

Н. И. КОШКИН и М. Г. ШИРКЕВИЧ

# СПРАВОЧНИК ПО ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ФИЗИКЕ

*ИЗДАНИЕ ПЯТОЕ,  
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Москва 1972

**53(083)**

**К 76**

**УДК 530 (083)**

#### **АННОТАЦИЯ**

Справочник по элементарной физике рассчитан на широкий круг работников различных профессий и на учащихся школ и техникумов.

**2-3-1**

---

**174-71**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к пятому изданию .....	11
Предисловие к первому изданию .....	12
К сведению пользующихся справочником .....	13
Введение .....	15

### Глава I МЕХАНИКА

#### А. Кинематика

Основные понятия и законы .....	18
1. Прямолинейное движение .....	18
2. Вращательное движение .....	20
3. Движение тел в земном поле тяготения .....	23
Таблицы .....	25
Табл. 1. Ускорения (примерные значения) .....	25
Табл. 2. Кинематические параметры планет .....	25
Табл. 3. Зависимость скорости убегания $v$ от высоты $H$ над поверхностью Земли .....	26
Табл. 4. Период обращения $T$ спутника Земли на разных высотах $H$ .....	26

#### Б. Динамика

Основные понятия и законы .....	26
1. Законы динамики .....	27
2. Динамика вращательного движения .....	29
3. Закон всемирного тяготения .....	30
4. Силы трения .....	32
5. Плотность вещества .....	34
6. Работа, мощность, энергия .....	34
Таблицы и графики .....	37
Табл. 5. Плотность твердых тел (при 20 °С) .....	37
Табл. 6. Плотность жидкостей (при 20 °С) .....	38
Табл. 7. Плотность металлов в жидком состоянии .....	39
Табл. 8. Плотности воды и ртути при различных темпера- турах .....	39
Табл. 9. Плотность газов и паров .....	40
Табл. 10. Объемная плотность материалов .....	40
Табл. 11. Моменты инерции однородных тел .....	41
Табл. 12. Коэффициенты трения скольжения для различ- ных материалов .....	42
Табл. 13. Напряженность земного поля тяготения (уско- рение свободного падения) для разных широт на уровне моря .....	43
Табл. 14. Динамические характеристики Солнечной системы	43

### В. Статика твердого тела

Основные понятия и законы .....	43
Таблицы и графики .....	47
Табл. 15. Центры тяжести однородных тел .....	47
Положение центра тяжести некоторых тел правильной геометрической формы .....	47

### Г. Элементы теории упругости

Основные понятия и законы .....	47
Таблицы и графики .....	50
Табл. 16. Пределы прочности некоторых материалов .....	50
Табл. 17. Модули упругости и коэффициенты Пуассона .....	51
Табл. 18. Сжимаемость жидкостей при различных температурах .....	52
Зависимость предела прочности от температуры .....	53

### Д. Механика жидкостей и газов

Основные понятия и законы .....	53
1. Статика .....	53
2. Динамика .....	54
Таблицы .....	56
Табл. 19. Вязкость жидкостей (при 18 °С) .....	56
Табл. 20. Вязкость газов (при 0 °С) .....	56
Табл. 21. Вязкость газов при высоких давлениях .....	57
Табл. 22. Вязкость воды при различных температурах .....	57
Табл. 23. Вязкость жидкостей при различных температурах .....	57
Табл. 24. Вязкость воздуха при различных условиях .....	58
Табл. 25. Вязкость металлов в жидком состоянии .....	58

## Глава II

### ТЕПЛОТА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Основные понятия и законы .....	59
1. Основы термодинамики. Теплоемкость .....	60
2. Фазовые превращения .....	61
3. Тепловое расширение твердых и жидких тел .....	64
4. Явления переноса .....	65
5. Поверхностное натяжение жидкостей .....	66
6. Газовый закон .....	67
7. Основы кинетической теории газов .....	70
Таблицы и графики .....	74
Табл. 26. Удельные теплоемкость $c_p$ , теплота плавления $\lambda$ , теплота испарения $r$ , температуры плавления $t_{пл}$ и кипения $t_{кип}$ некоторых веществ .....	74
Табл. 27. Относительное изменение объема вещества при плавлении .....	75
Табл. 28. Температура плавления огнеупорных материалов .....	75
Удельная теплоемкость воды при различных температурах .....	75
Табл. 29. Удельная теплоемкость твердых веществ при низких температурах .....	76
Табл. 30. Удельная теплоемкость жидкого этилового спирта при различных температурах и давлениях .....	76
Табл. 31. Удельная теплоемкость газов при давлении 1 атм .....	77
Табл. 32. Удельная теплота парообразования .....	77

