепла (теплопередача) Q_B между поверхностями, которые имеют разности температур ΔT ; в этих случаях

$$F_B = \eta_B S \Delta v, \quad Q_B = \lambda_B S \Delta T t, \quad (2.34)$$

где коэффициент трения $\eta_B = \frac{1}{6} \rho v_c$, коэффициент теплопередачи $\lambda_B = \frac{1}{6} \rho v_c c_V$, S — площадь пластинки или поверхности, t — время.

ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Таблица 25. 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	°С
Тройная точка равновесного водорода	13,81	—259,34
Равновесие между жидкой и газообразной фазами водорода при давлении 25 мм рт. ст.	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 26. Удельные теплоемкости c_p , теплоты плавления λ , теплоты парообразования r , температуры плавления $t_{пл}$ и кипения $t_{кп}$ некоторых веществ

Вещество	c_p , кДж/(кг·К) при 20°C	$t_{пл}$, °C	λ , кДж/кг	$t_{кп}$, °C	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
Глицерин	2,4	—	176	290	825
Германий	0,31	958	478	2700	—
Дерево:					
дуб 6—8% вес.	2,4	—	—	—	—
влажн.					
сосна 8% вес.	1,7	—	—	—	—
влажн.					
Железо	0,45	1530	293	3050	6300
Золото	0,13	1064,4	66,6	2800	1575
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	20500
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 27. Относительное изменение объема вещества при плавлении

Вещество	$\Delta V/V$, %	Вещество	$\Delta V/V$, %
Алюминий	6,6	Медные сплавы	3,0—4,5
Алюминиевые сплавы	4,5—5,9	Натрий	2,5
Висмут	—3,32	Олово	2,6
Галлий	—3	Ртуть	3,6
Золото	5,19	Свинец	3,6
Индий	2,5	Серебро	4,99
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

Т а б л и ц а 28. Температура плавления огнеупорных материалов

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

Теплоемкость воды

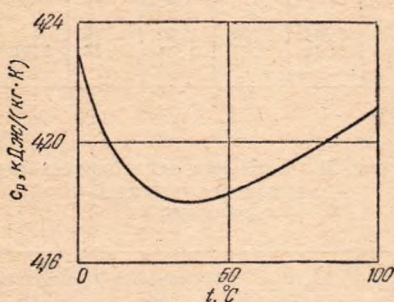


Рис. 22. Удельная теплоемкость воды при различных температурах.

Т а б л и ц а 29. Удельная теплоемкость твердых веществ при низких температурах (Дж/(кг·К))

Вещество	Температура, К							
	20 (кипе- ние Н 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
Плавн. 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°C средняя теплоемкость меди равна 410 Дж/(кг·К), плавленого кварца — 880 Дж/(кг·К).

Таблица 30. Удельная теплоемкость жидкого этилового спирта при различных температурах и давлениях
(c_p , кДж/(кг·К))

Давление, МПа	Температура, °С						
	—60	—40	—20	0	20	40	60
0,98	1,59	1,79	1,99	2,20	2,41	2,62	2,84
5,8	1,59	1,78	1,98	2,17	2,38	2,58	2,79

Давление, МПа	Температура, °С						
	80	100	120	140	160	180	200
0,98	3,06	3,28	3,52	3,75	—	—	—
5,8	3,00	3,21	3,44	3,66	3,90	4,19	4,57

Таблица 31. Удельная теплоемкость газов при нормальном давлении
(c_p , кДж/(кг·К))

Температура, °С	Кислород		Воздух		Углекислый газ		Водяной пар		Этиловый спирт	
	c_p	$\frac{c_p}{c_V}$	c_p	$\frac{c_p}{c_V}$	c_p	$\frac{c_p}{c_V}$	c_p	$\frac{c_p}{c_V}$	c_p	$\frac{c_p}{c_V}$
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 32. Удельная теплота парообразования

Вещество	Температура, °С	r , кДж/кг	Вещество	Температура, °С	r , кДж/кг
Бензин	50—120	230—314	Кислота серная	—	512
Воздух (20% O ₂)	—	213	Нафталин	220	316
Глицерин	100	828	Фреон-11 (CFC1 ₃)	0	189
Керосин	160—230	210—230	Фреон-12 (CFC1 ₂)	0	155
Кислота азотная	—	482	Хлороформ	61,2	247

Температура кипения воды

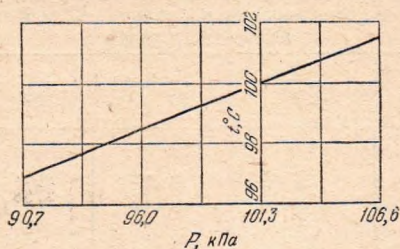


Рис. 23. Температура кипения воды (H_2O) в зависимости от атмосферного давления.

Т а б л и ц а 33. 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	891	—	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

Т а б л и ц а 34. Удельная теплота парообразования углекислоты при различных температурах

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

Таблица 35. Температура плавления $T_{пл}$ в тройной точке, молярная теплота плавления λ , температура кипения $T_{кп}$ при нормальном давлении и теплота парообразования r 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
Фтор	55,2	1520	85,2	6460
Углекислый газ	216,4 (при 0,505 МПа)	7950	194,7 (сублимация)	16500

Примечание. Теплота плавления соответствует температуре плавления в тройной точке, теплота парообразования — температуре кипения при нормальном давлении.

Таблица 36. Плотность, температура отвердевания и температура кипения водного раствора поваренной соли при различных концентрациях и нормальном давлении

Плотность раствора при 20°C ρ , Мг/м ³	Концентрация NaCl, кг на 100 кг воды	Температура отвердевания, °C	Температура кипения, °C
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 37. Максимальные температуры кипения водных растворов солей при нормальном давлении

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

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

Таблица 38. Свойства обычной и тяжелой воды

	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	$t_m, ^\circ\text{C}$	$t_{кп}, ^\circ\text{C}$	Критическая температура, $^\circ\text{C}$	Критическое давление, МПа	Плотность в крит. сост. ρ , Мг/м^3	Наибольшая плотность ρ , Мг/м^3
Вода	0	3,98	100	374,15	22,11	0,215	1
Тяжелая вода	3,82	11,23	101,43	371,5	21,8	0,338	1,106

Примечание. При температуре t_m плотность имеет наибольшее значение.

Таблица 39. Критические параметры

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

Таблица 40. Температура и давление тройных точек

Вещество	T , К	p , кПа	Вещество	T , К	p , 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
Пароводород	13,81	7,04	Бензойная кисло-	395,51	—
			та		

Таблица 41. Свойства насыщенного водяного пара

Давление, 10^5 Па	Температура t , °С	Удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$	Удельная теплота парообразования r , кДж/кг	Давление, 10^5 Па	Температура t , °С	Удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$	Удельная теплота парообразования r , кДж/кг
0,0059	0	207	2500	7,84	169,6	0,2448	2048
0,0196	17,2	63,3	2457	8,82	174,5	0,2189	2031
0,098	45,4	14,96	2388	9,8	179,0	0,1980	2014
0,196	59,7	7,8	2360	11,8	187,1	0,1663	1984
0,392	75,4	4,071	2322	13,7	194,1	0,1434	1956
0,588	85,45	2,785	2297	15,7	200,4	0,1261	1930
0,784	93,0	2,127	2278	17,6	206,2	0,1125	1907
0,88	96,2	1,905	2269	19,6	211,4	0,1015	1882
0,98	99,1	1,726	2262	29,4	232,8	0,0679	1790
1,012	100	1,674	2260	39,2	249,2	0,0506	1712
1,209	105	1,42	2242	55,0	270	0,0356	1605
1,76	116,3	0,996	2215	74,4	290	0,0255	1480
1,96	119,6	0,902	2206	99	310	0,0183	1320
2,94	132,9	0,617	2168	128	330	0,0130	1140
3,92	142,9	0,4708	2137	166	350	0,00881	893
4,90	151,1	0,3818	2111	211	370	0,00493	440
5,88	158,1	0,3214	2088	220,6	374	0,00347	113
6,86	164,2	0,2778	2067	221,1	374,15	0,00317	0

Таблица 42. Коэффициент объемного расширения жидкостей (для температур около 18°C)

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

Таблица 43. Коэффициент линейного расширения твердых тел
(для температур около 20°C)

Вещество	$10^{-6} \alpha, \text{K}^{-1}$	Вещество	$10^{-6} \alpha, \text{K}^{-1}$
Алмаз	0,91	Лед (от -10° до 0°C)	50,7
Алюминий	22,9	Магний	25,1
Бронза	17,5	Медь	16,7
Винипласт	70	Нейзильбер	18,4
Висмут	13,4	Никель	13,4
Вольфрам	4,3	Олово	21,4
Гранит	8,3	Платина	8,9
Дерево (вдоль волокон)	2-6	Платино-иридиевый	8,7
Дерево (поперек волокон)	50-60	сплав	
Дюралюминий	22,6	Свинец	28,3
Железо кованое	11,9	Сталь углеродистая	11,1-12,6
» литое	10,2	Сталь нержавеющая	9,6-16,0
Золото	14,5	Стекло обычное	8,5
Инвар (36,1% Ni)	0,9	» пирекс	3,0
Иридий	6,5	Углерод (графит)	7,9
Кварц (плавленный)	0,5	Фарфор	3,0
Кирпичная кладка	5,5	Цемент и бетон	12,0
Константан	17,0	Цинк	30,0
Латунь	18,9	Чугун	10-12
		Эбонит	70

Таблица 44. Коэффициент линейного расширения 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 45. Поверхностное натяжение жидкостей (при 20°C)

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 85%	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°C)	Толуол	28,5
Масло касторовое	36,4 (18°C)	Уксусная кислота	27,8
» оливковое	33,06 (18°C)	Эфир этиловый	16,9

Таблица 46. Поверхностное натяжение воды и этилового спирта при различных температурах (α , 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 47. Поверхностное натяжение металлов в жидком состоянии

Металл	Температура, °C	α , мН/м	Металл	Температура, °C	α , мН/м
Алюминий	750	520	Ртуть	20	465
Висмут	300	376		112	454
	400	370		200	436
	500	363		300	405
				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 48. Коэффициент теплопроводности материалов

Вещество	Влажность массовая, %	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
Войлок асбестовый	»	0,052—0,093
» шерстяной	»	0,047—0,058
Вата стеклянная	—	0,035—0,081
Газостекло (пеностекло)	Воздушно-сухое	0,073—0,107
Камышит (плиты)	Воздушно-сухой	0,105
Мипора	—	0,038
Пенобетон	Воздушно-сухой	0,07—0,32
Пенопласты	Воздушно-сухие	0,043—0,058
Торфолиты	—	0,047—0,07
Шлак котельный	Воздушно-сухой	0,233—0,372
<i>Другие материалы</i>		
Бакелитовый лак	—	0,29
Бетон с каменным щебнем	8	1,28
Бумага обыкновенная	Воздушно-сухая	0,14
Винипласт	—	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 свежавывающий	—	0,105
» уплотненный	—	0,35
» начавший таять	—	0,64
Сосна (вдоль волокон)	8	0,35—0,41
» (поперек волокон)	8	0,14—0,16
Стекло (обыкновенное)	—	0,74
Фторопласт-3	—	0,058
Фторопласт-4	—	0,233
Шлакобетон	13	0,698
Штукатурка	6—8	0,791

Т а б л и ц а 49. Коэффициент теплопроводности λ асбеста и пенобетона при различных температурах
($\rho_a = 576 \text{ кг/м}^3$, $\rho_n = 400 \text{ кг/м}^3$, λ , Вт/(м·К))

Материал	$t, ^\circ\text{C}$				
	-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

Т а б л и ц а 50. Коэффициент теплопроводности жидкостей (Вт/(м·К)) при различных температурах
(по линии насыщения)

Вещество	Температура, $^\circ\text{C}$		
	0	50	100
Анилин	0,19	0,177	0,167
Ацетон	0,17	0,16	0,15
Бензол	—	0,138	0,126
Вода	0,551	0,648	0,683
Глицерин	—	0,283	0,288
Масло вазелиновое	0,126	0,122	0,119
» касторовое	0,184	0,177	0,172
Спирт метиловый	0,214	0,207	—
» этиловый	0,188	0,177	—
Толуол	0,142	0,129	0,119

Т а б л и ц а 51. Коэффициент теплопроводности газов при нормальном давлении

Вещество	Температура, $^\circ\text{C}$	$\lambda, 10^{-4}$ Вт/(м·К)	Вещество	Температура, $^\circ\text{C}$	$\lambda, 10^{-4}$ Вт/(м·К)
Азот	15	251	Гелий	43	1558
Аргон	41	187	Кислород	20	262
Водород	15	1754	Метан	0	307
Воздух	20	257	Углекислый газ	20	162

Т а б л и ц а 52. Температурные коэффициенты давления газов

Газ	Азот	Аммиак	Водород	Воздух без CO_2	Гелий	Кислород	Углекислый газ
$\alpha, 10^{-3} \text{ K}^{-1}$	3,674	3,802	3,662	3,674	3,660	3,674	3,726

Таблица 53. Стандартная атмосфера

(p_0 и ρ_0 — давление и плотность на уровне моря при 15°C)

Высота, м	Давление, p/p_0	Плот- ность, ρ/ρ_0	Темпера- тура, °C	Высота, м	Давление, p/p_0	Плот- ность, ρ/ρ_0	Темпера- тура, °C
0	1	1	15	6 000	0,465	0,538	-24
1000	0,887	0,907	8,5	7 000	0,405	0,481	-30,5
2000	0,784	0,822	2	8 000	0,351	0,428	-37
3000	0,692	0,742	-4,5	9 000	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	—	—	—	—

Таблица 54. Коэффициент диффузии газов и паров в воздухе
(при 0°C и нормальном давлении)

Газ	$10^{-4} D, \text{ м}^2/\text{с}$	Газ	$10^{-4} D, \text{ м}^2/\text{с}$
Аммиак	0,2	Метан	0,2
Ацетилен	0,19	Метиловый спирт	0,13
Бензин авиационный	0,079	Сероуглерод	0,09
Бензол	0,078	Толуол	0,07
Водород	0,64	Углекислый газ	0,14
Водяной пар	0,21	Этиловый спирт	0,10
Кислород	0,18	Этиловый эфир	0,08
Кислота уксусная	0,107		

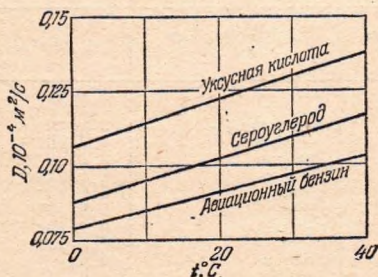


Рис. 24. Зависимость коэффициента диффузии газов в воздухе от температуры.

Таблица 55. Коэффициент диффузии водных растворов

Растворимое вещество	$t, ^\circ\text{C}$	Концентрация раствора, моль/л	$D, 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$	Растворимое вещество	$t, ^\circ\text{C}$	Концентрация раствора, моль/л	$D, 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$
Аммиак	12	1,0	1,64	Медный купорос	17	0,10	0,45
	4	3,55	1,23			0,50	0,34
Глицерин	10	0,125	0,63			0,95	0,27
		0,875	0,40	Натрий хлористый	15	0,02	1,09
		1,75	0,35			0,1	1,09
Калий хлористый	25	0,02	1,95			0,9	1,12
	18,5	1,0	1,61			3,9	1,18
		2,0	1,73	Сахар тростниковый	18,5	0,30	0,36
Кальций хлористый	9	0,29	0,79			0,97	0,28
		0,37	1,09			1,97	0,50
		1,5	0,84	Серебро азотнокислое	12	0,02	1,19
Кислота азотная	19,5	0,10	2,4			0,10	1,13
		0,90	2,62			0,90	1,02
		3,90	2,85			3,9	0,61
Кислота серная	18	0,35	1,53	Спирт этиловый	11	0,05	0,84
		2,85	1,85			0,25	0,8
		4,85	2,20			0,75	0,72
Кислота соляная	19,2	0,10	2,56			3,75	0,52
		0,90	3,04				
		3,20	4,5				

Таблица 56. Коэффициент диффузии и самодиффузии в твердых телах

Численные значения рассчитываются по эмпирической формуле

$$D = D_0 e^{-Q/T} \quad (T - \text{температура в кельвинах})$$

Диффундирующее вещество	Диффузионная среда	$D_0, \text{ см}^2/\text{с}$	Q
Углерод	α -железо	$2 \cdot 10^{-2}$	10 050
»	γ -железо	$1,9 \cdot 10^{-2}$	14 150
Медь	Железо	3,0	30 500
»	Никель	$1,01 \cdot 10^{-3}$	17 750
»	Серебро	$5,9 \cdot 10^{-5}$	12 400
Железо	Медь	$1,6 \cdot 10^6$	46 510
Водород H_2	α -железо	$2,2 \cdot 10^{-3}$	1 450
Азот N_2	»	$6,6 \cdot 10^{-3}$	9 300
Золото	Золото	9,2	31 450
Серебро	Серебро	0,9	23 000
Свинец	Свинец	6,6	14 000
γ -железо	γ -железо	0,7	34 000

Таблица 57. Газокинетические диаметры молекул

Вещество	Диаметр d , нм	Вещество	Диаметр d , нм
Азот	0,37	Метан	0,444
Аргон	0,36	Неон	0,354
Водород	0,27	Оксид 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 58. Удельная теплота сгорания топлива

Теплота сгорания, определяемая без учета потерь на испарение воды, содержащейся в топливе, называется высшей теплотой W_B ,
с учетом их — низшей теплотой W_H

Топливо	W_B , МДж/кг	W_H , МДж/кг
<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
Динамит 75%	—	5,4
Древесный уголь (сухой)	30,0	—
Дрова	19,0	10,0
Каменные угли длиннопламенные (Д)	31,0—32,0	21,0—24,0
Порох	—	3,0—3,1
Торф	22,0—25,0	8,4—11,0
<i>Жидкое</i>		
Бензин высшего качества	—	44,1
» III сорта	—	43,6
Дизельное автотракторное горючее	—	42,7
Керосин торговый	—	43,0
Мазут	—	39,0—41,0
Этиловый спирт	—	27,2
<i>Газообразное (0 °С 1013 гПа)</i>		
Ацетилен	50	48,2
Бутан	49,6	46,1
Водород	142	120
Коксовый газ (очищенный)	—	34,8
Оксид углерода	10,2	—
Природный газ	—	42—47

Таблица 59. Константы Ван-дер-Ваальса

Вещество	$a, \text{Дж} \cdot \text{м}^3 / \text{моль}^2$	$b, 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{моль}$	Вещество	$a, \text{Дж} \cdot \text{м}^3 / \text{моль}^2$	$b, 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{моль}$
Азот	0,141	39,2	Ксенон	0,415	51
Аммиак	0,422	37,2	Метан	0,228	27,1
Аргон	0,136	32,3	Неон	0,21	17,1
Ацетон	1,58	98,5	Пропан	0,92	84,5
Бензол	1,85	115	Ртуть	0,82	16,7
Вода	0,555	30,5	Спирт метиловый	0,95	67
Водород	0,0245	26,6	* пропиловый	1,5	101
Гелий	0,0035	23,8	* этиловый	1,22	84
Кислород	0,138	31,8	Эфир этиловый	1,75	134
Криптон	0,234	39,9			

Таблица 60. Психрометрическая таблица относительной влажности воздуха

Показания сухого термометра, °C	Разность показаний сухого и влажного термометров, °C										
	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. Относительную влажность определяют с помощью психрометра, состоящего из двух термометров — сухого и с резервуаром, покрытым влажной материей. Для определения относительной влажности по табл. 60 нужно взять столбец, соответствующий разности показаний сухого и влажного термометров, и строку, соответствующую показанию сухого термометра.

ГЛАВА III

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

1. Гармонические колебания

Ограниченные движения (или изменения состояний), повторяющиеся полностью или частично в окрестности некоторого среднего положения (например, вблизи положения устойчивого равновесия), называются *колебаниями*. Системы, которые совершают колебания, называются *колебательными системами*. Колебания называются *механическими*, если они характеризуются изменением только механических величин (например, смещения, скорости, ускорения, давления и т. п.).

Периодическими называются такие колебания, в которых каждое значение изменяющейся величины повторяется неограниченное число раз через одинаковые промежутки времени. Наименьший промежуток времени T , по истечении которого повторяется каждое значение изменяющейся величины, называется *периодом* колебания. Величина $\nu = 1/T$ называется *частотой* периодических колебаний. Частота ν выражается в герцах; 1 герц (Гц) — частота такого периодического колебания, период которого равен 1 с.

Гармоническим колебанием называется такое периодическое изменение величины, которое может быть описано синусоидальным (или косинусоидальным) законом:

$$u = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (3.1)$$

где A — наибольшее (по модулю) значение изменяющейся величины — называется *амплитудой* гармонического колебания, $\omega t + \varphi$ — *фазой* гармонического колебания, φ — *начальной фазой*, ω — *круговой частотой*. Круговая частота ω и частота колебаний ν связаны следующим соотношением:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu. \quad (3.2)$$

Фаза гармонического колебания определяет значение изменяющейся величины с единичной амплитудой в данный момент времени. Фаза выражается в угловых единицах (радианах или градусах). Круговая частота выражается в радианах в секунду (рад/с).

Примером гармонического колебания может служить движение проекции шарика, равномерно вращающегося по окружности с уг-

ловой скоростью ω (рис. 25). Для шариков 1 и 2 смещения проекций соответственно равны

$$u_1 = R \sin \alpha = R \sin \omega t,$$

$$u_2 = R \sin (\alpha + \varphi) = R \sin (\omega t + \varphi).$$

Колебания с одинаковыми частотами, но с различными начальными фазами называются *сдвинутыми по фазе*. Сдвигом (или *разностью*) фаз называется разность начальных фаз. Сдвиг фаз двух колебаний одинаковой частоты не зависит от выбора начала отсчета времени. Например, сдвиг фаз для проекций шариков 1 и 2 (см. рис. 25) при любом выборе начала отсчета времени равен φ .

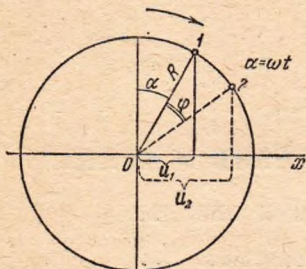


Рис. 25. Гармонические колебания проекций шариков, равномерно вращающихся по окружности.

Гармонические колебания тела возникают при воздействии на него квазиупругой силы. *Квазиупругими* называются такие силы, которые по своей природе не являются упругими, но величина их пропорциональна смещению тела от положения равновесия; эти силы всегда направлены к положению равновесия. Математическое выражение для квазиупругой силы имеет вид

$$F = -ku, \quad (3.3)$$

где k — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом квазиупругой силы, u — смещение; знак минус указывает на то, что векторы силы и смещения имеют противоположные направления.

Все виды периодических колебаний можно с любой степенью точности представлять в виде суммы гармонических колебаний *).

2. Маятники

Физическим маятником называется всякое тело, подвешенное так, что его центр тяжести находится ниже точки подвеса. Подвешенное подобным образом тело способно совершать колебания. Маятник называется *точечным* (или *математическим*), если можно считать, что вся масса тела сосредоточена в одной точке. Достаточно точной реализацией математического маятника может служить тело, подвешенное на нерастяжимой 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. Все нижеприведенные формулы относятся именно к таким колебаниям.

Период математического маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (3.4)$$

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

*) В математическом анализе доказывается, что любое периодическое колебание можно представить в виде бесконечной суммы гармонических колебаний, т. е. в виде так называемого гармонического ряда.

Колебания груза, подвешенного на пружине, можно считать гармоническими, если амплитуда колебаний лежит в пределах выполнения закона Гука (см. стр. 41), а силы трения достаточно малы. Период колебаний груза (масса пружины $M \ll m$):

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (3.5)$$

где m — масса груза, k — жесткость пружины, численно равная силе, необходимой для растяжения пружины на единицу длины.*)

Крутильный маятник представляет собой тело, совершающее вращательно-колебательное движение под действием пружины (например, балансиры в наручных часах и будильниках). При определенных условиях (амплитуда колебаний достаточно мала, достаточно малы и силы трения) эти колебания также можно считать гармоническими. Период колебаний крутильного маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{D}}, \quad (3.6)$$

где I — момент инерции тела относительно оси вращения, D — *крутильная жесткость*, численно равная закручивающему моменту, необходимому для поворота тела на единицу угла.

Период колебаний физического маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mga}}, \quad (3.7)$$

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 $l = I/mga$ называется *приведенной длиной* физического маятника, которая равна длине такого математического маятника, период колебаний которого совпадает с периодом колебаний данного физического маятника.

3. Свободные и вынужденные колебания

Механические колебания, которые происходят под действием сил, возникающих в самой колебательной системе, называются *свободными колебаниями*. Если свободные колебания тела вызваны наличием только квазиупругой силы, то они будут гармоническими.

Колебания тела, обусловленные одновременным действием квазиупругой силы и силы трения (которая пропорциональна мгновенной скорости u : $F_{\text{тр}} = -ru$ **), называются *затухающими колебаниями*. При затухающих колебаниях смещение

$$u = Ae^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi). \quad (3.8)$$

Положительная величина A называется *начальной амплитудой*, δ — *коэффициентом затухания*, $Ae^{-\delta t}$ — *мгновенным значением амплитуды*, ω — *круговой частотой*; e — основание натуральных

*) Формула (3.5) относится не только к колебаниям груза на пружине, но и вообще ко всем случаям, при которых справедливо соотношение (3.3).

**) Знак минус означает, что векторы скорости и силы направлены противоположно.

логарифмов;

$$\delta = \frac{r}{2m}, \quad (3.9)$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \quad (3.10)$$

где r — коэффициент сопротивления, m — масса тела, k — коэффициент квазиупругой силы, $\omega_0^2 = k/m$. Затухающие колебания изображаются кривой, показанной на рис. 26.

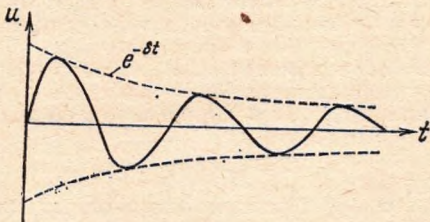


Рис. 26. Затухающие колебания ($\varphi = 0$).

Колебания, которые совершает тело под действием периодической внешней силы, называются *вынужденными*. Амплитуда вынужденных колебаний резко возрастает, если период синусоидальной

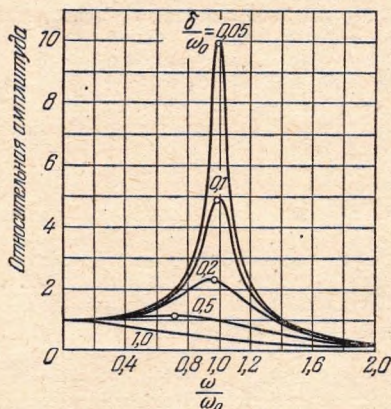


Рис. 27. Резонансные кривые при различных затуханиях. По оси Oy отложены относительные амплитуды смещения Ak/F_0 , где A — амплитуда смещения, F_0/k — статическое смещение, равное тому смещению, которое вызвала бы постоянная сила, равная амплитуде действующей силы. По оси Ox отложены относительные изменения частоты 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 положение максимального значения амплитуды смещения.

внешней силы приближается к периоду свободных колебаний тела (рис. 27). Это явление называют *резонансом*. Если силы трения велики (большое затухание), то резонанс выражен слабо (см. рис. 27) или совсем не проявляется (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 маятника в часах)

4. Сложение гармонических колебаний

Когда тело совершает одновременно два (или более) колебательных движения, то результирующее смещение его для любого момента времени равно векторной сумме всех смещений.

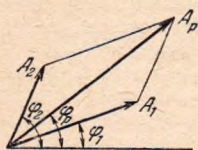


Рис. 28. Сложение амплитуд смещений гармонических колебаний с одинаковым направлением.

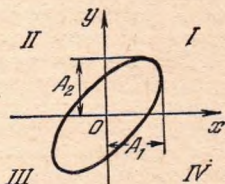


Рис. 29. Сложение взаимно перпендикулярных гармонических колебаний.

При сложении двух гармонических колебаний, имеющих одинаковые частоты и направления:

$$\begin{aligned} u_1 &= A_1 \sin(\omega t + \varphi_1), \\ u_2 &= A_2 \sin(\omega t + \varphi_2), \end{aligned} \quad (3.11)$$

амплитуда результирующего смещения A находится по правилу параллелограмма, как показано на рис. 28. Результирующее смещение для этого случая:

$$u = A \sin(\omega t + \varphi_p), \quad (3.12)$$

где

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}, \quad \operatorname{tg} \varphi_p = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}.$$

Когда тело совершает одновременно два гармонических колебания (с одинаковой частотой) во взаимно перпендикулярных направлениях, его смещения определяются уравнениями

$$\begin{aligned} u_x &= A_1 \sin \omega t, \\ u_y &= A_2 \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (3.13)$$

и траектория движения описывается уравнением эллипса (рис. 29)

$$\frac{u_x^2}{A_1^2} + \frac{u_y^2}{A_2^2} - \frac{2u_x u_y}{A_1 A_2} \cos \varphi = \sin^2 \varphi. \quad (3.14)$$

При $A_1 = A_2$ и $\varphi = 90^\circ$ движение тела происходит по окружности радиуса A_1 . При $\varphi = 0$ тело движется по прямой, проходящей через I и III четверти; при $\varphi = \pi$ тело движется по прямой, которая проходит через II и IV четверти.

5. Волны

Распространение с конечной скоростью колебаний в пространстве называется *волной*. Разграничение колебаний и волн производится согласно следующему условию: если $L < vT$ (L — характерные размеры системы, v — скорость распространения возмущений, T — период колебаний), то ограниченные повторяющиеся изменения в системе являются колебаниями; если $L > vT$, то такие изменения являются волнами. Например, при ударе по одному концу стержня образуется сжатие, которое распространяется с определенной скоростью вдоль стержня.

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

При распространении механических волн частицы среды совершают колебательные движения относительно своих положений равновесия. Скорость таких движений частиц среды называется *колебательной скоростью*.

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 называют *синусоидальными* (или *гармоническими*). Важной характеристикой синусоидальных волн является длина волны. *Длина волны* λ — это расстояние, на которое распространяется волна в течение одного периода:

$$\lambda = vT. \quad (3.15)$$

Частота ν и длина волны λ связаны соотношением

$$\nu = v/\lambda, \quad (3.16)$$

где v — скорость волн.

Математическое выражение вида

$$u = A \sin \omega \left(t - \frac{r}{v} \right) = A \sin (\omega t - kr), \quad (3.17)$$

которое описывает изменение состояния среды при распространении синусоидальных волн, называется *уравнением плоских гармонических волн* *).

В этом уравнении A — амплитуда волны, ω — круговая частота, r — расстояние от источника, возбуждающего волну, до точки пространства, в которой рассматривается изменение некоторого свойства среды, v — скорость волны, $k = 2\pi/\lambda$ — *волновое число*; $\omega t - kr$ называется *фазой волны*.

Поверхность, все точки которой находятся в одинаковой фазе, называется *волновой поверхностью*.

*) Под u здесь можно подразумевать любой параметр, характеризующий состояние среды (например, давление, температуру и т. д.).

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

$$u_{\text{ц}} = \frac{A}{\sqrt{r}} \sin(\omega t - kr), \quad (3.18)$$

$$u_{\text{с}} = \frac{A}{r} \sin(\omega t - kr), \quad (3.19)$$

где A — величина, численно равная амплитуде волны на расстоянии единицы длины 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 *поперечной*. Механические волны в жидких и газообразных средах являются продольными, в твердых телах возможны и продольные, и поперечные волны.

Скорость продольных волн в стержнях:

$$v_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (3.20)$$

где E — модуль Юнга, ρ — плотность.

Скорость продольных волн в твердом теле, поперечные размеры которого много больше длины распространяющейся волны:

$$v_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (3.21)$$

где ρ — плотность вещества, E — модуль Юнга, μ — коэффициент Пуассона (см. табл. 17).

Скорость продольных волн в тонких пластинках:

$$v_{\text{пп}} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}. \quad (3.22)$$

Скорость продольных волн в жидкостях:

$$v_{\text{ж}} = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho\beta_{\text{из}}}}, \quad (3.23)$$

где $\beta_{\text{из}}$ — изотермическая сжимаемость *), $\gamma = c_p/c_v$.

Скорость поперечных волн:

$$v_2 = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (3.24)$$

где G — модуль сдвига (см. стр. 43).

*) Сжимаемость — см. стр. 43; изотермическая сжимаемость отвечает процессу сжатия, происходящему при постоянной температуре.

Скорость звуковых волн в газах:

$$v_r = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}, \quad (3.25)$$

где $\gamma = c_p/c_v$, p — давление.

Формула (3.25) применима к идеальным газам, причем в этом случае ее можно записать в виде (R , μ , T см. на стр. 58)

$$v_r = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}}. \quad (3.26)$$

Волны на поверхности жидкости не являются ни поперечными, ни продольными. Движение частиц воды в поверхностных волнах более сложное (рис. 30).

Скорость поверхностных волн *):

$$v_p = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi\alpha}{\lambda\rho}}, \quad (3.27)$$

где g — ускорение свободного падения, λ — длина волны, α — коэффициент поверхностного натяжения, ρ — плотность.

Формулу (3.27) можно применять, если глубина жидкости не меньше $0,5\lambda$.

Когда глубина жидкости h мала (меньше $0,5\lambda$),

$$v_p = \sqrt{gh}. \quad (3.28)$$

При распространении волн переносится энергия, но частицы среды при этом не перемещаются по направлению распространения волн, а лишь совершают колебательные движения около положений

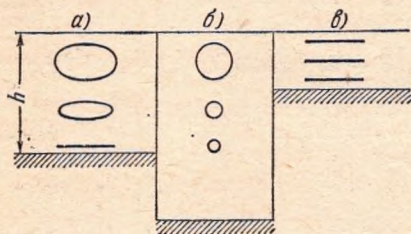


Рис. 30. Траектории частиц воды при распространении поверхностных волн: а) в глубокой воде; б) в глубокой воде (отношение $2\pi h/\lambda \gg 1$); в) в мелкой воде (отношение $2\pi h/\lambda \ll 1$).

равновесия (если волны имеют малую амплитуду и распространяются в невязкой среде). *Интенсивностью* волны называется величина, численно равная средней энергии, переносимой волной за единицу времени через единицу площади волновой поверхности. Интенсивность выражается в Вт/м². Интенсивность звуковых волн иногда называют *силой звука*.

При прохождении механических волн скорость и ускорение частиц среды изменяются по тому же гармоническому закону, что и смещение.

Если амплитуда смещения частиц при распространении плоской гармонической волны с круговой частотой ω имеет величину u_0 , то амплитуда колебательной скорости будет иметь значение

$$\dot{u}_0 = \omega u_0, \quad (3.29)$$

*) Формула (3.27) применима для волн на границе раздела жидкость — газ, когда плотность жидкости много больше плотности газа.

амплитуда ускорения

$$a_0 = \omega^2 u_0, \quad (3.30)$$

интенсивность

$$I = \frac{1}{2} \rho v \dot{u}_0^2, \quad (3.31)$$

где ρ — плотность среды, v — скорость волны.