Температура кипения обычной воды в зависимости от атмосферного давления .....	77
Табл. 33. Удельная теплота парообразования при различных температурах .....	78
Табл. 34. Удельная теплота парообразования углекислоты при различных температурах .....	78
Табл. 35. Температура плавления $T_{пл}$ в тройной точке, теплота плавления $\lambda$ , температура кипения $T_{кп}$ при нормальном давлении и теплота парообразования $r$ охлажденных газов .....	79
Табл. 36. Плотность, температура отвердевания и температура кипения водного раствора поваренной соли при различных концентрациях и нормальном давлении .....	79
Табл. 37. Максимальные температуры кипения водных растворов солей при нормальном давлении .....	80
Табл. 38. Свойства обычной и тяжелой воды .....	80
Табл. 39. Критические параметры .....	81
Табл. 40. Температура и давление для тройных точек некоторых веществ .....	81
Табл. 41. Свойства насыщенного водяного пара .....	81
Табл. 42. Коэффициент объемного расширения жидкостей .....	82
Табл. 43. Коэффициент линейного расширения твердых тел .....	83
Табл. 44. Коэффициент линейного расширения при различных температурах .....	83
Табл. 45. Поверхностное натяжение жидкостей .....	84
Табл. 46. Поверхностное натяжение воды и этилового спирта при различных температурах .....	84
Табл. 47. Поверхностное натяжение металлов в жидком состоянии .....	85
Табл. 48. Коэффициент теплопроводности материалов .....	85
Табл. 49. Коэффициент теплопроводности асбеста при различных температурах .....	87
Табл. 50. Коэффициент теплопроводности пенобетона при различных температурах .....	87
Табл. 51. Коэффициент теплопроводности жидкостей при различных температурах .....	87
Табл. 52. Коэффициент теплопроводности газов при нормальном давлении .....	88
Табл. 53. Термические коэффициенты давления газов .....	88
Табл. 54. Стандартная атмосфера .....	88
Табл. 55. Коэффициент диффузии газов и паров в воздухе .....	89
Зависимость коэффициента диффузии газов и паров в воздухе от температуры .....	89
Табл. 56. Газокинетические диаметры молекул .....	89
Табл. 57. Коэффициент диффузии водных растворов в чистой воде .....	90
Табл. 58. Константы Ван дер Ваальса .....	91
Табл. 59. Удельная теплота сгорания топлива .....	91
Табл. 60. Психрометрическая таблица относительной влажности воздуха .....	92

### Глава III

#### МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Основные понятия и законы .....	93
1. Гармонические колебания .....	93
2. Маятники .....	95
3. Свободные и вынужденные колебания .....	96

4. Сложение гармонических колебаний .....	98
5. Волны .....	99
6. Звук .....	103
Таблицы и графики .....	105
Табл. 61. Скорость звука в чистых жидкостях и маслах ...	105
Табл. 62. Скорость звука в твердых материалах .....	106
Табл. 63. Свойства Земли на разных глубинах и скорость сейсмических волн .....	107
Табл. 64. Скорость звука в газах .....	107
Зависимость скорости звука в воздухе и азоте от давления	108
Табл. 65. Шкала механических волн .....	108
Табл. 66. Сила звука и звуковое давление .....	109
Скорость волн на поверхности воды .....	109
Уровни громкости звука при слуховом восприятии .....	110
Смещение и ускорение частиц воды при прохождении звуковых волн различной интенсивности .....	110
Табл. 67. Коэффициент отражения звуковых волн на границе раздела различных сред .....	112
Табл. 68. Коэффициент поглощения звука в воздухе .....	112
Табл. 69. Звукопоглощательная способность материалов ..	113
Табл. 70. Поглощение звука в жидкостях .....	113
Табл. 71. Поглощение акустических волн в морской воде	113