6. Звук

Звук называются механические волны, частоты которых лежат в пределах от 17—20 до 20 000 Гц. Эти частоты механических волн способно воспринимать человеческое ухо. Механические волны с частотами ниже 17 Гц называют *инфразвуками*, а свыше 20 000 Гц — *ультразвуками*.

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

Изменение давления в среде при распространении звуковых волн по сравнению с давлением при отсутствии волн называется *звуковым давлением*. Амплитуда звукового давления Δp_0 связана с амплитудой колебательной скорости \dot{u}_0 соотношением

$$\Delta p_0 = \rho v \dot{u}_0. \quad (3.32)$$

Интенсивность плоских звуковых волн уменьшается вследствие поглощения в среде по закону

$$I_x = I_0 e^{-2\alpha x}, \quad (3.33)$$

где I_0 — интенсивность входящих в среду волн, I_x — их интенсивность после прохождения пути x .

Величина α , определяющая степень ослабления звуковых волн, называется *коэффициентом поглощения звука* (по амплитуде).

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

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

ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Таблица 61. Скорость звука в чистых жидкостях и маслах

Жидкость	$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м/с}$	$\alpha, \text{м/(с}\cdot\text{K)}$
<i>Чистые жидкости</i>			
Анилин	20	1656	-4,6
Ацетон	20	1192	-5,5
Бензол	20	1326	-5,2
Вода морская	17	1510—1550	—
» обычная	25	1497	2,5
Глицерин	20	1923	-1,8
Керосин	34	1295	—
Ртуть	20	1451	-0,46
Спирт метиловый	20	1123	-3,3
» этиловый	20	1180	-3,6
<i>Масла</i>			
Арахисовое	31,5	1562	—
Веретенное	32	1342	—
Газолиновое	34	1250	—
Кедровое	29	1406	—
Льняное	31,5	1772	—
Оливковое	32,5	1381	—
Сурепное	30,8	1450	—
Трансформаторное	32,5	1425	—
Эвкалиптовое	29,5	1276	—

Примечание. Скорость звука в жидкостях уменьшается с повышением температуры (за исключением воды). Для других температур скорость может быть подсчитана по формуле $v_t = v + \alpha(t - t_0)$, где v — указанная в таблице скорость, α — температурный коэффициент, указанный для чистых жидкостей в последней графе, t — температура, при которой рассчитывается скорость, t_0 — указанная в таблице температура.

Таблица 62. Скорость звука в твердых материалах (при 20°C)

Материал	$v_0, \text{м/с}$	$v_1, \text{м/с}$	$v_2, \text{м/с}$	Материал	$v_0, \text{м/с}$	$v_1, \text{м/с}$	$v_2, \text{м/с}$
Алюминий	5080	6260	3080	Пробка	500	—	—
Гипс	—	4970	2370	Резина	46	1040	27
Железо	5170	5850	3230	Свинец	2640	3600	1590
Известняк	—	6130	3200	Слюда	—	7760	2160
Каучук	—	1479	—	Сталь углеродистая	5050	6100	3300
Латунь	3490	4430	2123	Стекло кварцевое	5370	5570	3515
Лед	3280	3980	1990	» кронглас	5300	5660	3420
Медь	3710	4700	2260	» легкий флинт	4550	4800	2950
Мрамор	—	6150	3260	» тяжелый крон	4710	5260	2960
Никель	4785	5630	2960	» флинт	3490	3760	2220
Олово	2730	3320	1670	Фарфор	4884	5340	3120
Песчаник	—	3700	—	Цинк	3810	4170	2410
Плексиглас	—	2670	1121	Шифер	—	5870	2800
Полистирол	—	2350	1120	Эбонит	1570	2405	—

Таблица 63. Свойства Земли на разных глубинах и скорость сейсмических волн

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

H , км	ρ , Мг/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 64. Скорость звука в газах при нормальном давлении

Газ	t , °C	v , м/с	α , м/(с·К)	Газ	t , °C	v , м/с	α , м/(с·К)
Азот	0	334	0,6	Гелий	0	965	0,8
Аммиак	0	415	—	Кислород	0	316	0,56
Бензол (пар)	97	202	0,3	Неон	0	435	0,8
Водород	0	1284	2,2	Спирт метиловый	97	335	0,46
Водяной пар	134	494	—	» этиловый	97	269	0,4
Воздух	0	331	0,59	Углекислый газ	0	259	0,4

Примечания. 1. Скорость звука в газах при постоянном давлении увеличивается с повышением температуры. Поэтому для расчета скорости при других температурах приведен температурный коэффициент α изменения скорости (см. табл. 61).

2. При высоких частотах (или низких давлениях) наблюдается зависимость скорости звука от частоты. Приведенные значения относятся к таким частотам и давлениям, при которых скорость практически не зависит от частоты.

Скорость звука в воздухе и азоте

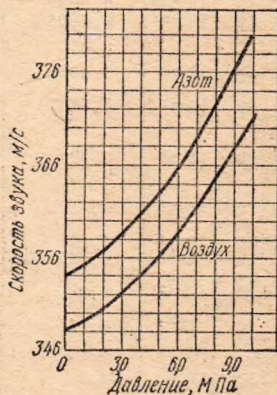


Рис. 31. Зависимость скорости звука в воздухе и азоте от давления. Приведенные зависимости относятся к температуре 20°C и диапазону частот от 200 до 500 кГц.

Таблица 65. Шкала механических волн

Частота, Гц	Наименование	Способы возбуждения	Применения
0,5—20	Инфразвуки	Колебания воды в больших водоемах, биения сердца	Предсказание погоды, диагностика заболеваний сердца
20—2·10 ⁴	Слышимые звуки	Голос человека и животных, музыкальные инструменты, свистки, сирены, громкоговорители и т. д.	Для связи и сигнализации, а также измерения расстояний (звукометрия)
2·10 ⁴ —10 ¹⁰	Ультразвуки	Магнитострикционные и пьезоэлектрические излучатели, свистки Гальтона; возбуждаются также некоторыми животными и насекомыми (летучие мыши, сверчки, саранча и т. д.)	Гидролокация, очистка деталей, дефектоскопия деталей и строительных конструкций, ускорение химических реакций, медицинские и биологические исследования, молекулярная физика
10 ¹¹ и выше	Гиперзвуки	Тепловые колебания молекул	В научных исследованиях

Таблица 66. Сила звука / и звуковые давления

Децибелы	I , Вт/м ²	Δp , Па	Примеры звуков указанной силы
0	10 ⁻¹²	0,00002	Предел чувствительности человеческого уха
10	10 ⁻¹¹	0,000065	Шорох листьев. Слабый шепот на расстоянии 1 м
20	10 ⁻¹⁰	0,0002	Тихий сад
30	10 ⁻⁹	0,00065	Тихая комната. Средний уровень шума в зрительном зале. Игра скрипки пианиссимо
40	10 ⁻⁸	0,002	Негромкая музыка. Шум в жилом помещении
50	10 ⁻⁷	0,0065	Слабая работа громкоговорителя. Шум в ресторане или учреждении с открытыми окнами
60	10 ⁻⁶	0,02	Громкий радиоприемник. Шум в магазине. Средний уровень разговорной речи на расстоянии 1 м
70	10 ⁻⁵	0,0645	Шум мотора грузового автомобиля. Шум внутри трамвая
80	10 ⁻⁴	0,20	Шумная улица. Машинописное бюро
90	10 ⁻³	0,645	Автомобильный гудок. Фортиссимо большого симфонического оркестра
100	10 ⁻²	2,0	Клепальная машина. Автомобильная сирена
110	10 ⁻¹	6,45	Пневматический молот
120	1	20	Реактивный двигатель на расстоянии 5 м. Сильные удары грома
130	10	64,5	Болевой предел; 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.

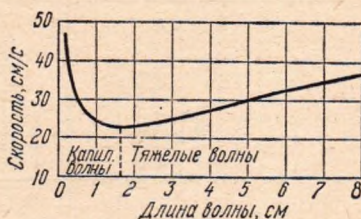


Рис. 32. Дисперсия поверхностных волн ($h > 0,5\lambda$).

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 (рис. 32; соотношение (3.27)), если глубина жидкости достаточно велика ($h > 0,5\lambda$).

Уровни громкости звука при слуховом восприятии

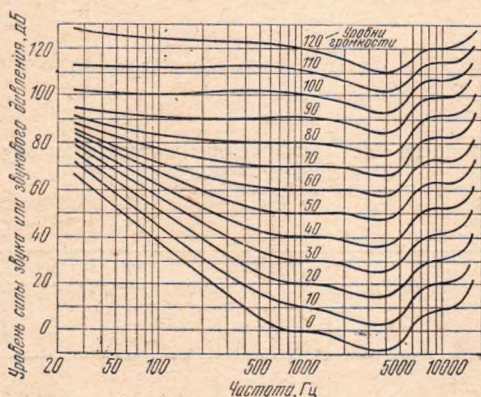


Рис. 33. Уровни громкости.

На рис. 33 приведены кривые интенсивности звуков равной громкости. Верхняя кривая соответствует порогу болевого ощущения, нижняя — порогу слышимости. Значения частоты отложены в логарифмическом масштабе.

Таблица 67. Коэффициент отражения звуковых волн на границе раздела различных сред (при нормальном падении) в %
Коэффициент отражения равен отношению интенсивностей отраженных и падающих звуковых волн

Материал	Алюминий	Вода	Масло трансформаторное	Медь	Никель	Ртуть	Сталь	Стекло
Алюминий	0	72	74	18	24	1	21	2
Вода		0	0,6	87	89	75	88	65
Масло трансформаторное			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.
2. При отражении от пластинки коэффициент отражения зависит от отношения ее толщины к длине волны.

Таблица 68. Коэффициент поглощения звука в воздухе (при 20°C)
 $\alpha, 10^{-4} \text{ см}^{-1}$

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

Примечание. Указанные значения относятся к давлениям, близким к нормальному.

Таблица 69. Звукопоглощательная способность материалов
Звукопоглощательная способность—отношение поглощенной энергии звука к энергии, падающей на отражающую поверхность

Материал	Частота, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Войлок (толщиной 25 мм)	0,18	0,36	0,71	0,79	0,82	0,85
Деревянная обшивка	0,10	0,11	0,11	0,08	0,082	0,11
Кирпичная стенка (не- оштукатуренная)	0,024	0,025	0,032	0,041	0,049	0,07
Ковер с ворсом	0,09	0,08	0,21	0,27	0,27	0,37
Мрамор	0,01	—	0,01	—	0,015	—
Стекло одинарное	0,03	—	0,027	—	0,02	—
Стекланная вата (толщи- ной 9 см)	0,32	0,40	0,51	0,60	0,65	0,60
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 70. Поглощение звука в жидкостях

Жидкость	$t, ^\circ\text{C}$	Диапазон частот, МГц	$\frac{\alpha}{v^2}, 10^{-17} \text{ c}^2/\text{cm}$
Азот	-199	44,5	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
Масло касторовое	18,5	3	11 000
Нефть	25	10	~100
Ртуть	20	0,5—1000	5,5
Скипидар	25	10	150
Спирт метиловый	20	5—46	43
» этиловый	20	7—100	52
Эфир этиловый	25	10	140

Примечание. Указанные значения относятся к давлениям 0,1—2 МПа. При этих значениях поглощение практически не зависит от давления.

Таблица 71. Коэффициент поглощения акустических волн в морской воде (при 15—20°C)

$f, \text{кГц}$	20	24	100	200	230	480	940
$\alpha, 10^{-4} \text{ см}^{-1}$	0,023	0,050	0,37	0,69	1,25	2,00	2,90

Г Л А В А IV

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

А. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

Существуют два рода электрических зарядов — положительные и отрицательные. *Положительными* называются заряды, возникающие на стекле, потертом о шелк, *отрицательными* — заряды, возникающие на эбоните, потертом о мех. Одноименные заряды отталкиваются, разноименные — притягиваются.

Носителями отрицательных зарядов в атоме являются электроны, носителями положительных зарядов — протоны, входящие в состав ядер атомов (см. стр. 177). 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 не равномерно между телами (например, при электризации трением или в гальваническом элементе, см. стр. 108) или между отдельными частями одного и того же тела (например, при электростатической индукции, см. стр. 99).

Электрические заряды не создаются и не исчезают; они могут перемещаться от одного тела к другому или смещаться внутри тела, в молекуле, атоме (*закон сохранения электрических зарядов*).

Носителями зарядов в различных средах могут быть электроны, оторванные от атомов (например, в металлах), ионы — части молекул или атомов, имеющие положительные и отрицательные заряды (например, в электролитах и газах) и молионы — коллоидные частицы в жидкости, имеющие заряды.

По модулю любой заряд кратен заряду электрона. Заряд электрона имеет наименьшую величину e ; эта наименьшая порция заряда называется *элементарным зарядом*. Заряд протона равен по абсолютной величине заряду электрона.

Взаимодействие зарядов. Электрическое поле. Закон взаимодействия точечных зарядов (*закон Кулона*) в инерциальной системе отсчета, относительно которой они неподвижны, записывается в следующей форме:

$$F_{12} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_{12}^2} r_0, \quad \text{модуль} \quad F_{12} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_{12}^2}, \quad (4.1)$$

где \mathbf{r}_0 — единичный вектор радиуса-вектора \mathbf{r}_{12} , \mathbf{F}_{12} — сила, действующая на заряд Q_2 , находящийся в электрическом поле заряда Q_1 на расстоянии r_{12} , \mathbf{r}_{12} — радиус-вектор, проведенный от заряда Q_1 к заряду Q_2 , ϵ_0 — *электрическая постоянная* (диэлектрическая проницаемость вакуума), ϵ — *относительная диэлектрическая проницаемость* среды; ϵ показывает, во сколько раз уменьшается взаимодействие точечных зарядов в безграничной однородной 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 $|\mathbf{F}_{12}|$. Направления сил \mathbf{F}_{12} и \mathbf{F}_{21} противоположны; их линия действия проходит через заряды. О взаимодействии движущихся зарядов см. стр. 126.

В Международной системе единиц электрическая постоянная

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \frac{\text{фарад}}{\text{метр}} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}.$$

В СИ единицей заряда является кулон (Кл). 1 кулон — это такой заряд, который переносится силой тока 1 А за 1 с через поперечное сечение проводника (см. стр. 125).

Если в пространстве обнаруживается действие сил на неподвижные электрические заряды, то говорят, что в нем существует *электрическое поле*.

Электрически заряженные тела всегда окружены электрическим полем. Поле неподвижных зарядов называют *электростатическим*. *Напряженность* электрического поля в данной точке численно равна силе, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в эту точку:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{Q}, \quad \text{модуль} \quad E = \frac{F}{Q}. \quad (4.2)$$

Напряженность — величина векторная. Направление вектора напряженности совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд. Напряженности полей двух и более различных электрических зарядов складываются векторно (см. введение).

Напряженность электрического поля точечного заряда:

$$\mathbf{E}_T = \frac{Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}_0, \quad \text{модуль} \quad E_T = \frac{Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}, \quad (4.3)$$

где \mathbf{r} — радиус-вектор, проведенный из точки, где расположен заряд Q , в точку, в которой определяется напряженность, \mathbf{r}_0 — единичный вектор.

Напряженность электрического поля равномерно заряженной бесконечной плоскости:

$$\mathbf{E}_n = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}, \quad (4.4)$$

где σ — поверхностная плотность заряда, т. е. заряд, приходящийся на единицу площади поверхности.

Напряженность электрического поля равномерно заряженного шара:

$$\mathbf{E}_ш = \frac{Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}_0, \quad \text{модуль} \quad E_ш = \frac{Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}, \quad (4.5)$$

где \mathbf{r} — радиус-вектор, проведенный из центра шара в точку, в которой определяется напряженность, \mathbf{r}_0 — единичный вектор.

Напряженность электрического поля заряженного длинного цилиндра

$$E_{\text{ц}} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r} r_0, \quad \text{модуль} \quad E_{\text{ц}} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r}, \quad (4.6)$$

где τ — линейная плотность заряда, т. е. заряд, приходящийся на единицу длины цилиндра, r — радиус-вектор, проведенный перпендикулярно к оси цилиндра и проходящий через точку, в которой определяется напряженность, r_0 — единичный вектор.

Векторная величина $D = \epsilon_0 \epsilon E$ называется *электрическим смещением*.

Линия, касательная в каждой точке которой совпадает с направлением напряженности, называется *силовой линией* электрического поля. Силовые линии различной структуры показаны на рис. 34—36.

Работа и напряжение. При перемещении заряда силами электрического поля производится работа. Работа в электростатическом поле не зависит от формы траектории, по которой перемещается заряд. Заряд, расположенный в любой точке электрического поля, имеет потенциальную энергию.

Потенциалом в данной точке поля называется скалярная величина, численно равная потенциальной энергии единичного положительного заряда, помещенного в этой точке. Потенциал зависит от выбора точки с нулевым потенциалом, которая может быть выбрана произвольно. Обычно в физике принимают, что в бесконечно удаленной точке потенциал равен нулю; в электротехнике считают, что поверхность Земли имеет потенциал, равный нулю.

Разность потенциалов между двумя точками электрического поля называется *напряжением* (U). Напряжение численно равно работе, которую производят электрические силы при перемещении единичного положительного заряда между двумя точками.

Работа в электростатическом поле при перемещении заряда рассчитывается по формуле

$$A = QU. \quad (4.7)$$

Напряжение в СИ выражается в вольтах (В). 1 В — это такая разность потенциалов между двумя точками, когда при перемещении между ними положительного заряда в 1 Кл совершается работа в 1 Дж.

Поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал, называется *эквипотенциальной поверхностью*. На рис. 34—36 эквипотенциальные поверхности показаны пунктиром. Силовые линии электростатического поля перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям. Работа электрических сил при перемещении заряда по эквипотенциальной поверхности равна нулю. Если A и B — две точки поля, то напряженность поля в точке A и разность потенциалов между этими точками связаны приближенной формулой

$$E = - \frac{\Delta U}{\Delta l},$$

более точно модуль

$$E = - \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta l} = - \frac{dU}{dl}, \quad (4.8)$$

где ΔU — разность потенциалов между близко расположенными точками A и B , Δl — расстояние по силовой линии между



Рис. 34. Силовые линии поля точечного электрического заряда.

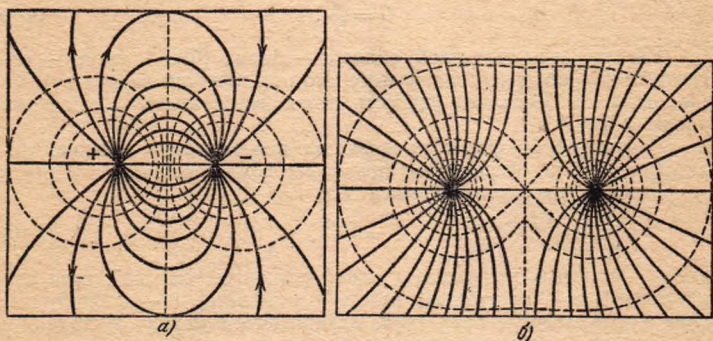


Рис. 35. Силовые линии: а) поля двух разноименных точечных зарядов; б) поля двух одноименных точечных зарядов.

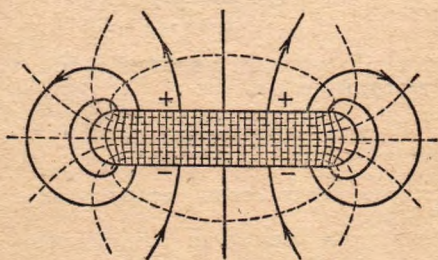


Рис. 36. Электрическое поле плоского конденсатора.

эквипотенциальными поверхностями, проходящими через эти точки. Величина — dU/dl называется *градиентом потенциала*.

Если электрическое поле однородно, т. е. напряженность во всех точках поля постоянна по величине и направлению (например, в плоском конденсаторе), то $E = -U/l$, где l — длина отрезка силовой линии. Напряженность поля в СИ выражается в единицах вольт на метр (В/м). 1 В/м есть напряженность такого однородного поля, у которого разность потенциалов на концах отрезка силовой линии длиной 1 м равна 1 В.

Емкость. Два проводника, между которыми имеется электрическое поле, все силовые линии которого начинаются на одном проводнике и заканчиваются на другом, называют *конденсатором*, а сами проводники — обкладками конденсатора. В простом конденсаторе заряды на обкладках равны по величине, но противоположны по знаку.

Емкость конденсатора равна отношению заряда на одной из обкладок к разности потенциалов между ними, т. е.

$$C = \frac{Q}{U}. \quad (4.9)$$

Единица электрической емкости — фарад (Ф). 1 фарад — емкость такого конденсатора, у которого при наличии заряда в 1 Кл (на одной из обкладок) разность потенциалов между обкладками равна 1 В.

Различают по форме проводящих поверхностей плоские, цилиндрические и сферические (шаровые) конденсаторы.

Емкость плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (4.10)$$

где S — площадь поверхности одной пластины (меньшей, если они не равны), d — расстояние между пластинами, ϵ — диэлектрическая проницаемость материала, находящегося между обкладками,

Емкость цилиндрического конденсатора и коаксиального кабеля:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon l}{\ln(b/a)}, \quad (4.11)$$

где b — радиус внешнего цилиндра, a — радиус внутреннего цилиндра, l — длина конденсатора.

Емкость сферического конденсатора:

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon}{\frac{1}{a} - \frac{1}{b}}, \quad (4.12)$$

где a и b — радиусы внутренней и внешней сфер.

Емкость двухпроводной линии:

$$C = \frac{\pi\epsilon_0\epsilon l}{\ln \frac{d}{a}}, \quad (4.13)$$

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

$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n, \quad (4.14)$$

при последовательном соединении

$$\frac{1}{C_{\text{пос}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (4.15)$$

Энергия заряженного конденсатора:

$$W = \frac{1}{2} CU^2. \quad (4.16)$$

В пространстве, где имеется электрическое поле, сосредоточена энергия. Величина, равная энергии, которая распределена в единице объема, называется *объемной плотностью энергии* w ; в однородном электрическом поле напряженностью E объемная плотность энергии

$$w = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2, \quad (4.17)$$

где E — напряженность поля *).

Проводники и изоляторы в электрическом поле. В проводниках, помещенных в электрическое поле, наводятся (индуцируются) заряды противоположных знаков. Эти заряды располагаются по поверхности проводника таким образом, что напряженность электростатического поля внутри проводника равна нулю, а поверхность проводника является эквипотенциальной поверхностью.

Изоляторы (диэлектрики), помещенные в поле, поляризуются. *Поляризация* состоит в том, что заряды, входящие в состав молекул, смещаются таким образом, что их электрическое поле становится подобным полю двух точечных разноименных зарядов, равных по абсолютной величине (см. рис. 35, а). Вообще, система зарядов, внешнее поле которых аналогично полю двух разноименных точечных зарядов, равных по величине, называется *электрическим диполем* (рис. 37).

Диполь характеризуется векторной величиной, называемой *электрическим моментом диполя* (p_i), причем

$$p_i = Ql, \quad (4.18)$$

где l — расстояние между зарядами. Направление вектора p_i совпадает с направлением радиуса-вектора, проведенного от отрицательного заряда диполя к положительному заряду.

Для оценки поляризации всего диэлектрика принимается векторная величина P , равная векторной сумме всех электрических моментов диполя в единице объема, т. е.

$$P = \sum_i p_i / V.$$

Эта величина называется *поляризованностью*. Поляризованность P диэлектрика и смещение электрического поля D связаны соотношением

$$D = \epsilon_0 E + P. \quad (4.19)$$

Молекулы некоторых диэлектриков даже в отсутствие электрического поля представляют собой диполи. Поляризация таких ве-

*) В случае произвольного поля вводится понятие «плотности энергии в точке»:

$$w = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta V}.$$

Здесь ΔW — энергия, сосредоточенная в объеме ΔV , «стягивающемся» в точку. Если под E понимать напряженность именно в этой точке, то формула (4.17) оказывается справедливой и для произвольного поля.

ществ состоит в ориентации молекулярных диполей по направлению поля.

Сегнетоэлектрики. Сегнетоэлектрики получили свое название от сегнетовой соли, в которой впервые была обнаружена самопроизвольная (спонтанная) поляризация. Даже в отсутствие электрического поля сегнетоэлектрик расчленяется на малые (микроскопические) объемы, которые имеют электрический момент. Эти области

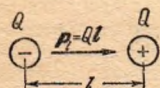


Рис. 37. Электрический диполь.

спонтанной поляризации называются *доменами* (см. также стр. 132). Электрические моменты доменов в отсутствие поля ориентированы в различных направлениях, а 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.

Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков имеет большие значения (иногда порядка нескольких тысяч); она сильно зависит от напряженности электрического поля.

При температурах, превышающих некоторое значение, тепловое движение разрушает домены, вследствие чего сегнетоэлектрические свойства исчезают. Такая температура называется *точкой (температурой) Кюри*.

Пьезоэлектрический эффект. При механической деформации некоторых кристаллов в определенных направлениях на их поверхностях образуются электрические заряды противоположных знаков, а внутри кристалла возникает электрическое поле. При изменении направления деформации изменяются и знаки зарядов. Это явление называют *пьезоэлектрическим эффектом*. Пьезоэлектрический эффект обратим, т. е. при помещении кристалла в электрическое поле он будет изменять свои линейные размеры. Обратный пьезоэффект используется для получения ультразвуков.

Заряд, возникающий при пьезоэлектрическом эффекте, определяется соотношением

$$Q = d_{ij}F, \quad (4.20)$$

где F — величина силы, вызвавшей деформацию, d_{ij} — постоянные для данного кристалла коэффициенты, называемые *пьезоэлектрическими модулями* (см. табл. 77); d_{ij} зависят от типа кристаллической решетки, вида деформации и температуры.

ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Таблица 72. Электрическое поле в атмосфере 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 равен 10—20 Кл, в отдельных случаях достигает 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 73. Электроизолирующие материалы

ϵ — диэлектрическая проницаемость, E_p — пробивная напряженность, ρ — плотность, ρ — удельное сопротивление.

Материал	ϵ	E_p , МВ/м	ρ , Мг/м ³	ρ , Ом·см
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	—
Винипласт (П)	4,1	15	—	—
Воск пчелиный	2,8—2,9	20—35	0,96	$2 \cdot 10^{10}$ — $2 \cdot 10^{15}$
Гетинакс (П)	5—6,5	10—30	1,3	—
Гуттаперча	4	15	0,95	$2 \cdot 10^9$
Каиифоль	3,5	—	1,1	$5 \cdot 10^{10}$
Карболит (П)	—	10—14,5	1,2—1,3	—
Мрамор	8—10	6—10	2,7	$1 \cdot 10^{10}$
Парафин	2,2—2,3	20—30	0,4—0,9	$3 \cdot 10^{18}$
Плексиглас	3,0—3,6	18,5	1,2	—
Полистирол	2,2—2,8	25—50	1,05—1,65	$5 \cdot 10^{15}$ — $5 \cdot 10^{17}$
Полихлорвинил	3,1—3,5	50	1,38	—
Прессшпан	3—4	9—12	0,9—1,1	$1 \cdot 10^9$
Радиофарфор (К)	6,0	15—20	2,5—2,6	—
Резина мягкая	2,6—3	15—25	1,7—2,0	$4 \cdot 10^{13}$
Слюда мусковит	4,5—8	50—200	2,8—3,2	—
» флогопит	4—5,5	60—125	2,5—2,7	10^{15} — 10^{17}
Стекло	4—10	20—30	2,2—4,0	10^{11} — 10^{14}
Текстолит	7	2—8	1,3—1,4	—
Тиконд (К)	25—80	15—20	3,8—3,9	—
Ультрафарфор (К)	6,3—7,5	15—30	2,6—2,9	$3 \cdot 10^{14}$
Фарфор электротехнический	6,5	20	2,4	—
Фибра сухая	2,5—8	2—6	1,1—1,94	$3 \cdot 10^{14}$
Фторопласт-3	2,5—2,7	—	2,14	$5 \cdot 10^9$
Целлулоид	3—4	30	—	$1,2 \cdot 10^{18}$
Шелк натуральный	4—5	—	—	$2 \cdot 10^{10}$
Шеллак	3,5	50	1,02	$1 \cdot 10^{16}$
Шифер	6—7	5—14	2,6—2,9	10^8
Эбонит (КП)	4—4,5	25	1,3	$1 \cdot 10^{18}$
Эскапон (П)	2,7—3	36	—	—
Янтарь	2,7—2,9	20—30	1,06—1,11	$1 \cdot 10^{18}$

Примечания. 1. Пробивная напряженность — это максимально допустимое значение напряженности; при больших значениях напряженности диэлектрик пробивается.

2. Указанные в скобках буквы означают: П — пластмасса, К — керамика, КП — каучуковая пластмасса.

3. Приведенные значения диэлектрической проницаемости относятся к температурам 18—20°C. Диэлектрическая проницаемость твердых тел мало изменяется с температурой, за исключением сегнетоэлектриков (см. рис. 38).

4. Об удельном сопротивлении см. стр. 105.

Т а б л и ц а 74. Диэлектрическая проницаемость чистых 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
Вода	87,83	83,86	80,08	78,25	76,47	73,02	69,73
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	23,52	22,16	20,87
» эфир	4,80	4,58	4,38	4,27	4,15	—	—

Примечание. Примеси в небольших количествах мало влияют на значение диэлектрической проницаемости.

Т а б л и ц а 75. Диэлектрическая проницаемость газов (при 18°С и нормальном давлении)

Вещество	ϵ	Вещество	ϵ
Азот	1,00061	Кислород	1,00055
Водород	1,00026	Пары воды	1,0078
Воздух	1,00059	Углекислый газ	1,00097
Гелий	1,00007		

Примечание. Диэлектрическая проницаемость газов уменьшается с повышением температуры и возрастает с увеличением давления.

Т а б л и ц а 76. Свойства сегнетоэлектрических кристаллов
Точка Кюри T_k , спонтанная поляризация p_s , диэлектрическая проницаемость ϵ .

Кристалл	T_k , К	p_s , нКл/м ²	ϵ
NaKC ₄ H ₄ O ₆ ·4H ₂ O (сегнетова соль)	296 (верхн.) 258 (нижн.)	2,6	~200
LiNH ₄ (C ₄ H ₄ O ₆)·H ₂ O	106	2,1	—
KN ₂ PO ₄ (КДР)	123	52,8	42
KN ₂ AsO ₄ (КДА)	95,6	—	54
NH ₄ H ₂ PO ₄ (АДР)	148	—	56
BaTiO ₃ (титанат бария)	391	158	3000
KNbO ₃ (ниобат калия)	708	257	—
LiNbO ₃ (ниобат лития)	~1470	500	84

Примечания. 1. Для некоторых сегнетоэлектриков их свойства проявляются в определенной области температур. В этих случаях указываются верхнее и нижнее значения температуры Кюри.
2. Приведены приближенные значения диэлектрической проницаемости.

Диэлектрическая проницаемость сегнетовой соли и титаната бария

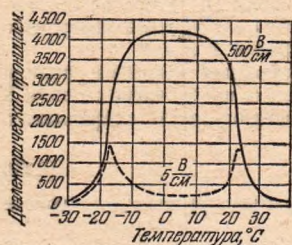


Рис. 38. Зависимость диэлектрической проницаемости незакрепленной пластинки сегнетовой соли от температуры. Две кривые соответствуют различным напряженностям поля.



Рис. 39. Зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария и сегнетовой соли от напряженности поля (при 20°C).

Таблица 77. Пьезоэлектрические модули кристаллов

Кристалл	d_{ij} , пКл/Н	Кристалл	d_{ij} , пКл/Н
Кварц	2,31 (d_{11})	Фосфат аммония	48 (d_{36})
Титанат бария	390 (d_{15})	Фосфат калия	21 (d_{36})
Цинковая обманка	3,3 (d_{14})	Ниобат лития	68 (d_{15})
Сегнетова соль	345 (d_{14})	Сульфат лития	18,3 (d_{32})
Турмалин	3,8 (d_{15})	Сульфид кадмия	14 (d_{15})

Примечание. Некоторые кристаллы имеют различные модули в зависимости от направления деформации; в этом случае приводятся наибольшие значения (в скобках указано обозначение модуля).

Б. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

1. Ток в металлах

Сила электрического тока и электродвижущая сила. Всякое упорядоченное движение носителей зарядов называется *электрическим током*. В металлах такими носителями являются электроны — отрицательно заряженные частицы с зарядом, равным элементарному заряду. За направление тока условно считают направление, противоположное направлению движения отрицательных зарядов. Если за время от момента t до момента $t + \Delta t$ через поперечное сечение проводника проходит количество электричества ΔQ , то *силой тока* в момент t называется предел

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt}. \quad (4.21)$$

Постоянный ток — такой ток, при котором за любые равные промежутки времени через поперечное сечение проводника проходят одинаковые количества электричества.

За единицу силы тока в СИ принят *ампер* (А). Определение ампера приводится на стр. 125. При силе тока в 1 А через поперечное сечение проводника за 1 с проходит заряд в 1 Кл.

Плотностью тока j называется векторная величина, равная по модулю отношению силы тока I к площади поперечного сечения S проводника, которое расположено перпендикулярно направлению движения зарядов:

$$j = I/S. \quad (4.22)$$

Направление вектора j совпадает с направлением вектора скорости положительных носителей зарядов.

За единицу плотности тока принимается ампер на квадратный метр (А/м^2). 1 А/м^2 — это такая плотность тока, при которой через перпендикулярное направлению движения носителей поперечное сечение площадью 1 м^2 проходит ток силой в 1 А.

Плотность тока:

$$j = ne \langle v \rangle, \quad (4.23)$$

где n — число носителей зарядов в единице объема, e — заряд носителя, $\langle v \rangle$ — средняя скорость их упорядоченного движения.

Подвижность электронов и численно равна средней скорости их упорядоченного движения, которую они приобретают в поле с единичной напряженностью: $\mu = \langle v \rangle/E$. Из (4.23) следует, что

$$j = ne\mu E = \sigma E, \quad (4.24)$$

где E — напряженность электрического поля внутри проводника, $\sigma = ne\mu$ — удельная проводимость (см. стр. 105).

Проводники, в которых ток обусловлен перемещением свободных электронов, называются *проводниками первого рода*. Металлы относятся к проводникам первого рода. Если имеются носители зарядов разных знаков и величин, то общая плотность тока будет равна сумме плотностей, каждая из которых вычисляется для зарядов определенного знака и величины:

$$j = \sum_i n_i e_i v_i. \quad (4.25)$$

Для получения тока в проводнике необходимо на его концах поддерживать разность потенциалов. Устройства, которые позволяют поддерживать разность потенциалов, называются *источниками* (или *генераторами*) *тока*. Клеммы источника, посредством которых источник подключается к потребителю, называются *полюсами*. Полюс с более высоким потенциалом называется *положительным*, второй полюс — *отрицательным*. В источниках тока различные формы энергии, не связанные с электрическим полем, преобразуются в электрическую энергию. На полюсах разомкнутого источника тока поддерживается разность потенциалов за счет работы таких сил, которые по своей природе отличаются от электрических. 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.

Электродвижущей силой источника (э. д. с.) называется величина, численно равная работе сторонних сил при перемещении единицы положительного заряда. Э. д. с. источника численно равна разности потенциалов на концах разомкнутого элемента. Электродвижущая сила измеряется в тех же единицах, что и напряжение (в вольтах). Э. д. с. возникают при диффузии ионов в электролитах (см. стр. 109), при электромагнитной индукции (см. стр. 129), при освещении светом полупроводниковых фотоэлементов (см. стр. 160) и т. д.

Электрической цепью называется совокупность источников тока, соединительных проводов, приборов (или других устройств), в которых ток производит работу (рис. 40). В конечном итоге работа в цепи производится за счет э. д. с. источника.

Закон Ома. На участке цепи, в котором не действуют сторонние силы, сила тока в проводнике пропорциональна напряжению на его концах, т. е.

$$I = \frac{U}{r}. \quad (4.26)$$

В этом соотношении величина $1/r$ является коэффициентом пропорциональности и называется *проводимостью*. Величина r называется *электрическим сопротивлением*.

Единица сопротивления в СИ — ом. 1 Ом — сопротивление такого проводника, в котором устанавливается ток в 1 А при напряжении 1 В на его концах.

Сопротивление проводника постоянного сечения:

$$r = \rho \frac{l}{S}, \quad (4.27)$$

где ρ — *удельное сопротивление*, равное сопротивлению проводника в единицу длины с поперечным сечением в единицу площади, l — длина проводника, S — площадь поперечного сечения; ρ выражается в ом-метрах (Ом·м). Величина $\sigma = 1/\rho$ называется *удельной проводимостью*. С повышением температуры удельное сопротивление большинства металлов увеличивается; это изменение удельного сопротивления может быть приближенно описано соотношением

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t), \quad (4.28)$$

где ρ_t — удельное сопротивление при температуре t , ρ_0 — удельное сопротивление при 0°C , α — температурный коэффициент сопротивления, который численно равен изменению сопротивления при нагревании проводника на 1°C , деленному на первоначальное сопротивление. При определенных низких температурах у некоторых металлов удельное сопротивление скачком уменьшается и становится равным нулю. Это явление называется *сверхпроводимостью*.

При последовательном соединении сопротивлений общее сопротивление $r_{\text{пос}}$ равно сумме отдельных сопротивлений $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$, т. е.

$$r_{\text{пос}} = r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n. \quad (4.29)$$

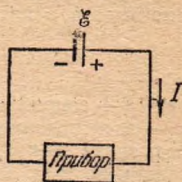


Рис. 40. Схема электрической цепи.

При параллельном соединении

$$\frac{1}{r_{\text{пар}}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots + \frac{1}{r_n}. \quad (4.30)$$

Закон Ома для участка цепи, в котором действует э. д. с., записывается в виде следующего соотношения:

$$I = \frac{U + \mathcal{E}}{r}, \quad (4.31)$$

где r — сопротивление участка, U — напряжение на участке, \mathcal{E} — электродвижущая сила, I — сила тока. Следует иметь в виду, что знаки как \mathcal{E} , так и U могут быть положительными и отрицательными. Э. д. с. принимается *положительной*, если она повышает потенциал в направлении тока (ток идет от минуса к плюсу источника); напряжение принимается *положительным*, если ток внутри источника идет в направлении понижения потенциала (от плюса к минусу). Например, при зарядке аккумулятора (рис. 41) зарядный ток

$$I_{\text{зар}} = \frac{U - \mathcal{E}_a}{r_a}, \quad (4.32)$$

где U — напряжение на клеммах источника при заряде, \mathcal{E}_a — э. д. с. заряжаемого аккумулятора, r_a — сопротивление аккумулятора (сопротивление соединительных проводников не учитывается). Для участка ADB в том же случае

$$i_{\text{зар}} = \frac{\mathcal{E}_n - U}{r_i}, \quad (4.33)$$

где \mathcal{E}_n — э. д. с. источника, r_i — внутреннее сопротивление источника.

В замкнутой неразветвленной цепи (в этом случае $U=0$) соотношение (4.33) записывается в следующем виде:

$$i = \frac{\mathcal{E}}{r + r_i}, \quad (4.34)$$

где r — внешнее сопротивление цепи.

Работа электрического тока. Работа, совершаемая постоянным током на участке цепи:

$$A = IUt, \quad (4.35)$$

где t — время прохождения тока, U — напряжение на участке, I — сила тока.

Работа тока, связанная с изменением внутренней энергии проводника (выделение тепла) при отсутствии на участке э. д. с.:

$$A = \frac{U^2}{r} t. \quad (4.36)$$

Работа, связанная с изменением внутренней энергии (независимо от наличия или отсутствия э. д. с. на участке):

$$A = I^2 r t. \quad (4.37)$$

Единицей работы (а также энергии) в СИ является джоуль (Дж); 1 Дж есть работа постоянного тока силой в 1 А в течение 1 с на участке с напряжением в 1 В.

Правила Кирхгофа. Расчет токов, напряжений и э. д. с. разветвленной цепи производится на основе *правил Кирхгофа*. Первое правило: алгебраическая сумма сил токов в участках цепи, сходящихся в любой точке разветвления, равна нулю. Например (рис. 42):

$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0. \quad (4.38)$$

Второе правило: для любого замкнутого контура, выделенного из разветвленной цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов на соответствующие сопротивления равна алгебраической сумме всех электродвижущих сил в этом контуре.

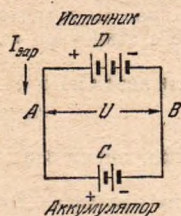


Рис. 41. Схема зарядки аккумулятора.

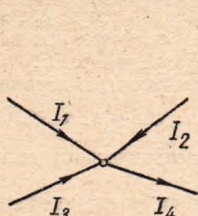


Рис. 42. Узел токов.



Рис. 43. Контур, выделенный из разветвленной цепи.

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. 43):

$$I_1 r_1 + I_2 r_2 - I_3 r_3 = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_3. \quad (4.39)$$

При последовательном соединении одинаковых источников

$$I (n r_i + r) = n \mathcal{E}, \quad (4.40)$$

где n — число источников, r_i — внутреннее сопротивление одного источника, r — внешнее сопротивление, \mathcal{E} — э. д. с. одного источника.

При параллельном соединении n одинаковых источников

$$I \left(r + \frac{r_i}{n} \right) = \mathcal{E}. \quad (4.41)$$

2. Ток в электролитах

К электролитам, или *проводникам второго рода*, относятся растворы кислот, щелочей и солей в воде и других растворителях. Расплавленные соли также обладают электрической проводимостью. В электролитах носителями зарядов являются *ионы* — части молекул, имеющие положительный или отрицательный заряд.

Электрическое поле в электролите создается между токопроводящими пластинками, которые погружаются в электролит; эти пластинки называются *электродами*. Электроды соединяются с полюсами

источника э. д. с.; 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, создаваемая ионами обоих знаков:

$$j = n_+ q_+ \langle v_+ \rangle + n_- q_- \langle v_- \rangle, \quad (4.42)$$

где n_+ , $\langle v_+ \rangle$ — концентрация и средняя скорость упорядоченного движения катионов, q_+ — заряд катионов, n_- , $\langle v_- \rangle$ — концентрация и средняя скорость анионов, q_- — заряд одного аниона.

Подвижность ионов численно равна средней скорости упорядоченного движения, которую получает ион в поле с единичной напряженностью: $u_+ = \langle v_+ \rangle / E$, $u_- = \langle v_- \rangle / E$.

Плотность тока, выраженная через подвижности ионов u_+ и u_- :

$$j = (n_+ u_+ q_+ + n_- u_- q_-) E, \quad (4.43)$$

где E — напряженность электрического поля. Для электролитов справедлив закон Ома.

При прохождении тока через электролиты (или расплавленные соли) изменяется их химический состав, а на электродах происходит выделение различных продуктов. Это явление называется *электролизом*.

Первый закон Фарадея. Масса вещества, выделившегося на электроде при электролизе, пропорциональна количеству электричества Q , прошедшего через электролит:

$$m = kQ. \quad (4.44)$$

Коэффициент пропорциональности k , численно равный массе данного вещества, выделяющейся при прохождении единицы количества электричества, называется *электрохимическим эквивалентом* этого вещества.

Второй закон Фарадея. Электрохимический эквивалент данного вещества пропорционален его химическому эквиваленту μ/n :

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{\mu}{n}; \quad (4.45)$$

химический эквивалент — внесистемная единица массы, равная отношению молярной массы μ данного вещества к его валентности n . Постоянная F называется *числом Фарадея*; $F = 96\,500$ Кл/моль. Если через любой электролит проходит заряд, равный числу Фарадея, то на каждом из электродов выделяется масса вещества μ/n .

Гальванические элементы. Между электродом, погруженным в электролит, и раствором устанавливается разность потенциалов. Эту разность называют *электрохимическим потенциалом* данного электрода в данном растворе.

Нормальными потенциалами называются значения электрохимических потенциалов металлов в растворах с нормальной концентрацией ионов; при таких концентрациях электрохимический потенциал зависит только от рода металла. Нормальные потенциалы определяются относительно водородного электрода, который представляет собой платиновую насыщенную водородом пластинку, частично погруженную в водный раствор серной кислоты с концентрацией ионов 2 моль/л.

При погружении в электролит двух электродов между ними устанавливается разность потенциалов, равная разности нормальных электрохимических потенциалов электродов. Электролит с двумя погруженными в него разнородными электродами называют *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. Количество электричества, которое может быть получено от аккумулятора при данных условиях работы (температуре, разрядном токе, начальном напряжении), называется емкостью аккумулятора. Емкость аккумулятора выражается в кулонах.

3. 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. Работа, производимая при отрыве электрона от молекулы или атома, называется *работой ионизации*. Работу ионизации принято измерять в электрон-вольтах (эВ). 1 эВ равен энергии, которую получит электрон, пройдя через поле с разностью потенциалов в 1 В.

Плотность тока в газах, как в металлах и жидкостях, определяется концентрацией носителей зарядов ионов, их подвижностью и величиной зарядов ионов. Однако ввиду зависимости концентрации ионов от напряженности поля и их неравномерного распределения по объему, занимаемому газом, газовые проводники в большинстве случаев не подчиняются закону Ома.

Различают два вида проводимости газов: несамостоятельную и самостоятельную. При несамостоятельной проводимости ионы образуются в газе не под действием приложенного электрического поля, а в силу других причин (например, за счет рентгеновских лучей, нагревания газа и т. п.). При самостоятельной проводимости ионы образуются под действием электрического поля, приложенного между электродами.

Ток в вакууме (например, в электронных лампах) обусловлен движением электронов, которые вырываются из электродов, помещенных в вакуум. Чтобы вырвать свободный электрон из металла, необходимо произвести определенную работу. Эта работа называется *работой выхода*.

Выход электронов из металла под действием теплового движения называется *термоэлектронной эмиссией*; электрон может вылететь из металла при условии

$$\frac{1}{2} m_e v_n^2 \geq A, \quad (4.46)$$

где m_e — масса электрона, v_n — проекция тепловой скорости электрона на направление нормали к поверхности, A — работа выхода.

Наибольшее значение тока термоэлектронной эмиссии (при неизменной температуре) называется *током насыщения*. Плотность тока насыщения при термоэлектронной эмиссии определяется

выражением

$$j = BT^2 e^{-A/(kT)}, \quad (4.47)$$

где B — постоянная, T — абсолютная температура, k — постоянная Больцмана (см. стр. 60), $e \approx 2,72$ — основание натуральных логарифмов. Величины B и A часто называют *эмиссионными постоянными*. Согласно теории величина B для всех чистых металлов должна быть одинакова ($60,2 \text{ А}/(\text{см}^2 \cdot \text{К}^2)$). На опыте, однако, получаются различные значения.

Широкое применение на практике получили оксидные катоды. Эти катоды получают путем нанесения на металлическое основание окислов бария или 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, зависит от материала, формы и размеров электродов, расстояния между электродами, а также от природы и давления газа.

В случае плоских параллельных электродов, размеры которых сравнимы с расстоянием между ними, пробивное напряжение для данного газа и материала электродов зависит лишь 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 величине искровых промежутков можно определять величину напряжения между электродами.

4. Полупроводники

Полупроводниками называются такие вещества, в которых электропроводность обусловлена движением электронов, а удельное сопротивление при комнатных температурах лежит в пределах 10^{-2} — 10^9 Ом·см. 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 атома, находятся на дискретных энергетических уровнях (см. стр. 175); каждый электрон имеет вполне определенное значение энергии, которое отличается от энергии других электронов. В изолированном атоме не может быть более двух электронов, находящихся на одном и том же энергетическом уровне; но и такие электроны будут отличаться друг от друга ориентацией спинов (см. стр. 176).

У изолированных атомов какого-либо вещества соответствующие уровни энергии одинаковы. При взаимодействии уровни энергии каждого атома незначительно изменяются по сравнению с уровнями энергии невзаимодействующих атомов; уровни энергии взаимодействующих атомов будут отличаться друг от друга.

На рис. 44, а для примера изображены уровни энергии K и L невзаимодействующих атомов; при взаимодействии n атомов каждый из уровней «расщепляется» на n различных уровней, что указано на рис. 44, б. Различие в энергиях «расщепленных уровней» прибли-

зительно равно 10^{-22} — 10^{-23} эВ. Совокупность расщепленных уровней энергии образует зону дозволённых (разрешённых) уровней энергии. Зоны отделяются друг от друга интервалами недозволенных значений энергии; такие интервалы энергии называются *запрещёнными зонами*; электрон не может иметь уровней энергии, которые находятся внутри запрещённой зоны.

Электропроводность как металлов, так и полупроводников обусловлена лишь валентными электронами, так как электроны внутренних оболочек прочно связаны с ядром. При 0 К валентные электроны занимают низшие уровни энергии. Все разрешённые уровни в этой зоне являются занятыми. Эта зона называется *заполнённой* (или *валентной*) *зоной*. Во второй зоне дозволённых уровней энергии при 0 К нет ни одного электрона; эта зона называется *зоной*

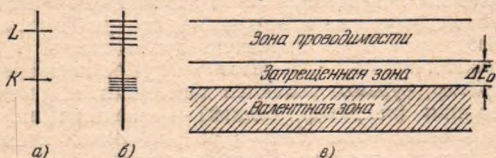


Рис. 44. Схема уровней энергии электронов в полупроводниках.

проводимости. Заполнённая зона и зона проводимости разделены запрещённой зоной (рис. 44, в). Энергия, необходимая для перехода электрона из заполнённой зоны в зону проводимости, называется *шириной запрещённой зоны* (ΔE_0). У металлов зона проводимости и валентная зона перекрываются; у изоляторов $\Delta E_0 > 2$ эВ.

Возникновение электропроводности обусловлено наличием электронов в зоне проводимости; если нет электронов в зоне проводимости, то нет и электропроводности.

Тепловое движение обеспечивает (кроме других воздействий) переходы электронов в зону проводимости. Количество электронов в зоне проводимости определяется соотношением

$$n = A e^{-\Delta E_0 / 2kT}, \quad (4.48)$$

где A — постоянная, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

Удельная электропроводность

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\Delta E_0 / (kT)}. \quad (4.49)$$

После перехода электрона в зону проводимости в валентной зоне возникают 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 заполнённой зоне можно рассматривать как перемещение положительного заряда в направлении, противоположном движению электрона. Такой положительный заряд условно называют *дыркой*. Проводимость, обусловленная движением одинакового количества электронов и дырок, которые образуются в результате перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости, называется *собственной*.

Собственная проводимость возникает за счет нарушения валентных связей.

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 тем самым 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 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.

5. Термоэлектричество

Если в замкнутой цепи, состоящей из двух разнородных проводников, поддерживать температуры спаев проводников различными, то в такой цепи будет идти ток. Этот ток поддерживается э. д. с., возникающей в спаях. Возникающая в этих условиях э. д. с. называется *термоэлектродвижущей силой* (т. э. д. с.), а само явление называется *термоэлектричеством*.

Т. э. д. с. в некоторых интервалах температур приблизительно пропорциональна разности температур; в этом случае т. э. д. с. $\mathcal{E}_T = \alpha(T_1 - T_2)$. Величина α называется *дифференциальной т. э. д. с.* (или коэффициентом т. э. д. с.); она численно равна т. э. д. с., возникающей при разности температур в 1°C .

ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Электрические токи в атмосфере Земли

Под действием электрического поля Земли (см. табл. 72) устанавливается в атмосфере поток ионов, т. е. ток проводимости, направленный вертикально вниз; плотность этого тока почти не изменяется с высотой и равна в районе «ясной» погоды $2 \div 3 \cdot 10^{-16}$ А/см². Токи противоположного направления создаются в районах с грозовой деятельностью.

Плотность тока в гидросфере 1 мкА/см².

Плотность токов, обусловленных движением зарядов на каплях дождя, снега, града, равна: при спокойных дождях $10^{-11} - 10^{-10}$ А/см², при грозовых ливнях и граде до 10^{-8} А/см².

Сила тока в молнии достигает 0,5 МА (наиболее часто сила тока в молнии лежит в пределах от 20 до 40 кА).

Напряжение в молнии достигает 10^9 В, длительность молнии — около 1 мс, длина — примерно 10 км, толщина канала — до 20 см.

Концентрация электронов в атмосфере

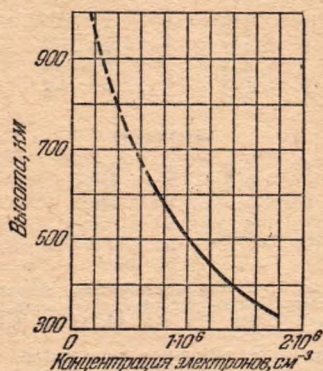


Рис. 45. Изменение концентрации электронов в атмосфере с высотой (определенное измерениями на спутниках и ракетах). Пунктиром указаны предполагаемые значения.

Таблица 78. Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления металлов (при 20 °С)

Металл	$10^{-8} \rho, \text{Ом} \cdot \text{см}$	$10^{-3} \alpha, \text{К}^{-1}$	Металл	$10^{-8} \rho, \text{Ом} \cdot \text{см}$	$10^{-3} \alpha, \text{К}^{-1}$
Алюминий	2,8	4,9	Никель	10,0	5,0
Бронза фосфористая	8,0	4,0	Олово	11,5	4,2
Вольфрам	5,5	4,5	Ртуть	95,8	0,9
Железо	9,8	6,2	Свинец	22,1	4,1
Латунь	2,5—6,0	2—7	Серебро	1,6	3,6
Медь	1,75	3,9	Тантал	15,5	3,1
Молибден	5,7	3,3	Хром	2,7	—
			Цинк	5,9	3,5

Примечание. Указанные в таблице значения являются средними. Их величина для различных образцов зависит 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 79. Температура перехода металлов и сплавов в сверхпроводящее состояние

Вещество	T , К	Вещество	T , К
<i>Металлы</i>		<i>Сплавы</i>	
Цирконий	0,3	Bi—Pt	0,16
Кадмий	0,6	Pb—Au	2,0—7,3
Цинк	0,8	Sn—Zn	3,7
Алюминий	1,2	Pb—Hg	4,1—7,3
Олово	3,7	Sn—Hg	4,2
Ртуть	4,1	Pb—Ag	5,8—7,3
Тантал	4,4	Pb—Sb	6,6
Свинец	7,3	Pb—Ca	7,0
Ниобий	9,2		
<i>Соединения</i>			
NiBi	4,2	Nb ₂ C	9,2
PbSe	5,0	NbC	10,1—10,5
NbBi ₂	5,5	NbN	15—16
NbB	6	V ₃ Si	17,1
MoC	7,6—8,3	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 2 К). Кроме того, температура перехода зависит от способа термической обработки сплава или соединения. В таких случаях в таблице указаны границы изменения температуры перехода.

Таблица 80. Сплавы с высоким активным сопротивлением (при 20°C)

Сплавы (состав в %)	ρ , 10^{-4} Ом·см	$10^{-3} \alpha$, К ⁻¹	t , °C
Константан (58,8 Cu, 40 Ni, 1,2 Mn)	0,44—0,52	0,01	500
Манганин (85 Cu, 12 Mn, 3 Ni)	0,42—0,48	0,03	100
Нейзильбер (65 Cu, 20 Zn, 15 Ni)	0,28—0,35	0,04	150—200
Никелин (54 Cu, 20 Zn, 26 Ni)	0,39—0,45	0,02	150—200
Нихром (67,5 Ni, 15 Cr, 16 Fe, 1,5 Mn)	1,0—1,1	0,2	1000
Реоган (84 Cu, 12 Mn, 4 Zn)	0,45—0,52	0,4	150—200
Фехраль (80 Fe, 14 Cr, 6 Al)	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 при температурном коэффициенте означает, что с увеличением температуры сопротивление уменьшается.

**Таблица 81. 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 82. Плавкие предохранители

Сила тока, А	5	15	30	60	100
Диаметр медной луженой 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 проволоку в предохранителе.

Электропроводность водных растворов

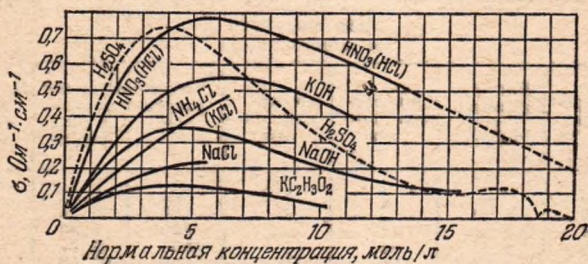


Рис. 46. Зависимость электропроводности от концентрации водных растворов некоторых соединений (при 18°C). Указана нормальная концентрация ионов. Единицей нормальной концентрации ионов является такой раствор, в единице объема которого содержится $1/n$ часть моля ионов (n — валентность иона).

**Таблица 83. Удельное сопротивление электролитов
для различных концентраций (при 18°C)**

Растворенное вещество	C, %	ρ' , Мг/м ³	ρ , Ом·см	κ , К ⁻¹
Азотная кислота	10	1,05	2,1	0,0145
	20	1,12	1,5	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
Медный купорос	5	1,062	52,9	0,0216
	10	1,107	31,5	0,0218
	17,5	1,206	23,8	0,0236
Нашатырь	5	1,011	10,9	0,0198
	10	1,029	5,6	0,0186
	20	1,057	3,8	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	1,5	0,0145
	30	1,22	1,4	0,0162
	40	1,30	1,5	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). Для других температур удельное сопротивление ρ_t может быть подсчитано по формуле (см. (4.28)) $\rho_t = \rho_{18} [1 - \kappa (t - 18)]$, где κ — температурный коэффициент, указанный в таблице, ρ_{18} — удельное сопротивление при 18°C, t — температура, при которой рассчитывается ρ_t .

**Таблица 84. Термоэлектродвижущая сила некоторых
пар металлов
(в милливольтх)**

Темпера- тура спая, °C	Платина- платина с 10% родия	Железо- констан- тан	Медь- констан- тан	Темпе- ратура спая, °C	Платина- платина с 10% родия	Железо- кон- стан- тан
-200	—	8	5,5	600	5,22	33
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°C.

Таблица 85. Дифференциальная т.э.д.с. α относительно платины (при 0°C)

Металл	α , мкВ/К	Металл	α , мкВ/К
Висмут	-65,0	Никель	-16,4
Железо	16,0	Сурьма	17,0
Закаись меди	1000	Сурьмянистый цинк	200
Константан	-34,4	Теллуристый свинец	-300
Медь	7,4		

Примечание. Знаки указывают, что ток в нагретом спае течет от металла с меньшим алгебраическим значением α . Например, в паре медь-константан ток в нагретом спае будет идти от константана к меди.

Дифференциальная т.э.д.с. пары медь — константан

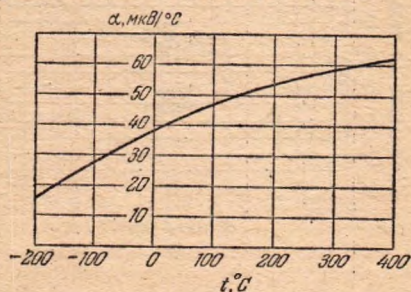


Рис. 47. Зависимость дифференциальной т. э. д. с. от температуры для пары медь-константан.

Таблица 86. 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 ⁻⁻	30,0	0,3108
O ⁻⁻	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 ⁻⁻	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. Число плюсов или минусов у символов показывает число элементарных зарядов, переносимых одним ионом; μ — молярная масса, n — валентность.

Таблица 87. Нормальные потенциалы металлов

Металлы	E	Металлы	E	Металлы	E
Железо	-0,44	Никель	-0,23	Серебро	0,80
Кадмий	-0,40	Ртуть	0,86	Хром	-0,56
Марганец	-1,05	Свинец	-0,13	Цинк	-0,76
Медь	0,35				

Зарядка и разрядка аккумуляторов

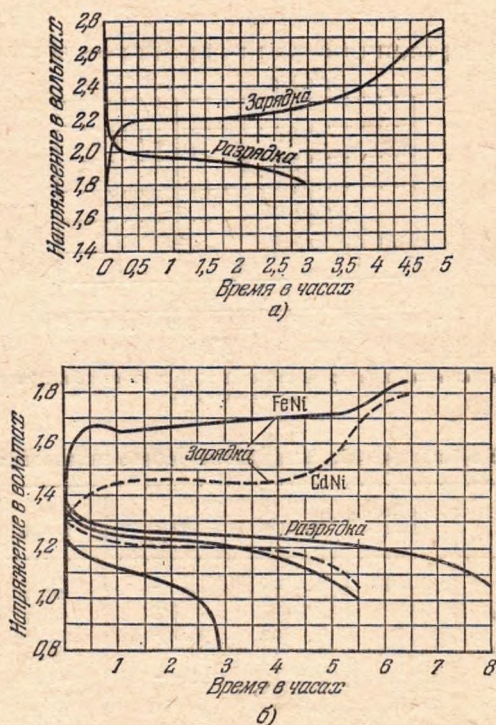


Рис. 48. а) Изменение напряжения на одной банке кислотного аккумулятора при зарядке нормальным током, $Q/4$, А (Q — емкость аккумулятора, Кл), и при разрядке током для трехчасового режима ($Q/3$, А), б) Изменение напряжения на одной банке при зарядке и разрядке кислотно-никелевых (сплошные линии) и кадмиево-никелевых (пунктирная линия) аккумуляторов. Зарядка ведется при нормальном режиме, $Q/6$, А (6 ч), разрядка — при пятичасовом режиме ($Q/5$, А). Для железо-никелевых аккумуляторов указаны кривые для восьми ($Q/8$, А)- и трехчасового ($Q/3$, А) режима разрядки.

Таблица 88. Э.д.с. гальванических элементов

Название элемента	Отрицательный полюс	Положительный полюс	Раствор	Э.д.с., В
Аккумулятор кислотный свинцовый	Губчатый свинец	Перекись свинца PbO_2	27—28%-ный раствор H_2SO_4 , свободный от хлора, плотность 1,20	2,0—1,9 при 15°C
Аккумулятор щелочной серебряно-цинковый	Окись цинка	Серебро	Раствор едкого кали (KOH)	1,5
Аккумулятор щелочной железо-никелевый (или кадмиево-никелевый)	Порошкообразное железо (или кадмий с примесью окислов железа)	Двуокись никеля	20%-ный раствор едкого кали (KOH)	1,4—1,1
Элемент Вестона нормальный	Амальгама кадмия	Ртуть	Насыщенный раствор $CdSO_4$, паста из Hg_2SO_4 и $CdSO_4$	1,0183
Элемент Грене	Цинк	Уголь	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	Уголь	Раствор нашатыря, перекись марганца с угольным порошком	1,46
Элемент Лекланше сухой	Цинк	Уголь	1 часть ZnO , 1 часть NH_4Cl , 3 части $ZnCl_2$ и вода до получения пасты	1,3

Таблица 89. Подвижность ионов в водных растворах
(при 18°C)

Катионы	$10^{-4} \frac{u_{+}}{\text{см}^2/(\text{с} \cdot \text{В})}$	Анионы	$10^{-4} \frac{u_{-}}{\text{см}^2/(\text{с} \cdot \text{В})}$
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 определяет число элементарных зарядов, переносимых одним ионом.

Таблица 90. Подвижность электронов в металлах
 $\text{см}^2/(\text{с} \cdot \text{В})$

Металл	Ag	Na	Be	Cu	Au	Li	Al	Cd	Zn
Подвижность	56	48	44	35	30	19	10	7,9	5,8

Примечание. Практически напряженность поля внутри металлов не превышает 1 мВ/см, а поэтому численные значения скоростей электронов будут значительно меньше указанных в таблице численных значений подвижностей. Это легко получить из соотношения (4.24), пользуясь допустимыми значениями тока, указанными в табл. 81.

Таблица 91. Подвижность ионов в газах
($\text{см}^2/(\text{с} \cdot \text{В})$ при нормальном давлении и 20°C)

Газ	Положительные ионы	Отрицательные ионы	Газ	Положительные ионы	Отрицательные ионы
Азот	2,7	—	Гелий	16,0	—
Аргон	1,5	1,7	Кислород	1,3	1,8
Водород	6,3	8,1	Ртуть (давл. 133 Па)	220	—
Воздух, насыщенный парами воды	1,4	2,1	Углекислый газ	0,8	0,8
Воздух сухой	1,4	1,9			

Примечания. 1. В общем случае подвижность зависит от отношения напряженности электрического поля в газе E к давлению газа p . При небольших значениях 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 величины заряда иона подвижность зависит слабо.

3. Подвижность в сильной степени зависит от чистоты газа. Поэтому приведенные в таблице значения следует рассматривать как ориентировочные.

Таблица 92. Работа ионизации

Ионизация	$E_{и}, \text{эВ}$	Ионизация	$E_{и}, \text{эВ}$	Ионизация	$E_{и}, \text{эВ}$
He \rightarrow He ⁺	24,5	CO ₂ \rightarrow CO ₂ ⁺	14,4	Xe \rightarrow Xe ⁺	12,8
Ne \rightarrow Ne ⁺	21,5	Kr \rightarrow Kr ⁺	13,9	O ₂ \rightarrow O ₂ ⁺	12,5
N ₂ \rightarrow N ₂ ⁺	15,8	H \rightarrow H ⁺	13,5	Hg \rightarrow Hg ⁺	10,4
Ar \rightarrow Ar ⁺	15,7	O \rightarrow O ⁺	13,5	Na \rightarrow Na ⁺	5,1
H ₂ \rightarrow H ₂ ⁺	15,4	H ₂ O \rightarrow H ₂ O ⁺	13,2	K \rightarrow K ⁺	4,3
N \rightarrow N ⁺	14,5				

Таблица 93. Эмиссионные постоянные металлов и полупроводников

Элемент	$A, \text{эВ}$	$B, A/(\text{см}^2 \cdot \text{К}^2)$	Элемент	$A, \text{эВ}$	$B, A/(\text{см}^2 \cdot \text{К}^2)$
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 94. Эмиссионные постоянные пленок на металлах

Металл	Пленка	$A, \text{эВ}$	$B, A/(\text{см}^2 \cdot \text{К}^2)$
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	0,5

Таблица 95. Эмиссионные постоянные оксидных катодов

Вид катода	A, эВ	B, A/(см ² ·К 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 96. Свойства полупроводников

$t_{пл}$ —температура плавления, ΔE_0 —ширина запрещенной зоны,
 u_n, u_p —подвижности электронов и дырок.

Вещество	$t_{пл},$ °C	$\Delta E_0, \text{эВ}$	$u_n,$ см ² /(В·с)	$u_p,$ см ² /(В·с)
Бор (В)	2030	1,16	1	50
Алмаз (С)	4030	5,4	1800	1400
Фосфор (черный) (Р)	44	0,33	220	350
Мышьяк (серый) (As)	817	1,2	65	65
Олово (α -Sn)	232	0,08	2500	2400
Сурьма (Sb)	630	0,13	—	—
Селен (серый) (Se)	217	2,8	—	20
Теллур (Te)	450	0,32	1700	1200
Йод (I)	114	1,3	25	—
Кремний (Si)	1414	1,15	1900	500
Германий (Ge)	958	0,75	3900	1900
PbSe	1065	0,5	1400	1400
PbS	1114	1,2	650	800
AgBr	430	2,0	240	10 ⁵
CdS	1750	2,5	350	(1,7 К)
Cu ₂ O	1232	1,5—2,2	—	15—50
α -Al ₂ O ₃	2050	2,5	—	—
ZnO	1975	3,4	200	—

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 (E_k). При $t=20^\circ\text{C}$ критическое поле в л-германии—0,9 кВ/см, р-германии—1,4 кВ/см, л-кремнии—2,5 кВ/см, р-кремнии—7,5 кВ/см. С понижением температуры критическое поле уменьшается.

Удельное сопротивление германия и кремния

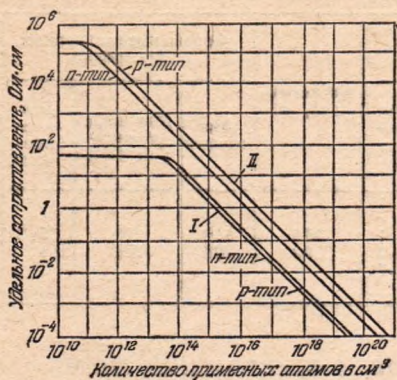


Рис. 49. Зависимость удельного сопротивления германия (I) и кремния (II) от концентрации примесных атомов. Температура — около 20°C .

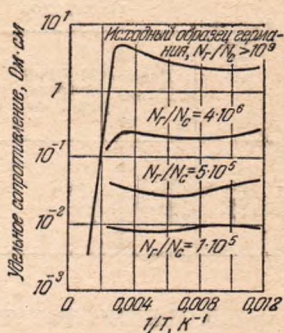


Рис. 50. Зависимость удельного сопротивления германия от температуры. По оси ординат отложены значения сопротивления в логарифмическом масштабе, по оси абсцисс — величина, обратная абсолютной температуре; $N_{\text{Г}}$ — число атомов германия, $N_{\text{С}}$ — число атомов сурьмы.

Напряжение пробоя между плоскими электродами

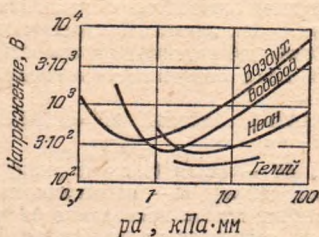


Рис. 51. Зависимость напряжения пробоя для плоских металлических электродов от величины pd (p — давление газа, d — расстояние между электродами).

Таблица 97. Искровые промежутки в воздухе
(в миллиметрах, при нормальном давлении)

Напря- жение, кВ	Форма металлических электродов			Напряже- ние, кВ	Форма металлических электродов		
	Два острия	Два шара диамет- ром 5 см	Две пло- ско- сти		Два острия	Два шара диамет- ром 2 см	Две пло- ско- сти
20	15,5	5,8	6,1	200	410	262	75,3
40	45,5	13	13,7	300	600	530	114
100	200	45	36,7				

В. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

1. Магнитная индукция. Взаимодействие токов. Магнитный момент

Проводники с токами, магниты и проводники с токами, магниты взаимодействуют между собой. Это взаимодействие осуществляется посредством поля, которое называется *магнитным*. Магнитное поле обнаруживается в системах отсчета, относительно которых имеет место упорядоченное движение зарядов; в системе отсчета, относительно которой заряды неподвижны, магнитное поле отсутствует.



Рис. 52. Сила Ампера, действующая на элемент проводника с током.

Магнитное поле обнаруживается по его действию на проводники с током (или движущиеся заряды) и магнитные стрелки; эти силы называются *магнитными*; на неподвижные заряды магнитное поле не действует.

Для характеристики магнитного поля вводится векторная величина **B**, которая называется *магнитной индукцией*. Направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением силы, действующей на северный конец магнитной стрелки, помещенной в данную точку поля. Сила, действующая на проводник с током, помещенный в магнитное поле, определяется *законом Ампера* (рис. 52):

$$\Delta F = kI [\Delta l B], \quad \text{модуль} \quad \Delta F = kI \Delta l B \sin \beta, \quad (4.50)$$

где I — сила тока, Δl — малая (элементарная) длина проводника (элемент длины проводника), B — магнитная индукция, β — угол между B и Δl ; элемент длины проводника Δl является вектором, направление которого совпадает с направлением тока; произведение $I \Delta l$ называется *элементом тока*. Коэффициент пропорциональности k зависит от выбора единиц; если все величины выражаются в одной системе, то $k=1$. Магнитная индукция по модулю равна

силе, с которой действует магнитное поле на единичный элемент тока ($I\Delta l=1$), расположенный перпендикулярно вектору индукции. Магнитная индукция зависит от свойств среды.

В СИ единицей индукции является тесла (Тл). 1 Тл — это магнитная индукция такого поля, которое действует на единичный элемент тока 1 А·м, расположенный перпендикулярно вектору индукции, с силой в 1 Н.

Наряду с магнитной индукцией B используется другая величина — напряженность магнитного поля H ; напряженностью магнитного поля в вакууме называется величина, равная отношению магнитной индукции B к магнитной постоянной μ_0 , т. е. $H=B/\mu_0$. В СИ $\mu_0=4\pi\cdot 10^{-7}$ Гн/м $=1,26\cdot 10^{-6}$ Гн/м. Напряженностью магнитного поля в любой среде называется величина, равная отношению $H=B/(\mu\mu_0)$, где μ — относительная магнитная проницаемость среды; произведение $\mu\mu_0=\mu_a$ называется абсолютной магнитной проницаемостью среды. Единица напряженности магнитного поля — ампер на метр (А/м). 1 А/м — это напряженность магнитного поля, создаваемого прямолинейным бесконечно длинным проводником с током в 4лА на расстоянии 2 м от него.

В среде с магнитной проницаемостью μ взаимодействие токов будет в μ раз больше по сравнению с взаимодействием их в вакууме (см. (4.51)). В изотропной среде векторы B и H имеют одинаковое направление.

Размерность и числовое значение μ_0 зависят от выбора системы единиц (стр. 203); относительная магнитная проницаемость μ не зависит от выбора системы единиц; значения μ обычно указываются в справочных таблицах.

Направление силы, действующей на проводник с током, определяется *правилом левой руки*: если расположить ладонь левой руки так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в нее, а вытянутые пальцы указывали направление тока, то отставленный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник (рис. 53).

Два достаточно длинных прямолинейных и параллельных провода с токами взаимодействуют друг с другом так, что если токи имеют одинаковое направление, то они притягиваются, а если токи противоположны, то они отталкиваются. Математическое выражение этого закона имеет следующий вид:

$$F = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} l, \quad (4.51)$$

где a — расстояние между проводами, l — длина проводов I_1, I_2 — силы тока в них, μ — магнитная проницаемость среды, в которой находятся провода. На основе (4.51) определяется единица силы тока — ампер. Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2\cdot 10^{-7}$ ньютон.

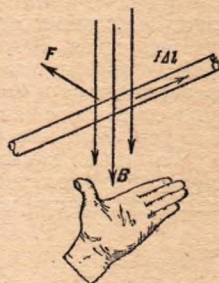


Рис. 53. Правило левой руки.

На движущийся заряд в магнитном поле действует сила (называемая *силой Лоренца*):

$$F_L = Q [\mathbf{v} \mathbf{B}], \quad \text{модуль} \quad F_L = QvB \sin \alpha, \quad (4.52)$$

где Q — заряд частицы, \mathbf{v} — скорость, α — угол между направлением скорости и индукцией \mathbf{B} . Сила Лоренца направлена перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы \mathbf{v} и \mathbf{B} .

На плоский контур тока, помещенный в магнитное поле, действует момент сил \mathbf{M} :

$$\mathbf{M} = IS [\mathbf{n} \mathbf{B}], \quad \text{модуль} \quad M = ISB \sin \alpha, \quad (4.53)$$

где I — сила тока, S — площадь контура, \mathbf{B} — магнитная индукция, α — угол между нормалью к плоскости витка и вектором \mathbf{B} , \mathbf{n} — единичный вектор нормали к контуру. Величина $p_M = IS$ называется *магнитным моментом контура*. Магнитный момент — величина векторная. Направление магнитного момента определяется по правилу правого винта: если головку винта поворачивать по направлению тока в контуре, то поступательное перемещение винта будет совпадать с направлением p_M . Магнитный момент нескольких контуров тока равен векторной сумме их магнитных моментов.

Магнитный момент p_M частицы (с зарядом Q), движущейся по круговой орбите с радиусом R и линейной скоростью v , рассчитывается (по модулю) по формуле

$$p_M = QvR/2. \quad (4.54)$$

2. Взаимодействие движущихся зарядов

Расчет взаимодействия проводится на основе преобразований Лоренца (см. стр. 19). Когда заряды неподвижны относительно системы отсчета, их взаимодействие в этой системе рассчитывается согласно закону Кулона (см. стр. 94).

Если один из зарядов, например Q_1 (рис. 54), движется вдоль оси Ox со скоростью \mathbf{v}_1 , а заряд Q_2 неподвижен, то действующая на заряд Q_2 сила изменится по величине и направлению; компонента силы F_x остается прежней, компонента F_y увеличивается и будет иметь значение

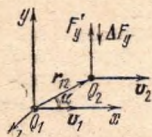


Рис. 54. Взаимодействие движущихся зарядов одного знака.

$$F_y = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sqrt{1 - v_1^2/c^2}}. \quad (4.55)$$

В том случае, когда оба заряда движутся параллельно оси Ox : Q_1 — со скоростью \mathbf{v}_1 , Q_2 — со скоростью \mathbf{v}_2 , на заряд Q_2 будет действовать, кроме F_y , дополнительная сила $\Delta F''_y$:

$$\Delta F''_y = - \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{12}^2} \cdot \frac{v_1 v_2 \sin \alpha}{c^2 \sqrt{1 - v_1^2/c^2}} j_y, \quad (4.56)$$

где j_y — единичный вектор, направленный вдоль оси Oy , r_{12} — радиус-вектор, проведенный от заряда Q_1 к заряду Q_2 , α — угол между вектором r_{12} и вектором скорости \mathbf{v}_1 . Компонента F_x остается неизменной. В отличие от кулоновской силы, направление силы \mathbf{F}_{12}' , которая действует на движущийся заряд Q_2 , не совпадает с направлением r_{12} .

На движущийся заряд Q_1 , расположенный в электрическом поле движущегося заряда Q_2 , будет действовать дополнительная компонента силы

$$\Delta F'_y = - \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{21}^2} \cdot \frac{v_1 v_2 \sin \alpha}{c^2 \sqrt{1 - v_2^2/c^2}} j_y. \quad (4.57)$$

Таким образом, $|\Delta F''_y| \neq |\Delta F'_y|$, если $|v_2| \neq |v_1|$.

В общем случае сила F''_{12} , действующая на движущийся заряд Q_2 , находящийся в электрическом поле движущегося заряда Q_1 , и сила F'_{21} , действующая на движущийся заряд Q_1 , находящийся в электрическом поле движущегося заряда Q_2 , не равны по модулю; направления этих сил не совпадают с линией, проходящей через заряды.

При малых скоростях ($v \ll c$)

$$\Delta F_y = - \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \frac{v_1 v_2 \sin \alpha}{c^2} j_y. \quad (4.58)$$

Эта сила и называется *магнитной*. Если инерциальную систему связать с одним из зарядов, то магнитного поля в этой системе не будет; взаимодействие в этом случае определяется только электрическим полем, возникающим за счет изменения линейной плотности зарядов. Когда рассматривается взаимодействие проводников с током, то кулоновское взаимодействие между ними равно нулю, так как проводники электрически нейтральны (сумма зарядов равна нулю), а поэтому наблюдается лишь взаимодействие, которое описывается формулой (4.56).

3. Магнитное поле в вакууме

Силовыми линиями магнитного поля называются такие линии, касательные к которым совпадают с направлением напряженности этого поля в данной точке. Магнитные силовые линии поля замкнуты (в отличие от силовых линий электростатического поля); такие поля называют *вихревыми*. Силовые линии прямолинейного тока представляют собой концентрические окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной проводнику (рис. 55). Направление силовой линии магнитного поля определяется по *правилу правого винта*: если винт поворачивать так, чтобы он поступательно перемещался по направлению тока, то направление вращения его головки будет совпадать с направлением силовых линий (см. рис. 55).

Напряженность магнитного поля, создаваемая элементом тока $I \Delta l$:

$$\Delta H = \frac{I [\Delta l r_0]}{4\pi r^2}, \quad \text{модуль} \quad \Delta H = \frac{I \Delta l \sin \alpha}{4\pi r^2}, \quad (4.59)$$

где r — радиус-вектор, проведенный от элемента тока в точку, в которой определяется напряженность, α — угол между Δl и r , r_0 — единичный вектор. Это соотношение называется *законом Био — Савара — Лапласа*.

Напряженность магнитного поля прямого длинного провода с током:

$$H = \frac{I}{2\pi a}, \quad (4.60)$$

где a — расстояние по нормали от проводника до точки поля, в которой определяется напряженность.

Напряженность магнитного поля в центре кругового тока:

$$H_K = I/(2R), \quad (4.61)$$

где R — радиус витка.

Напряженность поля внутри тороидальной катушки (рис. 56):

$$H_T = NI/(2\pi r), \quad (4.62)$$

где N — полное число витков, r — средний радиус тороида.

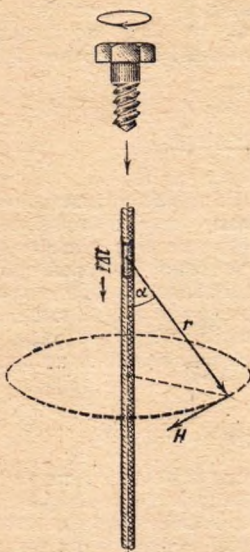


Рис. 55. К закону Био — Савара — Лапласа. Правило винта.

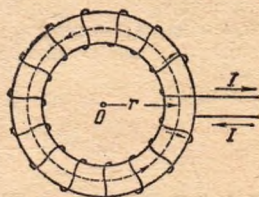


Рис. 56. Тороидальная катушка (тороид).

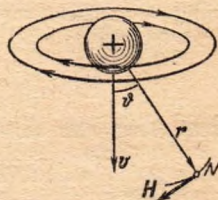


Рис. 57. Магнитное поле движущейся частицы.

Напряженность поля H_c внутри прямого соленоида, длина которого значительно больше диаметра витков, имеет одинаковое (вдали от витков) значение во всех точках:

$$H_c = nI, \quad (4.63)$$

где n — число витков на единицу длины соленоида. Поле внутри длинного соленоида однородно.

Напряженность поля движущейся заряженной частицы (рис. 57):

$$H_Q = \frac{Q [v r_\phi]}{4\pi r^2}, \quad (4.64)$$

модуль

$$H_Q = \frac{Qv \sin \phi}{4\pi r^2},$$

где Q — заряд частицы, \mathbf{v} — ее скорость, \mathbf{r} — радиус-вектор, проведенный от частицы в точку, где определяется напряженность, ϑ — угол между \mathbf{v} и \mathbf{r} , \mathbf{r}_0 — единичный вектор.

4. Работа при перемещении проводника с током в магнитном поле. Электромагнитная индукция

Магнитным потоком через плоский контур (в однородном поле) называется произведение модуля магнитной индукции B на площадь этого контура S и на косинус угла α между направлением поля и нормалью к поверхности контура (рис. 58):

$$\Phi = Bn S = BS \cos \alpha, \quad (4.65)$$

где \mathbf{n} — единичный вектор нормали к поверхности.

Единица магнитного потока — вебер (Вб). 1 Вб — это магнитный поток, который создается однородным магнитным полем с индукцией 1 Тл через нормальное сечение площадью 1 м².

При движении проводника с током в магнитном поле совершается работа

$$A = I(\Phi_2 - \Phi_1), \quad (4.66)$$

где Φ_1 — магнитный поток сквозь контур тока в начале перемещения, Φ_2 — магнитный поток в конце перемещения.

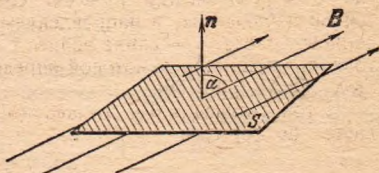


Рис. 58. К определению магнитного потока.

Изменяющийся магнитный поток возбуждает электрическое поле с замкнутыми силовыми линиями (*вихревое электрическое поле*). В проводнике наведенное поле проявляется как действие *сторонних сил* (стр. 105). Это явление называется *электромагнитной индукцией*, а возникающая при этом электродвижущая сила — э. д. с. индукции. Токи, которые обусловлены э. д. с. индукции, называются *индукционными*. Индукционный ток имеет такое направление, что его магнитное поле препятствует изменениям того магнитного поля, которое вызывало появление индукционного тока (*правило Ленца*).

Электродвижущая сила индукции может быть рассчитана по формуле

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (4.67)$$

Таким образом, э. д. с. индукции равна по абсолютной величине скорости изменения магнитного потока через площадь, ограниченную контуром. Знаки э. д. с. и $\Delta \Phi / \Delta t$ противоположны (в соответствии с правилом Ленца).

5. Самоиндукция

При любом изменении тока в проводнике возникает э. д. с. индукции, которая возбуждается магнитным потоком этого тока. Такое явление называется *самоиндукцией*.

Э. д. с. самоиндукции можно найти из формулы

$$\mathcal{E} = - L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (4.68)$$

где L — индуктивность, $\Delta I/\Delta t$ — скорость изменения силы тока; L зависит от формы и размеров проводника и от свойств среды.

Индуктивность — физическая величина, численно равная э. д. с. самоиндукции, которая возбуждается переменным током, скорость изменения которого равна единице. Единица индуктивности в СИ — генри (Гн). 1 Гн есть индуктивность такого проводника, в котором при изменении тока в 1 А за 1 с возникает э. д. с. самоиндукции, равная 1 В.

Индуктивность соленоида с сердечником:

$$L = \frac{k\mu\mu_0 N^2 S}{l}, \quad (4.69)$$

где μ — магнитная проницаемость, N — число витков, S — площадь поперечного сечения соленоида, l — длина намотки, k — коэффициент, зависящий от отношения длины намотки к диаметру катушки l/d . Значения k приводятся в табл. 107.

Индуктивность коаксиального кабеля длиной l :

$$L = \frac{l}{2\pi} \mu\mu_0 \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (4.70)$$

где R_2 и R_1 — радиусы внешнего и внутреннего цилиндров.

Индуктивность двухпроводной линии длиной l с радиусом сечения проводов r :

$$L = \frac{l}{\pi} \mu_0 \mu \ln \frac{a}{r}, \quad (4.71)$$

где a — расстояние между осями проводников (при условии $r \ll a$).

В пространстве, где имеется магнитное поле, распределена энергия. Энергия W магнитного поля, образующегося вокруг проводника с силой тока I , определяется по формуле

$$W = \frac{1}{2} L I^2. \quad (4.72)$$

Плотность энергии однородного магнитного поля (энергия в единице объема) определяется по формуле

$$w = \frac{1}{2} \mu\mu_0 H^2, \quad (4.73)$$

где H — напряженность магнитного поля.

Подъемная сила электромагнита:

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0}, \quad (4.74)$$

где S — площадь поперечного сечения наконечника электромагнита, B — магнитная индукция.

Вихревые токи (или *токи Фуко*) — это индукционные токи, возникающие в массивных проводниках под действием переменного магнитного поля.

6. Магнитные поля в веществе

Во всех телах, помещенных в магнитное поле, возникает магнитный момент. Это явление называется *намагничиванием*. Намагниченное тело называется *магнетиком*.

Магнитное поле в магнетике состоит из двух частей: поле с индукцией $B_0 = \mu_0 \mu H$, которое возбуждается макроскопическими токами, текущими по проводам, и дополнительное магнитное поле с индук-

цией B_c , которое возбуждается микроскопическими токами среды. Индукция B_c на межмолекулярных расстояниях значительно изменяется; поэтому определяется среднее значение $\langle B_c \rangle$ этой величины. Результирующее магнитное поле в среде имеет индукцию $B = B_0 + \langle B_c \rangle$.

В молекулах вещества циркулируют замкнутые токи; каждый такой ток имеет магнитный момент (стр. 126); в отсутствие внешнего магнитного поля молекулярные токи ориентированы хаотически и среднее поле, создаваемое ими, будет равно нулю. Под действием магнитного поля магнитные моменты молекул ориентируются преимущественно вдоль поля, вследствие чего вещество намагничивается. Степень намагничивания вещества определяется намагниченностью. Намагниченность J^* равна векторной сумме всех магнитных моментов p_m молекул, заключенных в единице объема вещества:

$$J = (\sum p_m) / V. \quad (4.75)$$

Намагниченность пропорциональна вектору напряженности магнитного поля:

$$J = \kappa H. \quad (4.76)$$

Величина κ называется магнитной восприимчивостью; эта величина безразмерная; B , H , J , а также μ и κ связаны между собой:

$$\langle B_c \rangle = \mu_0 J, \quad B = \mu_0 H + \mu_0 J, \quad \mu = 1 + \kappa. \quad (4.77)$$

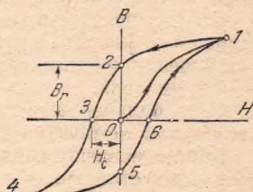


Рис. 59. Петля гистерезиса; 01 — кривая намагничивания из размагниченного состояния, 123 — кривая размагничивания.

Кривая, определяющая зависимость B (или J) от H , называется кривой намагничивания.

Вещества, для которых $\kappa > 0$ (но незначительно), называются парамагнитными (парамагнетиками); вещества, для которых $\kappa < 0$, называются диамагнитными (диамагнетиками). Вещества, у которых κ намного больше единицы, называются ферромагнетиками.

Ферромагнетики отличаются от парамагнетиков и диамагнетиков рядом свойств.

а) Кривая намагничивания ферромагнетиков имеет сложный характер (рис. 59), для парамагнетиков она представляет прямую линию с положительным угловым коэффициентом, для диамагнетиков — прямую с отрицательным угловым коэффициентом.

Магнитная восприимчивость и проницаемость ферромагнетиков зависит от напряженности поля; у парамагнетиков и диамагнетиков этой зависимости нет.

Для ферромагнетиков обычно указывается начальная магнитная проницаемость (μ_n) — предельное значение магнитной проницаемости, когда напряженность и индукция поля близки к нулю, т. е.

$$\mu_n = \lim_{H \rightarrow 0} \mu.$$

Кривая зависимости μ от H для ферромагнетиков проходит через максимум (см. рис. 61, а). Обычно указывается и максимальное значение μ_m .

*) Устаревший термин — вектор намагничивания.

б) Магнитная восприимчивость ферромагнетиков растет с увеличением температуры. При некоторой температуре T_k ферромагнетик превращается в парамагнетик; эта температура называется *температурой (точкой) Кюри*. При температурах выше точки Кюри вещество является парамагнетиком. Вблизи температуры Кюри магнитная восприимчивость ферромагнетика резко возрастает.

Магнитная восприимчивость диамагнетиков и некоторых парамагнетиков (например, в щелочных металлах) не зависит от температуры. Магнитная восприимчивость парамагнетиков (за немногими исключениями) изменяется обратно пропорционально абсолютной температуре.

в) Размагниченный ферромагнетик намагничивается внешним магнитным полем; зависимость B (или J) от H выражается кривой 01 (см. рис. 59). Эта кривая называется *начальной кривой намагничивания*. Намагничивание в слабых полях растет быстро, затем рост замедляется и, наконец, наступает состояние насыщения, при котором намагничивание практически остается постоянным при дальнейшем увеличении поля.

Максимальное значение намагниченности J называется *намагниченностью насыщения* (J_s).

При уменьшении H до нуля B (или J) изменяется по кривой 12 ; происходит отставание изменения индукции 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. 59 B_r равна отрезку 02 . Чтобы размагнитить ферромагнетик, нужно снять остаточную индукцию. Для этого необходимо создать поле противоположного направления. Изменение магнитной индукции в поле противоположного направления изображается кривой 234 . Напряженность поля H_c (отрезок 03 на рис. 59), при которой магнитная индукция равна нулю, называется *коэрцитивной напряженностью (силой)*.

Зависимость B (или J) от периодически изменяющейся напряженности магнитного поля от значений $+H$ до $-H$ выражается замкнутой кривой 1234561 . Такая кривая называется *петлей гистерезиса*.

За один цикл изменения напряженности поля от $+H$ до $-H$ расходуется энергия, пропорциональная площади петли гистерезиса.

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 магнитное поле, границы между доменами смещаются (в слабых полях), векторы намагниченности доменов поворачиваются по направлению намагничивающего поля (в сильных полях), в результате чего 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. Величина магнитострикционного эффекта не зависит от направления поля; 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.

ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

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 (силовые линии направлены вниз) и Южный магнитный полюс (силовые линии направлены вверх). 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 к 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.

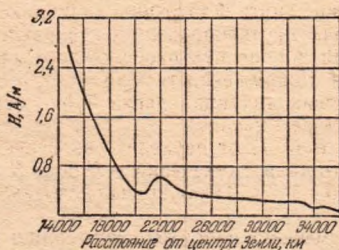


Рис. 60. Напряженность магнитного поля Земли на больших высотах.

Таблица 98. Свойства электротехнических сталей *)

Марка стали	μп	μм	H _c , А/м	B (при 2 кА/см), Тл	10 ⁻⁴ ρ, Ом·см
Э 31	250	5 500	43,8	1,46	0,5
Э 41	300	6 000	35,8	1,46	0,6
Э 42	400	7 500	31,8	1,45	0,6
Э 45	600	10 000	19,9	1,46	0,6
Э 310	1000	30 000	9,6	1,75	0,5

*) Обозначения см. на стр. 131, 132.

Таблица 99. Свойства железо-никелевых сплавов *)

Эти сплавы имеют высокую магнитную проницаемость, которая резко уменьшается при больших напряженностях поля и при высоких частотах. Кроме того, она сильно зависит от механических напряжений

Сплав	σ_B	σ_M	H_c , А/м	J_s , МА/м	$10^{-4} \frac{B}{\sigma_M \cdot \text{см}}$
79 НМ	20 000	100 000	2,4	0,8	0,55
80 НХС	35 000	120 000	1,2	0,7	0,62
50 НСХ	3 000	30 000	15,9	1,0	0,85
50 Н	3 000	35 000	9,55	1,5	0,45
65 НП	3 000	100 000	7,96	1,3	0,35
50 НП	2 000	20 000	15,9	1,55	0,45
Мо-пермаллой	20 000	75 000	2,4	0,85	0,55
78,5 Ni—пермаллой	10 000	100 000	2,0	1,07	0,16

*) Обозначения см. на стр. 131, 132.

Таблица 100. Свойства магнитотвердых материалов

Эти материалы отличаются высокой коэрцитивной силой и применяются для изготовления постоянных магнитов. Важной характеристикой их является наибольшее значение величины $H_B/2$. Эта величина пропорциональна максимальной энергии магнитного поля, окружающего ферромагнетик.

Материал	H_c , кА/м	B_r , Тл	$H_B/2$, кДж/м³
Сплавы: альни 1 (АН1)	19,9	0,7	2,8
альни 3 (АН3)	39,8	0,5	3,6
альниси (АНК)	59,7	0,4	4,3
альнико 12 (АНКО 1)	39,8	0,68	5,5
альнико 18 (АНКО 3)	51,7	0,9	9,7
магнико (АНКО 4)	39,8	1,23	15,0
Стали: EX3	4,8	0,95	1,2
EB6	4,9	1,00	1,3
EX5K5	7,9	0,85	1,8
EX9K15M 2	13,5	0,80	2,8
Платиновые магнитные сплавы	119—318	0,3—0,6	1—1,5
Барьерные ферриты	127—231	0,18—0,4	3—15

Таблица 101. Свойства магнитодиэлектриков

Магнитодиэлектрики состоят из мелких ферромагнитных частиц ($10^{-1}-10^{-4}$ см), которые связаны диэлектриком; удельное сопротивление этих материалов заключено в пределах от 1 до 400 Ом·см; α — температурный коэффициент сопротивления.

Материал	μ	$\alpha, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Прессперм Т4-180	160—200	+400
Альсифер Т4-90	75—85	+400
Альсифер Т4-60	55—65	—300, —400
Альсифер В4-32	30—34	—200, +250
Карбонильное железо К-12	11—14	—50, +50
Альсифер Р4-6	5—8	—80, —150
Ферроэласт К-9	9—10	—50, +50

Таблица 102. Основные свойства ферритов

Ферриты представляют собой смеси окислов металлов (никеля, цинка, железа), подвергаемые специальной термической обработке, в результате которой они приобретают большое удельное сопротивление; α — температурный коэффициент сопротивления.

Название	μ_n	$\alpha, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$\rho, \text{ Ом} \cdot \text{см}$
Марганец-цинковые ферриты			
4000 НМ	4000	2	100
3000 НМ	3000	3	
2000 НМ	2000	0,6—1,5	
1500 НМ	1500	0,6—1,5	
1000 НМ	1000	1,5	
Никель-цинковые и литий-цинковые ферриты			
2000 НН	2000	3	10^4-10^7
600 НН	600	6	
400 НН	400	5	
200 НН	200	4—25	
100 НН	100	10—30	
50 ВЧ	50	50	

Таблица 103. Магнитная проницаемость парамагнетиков и диамагнетиков

Парамагнетики	$(\mu-1), 10^{-6}$	Диамагнетики	$(1-\mu), 10^{-6}$
Азот	0,013	Водород	0,063
Воздух	0,38	Бензол	7,5
Кислород	1,9	Вода	9,0
Эбонит	14	Медь	10,3
Алюминий	23	Стекло	12,6
Вольфрам	176	Каменная соль	12,6
Платина	360	Кварц	15,1
Жидкий кислород	3400	Висмут	176

Таблица 104. Температура Кюри металлов

Вещество	$t_k, ^\circ\text{C}$	Вещество	$t_k, ^\circ\text{C}$
Гадолиний	20	Магнетит	585
30-процентный пермаллой	70	Железо электролитическое	769
Сплав Гейслера	200	Железо, переплавленное в водороде	774
Никель	358	Кобальт	1140
78-процентный пермаллой	550		

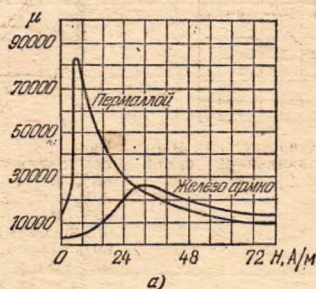
Таблица 105. Удельная магнитная восприимчивость металлов и полупроводников (при 18–20 °C)

Удельная восприимчивость χ_ρ равна отношению восприимчивости χ к плотности вещества ρ : $\chi_\rho = \chi/\rho$.

Металл	$\chi_\rho, 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	Металл	$\chi_\rho, 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	Металл	$\chi_\rho, 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$
Алюминий (п)	0,58	Литий	3,6	Селен (аморфн.)	-0,31
Ванадий (п)	1,4	Марганец (β, α)	8,8–9,6	Серебро (п)	-0,19
Вольфрам (п)	0,28	Медь (п)	-0,086	Сурьма (п)	-0,80
Германий	-0,12	Натрий	0,61	Теллур (п)	-2,9
Индий (п)	-0,11	Олово	0,03	Хром (п)	3,6
Кадмий (п)	-0,18	$-\beta$ (п)	-0,17	Цинк (п)	-0,14
Кальций (п)	1,1	Ртуть (ж)	-0,12		
		Свинец (п)	-0,12		

Примечание. В скобках указаны состояния: п — поликристалл, ж — жидкость, аморфн. — аморфное, α, β — соответствующие модификации.

Магнитная проницаемость, индукция, гистерезис и магнитострикция ферромагнетиков



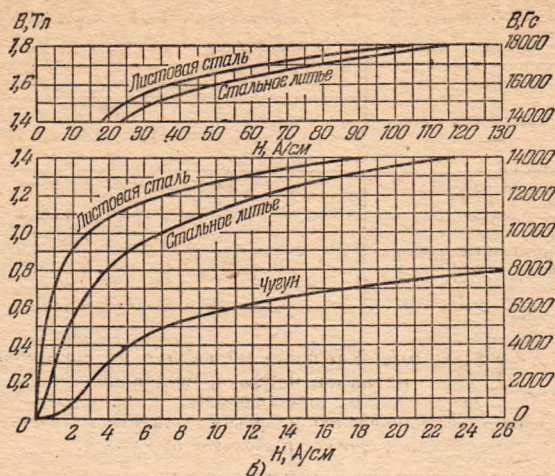


Рис. 61. а) Зависимость магнитной проницаемости железа и пермаллоя от напряженности в слабых полях; б) зависимость магнитной индукции в стали и чугуне от напряженности поля.

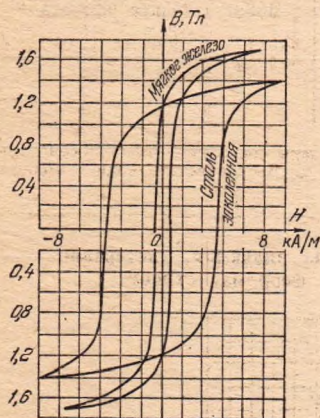


Рис. 62. Петля гистерезиса для мягкого железа и закаленной стали (~1% С).

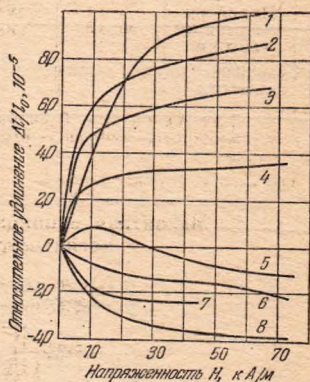


Рис. 63. Продольная деформация при магнитострикции: 1 — 54% Pt, 46% Fe; 2 — 70% Co, 30% Fe; 3 — 50% Co, 50% Fe; 4 — 50% Ni, 50% Fe; 5 — железо; 6 — кобальт (отожженный); 7 — феррит 20% Ni, 80% Zn; 8 — никель. В редкоземельных и урановых соединениях $\Delta l/l_0$ на 2—3 порядка больше.

**Таблица 106. Индукция и потери на гистерезис
в ферромагнетиках и ферритах**

Материалы	Индукция B (Тл) для H (А/м)						Потери, Дж/м³
	8	40	160	800	4000	40 000	
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% C)	0,003	0,03	0,6	1,4	1,7	2,1	500
» 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	—	—	—
» Ni—Zn	0,0005	0,008	0,01	0,15	0,24	—	—
» Mg—Mn	—	0,01	0,2	0,23	—	—	—
» 80% Ni—Fe	—	—	—	0,25	0,31	—	—
» 70% Ni—Cu	—	—	—	0,06	0,1	—	—

Примечания. 1. Числовые значения следует рассматривать как ориентировочные, так как для различных образцов они могут изменяться.

2. В последней графе указаны потери за один цикл перемагничивания в 1 м³ вещества для петли гистерезиса с максимальным значением индукции 0,1 Тл.

Таблица 107. Значения коэффициента k для расчета индуктивности

Отношение длины намотки к диаметру (l/d)	0,1	0,5	1	5	10
k	0,2	0,5	0,6	0,9	~1,0
Примечание. Для $l/d \geq 10$ величина $k \approx 1$.					

Г. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

1. Переменный ток

Переменным называется такой ток, сила или направление которого (или то и другое вместе) изменяется во времени. Токи, изменяющиеся только по величине, называются *пульсирующими* токами. Наиболее часто используется переменный синусоидальный ток (рис. 64). Периодические несинусоидальные токи можно с любой

степенью точности представить как сумму синусоидальных переменных токов (см. стр. 80).

Численное значение силы переменного тока в данный момент времени, которое определяется соотношением (4.21), называется мгновенным значением. Мгновенные значения переменного синусоидального тока и напряжения выражаются формулами

$$i = I_0 \sin \omega t, \quad (4.78)$$

$$u = U_0 \sin (\omega t + \varphi), \quad (4.79)$$

где I_0 и U_0 — наибольшие (амплитудные) значения тока и напряжения, ω — круговая частота тока, t — время, φ — разность фаз между током и напряжением (см. стр. 79), $\omega = 2\pi f$, f — частота тока.

Действующим или эффективным значением силы переменного тока называется такая сила постоянного тока, который на том же активном сопротивлении выделяет ту же мощность, что и переменный ток. В большинстве случаев (но не всегда!) амперметры и вольтметры показывают действующие значения силы тока I или напряжения U .

Для синусоидальных токов

$$I = \frac{I_0}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_0}{\sqrt{2}}. \quad (4.80)$$

Средняя мощность, выделяемая переменным током в цепи:

$$P = UI \cos \varphi. \quad (4.81)$$

Величина $\cos \varphi$ называется коэффициентом мощности.

Индуктивность L в цепи переменного тока действует аналогично сопротивлению, включенному в цепь, т. е. уменьшает силу переменного тока. Индуктивное сопротивление определяется по формуле

$$r_L = \omega L. \quad (4.82)$$

Это сопротивление обусловлено возникающей в катушке э. д. с. самоиндукции. Переменный ток в приборе, обладающем только индуктивным сопротивлением, отстает на 90° по фазе от напряжения, которое приложено к прибору.

Емкость в цепи переменного тока пропускает ток (в отличие от постоянного тока!). Сопротивление, которое оказывает емкость переменному току, называют емкостным. Емкостное сопротивление

$$r_C = \frac{1}{\omega C}. \quad (4.83)$$

Ток в конденсаторе опережает напряжение на 90° .

При последовательном соединении активного сопротивления, индуктивности, емкости и источника переменного напряжения (рис. 65, а) полное сопротивление (импеданс) контура

$$Z = \sqrt{r^2 + (r_L - r_C)^2}. \quad (4.84)$$

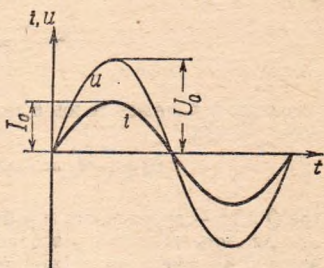


Рис. 64. Синусоидальное изменение переменного напряжения и тока ($\varphi=0$).

Цепь, состоящая из индуктивности, емкости и сопротивления, которые соединены последовательно с источником переменного напряжения, как показано на рис. 65, а, называется последовательным резонансным контуром.

В последовательном резонансном контуре амплитуда силы тока

$$I = \frac{U_0}{Z} = \frac{I_p}{\sqrt{1 + Q^2 (\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)^2}}; \quad (4.85)$$

разность фаз между током и внешним напряжением определяется из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi = (r_L - r_C)/r \quad \text{или} \quad \cos \varphi = r/Z, \quad (4.86)$$

где Q и ω_0 — добротность и резонансная частота контура, I_p — амплитуда силы тока при резонансе (см. ниже), U_0 и ω — амплитуда и частота внешнего напряжения.

Если в последовательном резонансном контуре $r_L = r_C$, то $\varphi = 0$, импеданс Z имеет наименьшее значение, равное r (см. рис. 70), а амплитуда силы тока достигает максимального значения I_p (при постоянном значении амплитуды внешнего напряжения U_0). Это явление называется *последовательным электрическим резонансом* (или

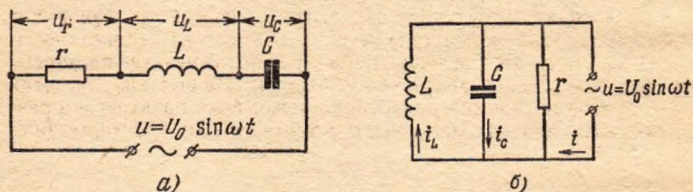


Рис. 65. Последовательный (а) и параллельный (б) резонансные контуры.

резонансом напряжений). При резонансе напряжений амплитуды напряжений на индуктивности и конденсаторе равны, но мгновенные значения этих напряжений (u_L и u_C) противоположны по фазам.

Величина, равная отношению амплитуды напряжения U_C на конденсаторе при резонансе к амплитуде U_0 внешнего переменного напряжения, называется добротностью Q контура. При условии, что $r/(2L) \ll \omega_0$, $Q = \omega_0 L/r = 1/(\omega_0 C r)$; ω_0 — резонансная частота, определяемая условием $r_L = r_C$.

При резонансе (если $Q > 1$) амплитуды напряжений на конденсаторе и индуктивности значительно больше амплитуды внешнего напряжения, потому что $U_L = U_C = Q U_0$.

Емкость C , индуктивность L и активное сопротивление r можно подключить параллельно к источнику переменного напряжения (рис. 65, б). Включенный таким образом контур LCr называется параллельным резонансным контуром. Полное сопротивление параллельного резонансного контура, показанного на рис. 65, б, определяется из соотношения

$$\frac{1}{Z^2} = \frac{1}{r^2} + \left(\frac{1}{r_L} - \frac{1}{r_C} \right)^2, \quad (4.87)$$

а разность фаз между напряжением u и током i в общей цепи — из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi = r \left(\frac{1}{r_L} - \frac{1}{r_C} \right). \quad (4.88)$$

Разность фаз $\varphi=0$, если $r_L=r_C$; это явление называется *параллельным электрическим резонансом* (или *резонансом токов*). При параллельном резонансе полное сопротивление Z имеет максимальное значение Z_m , амплитуда силы тока I в общей цепи имеет наименьшее значение I_p' , амплитуды сил токов I_C и I_L в конденсаторе и индуктивности равны, но мгновенные значения токов i_C и i_L противоположны по фазе. Добротность параллельного резонансного контура $Q = I_C/I_p' = I_L/I_p'$; если $Q > 1$, то при резонансе амплитуды сил токов в ветвях L и C больше амплитуды полного тока I_p' . Зависимость отношения I_p'/I от ω/ω_0 в идеальном параллельном контуре (рис. 65, б) такая же, как и зависимость I/I_p в последовательном резонансном контуре (см. рис. 72); ω_0 — резонансная частота, определяемая из условия $r_L=r_C$.

При точных расчетах параллельного контура необходимо учитывать в цепях L и C активные сопротивления. Зависимость отношения Z/Z_m от ω/ω_0 при наличии активных потерь в индуктивности и емкости приводится на графиках рис. 71.

В проводнике, по которому проходит переменный ток, наводятся индукционные токи, вследствие чего 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. Это явление называется *поверхностным эффектом* (или *скин-эффектом*).

2. Колебательный контур

Ограниченные изменения электрических величин (заряда, силы тока, напряжения), повторяющиеся полностью или частично относительно какого-либо среднего значения, называются *электрическими колебаниями*. Переменный электрический ток является одним из видов электрических колебаний.

Электрические колебания высокой частоты получают в большинстве случаев с помощью колебательного контура.

Колебательный контур представляет собой замкнутую цепь, состоящую из индуктивности L и емкости C .

Период свободных колебаний контура:

$$T = 2\pi \sqrt{LC}. \quad (4.89)$$

Это соотношение называется *формулой Томсона*; оно справедливо для случая, когда отсутствуют потери энергии. При наличии потерь в контуре (например, при наличии активного сопротивления r) свободные колебания контура являются затухающими, причем

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LG} - \left(\frac{r}{2L}\right)^2}}, \quad (4.90)$$

а ток в контуре изменяется по закону затухающих колебаний:

$$i = I_0 e^{-\frac{r}{2L} t} \sin \omega t. \quad (4.91)$$

График затухающих колебаний см. на стр. 82.

При воздействии на колебательный контур переменной э. д. с. в контуре устанавливаются *вынужденные колебания*. Амплитуда вынужденных колебаний тока при постоянных значениях L , C , r зависит от отношения собственной частоты колебаний контура и частоты изменения синусоидальной э. д. с. (см. рис. 72).

3. Электромагнитное поле

Согласно закону Био — Савара — Лапласа (см. стр. 128) вокруг проводника с током образуется магнитное поле с замкнутыми силовыми линиями. Такое поле называется *вихревым*. Вокруг провода, по которому течет переменный ток, образуется переменное магнитное поле.

Переменный ток, в отличие от постоянного, проходит через конденсатор (см. стр. 139); но этот ток не является током проводимости; он называется *током смещения*. Ток смещения представляет собой изменяющееся во времени электрическое поле; он создает переменное магнитное поле, как переменный ток проводимости. Плотность тока смещения:

$$j = \frac{\Delta D}{\Delta t}, \quad (4.92)$$

где D — смещение электрического поля.

В каждой точке пространства, вследствие изменения во времени смещения электрического поля, образуется переменное вихревое магнитное поле (рис. 66, а). Векторы B возникающего магнитного

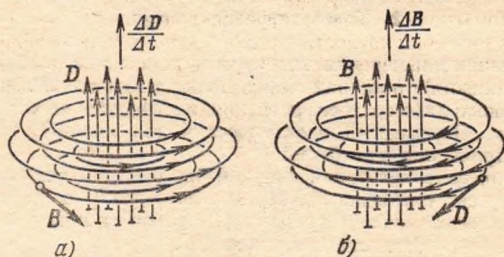


Рис. 66. а) Возникновение магнитного поля при изменении смещения электрического поля (первое уравнение Максвелла). б) Возникновение вихревого электрического поля при изменении магнитной индукции (второе уравнение Максвелла).

поля лежат в плоскости, перпендикулярной вектору D . Математическое уравнение, выражающее эту закономерность, называется *первым уравнением Максвелла*.

При электромагнитной индукции возникает электрическое поле с замкнутыми силовыми линиями (вихревое поле), которое проявляется как э. д. с. индукции (см. стр. 129). В каждой точке пространства, вследствие изменения во времени индукции магнитного поля, об-

разуется вихревое электрическое поле (рис. 66, б). Векторы D возникающего электрического поля лежат в плоскости, перпендикулярной вектору B . Математическое уравнение, описывающее эту закономерность, называется *вторым уравнением Максвелла*.

Совокупность переменных электрических и магнитных полей, которые неразрывно связаны друг с другом, называется *электромагнитным полем*.

Из уравнений Максвелла следует, что всякое изменение во времени электрического (или магнитного) поля передается от одной точки к другой; при этом происходят взаимные превращения электрических и магнитных полей. Электромагнитная волна — это взаимосвязанное распространение в пространстве изменяющихся электрического и магнитного полей. Векторы напряженностей электрического и магнитного полей (E и H) в электромагнитной волне, распространяющейся в неограниченном пространстве, перпендикулярны друг другу, а направление распространения перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы E и H (рис. 67).

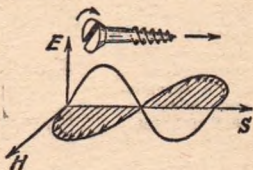


Рис. 67. Взаимное расположение векторов E , H и S в электромагнитной волне.

Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме не зависит от длины волны и равна

$$c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Скорость электромагнитных волн в различных средах меньше скорости в вакууме:

$$c_1 = \frac{c}{n}, \quad (4.93)$$

где n — показатель преломления среды (см. стр. 151).

Электромагнитные волны переносят энергию.

Поверхностная плотность потока излучения S — величина, по модулю равная энергии, переносимой волнами за единицу времени через поверхность единичной площади, расположенную перпендикулярно направлению их распространения:

$$S = [EH]. \quad (4.94)$$

Вектор S называется *вектором Пойнтинга*; направление его совпадает с направлением распространения волн.

4. Излучение электромагнитных волн

Заряженные частицы, движущиеся с ускорением, излучают электромагнитные волны. Диполь (см. стр. 100), расстояние между зарядами которого изменяется по гармоническому закону $l_0 \cos \omega t$, излучает электромагнитные волны, поток излучения которых

$$\Phi_d = Q^2 \omega^4 l_0^2 / (12\pi \epsilon_0 c^3), \quad (4.95)$$

где Q — заряд диполя, ϵ_0 — электрическая постоянная, ω — круговая частота, c — скорость волн в вакууме, λ — длина волны, Φ_d — величина, равная среднему значению энергии, которая излучается за единицу времени.

Излучателем электромагнитных волн является всякий проводник, по которому проходят переменные токи. Наиболее эффективно излучение происходит тогда, когда размеры излучателя сравнимы с длиной волны излучения. Проводники, эффективно излучающие (или принимающие) электромагнитные волны, называются *антеннами*.

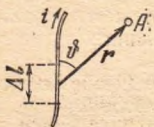


Рис. 68. К расчету напряженностей электрического и магнитного полей от элемента тока.

Элементом тока $i\Delta l$, в котором сила тока изменяется по гармоническому закону $i = I_0 \cos \omega t$, излучается электромагнитное поле, в котором напряженности электрического и магнитного полей равны соответственно

$$E_\theta = \frac{1}{2} \sqrt{\epsilon_0/\mu_0} \cdot I_0 \Delta l / (\lambda r) \cdot \sin \theta \cos(\omega t - kr), \quad (4.96)$$

$$H_\theta = \frac{1}{2} I_0 \Delta l / (\lambda r) \cdot \sin \theta \cos(\omega t - kr),$$

где θ — угол между прямой, соединяющей элемент тока $i\Delta l$ 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 определяется напряженность, причем $r \gg \lambda$, $r \gg \Delta l$ (рис. 68).

Поток излучения Φ_l , создаваемый элементом тока $i\Delta l$, рассчитывается по формуле

$$\Phi_l = \frac{2\pi}{3} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left(\frac{i\Delta l}{\lambda} \right)^2. \quad (4.97)$$

ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Сопротивления при постоянном и переменном токах

Отношение сопротивлений на переменном и постоянном токах зависит от параметра ξ :

$$\xi = 0,14d \sqrt{\mu f / \rho},$$

где d — диаметр провода (см), f — частота (Гц), ρ — удельное сопротивление (Ом·см), μ — магнитная проницаемость.

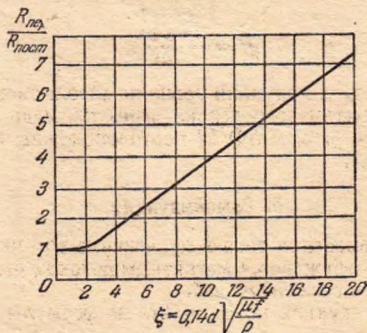


Рис. 69. График зависимости отношения сопротивлений на переменном и постоянном токах.

Зависимость от частоты индуктивного, емкостного и полного сопротивлений

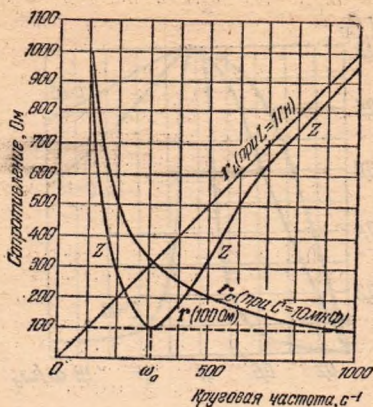


Рис. 70. Изменение индуктивного, емкостного и полного сопротивлений в зависимости от частоты в последовательном резонансном контуре.

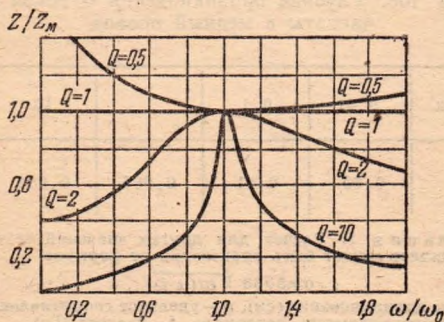


Рис. 71. Зависимость сопротивления Z от частоты в параллельном резонансном контуре. По осям отложены относительные значения Z/Z_M и ω/ω_0 . Расчет проведен для случая, когда активные сопротивления в ветвях L и C равны.

**Зависимость от частоты силы тока
в последовательном резонансном контуре**

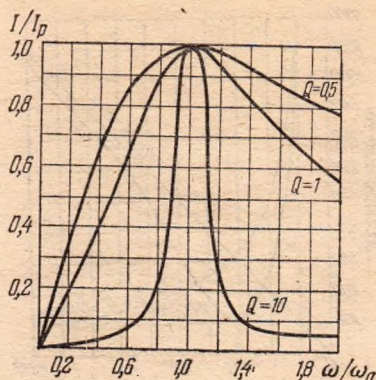


Рис. 72. Зависимость силы тока в последовательном резонансном контуре от частоты. Кривые рассчитаны по формуле (4.85). По осям отложены значения I/I_p и ω/ω_0 .

Таблица 108. Глубина проникновения σ токов высокой частоты в медный провод

Частота, МГц	0,01	0,1	1	10	100
σ , мм	0,65	0,21	0,065	0,021	0,006

Примечания 1. Расчет для других значений частоты и различных материалов может быть произведен по формуле

$$\sigma = 5033 \sqrt{\rho/(\mu \cdot f)},$$

где σ — глубина проникновения (см), ρ — удельное сопротивление (Ом·см), μ — 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, где e — основание натуральных логарифмов ($e \approx 2,72$).

Таблица 109. Шкала электромагнитных излучений

Шкала построена в логарифмическом масштабе. В графе 1 указываются длины волн (справа — в см, слева — в различных единицах длины), в графе 2 — частоты в герцах, в графе 3 — названия диапазонов, в графе 4 — названия групп частот (или волн), в графе 5 — основные способы получения и применения электромагнитных колебаний.

Наименьшую частоту имеют *низкочастотные волны и радиоволны*; эти волны излучаются различными искусственными вибраторами.

Инфракрасное излучение образуется главным образом при колебаниях молекул или групп атомов.

Световые волны и ультрафиолетовое излучение возникают при изменении состояний электронов на внешних оболочках атомов или молекул (см. стр. 177).

Рентгеновское излучение образуется при изменении состояний электронов на внутренних оболочках атомов (*характеристическое излучение*) или в результате резкого торможения электронов и других заряженных частиц.

Гамма-излучение возникает при возбуждении ядер и при взаимодействии элементарных частиц.

Сведения о некоторых свойствах различных типов волн имеются в разделе «Оптика».

Длина волн см	Частота, Гц	Диапазоны	Группа волн (или частот)	Основные способы получения и применения
10^9 км	10^{15}	Низкочастотные волны	Инфранизкие частоты	Генераторы специальных конструкций
10^8 км	$3 \cdot 10^{13}$		Низкие частоты	
10^6 км	10^{11}		Промышленные частоты	Генераторы переменного тока; большинство электрических приборов и двигателей питается переменным током 50—60 Гц Звуковые генераторы. Используются в электроакустике (микрофоны, громкоговорители), кино, радиовещании
10^5 км	10^{10}		Звуковые частоты	
10^3 км	10^8	Радиоволны	Длинные	Генераторы электрических колебаний различных конструкций. Используются в телеграфии, радиовещании, телевидении, радиолокации и т. д.
1 км	10^5		Средние	
	$3 \cdot 10^5$		Короткие	

Длина волны	Частота, Гц	Диапазоны	Группа волн (или частот)	Основные способы получения и применения
см				
1 м — 10^2 — $3 \cdot 10^8$		Радиоволны	Метровые	Метровые и дециметровые волны используются для исследования свойств вещества
10 м — 10 — $3 \cdot 10^9$			Дециметровые	
1 см — 1 — $3 \cdot 10^{10}$			Сантиметровые Миллиметровые Переходные	Получаются в магнетронных, клистронных генераторах и лазерах. Применяются в радиолокации, радиоспектроскопии и радиоастрономии
1 мм — 10^{-1} — $3 \cdot 10^{11}$				
		Инфракрасное излучение	Декамикронные	Излучение нагретых тел (дуговые и газоразрядные лампы и т. п.). Используются в инфракрасной спектроскопии, при фотографировании в темноте (в инфракрасных лучах)
			Микронные	
1 мкм — 10^{-6} — $3 \cdot 10^{14}$		Световые лучи		
		Ультрафиолетовое	Ближние	Излучение Солнца, ртутных ламп и т. п. Используются в ультрафиолетовой микроскопии, в люминесцентных лампах, в медицине
			Крайние	
1 нм — 10^{-9} — $3 \cdot 10^{17}$		Рентгеновское излучение	Ультрамягкие	Получаются в рентгеновских трубках и в других приборах, где происходит торможение электронов с энергией более 1 кэВ. Используются в медицине для целей диагностики, изучения строения вещества, в дефектоскопии
	10^{-8} — $3 \cdot 10^{18}$		Мягкие	
			Жесткие	
	10^{-11} — $3 \cdot 10^{21}$	Гамма-излучение		Возникают при радиоактивных распадах ядер, при торможении электронов с энергией более 0,1 МэВ и при других взаимодействиях элементарных частиц. Используются для обнаружения дефектов (γ -дефектоскопия), при изучении свойств вещества

ГЛАВА V ОПТИКА

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. стр. 176). 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. стр. 160) или энергия электромагнитных волн (см. стр. 143), излучаемых телом или средой. *Потоком излучения* называется величина, равная среднему значению энергии, переносимой электромагнитными волнами в единицу времени через произвольную поверхность. Поток излучения, оцениваемый по его воздействию на человеческий глаз, называется *световым потоком*.

Энергетические характеристики потоков излучения. Энергетическая сила света (сила излучения) — величина, равная отношению потока излучения Φ_9 к телесному углу Ω , в котором распространяется это излучение:

$$I_9 = \Phi_9 / \Omega; \quad (5.1)$$

единицей является ватт настерадиан (Вт/ср).

Энергетическая освещенность (облученность) — величина, равная отношению потока излучения Φ_9 к площади S равномерно облучаемой им поверхности:

$$E_9 = \Phi_9 / S; \quad (5.2)$$

единица — ватт на квадратный метр (Вт/м²).

Энергетическая светимость (излучательность) — величина, равная отношению потока излучения Φ_9 к площади $S_{\text{и}}$ излучающей поверхности:

$$R_9 = \Phi_9 / S_{\text{и}}; \quad (5.3)$$

единица — ватт на квадратный метр (Вт/м²).

Световые характеристики потоков излучения. Глаз неодинаково чувствителен к потокам 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 вызывает 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. Максимальную чувствительность при сумеречном зрении имеет глаз к длинам волн 507 нм. При дневном зрении потоку излучения 1 Вт соответствует световой поток 680 люмен (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*.

Для измерения силы света световых потоков применяется единица, которая называется канделой (кд). *Кандела равна силе света, испускаемого с поверхности $1/600000 \text{ м}^2$ полного излучателя (см. стр. 162) в перпендикулярном направлении при температуре излучателя, равной температуре затвердевания платины (2042 К) при давлении 101 325 Па. Кандела является одной из основных единиц СИ; для ее определения имеется эталон специальной конструкции.*

Световой поток — величина, равная произведению силы света I точечного источника на телесный угол Ω : $\Phi = I\Omega$. Единицей светового потока является люмен (лм). Люмен — это такой световой поток, который излучается точечным источником силой света 1 кд в телесном угле 1 ср. Испускаемый точечным источником полный световой поток

$$\Phi_T = 4\pi I. \quad (5.4)$$

Освещенность — величина, равная отношению светового потока Φ , падающего на поверхность, к площади S этой поверхности:

$$E = \Phi / S. \quad (5.5)$$

Единица освещенности — люкс (лк). Люкс — это такая освещенность, которая создается световым потоком 1 лм при равномерном распределении излучения на поверхность площадью 1 м^2 ; при этом поверхность должна быть расположена перпендикулярно направлению потока. Освещенность E_n плоской поверхности, создаваемая точечным источником, определяется по формуле

$$E_n = I \cos \alpha / r^2, \quad (5.6)$$

где I — сила света, r — расстояние от источника до поверхности, α — угол между нормалью к поверхности и направлением распространения волн.

Светимость — величина, равная отношению светового потока Φ , излучаемого поверхностью источника, к площади S_n этой поверхности:

$$R = \Phi / S_n. \quad (5.7)$$

Светимость определяется в тех же единицах, что и освещенность, т. е. в люксах.

Яркостью B_φ в направлении φ называется величина, равная отношению силы света I_φ в этом направлении к площади проекции S_n светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную

направлению наблюдения:

$$B_{\varphi} = I_{\varphi} / (S_0 \cos \varphi), \quad (5.8)$$

где площадь проекции $S_{\pi} = S_0 \cos \varphi$, S_0 — площадь поверхности.

Единица яркости — кандела на квадратный метр ($\text{кд}/\text{м}^2$); $1 \text{ кд}/\text{м}^2$ — это яркость равномерно светящейся плоской поверхности площадью 1 м^2 в перпендикулярном к ней направлении при силе света 1 кд .

Световая энергия Q — это величина, равная произведению светового потока Φ на время t действия или излучения этого потока:

$$Q = \Phi t. \quad (5.9)$$

Световая энергия измеряется в люмен-секундах ($\text{лм} \cdot \text{с}$). $1 \text{ лм} \cdot \text{с}$ — это световая энергия, соответствующая световому потоку в 1 лм за время его действия 1 с .

Фотометрия занимается измерением энергетических и световых величин.

2. Основные законы геометрической оптики

В геометрической оптике принимается, что свет распространяется в однородной среде прямолинейно. Линия, вдоль которой распространяется световая энергия, называется *световым лучом* (или просто *лучом*).

Углом падения называется угол между направлением падающего луча и перпендикуляром к границе раздела сред, восстановленным в точке падения; угол между этим перпендикуляром и направлением отраженного луча называется *углом отражения*; угол между тем же перпендикуляром и направлением преломленного луча называется *углом преломления*.

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*).

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 света, 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) будет зеркальное отражение.

Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данной длины волны; падающий и преломленный лучи и перпендикуляр к поверхности в точке падения лежат в одной плоскости (*закон преломления*);

$$\sin i / \sin r = n. \quad (5.10)$$

Величина n называется *относительным показателем преломления* второй среды относительно первой. Относительный показатель преломления равен отношению скоростей света в соответствующих средах:

$$n = c_1 / c_2. \quad (5.11)$$

Показатель преломления среды относительно вакуума называется *абсолютным показателем преломления* среды. Числовое значение n зависит от длины волны.

При переходе из среды с большим в среду с меньшим абсолютным показателем преломления луч может полностью отражаться. Это явление называется *полным отражением*. Угол падения $i_{\text{пр}}$, начиная с которого вся световая энергия отражается от границы раздела, называется *предельным углом* полного отражения, который определяется из соотношения $\sin i_{\text{пр}} = 1/n$, где n — показатель преломления той среды, в которой происходит полное отражение.

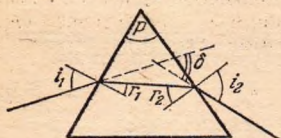


Рис. 73. Ход монохроматических лучей в призме.

Проходящие через призму лучи света преломляются (рис. 73). 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); $\delta_{\text{мин}} = 2i_1 - P$.

Показатель преломления n стекла, из которого сделана призма, можно рассчитать по формуле

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2} (\delta_{\text{мин}} + P)}{\sin \frac{1}{2} P}. \quad (5.12)$$

Наибольший преломляющий угол призмы, при котором лучи еще проходят через преломляющие грани, $P_{\text{м}} = 2i_{\text{пр}}$ ($i_{\text{пр}}$ — предельный угол полного отражения).

3. Линзы. Оптические приборы

Линзой называется прозрачное тело, которое ограничено двумя криволинейными поверхностями.

Линза называется *тонкой*, если ее толщина значительно меньше радиусов кривизны ее поверхностей.

Прямая, проходящая через центры кривизны поверхностей линзы, называется *главной оптической осью* линзы. Если одна из поверхностей линзы является плоскостью, то оптическая ось проходит перпендикулярно к ней (рис. 74).

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. Точка, в которой сходятся лучи света, идущие параллельно главной оптической оси, называется *фокусом*. Плоскость, проходящая через фокус перпендикулярно главной оптической оси, называется *фокальной плоскостью*.

Формула тонкой линзы:

$$-\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{1}{f}, \quad (5.13)$$



Рис. 74. Основные элементы тонкой линзы.

где a_1 — расстояние от линзы до предмета, a_2 — расстояние от линзы до изображения, $-f_1 = f_2 = f$ — фокусное расстояние линзы, r_1 и r_2 — радиусы кривизны сферических поверхностей, ограничивающих линзу, n — относительный показатель преломления вещества, из которого изготовлена линза.

В формуле (5.13) величины a_1 , a_2 , r_1 и r_2 считаются положительными, если направления отсчета их от оптического центра линзы совпадают с направлением распространения света; в противном случае эти величины считаются отрицательными (рис. 75).

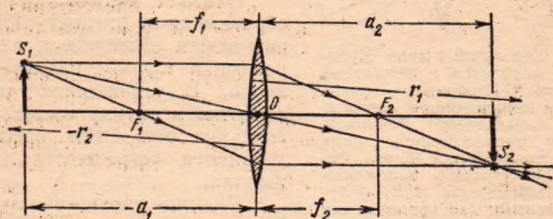


Рис. 75. Ход лучей в тонкой собирающей линзе.

Линзы характеризуются оптической силой. *Оптическая сила* — величина, равная отношению показателя преломления окружающей линзу среды к заднему фокусному расстоянию линзы, т. е. n/f . Единица оптической силы — диоптрия (дптр). 1 дптр — это оптическая сила линзы, расположенной в воздухе, с фокусным расстоянием 1 м.

Оптическая сила — величина алгебраическая; собирающая линза имеет положительную оптическую силу, рассеивающая — отрицательную. В формулу линзы числовое значение f подставляется со знаком плюс, если оптическая сила положительная; в противном случае числовое значение f подставляется со знаком минус.

Оптическая сила сферической поверхности рассчитывается по формуле

$$\Phi = (n_2 - n_1)/R, \quad (5.14)$$

где n_2 и n_1 — показатели преломления сред, R — радиус кривизны. Оптическая сила линзы определяется следующим выражением:

$$\Phi_{\text{л}} = \Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2/n, \quad (5.15)$$

где Φ_1 и Φ_2 — оптические силы сферических поверхностей линзы, d — ее толщина, n — показатель преломления стекла.

Оптическая сила двух тонких линз, сложенных вместе, равна сумме их оптических сил.

Многие оптические приборы предназначены для получения изображений предметов на экранах, на светочувствительных пленках или в глазу.

Глаз, например, представляет собой оптический прибор, где роль линз выполняют роговица и хрусталик, а изображение предмета получается на сетчатке глаза.

Углом зрения называется угол, образованный лучами, которые проходят от крайних точек предмета или его изображения через оптический центр хрусталика глаза.

По определению, видимое увеличение оптического прибора $\Gamma = \tan \varphi_2 / \tan \varphi_1$, где 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).

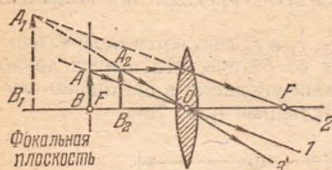


Рис. 76. Ход лучей в лупе. Предмет AB находится в фокальной плоскости F . Изображение получается в бесконечности (лучи 1, 2 идут параллельно). Возможно и такое расположение, когда предмет размещается вблизи фокальной плоскости в положении A_2B_2 . Изображение A_1B_1 получается мнимым (на продолжении лучей 2, 3); оно находится на таком расстоянии от глаза, которое является наиболее удобным для зрения.

Линза в оптическом приборе, обращенная к предмету (объекту), называется *объективом*; линза, обращенная к глазу, называется *окуляром*. В технических приборах объектив и окуляр состоят из нескольких линз. Этим частично устраняются погрешности в изображениях.

Видимое увеличение лупы (рис. 76):

$$\Gamma_L = 250/f, \quad (5.16)$$

где f — фокусное расстояние лупы (мм).

Видимое увеличение микроскопа:

$$\Gamma_M = \frac{\Delta}{f_1} \cdot \frac{250}{f_2}, \quad (5.17)$$

где f_1 и f_2 — фокусные расстояния объектива и окуляра (мм), Δ — расстояние от заднего фокуса объектива до переднего фокуса окуляра (мм) (рис. 77).

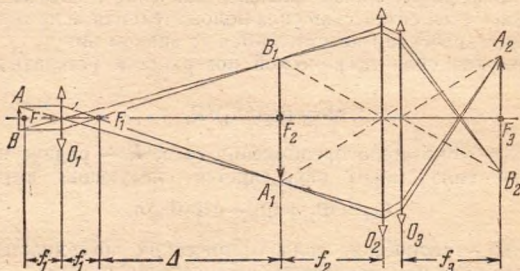


Рис. 77. Ход лучей в микроскопе. AB — предмет, O_1 — объектив микроскопа, который дает увеличенное, обратное и действительное изображение A_1B_1 предмета. Изображение предмета лежит в фокальной плоскости F_2 окуляра микроскопа O_2 , через который оно рассматривается, как в лупу. В фокальной плоскости F_3 хрусталика глаза O_2 получается действительное изображение A_2B_2 предмета. Возможно и такое расположение O_1 и O_2 , когда A_1B_1 находится между F_2 и O_2 .

Видимое увеличение зрительной трубы:

$$\Gamma_T = f_{об}/f_{ок}, \quad (5.18)$$

где $f_{об}$ и $f_{ок}$ — фокусные расстояния объектива и окуляра (рис. 78).

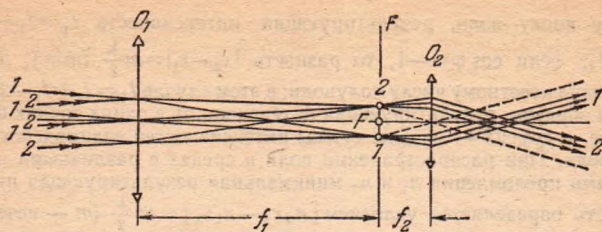


Рис. 78. Ход лучей в зрительной трубе. Лучи 1, 1, 1 падают на объектив O_1 от одной точки удаленного предмета параллельным пучком. Изображение этой точки 1 получается в фокальной плоскости F объектива O_1 и окуляра O_2 . Лучи 2, 2, 2 от второй точки удаленного предмета падают на объектив также параллельным пучком (но под другим углом к оптической оси). Эти лучи дают изображение точки 2 в фокальной плоскости F . Изображение точек 1, 2 рассматривается через окуляр, как в лупу.

4. Волновые свойства света

Интерференция. Если в среде распространяются одновременно две (или более) волны, то в каждой точке среды частицы участвуют одновременно в двух (или более) колебательных движениях. Результирующее смещение частицы при этом определяется правилами сложения колебаний (см. стр. 83). При распространении нескольких электромагнитных волн векторы напряженности электрического, а также и магнитного поля складываются в каждой точке пространства как векторы (см. введение).

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*.

В результате взаимодействия двух плоских гармонических электромагнитных волн

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{01} \sin(\omega t - kx_1), \\ E_2 &= E_{02} \sin(\omega t - kx_2), \end{aligned} \quad (5.19)$$

распространяющихся в одном направлении, образуется результирующая гармоническая волна (см. формулу (3.12))

$$E_{12} = E_1 + E_2 = E_p \sin \left[\omega t - \frac{1}{2} k (x_2 - x_1) \right] \quad (5.20)$$

с амплитудой $E_p = \sqrt{E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \varphi}$, где разность фаз $\varphi = k(x_2 - x_1)$, x_1 и x_2 — расстояния, которые проходят волны от соответствующих источников до точки наблюдения.

Величина, пропорциональная квадрату амплитуды, называется интенсивностью (I); последняя пропорциональна плотности потока излучения. Оптические приборы, в том числе и глаз, обычно фиксируют усредненные значения квадрата амплитуды, т. е. интенсивность.

Если разность фаз изменяется хаотически, то среднее значение $\langle \cos \varphi \rangle = 0$, $E_p^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2$, 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 крайних случая: если $\cos \varphi = +1$, то разность $|x_2 - x_1| = m\lambda$ ($m = 1, 2, 3, \dots$), т. е. равна

целому числу волн, результирующая интенсивность $I_p = I_1 + I_2 + 2I_1I_2$; если $\cos \varphi = -1$, то разность $|x_2 - x_1| = m \frac{\lambda}{2}$ ($m = 1, 3, 5$), т. е. равна нечетному числу полуволн; в этом случае $I_p = I_1 + I_2 - 2I_1I_2$. Таким образом, результирующая интенсивность в одних точках будет больше, в других — меньше суммы интенсивностей взаимодействующих волн. При распространении волн в средах с различными показателями преломления n_1 и n_2 минимальная результирующая интенсивность определяется условием $|n_2 x_2 - n_1 x_1| = m \frac{\lambda}{2}$ (m — нечетное целое число), максимальная — $|n_2 x_2 - n_1 x_1| = m' \lambda$ ($m' = 0, 1, 2, \dots$).

Произведение геометрического пути на показатель преломления называется *оптической длиной пути*; разность оптических длин путей называется *оптической разностью хода*.

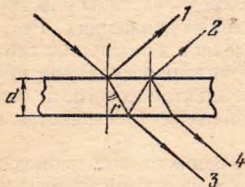


Рис. 79. Интерференция лучей, падающих на плоскопараллельную пластинку.

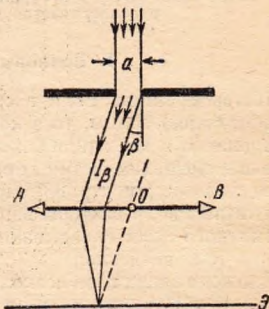


Рис. 80. Дифракция параллельных лучей от одной щели. AB — линза, O — ее оптический центр, Z — экран, расположенный в фокальной плоскости линзы.

Интерференция наблюдается при взаимодействии таких волн, у которых разность фаз в точках наблюдения не зависит от времени. Для интерференции поляризованных волн (см. стр. 159) необходимо, кроме того, чтобы их плоскости поляризации были параллельны. Волны, у которых разность фаз постоянна, называются *когерентными*, и соответствующие источники также называются *когерентными*. В большинстве случаев когерентные источники в оптике получают искусственно, путем деления одной волны на несколько частей; исключения представляют лазеры.

Цвета тонких пленок при освещении естественным светом зависят от интерференции лучей 1, 2 (в отраженном свете) или лучей 3, 4 (в проходящем свете) (рис. 79). Оптическая разность хода отраженных лучей 1, 2:

$$\Delta_{12} = 2d n \cos r + \lambda/2, \quad (5.21)$$

проходящих лучей 3, 4: $\Delta_{34} = 2d n \cos r$, где $\lambda/2$ учитывает изменение фазы на π вектора напряженности электрического поля при отражении от оптически более плотной среды (при углах падения, которые меньше угла полной поляризации, см. ниже).

Дифракция. Отклонение световых лучей 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 (стр. 84) являются центрами воображаемых когерентных источников, которые излучают сферические волны; эти волны называются *элементарными*. Огибающая элементарных волн представляет собой волновую поверхность для последующего момента времени; она возникает в результате интерференции элементарных волн. Предполагается, что огибающая перемещается лишь в одну сторону от волновой поверхности (по направлению распространения волны).

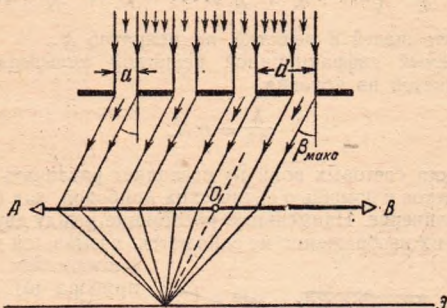


Рис. 81. Дифракция параллельных лучей от дифракционной решетки. AB — линза, O — ее оптический центр, $Э$ — экран, расположенный в фокальной плоскости линзы.

При дифракции параллельного пучка света, падающего нормально на узкую длинную щель, интенсивность I_β волн, распространяющихся под углом β , определяется следующим соотношением:

$$I_\beta = I_0 \frac{\sin^2 \left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \beta \right)}{\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \beta \right)^2}, \quad (5.22)$$

где I_0 — интенсивность волн, распространяющихся в направлении $\beta=0$, a — ширина щели, β — угол между перпендикуляром к плоскости щели и направлением распространения дифрагированных лучей (рис. 80), λ — длина волны света.

Направления, в которых интенсивность дифрагированного на одной щели света равна нулю, определяются из условия

$$\sin \beta_{\min} = m \frac{\lambda}{a} \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots). \quad (5.23)$$

Совокупность большого числа узких параллельных щелей, имеющих одинаковую ширину и расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга, называется *дифракционной решеткой*. Расстояние, равное сумме ширины одной щели и ширины промежутка между соседними щелями, называется *постоянной* (или *периодом*) *дифракционной решетки*. На рис. 81 приведена схема дифракционной решетки.

При нормальном падении света на решетку направления, в которых наблюдается максимальная интенсивность дифрагированных волн, определяются выражением, которое называется *условием главных максимумов*:

$$d \sin \beta_{\text{макс}} = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots), \quad (5.24)$$

где d — период решетки.

Главные минимумы определяются соотношением (5.23). Имеется ряд других направлений, в которых интенсивность дифрагированного на решетке света равна нулю (*дополнительные минимумы*); дополнительные минимумы определяются соотношением

$$\sin \beta_{\text{д. м}} = m' \frac{\lambda}{d} \quad \left(m' = \frac{1}{N}, \frac{2}{N}, \dots, \frac{N-1}{N}, \frac{N+1}{N}, \dots \right), \quad (5.25)$$

где N — число щелей в решетке, m' некратно N .

Разрешаемый дифракционной решеткой интервал длин волн ($\Delta\lambda$) определяется из условия

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN. \quad (5.26)$$

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 *разрешаемым*

расстоянием оптического прибора (δ).

Для микроскопа разрешаемое расстояние

$$\delta \geq \frac{\lambda}{2n \sin u}, \quad (5.27)$$

где u — апертурный угол (половина угла между крайними лучами, падающими от точки предмета



Рис. 82. Ход лучей с различной длиной волны в стеклянной призме.

на объектив и достигающими глаза наблюдателя или экрана), n — показатель преломления среды.

Дисперсия света. Скорость света в данной среде зависит от длины волны. Это явление называют *дисперсией* света. Показатель преломления также меняется с изменением длины волны (дисперсия показателя преломления). В результате дисперсии стеклянная призма выделяет из белого света, состоящего из излучения с различными длинами волн, его составляющие, которые после преломления распространяются по различным направлениям: лучи с меньшей длиной волны преломляются к основанию призмы на больший угол по сравнению с лучами, имеющими большую длину волны (рис. 82).

Поляризация света. В световых волнах, излучаемых различными источниками, векторы \mathbf{E} (а следовательно, и \mathbf{H}) имеют всевозможные направления (при условии, что они взаимно перпендикулярны и плоскость, в которой они находятся, перпендикулярна направлению распространения света). Такой свет называется *естественным*.

Из естественного света можно выделить, например, пропуская его через турмалиновую пластинку (или через полярийд), такие волны, в которых вектор \mathbf{E} будет совершать колебания в одной и той

же плоскости. Такие волны называются *линейно поляризованными*. Плоскость, в которой лежат векторы \mathbf{H} в линейно поляризованной волне, называется *плоскостью поляризации*; плоскость, в которой лежат векторы \mathbf{E} , называется *плоскостью колебаний*.

Естественный свет при отражении от поверхности диэлектриков частично поляризуется. Отраженный свет поляризован полностью при угле падения, определяемом соотношением

$$\operatorname{tg} i_B = n, \quad (5.28)$$

где n — относительный показатель преломления диэлектрика, от которого происходит отражение. Угол i_B называется углом Брюстера. Проходящий через диэлектрик свет также частично поляризуется.

В некоторых монокристаллах (например, кварц, исландский шпат, слюда, гипс) естественный пучок света разделяется на два линейно поляризованных в различных плоскостях пучка, которые распространяются с различными скоростями. Это явление называется *двойным лучепреломлением*.

В одноосных кристаллах (типа кварца) имеется лишь одно направление, в котором не наблюдается двойного лучепреломления. Это направление называется *оптической осью*. Луч, в котором вектор \mathbf{E} совершает колебания перпендикулярно оптической оси кристалла, называется *обыкновенным*. Его скорость по различным направлениям в кристалле одинакова. Вторым луч, у которого направления колебаний вектора \mathbf{E} составляют различные углы с оптической осью (в зависимости от угла падения и положения плоскости падения), называется *необыкновенным*. Скорость необыкновенного луча 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 обыкновенного и необыкновенного лучей равны.

Двойное лучепреломление в изотропных средах можно вызвать действием на них механических напряжений (*фотоупругость*), электрического поля (*электрическое двойное лучепреломление*), магнитного поля (*магнитное двойное лучепреломление*). В этих случаях среда действует на свет как одноосный кристалл с оптической осью, параллельной направлениям механического напряжения или соответствующих полей.

Разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей при фотоупругости

$$\Delta\sigma = K\sigma/l, \quad (5.29)$$

где K — постоянная фотоупругости, зависящая от природы вещества, σ — механическое напряжение, l — толщина деформируемого образца, λ — длина волны.

При электрическом и магнитном двойном лучепреломлении, когда свет распространяется перпендикулярно к направлениям соответствующих полей, разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей

$$\Delta E = 1,11 \cdot 10^{-5} B E^2 l \lambda, \quad (5.30)$$

$$\Delta H = 1,58 C H^2 l \lambda, \quad (5.31)$$

где B и C — соответственно постоянные Керра и Коттона — Мутона, E — напряженность электрического поля (В/см), H — напряженность магнитного поля (А/см), l — геометрические пути лучей в веществе.

Некоторые вещества (например, кварц, раствор сахара в воде) при прохождении через них линейно поляризованного света поворачивают его плоскость поляризации. Это явление называется *вращением плоскости поляризации*. Вращение плоскости поляризации характеризуется *постоянной вращения* (для чистых веществ) и *удельной постоянной вращения* (для растворов). *Постоянная вращения* $\alpha = \varphi/l$, удельная постоянная вращения $[\alpha] = 1000 \varphi/(lC)$, где φ — угол поворота плоскости поляризации (град), l — толщина слоя оптически активного вещества (дм), C — концентрация раствора (г/л). $[\alpha]$ зависит от концентрации, температуры, длины волны (*вращательная дисперсия*) и растворителя.

Давление света. Электромагнитные волны, падая на поверхность тела, производят механическое давление (называемое *радиационным* или *давлением излучения*). Радиационное давление электромагнитных волн на плоскость, расположенную перпендикулярно направлению их распространения:

$$p = E_0 (1 + \rho)/c, \quad (5.32)$$

где E_0 — энергетическая освещенность (см. стр. 149), c — скорость света в вакууме, ρ — коэффициент отражения, равный отношению потоков энергий отраженных и падающих волн.

Давление, которое производят на земную поверхность солнечные лучи в яркий день, равно приблизительно 4 мкПа.

5. Квантовые свойства света

Энергия любого вида электромагнитного излучения, в том числе и светового, состоит из дискретных порций, которые называются *квантами излучения* или *фотонами*; фотон — элементарная частица (см. стр. 192). Энергия фотона ϵ зависит от частоты излучения ν :

$$\epsilon = h\nu, \quad (5.33)$$

где $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с называется *постоянной Планка*.

Согласно основным положениям современной физики изменению энергии какой-либо системы на величину ϵ соответствует изменение ее массы на величину ϵ/c^2 (c — скорость света в вакууме). Поэтому при излучении одного фотона масса излучающего тела уменьшается на величину

$$\Delta m = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (5.34)$$

Свойства излучения, обусловленные его квантовым характером, называются *квантовыми* (или *корпускулярными*).

Свету, как и всем другим видам электромагнитного излучения, присущи как волновые, так и корпускулярные свойства.

Фотоэффектом называются электрические явления, которые происходят при освещении светом вещества, а именно: выход электронов из вещества (называется *фотоэлектронной эмиссией* или *внешним фотоэффектом*), возникновение э. д. с. (*вентильный фотоэффект*), изменение электрической проводимости (*фотопроводимость*).

Фотоэффект является одним из примеров проявления корпускулярных свойств света.

Законы внешнего фотоэффекта. 1. Число электронов, освобожденных светом за 1 с (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*):

$$h\nu = A + \frac{m_e v_m^2}{2}, \quad (5.35)$$

где $h\nu$ — энергия светового фотона, A — работа выхода (см. стр. 109), 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 вещества;

$$\nu_k = A/h. \quad (5.36)$$

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 возникают электроны в зоне проводимости (стр. 111) и сопротивление полупроводников и диэлектриков уменьшается.

При освещении границы раздела между полупроводниками с различным типом проводимости возникает электродвижущая сила. Это явление называется *вентильным фотоэффектом*.

На фотоэффекте основано устройство фотоэлементов, фотосопротивлений, вентильных фотоэлементов и солнечных батарей.

6. Типы спектров

Любое колебание (волну или импульс) можно представить как результат сложения (суперпозицию) гармонических колебаний (кратко их называют гармониками) с различными амплитудами и частотами (см. стр. 80). 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 полосы, получающиеся в результате разложения света призмой (или другим прибором) по длинам волн.

Раскаленные твердые тела дают сплошной спектр, состоящий из всех спектральных цветов, непрерывно переходящих друг в друга.

В *линейчатом спектре* мощность излучения имеет значительную величину в очень узких пределах вблизи некоторых определенных длин волн, а для всех прочих длин волн близка к нулю. Линейчатые спектры дают разреженные газы. Если разложить такой спектр призмой (или другим прибором), то будут видны тонкие линии различной окраски. Число и расположение этих линий по длинам волн характерны для данного элемента. По расположению линий в спектре можно судить о химическом составе данного вещества.

Молекулы вещества дают спектр, состоящий из большого числа близко расположенных друг к другу линий, которые группируются в отдельные полосы. Такие спектры называются *полосатыми*.

Спектры раскаленных тел называются *спектрами испускания* (или, иначе, *эмиссионными спектрами*).

Спектром поглощения называется спектр излучения, который поглощается веществом. Спектр поглощения, занимающий узкий интервал, ширина которого много меньше средней частоты интервала, называется *спектральной линией поглощения*.

В спектрах излучения источников света, внутренние зоны которых окружены более холодными слоями паров, наблюдаются спектральные линии поглощения. Эти линии обусловлены поглощением света парами, которые находятся во внешних слоях. Газы сильно поглощают такие участки спектра, 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

Нагретые тела излучают, кроме световых волн, *ультрафиолетовые* и *инфракрасные* волны. Длина волны ультрафиолетовых волн (см. табл. 117) меньше 400 нм; длина волны инфракрасных волн больше 800 нм.

Электромагнитное излучение, которое возбуждается тепловым движением атомов или молекул, называется *тепловым излучением*.

Распределение энергии излучения по длинам волн (или частотам) определяется *спектральной плотностью энергетической светимости* *). Эта величина равна отношению энергетической светимости ΔR_θ , которая соответствует малому участку спектра $\Delta\lambda$ (или $\Delta\nu$), к ширине этого участка, т. е. $r_\lambda = \Delta R_\theta / \Delta\lambda$ (или $r_\nu = \Delta R_\theta / \Delta\nu$). Единицы $[r_\lambda] = \text{Вт/м}^3$, $[r_\nu] = \text{Дж/м}^2$.

Отношение поглощенного телом потока излучения $\Delta\Phi'_\lambda$, которому соответствует узкий участок спектра $\Delta\lambda$, к падающему на это тело потоку Φ_λ с тем же самым участком спектра $\Delta\lambda$, называется *спектральной поглощательной способностью*: $A_\lambda = \Delta\Phi'_\lambda / \Phi_\lambda$; A_λ — величина безразмерная.

Тело, которое поглощает полностью все падающее на него излучение независимо от направления, длины волны и поляризации, называется *абсолютно черным телом* (или *полным излучателем*). Моделью такого тела может служить малое отверстие в стенке полого ящика. Для абсолютно черного тела $A_\lambda = 1$.

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.

$$r_{\lambda T} / A_{\lambda T} = \varepsilon_{\lambda T}; \quad (5.37)$$

$\varepsilon_{\lambda T}$ является универсальной функцией длины волны (или частоты) и температуры; она соответствует спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела.

На рис. 83 приводится распределение спектральной плотности энергетической светимости в спектре излучения абсолютно черного

*) Устаревшее название — *испускательная способность*.

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 абсолютную температуру.

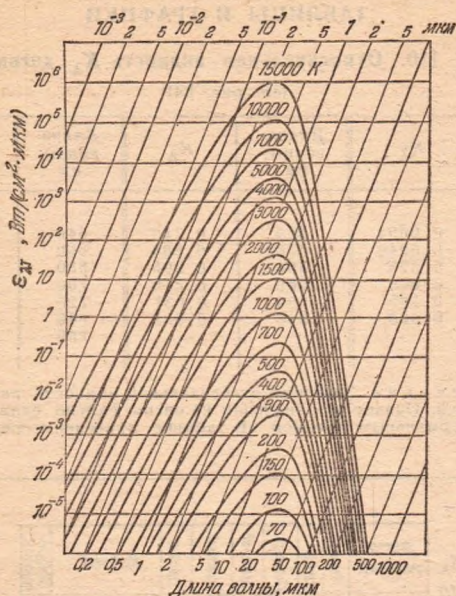


Рис. 83. Излучение абсолютно черного тела при различных температурах.

Закон Стефана — Больцмана. Энергетическая светимость R_3 абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры T :

$$R_3 = \sigma T^4, \quad (5.38)$$

где σ — коэффициент пропорциональности (*постоянная Стефана — Больцмана*):

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Закон смещения Вина. Наибольшая спектральная плотность энергетической светимости соответствует определенной длине волны λ_m (см. рис. 83). Длина волны, которой соответствует максимальная спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре T , т. е.

$$\lambda_m T = b, \quad (5.39)$$

где постоянная $b = 0,2898 \text{ см} \cdot \text{К}$.

Формула Планка. Спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела:

$$\epsilon_{\lambda T} = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{h}{e^{hc/(k\lambda T)} - 1}, \quad (5.40)$$

где c — скорость света в вакууме, λ — длина волны, k — постоянная Больцмана, n — постоянная Планка. Графически функция $\epsilon_{\lambda T}$ представлена на рис. 83 (для различных температур).

ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Таблица 110. Относительная видность K_{λ} дневного зрения
(см. рис. 84)

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 K_{λ} .

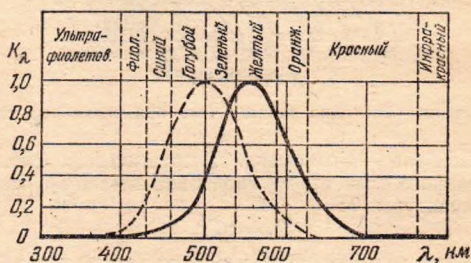


Рис. 84. График относительной видности при дневном и сумеречном зрении (пунктирная кривая).

Таблица 111. 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	$3 \cdot 10^4$
Поверхность Луны	$2,5 \cdot 10^3$

Таблица 112. Яркость источников света

Источник	Яркость, кд/м ²
Солнце	$15 \cdot 10^8$
Капилляр ртутной дуги сверхвысокого давления	$12 \cdot 10^8 - 15 \cdot 10^8$
Кратер угольной дуги	$15 \cdot 10^7$
Металлический волосок лампы накаливания	$1,5 \cdot 10^8 - 2 \cdot 10^8$
Ночное безлунное небо	10
Искра при разряде в атмосфере ксенона	$1,1 \cdot 10^{11}$
» аргона	$1,5 \cdot 10^{11}$
» воздуха (азота)	$2,1 \cdot 10^{11}$
» гелия	$1,5 \cdot 10^{12}$

Таблица 113. Освещенность в некоторых типичных случаях

Освещение	Освещенность, лк
Солнечными лучами в полдень (средние широты)	100 000
При киносъемке в студии	10 000
На открытом месте в пасмурный день	1 000
В светлой комнате (вблизи окна)	100
На рабочем столе для тонких работ	100—200
Необходимое для чтения	30—50
На экране кинотеатра	85—120
От полной Луны	0,2
От ночного неба в безлунную ночь	0,0003

Таблица 114. Коэффициент отражения при различных углах падения для стекла и воды

(ρ, %)

Вещество	Угол падения в градусах									
	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 пленкой кремнезема и показателем преломления 1,5 при нормальном падении $\rho \approx 2,5$. Для стекла с пленкой кремнезема и показателем преломления 1,9 при нормальном падении $\rho \approx 0,8$.

**Таблица 115. Отражение света при переходе
из стекла в воздух**

Угол падения	0°	10°	20°	30°	35°	39°	39°30'	40°	60°
Угол преломле- ния	0°	15°40'	32°	51°	63°	79°	82°	90°	—
Доля отражен- ной энергии в %	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 неполяризованного света**

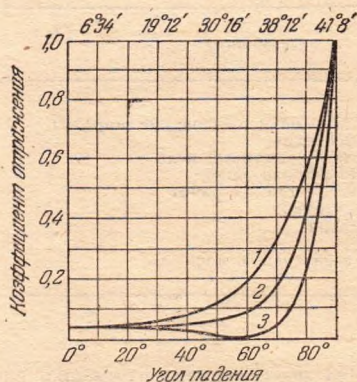


Рис. 85. Зависимость коэффициента отражения света от угла падения на границе раздела воздух — стекло ($n=1,52$): 1 — отражение плоскополяризованных волн (направление колебаний вектора E перпендикулярно плоскости падения); 2 — отражение неполяризованного света; 3 — отражение плоскополяризованных волн (вектор E параллелен плоскости падения). Наверху указаны углы падения при переходе света из стекла в воздух.

Таблица 116. Длины волн видимой части спектра

Цвет	Границы, нм	Цвет	Границы, нм
Фиолетовый	380—450	Желто-зеленый	550—575
Синий	450—480	Желтый	575—585
Голубой	480—510	Оранжевый	585—620
Зеленый	510—550	Красный	620—760

Таблица 117. Длины волн ультрафиолетовой части спектра

Диапазон	Границы, нм	Производимое действие
Длинноволновый ультрафиолет	315—380	Загар
Средневолновый ультрафиолет	280—315	Эритемное
Коротковолновый ультрафиолет	200—280	Бактерицидное
Вакуумный ультрафиолет	< 200	Озолирующее

Таблица 118. Отражение света металлами

Числа, приведенные в таблице, показывают долю отраженного света (в %) полированной поверхностью (при нормальном падении).

Название группы волн	Длина волн, нм	Алюминий	Медь	Сталь (1%С)	Серебро	Никель	Хром	Цинк	Кремний
Ультрафиолетовые	188	—	—	22	76	—	33	17	64
	200	—	—	27	76	—	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
Световые	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	—
Инфракрасные	800	85	89	61	97	70	—	62	—
	1 000	93	90	63	97	72	57	69	—
	5 000	94	98	90	99	94	81	97	—
	10 000	97	98	94	99	—	93	—	—

Таблица 119. Предельные углы полного отражения (в градусах)

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 120. Длины волн главных фраунгоферовых линий

Обозначение линий	Элемент	λ , нм	Обозначение линий	Элемент	λ , нм
<i>A</i>	Кислород	759,4	<i>b₄</i>	Железо, магний	516,74
<i>a</i>	»	718,5	<i>c</i>	»	495,76
<i>B</i>	»	687,0	<i>F</i>	Водород	486,13
<i>C</i>	Водород	656,3	<i>d</i>	Железо	466,8
α	Кислород	627,81	<i>e</i>	»	438,36
<i>D₁</i>	Натрий	589,59	<i>f</i>	Водород	434,05
<i>D₂</i>	»	589,0	<i>G'</i>	Железо	432,58
<i>D₃</i>	Гелий	587,56	<i>G</i>	», кальций	430,79
<i>E</i>	Железо	526,96	<i>g</i>	Кальций	422,67
<i>b₁</i>	Магний	518,36	<i>h</i>	Водород	410,17
<i>b₂</i>	»	517,27	<i>H</i>	Кальций	396,8
<i>b₃</i>	Железо	516,9	<i>k</i>	»	393,36

Таблица 121. Показатели преломления для длин волн, соответствующих некоторым фраунгоферовым линиям

Фраунгоферовы линии		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>D</i>	<i>F</i>	<i>H</i>
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

Таблица 122. 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	Сероводород	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	17,63
Метан	4,41	углерод	

Примечание. Значения показателей преломления, указанные в таблице, относятся к длине волны, соответствующей желтой линии натрия (D), и приведены к плотности, соответствующей 0°C и нормальному давлению (101 325 Па), на основании соотношения $(n-1)/\rho = \text{const}$ (для данного газа).

Таблица 123. 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
Кападский бальзам	1,53	Парафиновое	1,44
Серная кислота	1,43		

**Т а б л и ц а 124. Зависимость показателя преломления
от длины волны**

Название волн	Длина волны, нм	Стекло (15°C)		Кварц (18°C)		Плавленый кварц	Вода при 20°C	Силика (KCl) при 18°C
		легкий крон	тяжелый крон	обыкновенный луч	необыкновенный луч			
Инфракрасные	22 300	—	—	—	—	—	—	1,3712
	9 429	—	—	—	—	—	—	1,4587
	4 200	—	—	1,4569	—	—	—	1,4720
	2 172	1,4946	1,6153	1,5180	1,5261	—	—	1,4750
	1 256	1,5042	1,6268	1,5316	1,5402	—	1,3210	1,4778
Видимые	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	1,5667	1,4697	1,3428	1,5097
Ультрафиолетовые	303,4	1,5552	—	1,5770	1,5872	1,4869	1,3581	1,5440
	214,4	—	—	1,6305	1,6427	1,5339	1,4032	1,6618
	185,2	—	—	1,6759	1,6901	1,5743	—	1,8270
Температурный коэффициент, 10°K ⁻¹		—1	3	—5	—6	—3	—80	—40

Примечание. 1. Показатели преломления даны относительно воздуха.

2. Температурный коэффициент — изменение показателя преломления при повышении температуры на 1°C. Минус указывает, что при увеличении температуры показатель преломления уменьшается.

3. В кристалле кварца луч расщепляется на два поляризованных луча. В таблице указаны значения показателя преломления для обоих лучей. Для необыкновенного луча указаны наибольшие значения показателя преломления.

**Т а б л и ц а 125. Диффузное отражение материалов
в белом свете**

Материал	Отражение, %	Материал	Отражение, %
Бумага голубая	25	Калька	22
» желтая	25	Картон белый	60—70
» коричневая	13	» желтый	30
» обычная белая	60—70	Марля	16
» промокательная	70—80	Материалы, окрашенные белилами	50
» шоколадного цвета	4	Материалы, окрашенные желтым	40
Вельвет черный	0,4	Почва влажная	8
Дерево (сосна)	40		
Жирная глина (желтая)	24		

Таблица 126. Постоянные Керра и Коттона — Мутона

Вещество	$B, 10^{-7} \text{ см/В}^2$	$C, 10^{-13} \text{ см/А}^2$
Бензол	0,60	7,5 (26°C, 580 нм)
Сероуглерод	3,21	-4,0 (28°C, 540 нм)
Хлороформ	-3,46	-0,8 (20°C, 546 нм)
Вода	4,7	-0,014 (20°C, 546 нм)
Хлорбензол	10,0	10,2 (25°C, 546)
Нитротолуол	123	
Нитробензол	220	24,1 (20°C, 589 нм)

Примечания 1. Значения B указаны для температуры 20°C и линии натрия 589 нм.

2. Знак минус указывает на то, что скорость луча, у которого вектор E параллелен направлению поля, больше скорости луча, у которого вектор E перпендикулярен к полю.

Таблица 127. Удельная постоянная вращения при температуре 20°C, угл. градусы·л/(г·дм)

Вещество	Растворитель	$[\alpha] (\lambda=589,3 \text{ нм})$	$\Delta C, \text{ г/л}$
Тростниковый сахар	Вода	$66,47 + 0,127 C - 3,8 \cdot 10^{-3} C^2$	0—500
Глюкоза	Вода	$52,50 + 0,188 C + 5,17 \cdot 10^{-3} C^2$	0—350
Виннокаменная кислота	Вода	$14,83 - 1,46 C$	0—500
Скипидар	Чистый	-37	—
Камфора	Спирт (этил)	$40,9 + 1,35 C$	100—500
Хинин	Спирт (этил)	-169	20
Миндальная кислота	Вода	156	32

Примечание. Значения концентрации C приведены в граммах на литр (г/л). Минус указывает, что вращение происходит против часовой стрелки, если смотреть на вещество против хода лучей. В последней графе указаны пределы изменения концентрации ΔC .

Таблица 128. Вращательная дисперсия при 20°C (в угловых градусах на мм)

Тростниковый сахар в воде ($C=100-260 \text{ г/л}$)		Винная кислота в воде ($C=286,2 \text{ г/л}$)		Кварц (вдоль оптической оси)	
$\lambda, \text{ нм}$	$[\alpha]$	$\lambda, \text{ нм}$	$[\alpha]$	$\lambda, \text{ нм}$	$[\alpha]$
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°C $[\alpha]$ увеличивается на 0,003 первоначального значения (для $\lambda=589,3 \text{ нм}$); C — концентрация (см. табл. 127).

Таблица 129. Спектры испускания металлов и газов

Алюминий (дуга), нм	Медь (дуга в вакууме), нм	Ртуть (ртутная лампа), нм	Натрий (в пламе- ни), нм	Кадмий (дуга), нм	Цинк (дуга в вакууме), нм
308,3	324,8	312,6	588,997 о	326,1	303,6
309,3	327,4	313,1	589,593 о	340,4	307,2
394,4 ф	402,3 ф	365,0		346,6	334,5
396,2 ф	406,3 ф	404,68 ф		361,1	468,0 г
466,3 г	510,55 з	435,83 ф		398,2 ф	472,2 г
505,7 з	515,33 з	491,64		441,3 г	481,1 г
569,6 ох	521,82 з	495,97 з		467,8 г	491,2 г
572,3 ох	570,0	546,07 з		479,99 г	492,5 г
	578,21 ох	576,96 ох		508,58 з	610,3 о
	578,22	579,07 ох		533,8 з	636,2 о
		615,20 о		537,9 з	
		623,20 о		643,85 к	
Азот	Аргон	Водород	Гелий	Кислород	Неон
(в газовом разряде)					
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	415,86	434,05	412,08	(полоса)	470,44
590,4	416,42	486,128	501,57	555,0	470,89
595,7	418,19	486,136	587,56	564,0	471,53
601,2	419,0	656,271	667,81	(полоса)	478,89
606,8	419,10	656,285	706,52		533,08
625,1	419,83				534,11
632,1	420,07				535,80
639,3	425,12				540,06
646,7	425,94				585,25
654,3	426,63				588,19
662,2	427,22				596,54
670,3	430,01				614,31
678,7	433,36				626,65
	433,54				638,30
					640,22
					650,65
					717,39
					724,52

Примечания 1. Длины волн измерены в воздухе при 15°C и нормальном давлении (101 325 Па).
2. Цвета видимых линий обозначены начальными буквами соответствующего цвета.
3. Наиболее яркие линии подчеркнуты.

Таблица 130. Световая отдача, к.п.д. и яркость источников света

Тип лампы	лм/Вт	к.п.д., %	T, К	Яркость, кд/м ²
50 Вт, пустотная угольная	2,5	0,4	2095	5 · 10 ⁵
50 Вт, пустотная фольфрамовая	10	1,6	2460	15 · 10 ⁵ — 20 · 10 ⁵
50 Вт, газонаполненная вольфрамовая	10	1,6	2685	5 · 10 ⁶
500 Вт, газонаполненная вольфрамовая	17,5	2,8	2900	10 ⁷
2000 Вт, газонаполненная вольфрамовая	21,2	3,5	3020	13 · 10 ⁶ — 15 · 10 ⁶
Вольтова дуга	25	4	4000	15 · 10 ⁷ (в кратере)
Люминесцентная лампа	40—60	6,4	—	1,5 · 10 ⁴

Примечание. Световая отдача есть отношение полного светового потока к мощности тока, питающего источник света.

К.п.д. есть отношение мощности светового излучения для длины волны 555 нм к мощности, потребляемой источником света:

$$\eta = \Phi / (680 P),$$

где Φ — световой поток (лм), P — мощность (Вт), потребляемая источником.

Таблица 131. Работа выхода электронов и красная граница фотоэффекта

Вещество	A, эВ	$\lambda_{\text{к}}$, нм
Закись меди	5,15	250
Слюда	4,8	255
Хлористый натрий	4,2	295
Бромистое серебро	3,7—5,14	335—240
Торий на вольфраме	2,62	473
Натрий на вольфраме	2,10	593
Цезий на вольфраме	1,36	909
Цезий на платине	1,31	895
Барий на вольфраме	1,1	1133
Оксид бария на окисленном вольфраме	1,0—1,1	1240—1130

ГЛАВА VI

СТРОЕНИЕ АТОМА И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

1. Единицы заряда, массы и энергии в атомной физике

За единицу заряда принимается *элементарный заряд*:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

За единицу массы принимается 1/12 часть массы изотопа (см. стр. 177) углерода с массовым числом 12. Эта единица называется *атомной единицей массы* (сокращенно а. е. м.):

$$1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Масса наилегчайшего атома — атома водорода — равна 1,008 а. е. м.

За единицу энергии принимается *электрон-вольт (эВ)* (см. стр. 109):

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Моменты импульсов частиц выражаются в единицах $\hbar/2\pi$, магнитные моменты электронов — в единицах $eh/4\pi m_e$, магнитные моменты ядер — в единицах $eh/4\pi m_p$. В этих выражениях \hbar — постоянная Планка, e — элементарный заряд, m_e — масса электрона, m_p — масса протона. Единица $eh/4\pi m_e$ называется *магнетоном Бора*, $eh/4\pi m_p$ — *ядерным магнетоном*.

Магнетон Бора $\mu_B = 9,274 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл.}$

Магнетон ядерный $\mu_N = 9,051 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл.}$

2. Модель атома Резерфорда — Бора

В центре атома находится положительно заряженное ядро, вокруг которого вращаются по определенным орбитам электроны. Основная масса атома сосредоточена в ядре.

Ядро самого легкого атома — водорода ${}^1\text{H}$ — состоит из одного протона. Масса протона $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, масса электрона $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$, $m_p \approx 1836 m_e$.

Заряд электрона равен элементарному заряду e . Положительный заряд протона равен по абсолютному значению элементарному заряду. Заряд ядра атома, выраженный в элементарных зарядах, равен порядковому номеру Z элемента в периодической системе

Д. И. Менделеева, количество электронов в атоме также равно порядковому номеру Z .

Согласно модели Резерфорда — Бора электроны в атоме движутся вокруг ядра по определенным круговым и эллиптическим орбитам (рис. 86). Эти орбиты называют *стационарными*. Двигаясь по стационарным орбитам, электрон, несмотря на наличие у него ускорения, не излучает. Радиусы стационарных круговых орбит определяются из условия

$$m_e v_n r_n = \hbar n / (2\pi), \quad (6.1)$$

где m_e — масса электрона, v_n — его линейная скорость, r_n — радиус n -й орбиты, \hbar — постоянная Планка, $n=1, 2, 3, \dots$

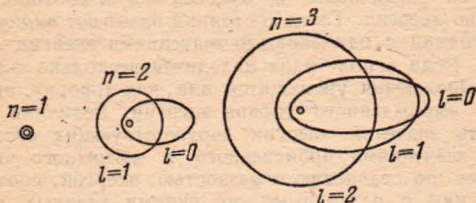


Рис. 86. Возможные орбиты электрона в атоме водорода (для различных квантовых чисел). Большие полуоси эллипса относятся как квадраты целых чисел $1^2; 2^2; 3^2; 4^2$ и т. д.

Определенным стационарным орбитам электронов (точнее, стационарным состояниям атома) соответствуют определенные значения энергии (*дискретные уровни энергии*). Уровни энергии E_n и радиусы r_n круговых орбит атома водорода можно вычислить по формулам *)

$$E_n = - m_e e^4 / (8 \epsilon_0^2 n^2 \hbar^2), \quad (6.2)$$

$$r_n = n^2 \hbar^2 / (4 \pi^2 m_e e^2), \quad (6.3)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная.

Атом излучает электромагнитную энергию, если электрон переходит с удаленной от ядра стационарной орбиты на ближнюю; при переходе электрона с ближней орбиты на дальнюю атом поглощает энергию. Величина излученного или поглощенного при переходах кванта энергии $h\nu$ определяется условием

$$h\nu = E_2 - E_1, \quad (6.4)$$

где E_1 и E_2 — дискретные уровни энергии в атоме до и после перехода электрона.

По современным представлениям, электронных орбит не существует; имеется электронное распределение и рассчитывается лишь вероятность того, что электрон находится на определенном расстоянии от ядра. Однако и в современных теориях понятие о дискретных уровнях энергии атома остается в силе.

*) В системе СГС (см. приложение VII); $E_n = - 2\pi^2 m_e e^4 / (n^2 \hbar^2)$, $r_n = n^2 \hbar^2 / (4\pi^2 m_e e^2)$.

3. Электронные оболочки в многоэлектронных атомах

Состояние электрона в атоме (точнее, состояние атома в целом) определяется четырьмя квантовыми числами: главное квантовое число n , орбитальное (или азимутальное) квантовое число l , магнитное квантовое число m и спиновое квантовое число s . Значения первых трех квантовых чисел связаны между собой. При заданном главном квантовом числе n орбитальное квантовое число l может принимать целочисленные значения от 0 до $n-1$, а магнитное квантовое число — целочисленные значения от $-l$ до l . Спиновое квантовое число имеет единственное значение, равное $1/2$.

Если в электрическом поле ядра находится только один электрон, то все состояния с одинаковым значением главного квантового числа, но различными значениями l и m соответствуют одному значению энергии. Такие состояния называют *вырожденными*, а число состояний с одинаковыми значениями энергии — степенью вырождения. Если в поле ядра находится несколько электронов, то степень вырождения уменьшится или, как говорят, происходит расщепление вырожденного уровня энергии. Величина расщепления (разность значений энергии, соответствующих состояниям с различными значениями орбитального и магнитного чисел), как правило, мала по сравнению с разностью энергий, соответствующих состояниям с различными значениями главных квантовых чисел. Поэтому говорят, что главные квантовые числа определяют в основном значения энергии атома.

Распределение электронной плотности вокруг ядра, определяющее совокупность положений электрона с квантовыми числами n , l , m , называется *орбиталью*. Орбитальное и магнитное квантовые числа определяют форму орбитали. Момент импульса электрона и его проекции на некоторое направление имеют различные значения (для различных орбиталей). Орбитальное квантовое число определяет *момент импульса M электрона* в данном состоянии (т. е. находящегося на данной орбитали), а магнитное — его проекции M_z на выделенное (например, внешним магнитным полем) направление:

$$M = \hbar \sqrt{l(l+1)}, \quad M_z = m \hbar \quad (\hbar = h/(2\pi)). \quad (6.5)$$

Спиновое квантовое число определяет *собственный момент импульса M_s электрона (спина)* и его возможные проекции M_{sz}

$$M_s = \hbar \sqrt{s(s+1)}, \quad M_{sz} = \pm \frac{1}{2} \hbar. \quad (6.6)$$

Принято говорить, что спин электрона (или другой частицы) равен одной второй ($1/2$); при этом подразумевается, что проекции собственного момента импульса равны $\pm \frac{1}{2} \hbar$.

Четыре квантовых числа определяют энергетические уровни электрона.

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 (*фермионы*).

При переходе электрона с одного энергетического уровня на другой изменяются квантовые числа, определяющие его состояние. Как показывают теория и опыт, переход электрона возможен на такие уровни, когда изменение $\Delta m = 0, \pm 1$ изменение $\Delta l = \pm 1$.

В атоме совокупность электронов, которые имеют одинаковые квантовые числа n , образует *слой* (или группу); совокупность электронов, имеющих одинаковые квантовые числа n и l , образует *оболочку* (*орбиталь*). Слои обозначаются буквами K, L, M, N и т. д. (что соответствует значениям главного квантового числа $n=1, 2, 3, 4$ и т. д.), оболочки обозначаются буквами s, p, d, f и т. д., что соответствует значениям орбитального квантового числа $l=0, 1, 2$ и т. д. Наибольшее число электронов в слое равно $2n^2$. Распределение электронов по слоям и оболочкам приводится в табл. 132 и 133. Заполнение оболочек у многоэлектронных атомов осуществляется в следующей последовательности: $1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d, 4p, 5s, 4d, 5p, 6s, 4f, 5d, 6p, 7s, 5f, 6d$.

Химические свойства атомов определяются электронами его внешней оболочки. При переходах электронов во внешних оболочках излучаются световые и ультрафиолетовые электромагнитные волны.

Если из внутренней оболочки атома удалить электрон, то на эту оболочку будут самопроизвольно переходить электроны из других оболочек с большими номерами n . При таких переходах излучается *характеристическое рентгеновское излучение* с линейчатым спектром. Линии этого спектра объединяются в серии. Каждая серия определяется тем слоем, в который переходят электроны на вакантные места. Эти серии принято обозначать такими же буквами, какими обозначаются и слои: K, L, M, N, \dots . Длины волн этих спектров определяются только дискретными уровнями энергии атомов данного вещества. Наиболее коротковолновое излучение соответствует K -серии.

4. Атомное ядро

Основные характеристики стабильных ядер — массовое число A , электрический заряд Ze , масса M , энергия связи ΔE , радиус R , спин I , магнитный момент μ и другие величины.

Атомное ядро любого элемента состоит из протонов и нейтронов. Нейтрон — частица, не имеющая заряда, с массой, близкой к массе протона; спин у нейтрона, как и у протона, равен $(1/2)\hbar$.

Ядра, имеющие одинаковый заряд (и одинаковое число протонов), но отличающиеся друг от друга числом нейтронов, называются *изотопами*. Количество протонов и нейтронов, входящих в состав ядра, называется *массовым числом* (A).

Число нейтронов в ядре $N=A-Z$, где Z — атомный номер ядра, равный порядковому номеру атома в периодической системе. Заряд ядра равен Ze . Обе частицы — протон и нейтрон — называются *нуклонами* (ядерными частицами). Ядра, у которых число нейтронов или протонов равно одному из следующих чисел: 2, 8, 20, 28, 50, 82 и 120, называются *магическими ядрами*, а сами числа — *магическими числами*. Такие ядра имеют наибольшую стабильность.

Плотность ядра очень большая (порядка 10^{11} кг/см³), размер ядра имеет порядок 10^{-13} см (1 ферми).

Радиус ядра приближенно рассчитывается по формуле

$$R = R_0 A^{1/3}, \quad (6.7)$$

где A — массовое число, $R_0 = (1,2 \div 1,3) \cdot 10^{-13}$ см.

Спин ядра образуется из спинов нуклонов и их орбитальных моментов. Суммарный момент ядра, состоящий из четного числа протонов и четного числа нейтронов, равен нулю; момент ядра, которое

состоит из нечетного числа нуклонов, определяется моментом непарного нуклона, т. е. $i = s + l$ (s — спин непарного нуклона, l — его орбитальный момент, выраженные в единицах \hbar). Спины ядер I не превышают нескольких единиц \hbar .

Ядро любого элемента, которое имеет определенное строение и состав, называется *нуклидом*. Нуклид обозначается символом химического элемента с указанием атомного номера и массового числа в качестве нижнего и верхнего индекса соответственно (например, ${}_{13}^{27}\text{Al}$ — нуклид алюминия с атомным номером 13 и массовым числом 27).

Нуклоны внутри ядра связаны особыми силами, которые называются *ядерными силами*. Ядерные силы в значительной мере зависят от расстояния между нуклонами; на расстоянии $1 \cdot 10^{-13}$ см ядерные

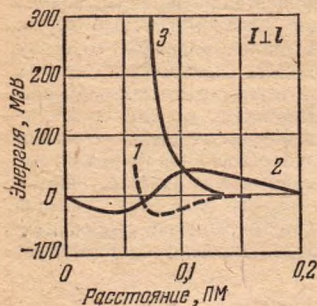


Рис. 87. Компоненты энергии связи трех составляющих ядерных сил: кривая 1 соответствует центральным силам, кривая 2 — спин-спиновой силе, кривая 3 — спин-орбитальной силе; кривые 2 и 3 соответствуют случаю, когда полный спин I нуклонов расположен перпендикулярно к их орбитальному моменту l .

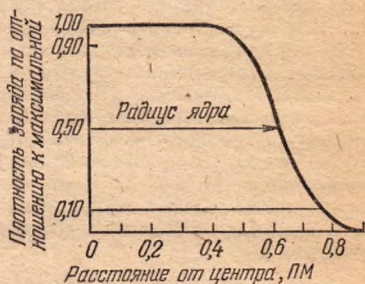


Рис. 88. Распределение заряда в ядре золота.

силы между нуклонами приблизительно в 135 раз больше сил электрического отталкивания и в 10^{38} раз больше гравитационного взаимодействия. На расстояниях меньше $0,7 \cdot 10^{-13}$ см ядерные силы действуют как силы отталкивания, на расстояниях больше $0,7 \cdot 10^{-13}$ см — как силы притяжения; на расстоянии $2 \cdot 10^{-12}$ см их действие равно нулю. Ядерные силы не зависят от электрического заряда и обладают свойством насыщения.

Ядерные силы имеют три составляющие: центральная сила, зависящая от расстояния, спин-спиновая сила и спин-орбитальная сила, которая возникает в результате искривления траектории одного нуклона при прохождении вблизи другого нуклона.

Энергия покоя частицы определяется соотношением $E_0 = mc^2$ (m — масса покоя частицы, c — скорость света в вакууме). Ядро с массой M имеет энергию покоя $E = Mc^2$.

При образовании ядра ядерными силами производится работа, вследствие чего энергия покоя E образовавшегося ядра будет меньше суммы энергий покоя $E(Z, A)$ невзаимодействующих нуклонов: $E(Z, A) = Zm_p c^2 + (A - Z)m_n c^2$, где m_p — масса покоя протона, m_n —

масса покоя нейтрона. Величина

$$\Delta E = \{Zm_p + (A - Z)m_n - M\} c^2 \quad (6.8)$$

называется *энергией связи ядра*, а разность между массами невзаимодействующих нуклонов и массой образовавшегося из них ядра называется *дефектом масс* ΔM :

$$\Delta M = Zm_p + (A - Z)m_n - M. \quad (6.9)$$

Энергия связи равна работе по расщеплению ядра на образующие его нуклоны. В расчетах обычно используется *удельная энергия связи*, равная средней энергии связи, приходящейся на один нуклон, т. е. $\Delta E/A$; среднее значение удельной энергии связи для тяжелых ядер приблизительно равно 8 МэВ.

На рис. 87 показаны кривые энергии связи каждой составляющей ядерных сил при взаимодействии одинаковых нуклонов (протон — протон, нейтрон — нейтрон).

В ядре нуклоны занимают дискретные уровни энергии. Электрический заряд распределен по ядру неравномерно; в середине ядра плотность постоянна; сердцевина окружена оболочкой, в которой плотность уменьшается. *Радиусом ядра* принято считать расстояние от центра до слоя, в котором плотность заряда равна половине его максимального значения. Распределение заряда в ядре золота показано на рис. 88.

Ядро имеет приблизительно сферическую форму; форма тяжелых и некоторых легких ядер отлична от сферической, она вытянута вдоль спина.

5. Ядерные превращения

Некоторые из тяжелых ядер (уран, торий, радий) самопроизвольно распадаются с образованием новых ядер и выделением α -частиц, электронов и фотонов большой энергии (γ -лучей, см. шкалу электромагнитных излучений). Это свойство называется *естественной радиоактивностью*. Для радиоактивности установлены следующие законы:

1. Радиоактивный распад не зависит от внешних условий (температуры, давления, химических взаимодействий).

2. α - и γ -частицы имеют дискретные значения энергии, β -частицы имеют различные значения энергии; β -распад сопровождается излучением нейтрино и антинейтрино.

3. Изменение числа радиоактивных ядер определяется формулой

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 2^{-t/T}, \quad (6.10)$$

где N_0 — начальное число ядер в момент времени $t=0$, N — оставшееся число 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 $\tau = 1/\lambda$.

4. Новые ядра, получившиеся после радиоактивного распада, занимают в периодической системе элементов другие места: при α -распаде порядковый номер уменьшается на 2, при электронном распаде увеличивается на 1, при позитронном распаде уменьшается на 1. Этот закон называется *законом смещения*.

Взаимодействия, которые осуществляются благодаря действию ядерных сил, называются *сильными*.

Сильное взаимодействие атомного ядра с элементарной частицей или другим ядром, в результате которого происходит преобразование

ядер, называется *ядерной реакцией*; ядерные реакции осуществляются при сближении частиц на расстояния около 10^{-13} см.

Ядерные реакции происходят при облучении вещества протонами, нейтронами, ядрами дейтерия, гелия или более тяжелых элементов, а также γ -лучами; при этом могут образовываться новые радиоактивные изотопы, которых нет на Земле. Радиоактивность ядра, которая возникает в результате ядерных реакций, называется *искусственной радиоактивностью*. При искусственной радиоактивности ядра в основном испускают β -частицы и γ -излучение.

Плотностью потока частиц называется величина, равная количеству частиц, проходящих через единицу площади за единицу времени.

Число ядерных реакций K , проходящих в веществе за 1 с при бомбардировке потоком частиц плотностью P , определяется формулой

$$K = \sigma n_0 P, \quad (6.11)$$

где n_0 — число атомов в веществе, σ — коэффициент пропорциональности, который называется *эффективным сечением ядерной реакции*; этот коэффициент имеет размерность площади и численно равен вероятности ядерной реакции за 1 с при бомбардировке одного ядра потоком с плотностью в 1 частицу на 1 см^2 .

Эффективное сечение для быстрых частиц равно приблизительно площади поперечного сечения ядра, т. е. $\sigma = \pi r_0^2$ (r_0 — радиус ядра).

Ядерные превращения используются для освобождения ядерной энергии путем деления тяжелых ядер (например, урана ^{235}U) или путем синтеза (соединения) легких ядер (например, ядер водорода). Синтез легких ядер может быть осуществлен при очень высоких температурах (порядка десятков и сотен миллионов градусов); такие реакции называются *термоядерными*.

6. Волновые свойства частиц

Всякая движущаяся частица обладает волновыми свойствами. Например, электроны, проходя через металлическую пластинку, дают дифракционную картину, подобную дифракционной картине от рентгеновских и γ -лучей (рис. 89).



Рис. 89. Дифракция электронов на тонкой серебряной фольге.

Длина волны частицы определяется из соотношения

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (6.12)$$

где m — масса частицы, v — ее скорость, h — постоянная Планка,

7. Взаимодействие ядерных излучений с веществом

Электроны и позитроны. Основными видами взаимодействия являются упругое и неупругое рассеяние, радиационное торможение.

При неупругом рассеянии происходит ионизация и возбуждение атомов, вследствие чего уменьшается энергия частиц; такие изменения энергии называются *ионизационными потерями*.

При взаимодействии быстрых электронов с ядрами происходит торможение их с испусканием тормозного излучения (например, рентгеновских лучей). Такие потери называются *радиационными*. Ионизационные и радиационные потери определяют длину пробега электрона в веществе.

Поглощение электронов описывается законом

$$N_d = N_0 e^{-\mu d} = N_0 e^{-\mu' \rho d}, \quad (6.13)$$

где N_0 — начальная интенсивность пучка электронов, N_d — интенсивность пучка после прохождения слоя вещества толщиной d , μ — линейный коэффициент поглощения (в см^{-1}), $\mu/\rho = \mu'$ — массовый коэффициент поглощения, который имеет приблизительно одинаковое значение в различных веществах (для одного и того же излучения), ρ — плотность вещества.

Атомные ядра. Радиационные потери атомных ядер невелики; основную роль играют ионизационные потери, которые определяются зарядом и скоростью частиц. Например, у электрона и протона при одинаковых скоростях ионизационные потери одинаковы. Однако длина пробега частицы (при одинаковых энергиях) зависит от массы; для тяжелых частиц она меньше, чем для легких. Для α -частиц длина пробега (в см) в воздухе (при нормальных условиях) определяется выражением

$$R = 0,309 E^{3/2}, \quad (6.14)$$

где E — энергия в МэВ, изменяющаяся в пределах от 4 до 7 МэВ.

Нейтроны. Взаимодействие нейтронов с атомными ядрами осуществляется посредством ядерных сил; различаются в основном два вида взаимодействия — рассеяние и захват.

Рассеяние может быть упругим и неупругим; при неупругом рассеянии меняется кинетическая энергия. После нескольких столкновений происходит захват нейтронов ядрами.

Гамма-излучение. Ослабление интенсивности пучка γ -лучей определяется соотношением

$$I = I_0 e^{-\mu d} = I_0 e^{-\mu' \rho d}, \quad (6.15)$$

где I — интенсивность пучка при входе в слой вещества, d — толщина слоя, μ — линейный коэффициент ослабления, $\mu/\rho = \mu'$ — массовый коэффициент ослабления. Основными видами взаимодействия являются *рассеяние на электронах, фотоэлектрическое поглощение и образование пар*.

Различают два типа рассеяния — когерентное (для фотонов с энергией до 10 кэВ) и некогерентное (комптоновское). При высоких энергиях преобладает некогерентное рассеяние; при этом изменяется длина волны.

Фотоэлектрическое поглощение связано со взаимодействием фотона с электроном атома; оно имеет наибольшую вероятность, когда фотон обладает энергией, незначительно превышающей энергию

связи электрона. Фотон, имеющий энергию больше $2m_e c^2$ (m_e — масса электрона, c — скорость света), может превратиться вблизи ядра в пару частиц — электрон и позитрон, которые производят ионизацию атомов вещества.

Коэффициент полного ослабления

$$\mu = \sigma + \tau + \kappa, \quad (6.16)$$

где σ , τ , κ — коэффициенты ослабления, учитывающие комптоновское рассеяние, фотоэлектрическое поглощение и образование электрон-позитронных пар соответственно.

8. Единицы радиоактивности и ионизирующих излучений

Активностью нуклида A в радиоактивном источнике (активностью изотопа) называется величина, равная отношению количества распавшихся атомов ΔN к промежутку времени Δt распада этого числа частиц:

$$A = \Delta N / \Delta t. \quad (6.17)$$

Единицей активности изотопов является беккерель (Бк); 1 беккерель равен активности такого изотопа, в котором за 1 с происходит один распад. Массу радиоактивного изотопа, активность которого равна 1 Бк, можно рассчитать по формуле $M = 2,41 \cdot 10^{-24} A_n T$, где M — масса (г), T — период полураспада (с), A_n — массовое число.

Величина, равная энергии, поглощенной единицей массы данного вещества, называется *поглощенной дозой излучения*; единицей этой величины является грей (Гр). 1 Гр равен такой дозе излучения, при которой вещество массой 1 кг поглощает энергию ионизирующего излучения 1 Дж.

Доза излучения в единицу времени называется *мощностью поглощенной дозы*; единица измерения — грей в секунду (Гр/с).

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 воздействием электронов, образующихся в облучаемом воздухе, к массе Δm этого воздуха:

$$X = \Delta Q / \Delta m; \quad (6.18)$$

при этом предполагается, что полностью используется ионизирующая способность электронов. Единицей экспозиционной дозы фотонного излучения является кулон на килограмм (Кл/кг); это такая экспозиционная доза, при которой сумма зарядов всех созданных электронами ионов одного знака в 1 кг воздуха равна 1 Кл.

При прохождении ионизирующего излучения в веществе образуются заряженные частицы, которые в свою очередь могут производить ионизацию атомов. Величина, определяющая степень этой ионизации (называемой косвенной ионизацией), называется *кермой*. Керма K равна отношению суммы первоначальных кинетических энергий W всех заряженных частиц, образующихся при косвенной ионизации, к массе m этого вещества: $K = W/m$. Единица кермы — грей (Гр) — это такая керма, при которой сумма всех первоначальных кинетических энергий заряженных частиц, образующихся при косвенной ионизации в 1 кг вещества, равна 1 Дж.

9. Систематика элементарных частиц

По величине спина частицы делятся на два типа — с целым спином (0 и 1) и полуцелым (1/2); частицы с полуцелым спином подчиняются принципу Паули; частицы с целым спином не подчиняются этому принципу. По массе частицы делятся на три группы: барионы (тяжелые частицы), мезоны, лептоны (легкие частицы). Каждой элементарной частице соответствует своя античастица; любая пара таких частиц характеризуется тремя основными свойствами.

1. Частица и соответствующая ей античастица имеют одинаковые массы, спин и время жизни.

2. Частица и ее античастица имеют равные по величине, но противоположные по знаку электрические заряды, барионные (лептонные) числа и странности.

3. Продукты распада античастицы являются античастицами по сравнению с продуктами распада соответствующей частицы.

Барионное число — квантовое число, равное +1 для нуклонов и гиперонов, —1 — для их античастиц, 0 — для мезонов и лептонов. Подобным образом вводится и лептонное число: для лептонов +1, для их античастиц —1.

Среди разнообразных элементарных частиц можно выделить определенные группы, имеющие близкие характеристики (спин, массу), но отличающиеся зарядом. Такие группы называются зарядовыми мультиплетами; например, протон и нейтрон, π -мезоны. Частицы, входящие в такие группы, рассматриваются как различные состояния одной частицы. Средняя величина зарядов частиц, входящих в мультиплет, называется центром зарядового мультиплета; для нуклонов эта величина равна +1/2, для π -мезонов — нулю.

Центры зарядовых мультиплетов гиперонов смещены по отношению к соответствующим центрам нуклонов. Странность — квантовое число, которое определяется как удвоенная величина смещения центра зарядового мультиплета. Для π -мезонов и нуклонов странность равна нулю.

10. Превращение частиц

Вследствие различного типа взаимодействий, одни элементарные частицы превращаются в другие. Например, при слабом взаимодействии (которое, однако, в 10^{25} раз сильнее гравитационного взаимодействия) нейтрон превращается в протон, электрон и антинейтрино:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu};$$

мезоны распадаются по схемам

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu},$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu} + \nu,$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu,$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu},$$

где μ^+ — мю-плюс-мезон, μ^- — мю-минус-мезон, π^+ — пи-плюс-мезон, ν — нейтрино, $\bar{\nu}$ — антинейтрино, e^- — электрон, e^+ — позитрон.

При столкновениях частиц и античастиц происходят превращения по следующим схемам:

т. е. электрон + позитрон \rightarrow два гамма-кванта,

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma,$$

т. е. протон + антипротон \rightarrow пять пи-мезонов,

$$p + \bar{p} \rightarrow 2\pi^+ + 2\pi^- + \pi^0.$$

При торможении γ -квантов большой энергии образуются пары электрон-позитрон:

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+.$$

Процесс взаимодействия частиц и античастиц и превращения их в другие частицы называется *аннигиляцией*. При аннигиляции электрона и позитрона, которые имеют массу покоя, образуются частицы (γ -кванты), не имеющие массы покоя; хотя слово «аннигиляция» означает «уничтожение», никакого уничтожения массы и энергии в этих превращениях не происходит и закон сохранения массы-энергии выполняется совершенно строго. Типичные примеры превращений элементарных частиц указаны в табл. 138.

ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Энергетические уровни атома водорода

Энергетические уровни рассчитываются по формуле (6.2), где n полагается равным 1, 2, 3, 4 и т. д. Используя схему уровней, легко рассчитать частоты спектральных линий в спектре атома водорода из соотношения (6.4).

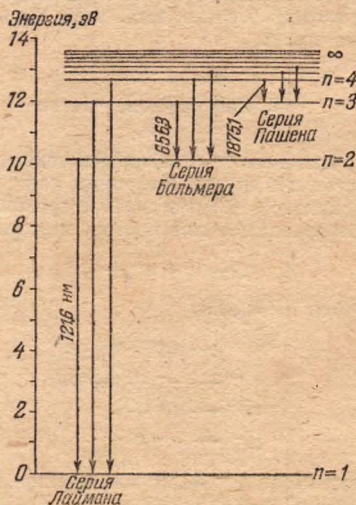


Рис. 90. Схема энергетических уровней и спектр излучения атома водорода.

При переходе электронов на уровень с $n=1$ излучается система линий, называемая серией Лаймана (рис. 90); линии этой серии лежат в ультрафиолетовой области.

При переходе на уровень с $n=2$ излучаются линии серий Бальмера (четыре линии этой серии лежат в видимой части спектра, остальные — в ультрафиолете), при переходе на уровень с $n=3$ — линии серии Пашена (лежат в инфракрасной области).

Числа у самых коротких стрелок каждой серии на рис. 90 указывают наибольшую длину волны (нм) в данной серии.

Таблица 132. Схема заполнения слоев и оболочек атома

Слой	Оболочка	Квантовые числа				Максимальное число электронов
		n	l	m	s	
K	1s	1	0	0	$\pm 1/2$	2
L	2s	2	0	0	$\pm 1/2$	2
	2p		1	$\begin{matrix} -1 \\ 0 \\ +1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \end{matrix}$	6
M	3s	3	0	0	$\pm 1/2$	2
	3p		1	$\begin{matrix} -1 \\ 0 \\ +1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \end{matrix}$	6
	3d		2	$\begin{matrix} -2 \\ -1 \\ 0 \\ +1 \\ +2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \end{matrix}$	10
N	4s	4	0	0	$\pm 1/2$	2
	4p		1	$\begin{matrix} -1 \\ 0 \\ +1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \end{matrix}$	6
	4d		2	$\begin{matrix} -2 \\ -1 \\ 0 \\ +1 \\ +2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \end{matrix}$	10
	4f		3	$\begin{matrix} -3 \\ -2 \\ -1 \\ 0 \\ +1 \\ +2 \\ +3 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \\ \pm 1/2 \end{matrix}$	14

период	группа	ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ				
1	I	(H)				
2	II	3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N
		ЛИТИЙ 6,941	БЕРИЛЛИЙ 9,01218	БОР 10,81	УГЛЕРОД 12,01	АЗОТ 14,0067
3	III	11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P
		НАТРИЙ 22,98977	МАГНИЙ 24,305	АЛЮМИНИЙ 26,98154	КРЕМНИЙ 28,086	ФОСФОР 30,97376
4	IV	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V
		КАЛИЙ 39,098	КАЛЬЦИЙ 40,08	СКАНДИЙ 44,9559	ТИТАН 47,90	ВАНАДИЙ 50,9414
	V	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As
		МЕДЬ 63,546	ЦИНК 65,38	ГАЛЛИЙ 69,72	ГЕРМАНИЙ 72,59	МИСЬ 74,9216
5	VI	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb
		РУБИДИЙ 85,4673	СТРОНЦИЙ 87,62	ИТРИЙ 88,9059	ЦИРКОНИЙ 91,22	НИОБИЙ 92,9064
	VII	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb
		СЕРЕБРО 107,868	КАДМИЙ 112,40	ИНДИЙ 114,82	ОЛОВО 118,69	СВЯЩЕНА 121,75
6	VIII	55 Cs	56 Ba	57 La*	72 Hf	73 Ta
		ЦЕЗИЙ 132,9054	БАРИЙ 137,34	ЛАНТАН 138,9055	ГАФИЙ 178,49	ТАНТАЛ 180,9479
	IX	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi
		ЗОЛОТО 196,9665	РУТУТЬ 200,59	ТАЛЛИЙ 204,37	СВИНЕЦ 207,2	ВИСМУТ 208,9804
7	X	87 Fr	88 Ra	89 Ac**	104 Ku	105 (Hs)
		ФРАНЦИЙ [223]	РАДИЙ 226,0254	АКТИНИЙ [227]	КУРИОЗИЙ [261]	ХАЙНСБОРИЙ [261]

* ЛАНТА

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd
ЦЕРИЙ 140,12	ПРАЗЕОДИЙ 140,9077	НЕОДИМ 144,24	ПРОМЕТИЙ [145]	САМАРИЙ 150,4	ЕВРОПИЙ 151,96	ГАДОЛИНИЙ 157,25

** АКТИ

90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm
ТОРИЙ 232,0381	ПРОТАКТИНИЙ 231,0359	УРАН 238,02	НЕПТУНИЙ 237,0482	ПЛУТОНИЙ [244]	АМЕРИЦИЙ [243]	КЮРИЙ [247]

	VII		VIII	
	водород 1 H 1,0079	гелий 2 He 4,00260		
VI				
кислород 8 O 15,9994	фтор 9 F 18,99840	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 54,9380 марганец	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 127,66	йод 53 I 126,9045	ксенон 54 Xe 131,30		
74 W вольфрам 183,85	75 Re рений 186,207	76 Os осмий 190,2	77 Ir иридий 192,22	78 Pt платина 195,09
полоний 84 Po [209]	астат 85 At [210]	радон 86 Rn [222]	атомный номер 81 Tl таллий 204,37	
106 (EW) экавольфрам	107 (ERe) экарений	атомная масса [относительная]		
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 174,97			
НОИДЫ				
97 Bk берклий [247]	98 Cf калифорний [251]	99 Es эйнштейний [254]	100 Fm фермий [257]	101 Md менделевий [258]
102 (No) нобелий [255]	103 (Lr) лавренций [256]			

Таблица 133. 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	$5d^1 6s^2$
Бор	$2s^2 2p^1$	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	$5d^3 6s^2$
Скандий	$3d^1 4s^2$	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	$5f^6 7s^2$
Молибден	$4d^5 5s^1$	Америций	$5f^7 7s^2$
Технеций	$4d^6 5s^2$	Кюрий	$5f^7 6d^1 7s^2$
Рутений	$4d^7 5s^1$	Берклий	$5f^8 6d^1 7s^2$
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	$5f^{13} 7s^2$
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 134. Основные линии рентгеновского характеристического спектра некоторых элементов (К-серия)

Элемент	Длина волны 10^{-1} нм			Элемент	Длина волны, 10^{-1} нм		
	α_2	α_1	β		α_2	α_1	β
Алюминий	9,89		9,56	Цинк	1,439	1,435	1,295
Кремний	7,128	7,125	6,768	Германий	1,258	1,254	1,129
Хром	2,294	2,290	2,085	Селен	1,109	1,105	0,992
Марганец	2,106	2,102	1,910	Вольфрам	0,214	0,209	0,184
Железо	1,940	1,936	1,757	Золото	0,185	0,180	0,159
Кобальт	1,793	1,789	1,621	Свинец	0,170	0,165	0,146
Никель	1,662	1,658	1,500	Уран	0,131	0,126	0,111
Медь	1,544	1,541	1,392				

Таблица 135. Относительная атомная масса, процентное содержание и активность легких изотопов

Элемент	Число протонов	Число нейтронов	Относит. атомная масса	Содержание в %	Период полураспада	Род активности
H	1	0	1,0077	99,98	стабилен	
D	1	1	2,0139	0,02	»	
T	1	2	3,0159	10^{-18}	12,26 г	β^-
He	2	1	3,01588	$1,3 \cdot 10^{-4}$	стабилен	
		2	4,0024	~ 100	»	
		3	5,0118	—	$6 \cdot 10^{-20}$ с	α, n
		4	6,0183	—	0,8 с	β^-
C	6	4	10,0169	—	19,5 с	β^+, γ
		5	11,0109	—	20,4 мин	β^+
		6	12,0000	98,9	стабилен	
		7	13,0027	1,1	»	
O	8	8	14,0026	—	5730 г	β^-
		7	15,0023	—	2,1 мин	β^+
		8	15,9942	99,76	стабилен	
		9	16,9983	0,04	»	
		10	17,9984	0,20	»	
		11	19,0026	—	29,1 с	β^-, γ
Al	13	13	25,9868	—	6,4 с	β^+
		14	26,9863	100	стабилен	
		15	27,9807	—	2,3 мин	β^-, γ
		16	28,9792	—	6,6 мин	β^-

Примечание. β^- — излучение электронов, β^+ — излучение позитронов, γ — гамма-излучение, α — ядро гелия, n — нейтрон.

**Т а б л и ц а 136. Некоторые радиоактивные изотопы
и их характеристики**

Элемент	Нуклид	Период полурас- пада	Энергия излучения, МэВ	
			β-частицы	γ-лучи
Углерод	¹⁴ ₆ C	5568 лет	0,155	—
Натрий	²⁴ ₁₁ Na	15,0 ч	1,39	1,38; 2,76
Фосфор	³² ₁₅ P	14,3 сут	1,71	—
Сера	³⁵ ₁₆ S	87,1 сут	0,167	—
Хлор	³⁶ ₁₇ Cl	3,1·10 ⁵ г	0,714	—
Кальций	⁴⁵ ₂₀ Ca	152 сут	0,254	—
Скандий	⁴⁶ ₂₁ Sc	85 сут	0,36	0,89; 1,12
Титан	⁵¹ ₂₂ Ti	5,8 мин	2,13	0,32; 0,61 0,93
Хром	⁵¹ ₂₄ Cr	28 сут	—	0,32; 0,57
Железо	⁵⁵ ₂₆ Fe	2,9 г	—	0,21
Железо	⁵⁹ ₂₆ Fe	45 сут	0,46; 0,27	1,1; 1,29
Кобальт	⁶⁰ ₂₇ Co	5,3 г	0,3	1,17; 1,33
Селен	⁷⁵ ₃₄ Se	127 сут	—	0,2—0,4
Стронций	⁸⁹ ₃₈ Sr	51 сут	1,46	—
Цирконий	⁹⁵ ₄₀ Zr	65 сут	0,36; 0,40; 0,88	0,23; 0,72; 0,75
Технеций	⁹⁹ ₄₃ Tc	2,12·10 ⁵ г	0,3	—
Серебро	¹¹⁰ ₄₇ Ag	270 сут	{ 0,087; 0,53; 2,12; 2,86	0,1—2,5
	¹¹¹ ₄₇ Ag	7,5 сут	0,7; 0,8; 1,0	0,25; 0,34
Кадмий	¹⁰⁹ ₄₈ Cd	470 сут	—	0,087
	¹¹⁵ ₄₈ Cd	43 сут	0,7; 1,61	0,5—1,3
Сурьма	¹¹⁵ ₅₁ Sb	2,0 г	{ 0,25; 0,34; 0,61; 0,82	0,08—0,72
Иод	¹³¹ ₅₃ I	8,14 сут	{ 0,25; 0,34; 0,61; 0,82	0,08—0,72
Цезий	¹³⁷ ₅₅ Cs	27 г	0,51; 1,17	0,66
Прометий	¹⁴⁷ ₆₁ Pm	2,6 г	0,22	0,121
Европий	¹⁵⁵ ₆₃ Eu	1,7 г	0,15; 0,24	0,06—0,132
Тулий	¹⁷⁰ ₆₉ Tu	129 сут	0,88; 0,97	0,08
Гафний	¹⁸¹ ₇₂ Hf	46 сут	0,4	0,004—0,62
Тантал	¹⁸² ₇₃ Ta	111 сут	0,53	0,06—1,6
Вольфрам	¹⁸⁵ ₇₄ W	73,2 сут	0,37; 0,43	{ 0,056; 0,57; 0,77
Иридий	¹⁹² ₇₇ Ir	74,4 сут	{ 0,10; 0,26; 0,54; 0,67	0,2—0,9

Таблица 136 (продолжение)

Элемент	Нуклид	Период полураспада	Энергия излучения, Мэв	
			β-частицы	γ-лучи
Золото	$^{198}_{79}\text{Au}$	2,7 сут	{ 0,29; 0,96; 1,37	0,41—1,09
	$^{199}_{79}\text{Au}$	3,15 сут	{ 0,29; 0,44 0,47	{ 0,05; 0,16; 0,21
Ртуть	$^{205}_{80}\text{Hg}$	5,6 мин	1,8	0,23
Таллий	$^{204}_{81}\text{Tl}$	4,1 г	0,77	—

Таблица 137. Некоторые искусственно полученные элементы

Атомный номер	Название	Символ	Массовые числа изотопов	Период полураспада
61	Прометий	Pm	146—151; 147	2,6 г
85	Астат	At	210—219	8,3 ч
87	Франций	Fr	219—223	23 мин
93	Нептуний	Np	231—241; 237	$2,2 \cdot 10^6$ г
94	Плутоний	Pu	236—246; 244	$7,5 \cdot 10^3$ г
95	Америций	Am	240—246; 243	$8 \cdot 10^3$ г
96	Кюрий	Cm	238—250; 247	$4 \cdot 10^2$ г
97	Берклий	Bk	243—250; 247	700 г
98	Калифорний	Cf	244—254; 251	660 г
99	Эйнштейний	Es	247—255; 254	~ 1 г
100	Фермий	Fm	250—256; 253	4,5 г
101	Менделевий	Md	255; 256	30 мин
102	Нобелий	No	255	
103	Лоуренсий	Lw	257	~ 8 с
104	Курчатовий	Ku	260	~ 0,3 с
105	Нильсборий	Ns	260, 262	

Примечания. 1. Жирным шрифтом набраны массовые числа изотопов с наибольшим периодом полураспада.

2. Предполагается существование элементов с атомными номерами от 106 до 118.

Таблица 138. Элементарные частицы

Частица	Символ	Заряд, e	Масса покоя, МэВ	Спин	Барионное число	Странность	Среднее время жизни, с	Обычные 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	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$\pi^- + p$
<i>Нуклоны:</i>								
нейтрон	n	0	940	1/2	+1	0	$1,0 \cdot 10^3$	$e^- + \nu + p$
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	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$\left\{ \begin{array}{l} \mu^+ + \nu \\ \pi^+ + \pi^0 \\ \mu^+ + \nu \end{array} \right.$
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	$8 \cdot 10^{-17}$	$\gamma + \gamma$
Фотон	γ	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 139. Моменты импульсов I и магнитные моменты μ ядер

Z	Ядро	Массовое число	I, \hbar	μ (в 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 указывает на то, что направления магнитного и механического моментов противоположны.

Таблица 140. Массовые коэффициенты поглощения рентгеновских лучей ($\text{см}^2/\text{г}$).

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
0,1	1,40	2,6	—	14,0	95	134	71	77
0,12	2,5	—	—	24	170	218	120	128
0,14	3,9	—	—	36	270	42	174	180
0,16	5,8	—	—	55	390	60	250	258
0,18	7,9	—	—	79	61	85	354	360
0,2	10,0	—	—	106	78	119	436	—

Таблица 141. Источники излучения и детекторы
для обнаружения элементарных частиц

Частицы	Источник излучения	Что было измерено или наблюдалось	Способ наблюдения
$\tilde{\nu}$	Ядерный реактор	$p + \tilde{\nu} = n + e^+$, аннигиляция	Счетчики
e^-	Катодно-лучевая трубка	Отношение заряда к массе	Флюоресцентный экран
e^+	Космические лучи	Отношение заряда к массе	Камера Вильсона
μ^+ , μ^-	Космические лучи	Поглощение излучения при прохождении через свинец не наблюдалось, распадается в состоянии покоя	Камера Вильсона
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	Масса	Ионизационная камера
\tilde{p}	Ускоритель	Отношение заряда к массе и аннигиляция	Счетчики
\tilde{n}	Ускоритель	Аннигиляция	Счетчики
Λ^0	Космические лучи	Распад на $p + \pi^-$	Камера Вильсона
$\tilde{\Lambda}^0$	Ускоритель	Распад на $p + \pi^+$	Эмульсия
Σ^+	Космические лучи	Распад в состоянии покоя	Эмульсия
Σ^-	Ускоритель	Распад на $\pi^- + n$	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
ν	Ускоритель	$\pi \rightarrow \mu^+ + \nu$ $\nu + n \rightarrow p + \mu^-$	Искровая камера

Таблица 142. Массовые коэффициенты поглощения
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 143. Эффективные сечения нейтронов

В первом столбце указан элемент, во втором — полное сечение 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_{π} — сечение поглощения, σ_a — сечение образования искусственного элемента (сечение активации) для различных изотопов; эффективные сечения указаны в барнах; 1 барн = 10^{-24} см².

Элемент	Быстрые нейтроны	Тепловые нейтроны		
		σ_p	σ_{π}	σ_a
H	0,9	38 (H ₂)	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 144. Предельно допустимые дозы облучения

Опасность внутреннего облучения зависит от того, какой орган поражен. Критический орган — это такой орган, накопление в котором радиоактивного изотопа поражает в большой степени весь организм. Санитарными правилами установлены три группы критических органов: I группа — все тело, гонады, хрусталик и кроветворные органы; II группа — мышцы, жировая ткань, печень, почки, поджелудочная железа и предстательная железа, желудочно-кишечный тракт и легкие; III группа — кожа, цитовидная железа, кости.

Категория облучения	Внешнее облучение		Внутреннее облучение					
			I группа		II группа		III группа	
	мДж/кг·нед	мДж/кг·г	мДж/кг·нед	мДж/кг·г	мДж/кг·нед	мДж/кг·г	мДж/кг·нед	мДж/кг·г
А — профессиональное	1	50	1	50	3	150	6	300
Б — в смежных помещениях	0,1	5	0,1	5	0,3	15	0,6	30
В — облучение всего населения	0,01	0,5	0,01	0,5	0,1	5	0,2	10

Примечание. Во всех случаях к 30 годам суммарная доза не должна превышать 0,6 Дж/кг. Естественное облучение за счет космической радиации и радиоактивных изотопов составляет около 1 мДж/г.

Таблица 145. Пробег α -частиц в воздухе, биологической ткани и алюминии

Энергия, МэВ	В воздухе, см	В ткани, мкм	В алюминии, мкм	Энергия, МэВ	В воздухе, см	В ткани, мкм	В алюминии, мкм
4,0	2,5	31	16	8,0	7,4	91	48
5,0	3,5	43	23	9,0	8,9	110	58
6,0	4,6	56	30	10,0	10,6	130	69
7,0	5,9	72	38				

Компоненты полного поглощения γ -лучей в свинце и алюминии

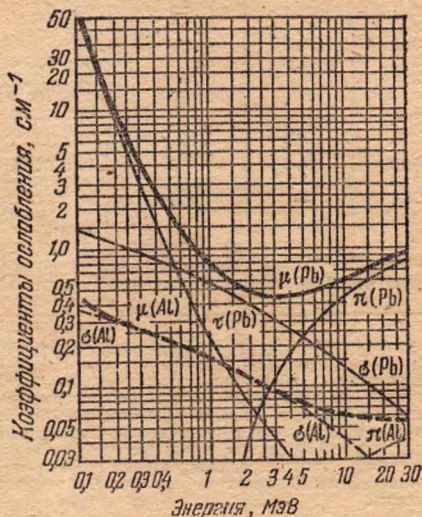


Рис. 91. Коэффициент полного поглощения γ -лучей $\mu = \sigma + \tau + \pi$, где σ , τ , π — коэффициенты ослабления, учитывающие соответственно рассеяние, фотоэлектрическое поглощение и образование электрон-позитронных пар, в свинце (Pb) и алюминии (Al). По оси абсцисс отложены значения энергии (МэВ), по оси ординат — коэффициенты ослабления (см⁻¹); обе шкалы логарифмические.

Удельная энергия связи нуклона в ядре

По оси абсцисс (рис. 92) отложены массовые числа, по оси ординат — удельная энергия связи (МэВ). Значения энергии связи легких ядер указаны отдельными точками; сплошная кривая представляет собой усредненные значения по изобарам; подъемы и впадины на кривой наблюдаются в эксперименте.

На внутреннем графике указаны экспериментальные значения для ядер с массовыми числами от 50 до 100 (масштаб по оси ординат увеличен).

Освобождение 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.

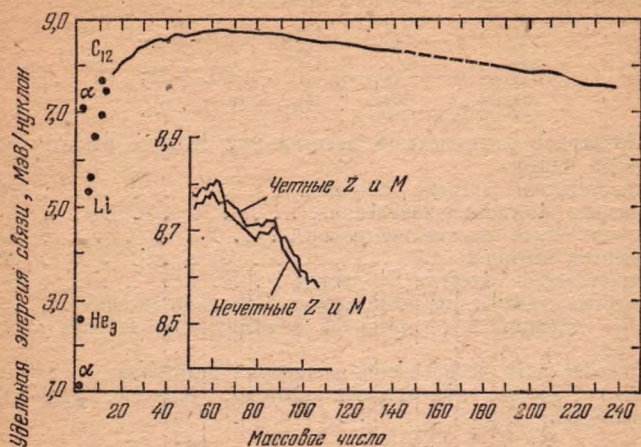


Рис. 92. Кривая удельной энергии связи.

Примеры ядерных реакций

Ядерные реакции идут с выделением или поглощением энергии. В приводимых ниже реакциях числа в левых частях равенств указывают величину поглощенной, а в правых — выделенной энергии в МэВ.

- ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} + 1,1 = {}^{17}_8\text{O} + p.$
- ${}^{17}_3\text{Li} + p = 2 {}^4_2\text{He} + 17,3.$
- ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} + 28,2 = {}^{30}_{15}\text{P} + n.$
- ${}^{14}_7\text{N} + n = {}^{14}_6\text{C} + p + 0,6.$
- ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^{12}_6\text{C} = {}^{34}_{17}\text{Cl} + {}^4_2\text{He} + n + 28,2.$
- ${}^{232}_{90}\text{Th} + n \rightarrow {}^{233}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{233}_{91}\text{Pa} + e^- \rightarrow {}^{233}_{92}\text{U} + 2e^-.$
- ${}^{238}_{92}\text{U} + n \rightarrow {}^{239}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{239}_{93}\text{Np} + e^-; {}^{239}_{93}\text{Np} \rightarrow {}^{239}_{94}\text{Pu} + e^-.$

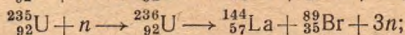
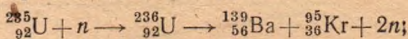
• П р и м е ч а н и е. Стрелки в уравнениях указывают на то, что дальнейший ход реакции идет самопроизвольно.

Деление ядер

Ядро урана-235 делится тепловыми нейтронами (0,025 эВ) на два неравных по массе осколка; кроме того, образуется 2—3 нейтрона. Наиболее вероятными значениями массовых чисел ядер-осколков являются 94—96 и 139—141; деление на равные части происходит очень редко (всего около 1% от 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.

Некоторые реакции деления урана-235:



Примерное распределение энергии при делении одного ядра урана-235 (МэВ):

кинетическая энергия осколков	168
энергия жесткого γ -излучения	5
кинетическая энергия нейтронов	5
энергия нейтрино	10
кинетическая энергия β^- -частиц	5
энергия γ -излучения, испускаемого осколками деления . .	7

При делении 1 г урана-235 освобождается энергия около 7,2 ГДж.

Деление ядер используется в ядерных реакторах; в качестве ядерного горючего применяются изотопы: уран-235, уран-233, плутоний-239.

Синтез ядер

Реакции синтеза ядер могут идти только при высоких температурах (порядка 10^7 — 10^8 градусов). Ниже приведены примеры таких реакций; освобождаемая энергия указана в МэВ.

1. ${}^1_6\text{C} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{13}_7\text{N} + \gamma + 1,9.$
2. ${}^{13}_7\text{N} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + e^+ + 1,2.$
3. ${}^{13}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + 7,5.$
4. ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{15}_8\text{O} + \gamma + 7,3.$
5. ${}^{15}_8\text{O} \rightarrow {}^{15}_7\text{N} + e^+ + 1,7.$
6. ${}^{15}_7\text{N} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He} + 4,9.$
7. ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + \gamma + 23,8.$
8. ${}^2_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma + 5,4.$
9. ${}^3_2\text{He} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + e^+ + 18,7.$
10. ${}^3_2\text{He} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^2_1\text{H} + 14,3.$

ПРИЛОЖЕНИЯ

I. Некоторые часто встречающиеся числа

$$\begin{array}{lll}
 \pi = 3,141593 & \sqrt{\pi} = 1,77245 & 1^\circ = 0,017453 \text{ рад} \\
 4\pi = 12,56637 & e = 2,718282 & 1' = 0,000291 \\
 \frac{2}{\pi} = 0,63662 & \sqrt{2} = 1,41421 & 1'' = 0,0000048 \\
 \pi^2 = 9,86960 & \sqrt{3} = 1,73205 &
 \end{array}$$

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 ошибкам, не превышающим 0,1%.

III. Элементы теории ошибок

Все измерения можно производить только с определенной степенью точности.

Точность измерения определяется той наименьшей частью единицы меры, до которой с уверенностью можно провести измерение. Для исключения случайных ошибок, возможных при каждом измерении, измерения следует производить несколько раз и брать среднее арифметическое всех результатов.

Если величина A измерялась n раз и A_1, A_2, \dots, A_n — результаты соответствующих измерений, то среднее значение

$$A_{\text{ср}} = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{n}$$

Отклонение $\Delta A_i = |A_{\text{ср}} - A_i|$ называется абсолютной ошибкой отдельного измерения. Величина $\Delta A = \frac{|\Delta A_1| + |\Delta A_2| + \dots + |\Delta A_n|}{n}$ называется средней абсолютной ошибкой измерения.

Обычно считают, что

$$A_{\text{ср}} - \Delta A < A < A_{\text{ср}} + \Delta A.$$

Отношение $\Delta A/A_{\text{ср}}$ называется средней относительной ошибкой измерения. Часто ее выражают в процентах.

Результат, интересующий экспериментатора, редко может быть получен измерением только одной величины. Обычно приходится измерять несколько величин и результат вычислять по соответствующей формуле. В приведенной ниже таблице даны выражения для абсолютных и относительных ошибок результатов, вычисленных по некоторым часто встречающимся формулам.

Фор- мула	Абсолютная ошибка	Относитель- ная ошибка	Фор- мула	Абсолютная ошибка	Относитель- ная ошибка
$A+B$	$\Delta A + \Delta B$	$\frac{\Delta A + \Delta B}{ A+B }$	$\frac{A}{B}$	$\frac{B\Delta A + A\Delta B}{B^2}$	$\frac{\Delta A}{ A } + \frac{\Delta B}{ B }$
$A-B$	$\Delta A + \Delta B$	$\frac{\Delta A + \Delta B}{ A-B }$	A^n	$nA^{n-1}\Delta A$	$n \frac{\Delta A}{ A }$
$A \cdot B$	$A\Delta B + B\Delta A$	$\frac{\Delta A}{ A } + \frac{\Delta B}{ B }$	$\sqrt[n]{A}$	$\frac{1-n}{n} A^{\frac{1-n}{n}} \Delta A$	$\frac{1}{n} \frac{\Delta A}{ A }$
$\sin A$	$ \cos A \Delta A$	$ \operatorname{ctg} A \Delta A$	$\cos A$	$ \sin A \Delta A$	$ \operatorname{tg} A \Delta A$

П р и м е р. Для определения плотности твердого тела необходимо измерить объем тела и его массу. Пусть измерение объема тела проводилось с точностью до 1,5%, а масса тела — с точностью до 1%. Тогда относительная ошибка измерения плотности тела составит 2,5%. Таким образом, можно положить, что

$$\left(\frac{m}{V}\right)_{\text{ср}} (1 - 0,025) < \frac{m}{V} < \left(\frac{m}{V}\right)_{\text{ср}} (1 + 0,025).$$

IV. Множители для образования десятичных кратных и дольных единиц

Наименование	Мно- жи- тель	Обозначение		Наименование	Мно- жи- тель	Обозначение	
		рус- ское	между- народное			рус- ское	между- народное
экса	10^{18}	Э	E	деци	10^{-1}	д	d
пета	10^{15}	П	P	сан- ти	10^{-2}	с	с
тера	10^{12}	T	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 единицами различных систем

Единицы длины и площади:

1 ангстрем (Å) = 10^{-10} м	1 дюйм = $2,54 \cdot 10^{-2}$ 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 л. с. = 736 Вт
1 килокалория в час (ккал/ч) = 1,16 Вт	

Единицы давления:

1 дин/см ² = 0,1 Па	1 атм = $1,01 \cdot 10^5$ Па
1 кгс/м ² = 9,81 Па	1 мм. рт. ст. = 133 Па
1 ат = 1 кгс/м ² = $9,81 \cdot 10^6$ Па	

Единицы силы тока и электрического заряда:

1 ед. СГС _I = $\frac{10}{c}$ А = $\frac{1}{3 \cdot 10^9}$ А	1 ед. СГСМ _I = 10 А
1 ед. СГС _Q = $\frac{10}{c}$ Кл = $\frac{1}{3 \cdot 10^9}$ Кл	1 ед. СГСМ _Q = 10 Кл

Единицы напряженности электрического поля:

1 ед. СГС _E = $c \cdot 10^{-6}$ В/м = $3 \cdot 10^4$ В/м	1 В/см = 100 В/м
---	------------------

Единицы электрической емкости:

$$1 \text{ ед. СГС}_C = \frac{1}{c^2} \cdot 10^9 \text{ Ф} = \frac{1}{9} \cdot 10^{-11} \text{ Ф}$$

Единицы электрического сопротивления и удельного сопротивления:

1 ед. СГС _r = $c^2 \cdot 10^{-9}$ Ом = $9 \cdot 10^{11}$ Ом	1 Ом·мм ² /м = 10^{-6} Ом·м
1 Ом·см = 10^{-2} Ом·м	1 ед. СГС _p = $9 \cdot 10^9$ Ом·м

Единицы магнитной индукции и магнитного потока:

1 гаусс (Гс) = 10^{-4} Тл
1 Вб/см ² = 10^4 Тл
1 максвелл (Мкс) = 10^{-8} Вб

*) Карат применяется для определения массы драгоценных камней, тройская унция — для определения массы драгоценных металлов.

Единицы напряженности магнитного поля:

$$1 \text{ эрстед (Э)} = \frac{1}{4\pi} \cdot 10^3 \text{ А/м} \quad 1 \text{ А/см} = 100 \text{ А/м}$$

Единицы индуктивности:

$$1 \text{ ед. СГС}_L = 10^{-9} \text{ Гн}$$

Единицы яркости и освещенности:

$$1 \text{ кд/см}^2 = 10^4 \text{ кд/м}^2 \quad 1 \text{ фот} = 10^4 \text{ лк}$$

$$1 \text{ стильб (сб)} = 1,005 \cdot 10^4 \text{ кд/м}^2$$

Единицы активности нуклидов:

$$1 \text{ кюри (Ки)} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк} \quad 1 \text{ резерфорд (Рд)} = 10^6 \text{ Бк}$$

Единицы дозы и мощности дозы излучения:

$$1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр}, \quad 1 \text{ эрг/г} = 10^{-4} \text{ Гр}$$

$$1 \text{ рад/с} = 10^{-2} \text{ Гр/с}, \quad 1 \text{ эрг/(с·г)} = 10^{-4} \text{ Гр/с}$$

Единицы экспозиционной дозы фотонного излучения:

$$1 \text{ рентген (Р)} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$$

VI. Физические константы

Скорость света в вакууме c	$2,99792 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Гравитационная постоянная γ	$6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н·м}^2/\text{кг}^2$
Молярный объем идеального газа V_M ($T_0 = 273,15 \text{ К}$, $P_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$)	$22,4138 \text{ л/моль}$
Универсальная газовая постоянная R	$8,314 \text{ Дж/(К·моль)}$
Постоянная Фарадея F	$96\,485 \text{ Кл/моль}$
Постоянная Авогадро N_A	$6,02204 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана k	$1,38066 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Масса покоя протона m_p	$1,67265 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя электрона m_e	$9,10953 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя нейтрона m_n	$1,67495 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Отношение масс покоя протона и электрона m_p/m_e	$1836,1515$
Заряд электрона e	$1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Постоянная Вина b	$0,0028978 \text{ м·К}$
Постоянная Планка h	$6,6262 \cdot 10^{-34} \text{ Дж·с}$
Постоянная Стефана — Больцмана σ	$5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Постоянная Ридберга R_∞	$1,09737318 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$
Магнетон Бора μ_B	$9,27408 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$
Магнетон ядерный μ_N	$5,05082 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл}$
Магнитный момент электрона μ_e	$9,28483 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$
Магнитный момент протона μ_p	$1,4106171 \cdot 10^{-26} \text{ Дж/Тл}$

Примечание. Указаны значения констант по согласованию на 1973 г.

VII. Сравнительная таблица размеров единиц Международной системы (СИ) и гауссовой системы (СГС)

Ранее в теоретической физике широко использовалась система СГС (система Гаусса), которая образуется из систем СГСЭ и СГСМ. В системе СГС основными единицами являются сантиметр ($1 \text{ см} = 10^{-2} \text{ м}$), грамм ($1 \text{ г} = 10^{-3} \text{ кг}$), 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, поляризуе-

мость, электрическая емкость) выражаются, как в системе СГСЭ, магнитные величины (магнитная индукция, поток магнитной индукции, магнитный момент, коэффициент индукции 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 систем СГС	
		русское	международное	СГСЭ	СГСМ
1. Основные единицы					
Длина	метр	м	m	10^2 см	10^2 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^{-1}
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	10^2 см/с	10^2 см/с
Ускорение	метр на секунду в квадрате	м/с ²	m/s ²	10^2 см/с ²	10^2 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^{-1}
Напряжение, э. д. с.	вольт	В	V	1/300	10^8
Напряженность электрического поля	вольт на метр	В/м	V/m	$1/3 \cdot 10^{-4}$	10^9
Электрическая емкость	фарад	Ф	F	$9 \cdot 10^{11}$	10^{-9}
Электрическое сопротивление	ом	Ом	Ω	сантиметр $1/9 \cdot 10^{-11}$	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	$36\pi \cdot 10^9$	$4\pi \cdot 10^{-11}$
4. Магнитные величины					
Магнитный поток	вебер	Вб	Wb	1/300	10^8 максвелл (Мкс)
Магнитная индукция	тесла	Тл	Tl	$1/3 \cdot 10^{-6}$	10^4 Гаусс (Гс)
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	А/м	A/m	$12\pi \cdot 10^7$	$4\pi \cdot 10^{-3}$ 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 уравнения электродинамики, записанные
в Международной системе (СИ) и гауссовой системе (СГС)**

	СИ	СГС
Закон Кулона	$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2} r_0$	$F = \frac{Q_1 Q_2}{\epsilon r^2} r_0$
Напряженность поля точечного заряда	$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2} r_0$	$E = \frac{Q}{\epsilon r^2} r_0$
Напряженность поля плоского конденсатора	$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}$	$E = \frac{4\pi\sigma}{8}$
Сила, действующая на заряд в электрическом поле		$F = QE$
Работа перемещения заряда в электрическом поле		$A = QU$
Электрическая емкость		$C = \frac{Q}{U}$
Емкость плоского конденсатора	$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$	$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d}$
Момент электрического диполя		$p = Qt$
Поляризованность	$P = \kappa \epsilon_0 E$	$P = \kappa E$
Смещение электрического поля	$D = \epsilon_0 E + P$	$D = E + 4\pi P$
Связь между ϵ и κ	$\epsilon = 1 + \kappa$	$\epsilon = 1 + 4\pi\kappa$
Плотность энергии электрического поля	$w = \epsilon \epsilon_0 E^2 / 2$	$w = \epsilon E^2 / (8\pi)$
Закон Ома		$I = U/R$
Мощность электрического тока		$P = IU$
Электрическое сопротивление		$R = \rho l/S$
Взаимодействие длинных параллельных проводников с током	$F = \frac{\mu \mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}$	$F = \frac{1}{c^2} \frac{2\mu I_1 I_2 l}{r}$
Магнитный поток		$\Phi = BS$
Магнитная индукция	$B = \mu_0 \mu H$	$B = \mu H$
Связь между μ и κ	$\mu = 1 + \kappa$	$\mu = 1 + 4\pi\kappa$
Закон Био — Савара — Лапласа	$\Delta H = \frac{I [\Delta tr_0]}{4\pi r^2}$	$\Delta H = \frac{I}{c^2} \cdot \frac{[\Delta tr_0]}{r^2}$
Напряженность магнитного поля прямого тока	$H = \frac{I}{2\pi r}$	$H = \frac{1}{c} \cdot \frac{2I}{r}$
Закон Ампера	$\Delta F = I \cdot [\Delta l \cdot B]$	$\Delta F = \frac{I}{c} [\Delta l B]$
Сила Лоренца	$F = Q[vB]$	$F = \frac{Q}{c} [vB]$
Закон электромагнитной индукции	$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$	$\mathcal{E} = - \frac{1}{c} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$
Индуктивность соленоида	$L = \mu \mu_0 N^2 S / l$	$L = 4\pi \mu N^2 S / l$
Плотность энергии магнитного поля	$w = \mu_0 \mu H^2 / 2$	$w = \mu H^2 / (8\pi)$
Формула Томсона	$T = 2\pi \sqrt{LC}$	$T = \frac{2\pi}{c} \sqrt{LC}$
Реактивное сопротивление	$r_{LC} = \omega L - \frac{1}{\omega C}$	$r_{LC} = \frac{\omega L}{c^2} - \frac{1}{\omega C}$
Плотность потока электромагнитных волн	$S = [EH]$	$S = \frac{c}{4\pi} [EH]$
Скорость света в среде	$c_1 = \frac{1}{\sqrt{\mu \mu_0 \epsilon \epsilon_0}}$	$c_1 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}$

Примечание. Формулы, имеющие одинаковый вид в обеих системах, записаны один раз (на границе раздела граф); c — скорость света в вакууме.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абсолютно черное тело 162
 Абсолютный нуль 52
 Адиабата 59
 Аккумулятор 109
 Активность нуклида 182
 Альфа-частица 179
 Ампер 125
 Амплитуда 79, 139
 Анион 108
 Аннигиляция 184
 Анод 108
 Антенна 144
 Античастицы 183
 Атмосфера стандартная 62
- Барioniы 183
 Барометрическая формула 62
 Беккерель 182
 Блоки 39
- Вебер 129
 Векторы 13
 Взаимодействие зарядов 95, 126
 Винт 40
 Влажность 62
 Волна линейно поляризованная 84, 85, 159
 — плоская 85
 — поперечная 85
 — продольная 85
 — синусоидальная 84
 — сферическая 85
 — цилиндрическая 85
 Вольт 96
 Ворот 40
 Восприимчивость магнитная 131
 — — удельная 136
 Вращение плоскости поляризации 160
 Вязкость 48, 56
- Гаусс 201, 202
 Генри 130
 Гистерезис магнитный 132
 Градиент потенциала 98
 — скорости 57
 — температуры 56
 Грей 182
 Громкость звука 87
- Давление звуковое 87
 — критическое 59
 — парциальное 61
 — радиационное 160
- Движение вращательное 15
 — вязкой жидкости 47
 — идеальной жидкости 47
 — криволинейное 15
 — механическое 15
 — прямолинейное 15
 — равномерное 15
 — равнопеременное 16
 — тела в поле тяготения 20
 Дефект массы 179
 Деформация 41
 — относительная поперечная 42
 — — продольная 42
 — сдвига 43
 — упругая 41
 Децибел 87
 Джоуль 32
 Диамантики 131
 Динамика 23, 26, 47
 — вращательного движения 26
 — жидкостей и газов 47
 Диоптрия 153
 Диполь электрический 100
 Дисперсия 84, 158
 — вращательная 160
 Дифракционная решетка 157
 Дифракция 157
 Длина волны 84
 — — частицы 180
 — свободного пробега 60
 Добротность контура 140
 Доза излучения поглощенная 182
 — фотонного излучения экспозиционная 182
 Домены 100, 132
- Единица измерения (система) 14
- Жидкие газы 68
 Жидкий воздух 68
 Жидкость идеальная 47
- Закон Ампера 124
 — Архимеда 47
 — Био — Савара — Лапласа 127
 — Бойля — Мариотта 58
 — всемирного тяготения 27
 — вращательного движения 26
 — Гей-Люссака 58
 — Гука 41
 — Кирхгофа 162
 — Кирхгофа — Бунзена 162
 — Ома 105
 — Паскаля 46
 — сохранения зарядов 94

Закон сохранения импульса 25

- — момента импульса 27
- — энергии 32
- Стефана — Больцмана 163
- Торричелли 47
- Шарля 58
- внешнего фотоэффекта 160
- Ньютона 23, 24
- Фарадея 108
- Заряд положительный 94
- элементарный 94
- Звук 87
- Зоны 111
- запрещенная 111
- проводимости 111

Излучение тепловое 162

- Изотопы 177
- Импеданс 139
- Импульс тела 24
- Индукция магнитная 124
- электромагнитная 129
- Инертность (инерция) 23
- Интенсивность 86
- Интерференция 155
- Инфразвук 87
- Ионизация газов 109
- Ионы 107
- Искровой промежуток 110
- Источник тока 104
- Источники когерентные 156

Кандела 14, 150

- Катионы 108
- Катод 108
- Катоды оксидные 110
- Квант излучения 160
- Квантовые числа 176
- Кельвин 14, 52
- Керма 182
- Килограмм 14
- Кинематика 15
- Кинетическая теория газов 60
- Колебания вынужденные 82
- гармонические 79
- затухающие 81
- свободные 81
- электрические 141
- Количество движения 24
- Конвекция 56
- Конденсаторы 95
- Константы физические 201
- Контур колебательный 141
- Коэффициент внутреннего трения 57
- давления 58
- затухания 81
- квазиупругой силы 80
- линейного расширения 55
- мощности 139
- объемного расширения 58
- отражения звука 92
- — света 160
- поверхностного натяжения 57
- поглощения звука 87
- — линейный 181
- — массовый 181
- Пуассона 42
- самоиндукции (индуктивность) 130
- сопротивления температурный 105
- теплопроводности 56

Коэффициент внутреннего трения 57

- Кривая видности 164
- намагничивания 131
- Кулон 94
- Лептоны 183
- Линии силовые 96
- Фраунгофера 162
- Лучепреломление двойное 159
- Люкс 150
- Люмен 150

Магнетики 130

- Магнетон Бора 174
- ядерный 174
- Магнитострикция 132
- Максвелл 201, 202
- Масса 24
- Массовое число 177
- Маятник крутильный 80
- математический 80
- физический 80
- Мезоны 183, 191
- Метр 14
- Модель атома 174
- Модуль сдвига 43
- Юнга 42
- Моль 14, 58
- Момент диполя электрический 99
- импульса 26
- инерции 26
- контура магнитный 126
- силы 26
- Мощность 30
- поглощенной дозы 182

Намагниченность 131

- Напряжения механическое 41, 43
- электрическое 96
- Напряженность поля гравитационного 28
- — магнитного 125
- — электрического 95
- Нейтрон 177, 191
- Нуклид 178
- Нуклоны 177

Оболочка электронная (орбиталь) 176

- Ом 105
- Оптика геометрическая 149
- Орбита стационарная 175
- Освещенность 150
- Отражение диффузное 151
- полное 151
- света 151, 165, 167
- Ошибки измерений 198

Пар насыщенный 54

- Парамагнетики 131
- Параметры критические 55, 59
- термодинамические 51
- Паскаль 46
- Период колебаний 79
- полураспада 179
- колебаний контура 141
- Петля гистерезиса 131
- Плотность вещества 30
- критическая 59

- Плотность объемная 30
 - тока 104
 - энергии объемная 99
- Поверхность волновая 84
 - эквипотенциальная 96
- Поглощательная способность 162
- Подвижность электронов 104,
 - ионов 108
- Показатель преломления 151
- Поле гравитационное 28, 142
 - магнитное 124
 - электрическое 94
 - — вихревое 129
 - электромагнитное 143
- Полиспаст 40
- Полный излучатель 150, 162
- Полупроводники 110
- Полюсы источника 104
 - магнитные 133
- Поляризация света 158
- Порог болевого ощущения 87
 - слышимости 87
- Постоянная Больцмана 60
 - вращения 160
 - — удельная 160
 - гравитационная 27, 201
 - Планка 160
- Постоянные эмиссионные 110
- Потенциал нормальный 108, 118
 - электрического поля 96
 - электрохимический 108
- Поток излучения 149
 - магнитный 129
 - световой 149
- Правила Кирхгофа 107
- Правило винта (правого) 14, 18, 127
 - левой руки 125
 - Ленца 129
- Предел текучести 42
 - прочности 42, 46
 - упругости 42
- Преобразования Лоренца 19
- Приборы оптические 152
- Примеси акцепторные 112
 - донорные 112
- Принцип Паули 176
- Проводимость 105
 - дырочная 111
 - несамостоятельная 109
 - самостоятельная 109
 - удельная 105
 - электронная 111
- Проницаемость диэлектрическая 95
 - магнитная 125
 - — начальная 131
- Протон 177, 191
- Пьезоэлектрический модуль 100
 - эффект 100
- Работа 30
 - выхода 109
 - ионизации 109
 - магнитного поля 129
- Равновесие безразличное 39
 - динамическое 54
 - на наклонной плоскости 39
 - неустойчивое 39
 - термодинамическое 51
 - устойчивое 38
- Радиоактивность 179, 180
- Реакция термоядерная 180
 - ядерная 180
- Резонанс токов 141
 - напряжений 140
- Рычаг 40
- Самоиנדукция 129
- Сверхпроводимость 105
- Свет естественный 158
- Светимость 150
- Сегнетоэлектрики 100
- Секунда 14
- Серия Бальмера 184, 185
 - Лаймана 184, 185
 - Пашена 184, 185
- Сечение эффективное ядерной реакции 180
- Сжижение 54
- Сжимаемость 43
- Сила 23
 - инерции 25
 - квазиупругая 80
 - Кориолиса 25
 - коэрцитивная 132
 - Лоренца 126
 - магнитная 124, 127
 - света 149, 150
 - сторонняя 104
 - электрического тока 103
 - трения 29
 - центробежная 25
 - центростремительная 27
 - электродвижущая 105
- Силы ядерные 178
- Система единиц СГС и СИ 202
 - макроскопическая 51
 - отсчета 15, 19
- Скин-эффект (поверхностный эффект) 141
- Скорость звука 88
 - колебательная 84
 - космическая 21
 - линейная 18
 - мгновенная 16
 - молекул 61
 - освобождения 21
 - равномерного движения 15
 - сейсмических волн 89
 - средняя 16
 - угловая 18
 - электромагнитных волн 143
- Смещение электрическое 96
- Сопротивление электрическое 105
 - удельное 105
 - емкостное 139
 - индуктивное 139
 - полное (импеданс) 139
- Спектры 161, 162
 - испускания (эмиссионные) 161
 - линейчатые 161
 - поглощения 161
 - характеристические рентгеновские 177
- Спин 176
- Странность 183
- Температура 51
 - кипения 54
 - критическая 59
 - Кюри 100, 132
 - плавления 53
- Тепловое расширение 55
- Теплоемкость 51—53

Теплоемкость удельная 52
Теплопроводность 56
Теплота парообразования 54
— плавления 53, 112
Термоэлектродвижущая сила 112
Тесла 125, 201
Ток насыщения 109
— переменный 138
— постоянный 104
— пульсирующий 104
— смещения 142
— эффективный 139
Токи вихревые (Фуко) 130
— индукционные 129
Точка материальная 15
Траектория 15
Трение качения 29
— покоя 29
— скольжения 29
— сухое 29

Увеличение оптических приборов 154
Угол апертурный 158
— отражения 151
— — предельный 152
— падения 151
— преломления 151
Ультразвук 87
Уравнение адиабаты 59
— Бернулли 47
— Клапейрона — Менделеева 58
— Эйнштейна 161
Уравнения Максвелла 142, 143
Уровни энергии 110, 175, 176
Ускорение 15—17
— кориолисово 20
— нормальное 17
— полное 17
— тангенциальное 17
— угловое 18

Фаза колебаний 79
— начальная 79
— термодинамическая 53
Фарад 93

Ферромагнетики 131
Фокус линзы 152
Формула Стокса 48
— Томсона 141
— тонкой линзы 152
Фотометрия 149
Фотон 160
Фотоэффект 160

Центр инерции (масс) 38
— тяжести 38

Частицы элементарные 183, 191
Частота 79
Числа квантовые 176
Число Авогадро 58
— барионное 183
— массовое 177
— Фарадея 108
Чувствительность глаза 150

Шкала механических волн 90
— электромагнитных волн 147, 148

Экватор магнитный 133
Эквивалент электрохимический 108
Электрическая цепь 105
Электрод 107
Электрическая емкость 98
Электролиз 108
Электролиты 107
Электрон-вольт 109
Элемент тока 124
Элементы гальванические 109, 119
Эмиссия термоэлектронная 109
Энергия кинетическая 31
— потенциальная 31
— связи ядра 179
— упругой деформации 43
Эрстед 201, 203

Ядра магические 177
Ядро атомное 177
Яркость 150



75 к.