## Глава IV ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

### А. Электростатическое поле

Основные понятия и законы .....	114
Таблицы и графики .....	122
Табл. 72. Электрическое поле в атмосфере Земли .....	122
Табл. 73. Электроизолирующие материалы .....	123
Табл. 74. Диэлектрическая проницаемость чистых жидкостей .....	124
Табл. 75. Диэлектрическая проницаемость газов .....	124
Табл. 76. Пьезоэлектрические модули кристаллов .....	124
Табл. 77. Свойства сегнетоэлектрических кристаллов .....	125
Зависимость диэлектрической проницаемости незакрепленной пластинки сегнетовой соли от температуры ..	125
Зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария и сегнетовой соли от напряженности поля (при 20 °С) .....	125

### Б. Постоянный электрический ток

Основные понятия и законы .....	126
1. Ток в металлах .....	126
2. Ток в электролитах .....	131
3. Ток в газах .....	133
4. Полупроводники .....	135
5. Термоэлектричество .....	137
Таблицы и графики .....	138
Электрические токи в атмосфере Земли .....	138
Табл. 78. Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления металлов (при 20 °С) .....	138
Изменение концентрации электронов в атмосфере с высотой	139
Табл. 79. Температура перехода металлов и сплавов в сверхпроводящее состояние .....	139
Табл. 80. Сплавы с высоким омическим сопротивлением ...	140

Табл. 81. Допустимые токи в изолированных проводах при продолжительной работе, $a$ .....	140
Табл. 82. Плавкие предохранители .....	140
Табл. 83. Удельное сопротивление электролитов для различных концентраций $p'$ (при 18 °С) .....	141
Зависимость электропроводности от концентрации водных растворов некоторых соединений (при 18 °С) .....	142
Табл. 84. Термозлектродвижущая сила некоторых пар металлов, $m\epsilon$ .....	142
Табл. 85. Дифференциальная ТЭДС ( $\alpha$ ) относительно платины (при 0 °С) .....	142
Зависимость дифференциальной ТЭДС от температуры для пары медь—константан .....	143
Табл. 86. Электрохимические эквиваленты .....	143
Табл. 87. Абсолютные нормальные потенциалы металлов .....	143
Табл. 88. ЭДС гальванических элементов .....	144
Зарядка и разрядка аккумуляторов .....	145
Табл. 89. Подвижность ионов в водных растворах .....	146
Табл. 90. Подвижность электронов в металлах .....	146
Табл. 91. Подвижность ионов в газах .....	147
Табл. 92. Работа ионизации .....	147
Табл. 93. Эмиссионные постоянные металлов и полупроводников .....	148
Табл. 94. Эмиссионные постоянные пленок на металлах .....	148
Табл. 95. Эмиссионные постоянные оксидных катодов .....	148
Табл. 96. Свойства полупроводников .....	149
Зависимость удельного сопротивления германия и кремния от концентрации примесных атомов .....	150
Зависимость сопротивления германия от температуры .....	150
Зависимость напряжения пробоя для плоских металлических электродов от давления газа и расстояния между электродами .....	150
Табл. 97. Искровые промежутки для воздуха .....	151

### В. Электромагнетизм

Основные понятия и законы .....	151
1. Индукция магнитного поля. Взаимодействие токов. Магнитный момент .....	151
2. Системы единиц СГСМ и СИ .....	154
3. Напряженность магнитных полей токов .....	155
4. Работа при перемещении проводника с током в магнитном поле. Электромагнитная индукция .....	157
5. Самоиндукция .....	159
6. Магнитные свойства вещества .....	160
Таблицы и графики .....	163
Магнитное поле Земли .....	163
Табл. 98. Свойства электротехнических сталей .....	164
Табл. 99. Свойства железо-никелевых сплавов .....	164
Табл. 100. Свойства магнитнотвердых материалов .....	165
Табл. 101. Свойства магнитодизлектриков .....	165
Табл. 102. Основные свойства ферритов .....	166
Табл. 103. Магнитная проницаемость парамагнетиков и диамагнетиков .....	166
Табл. 104. Температура Кюри металлов .....	167
Табл. 105. Удельная магнитная восприимчивость металлов .....	167
Зависимость магнитной проницаемости и индукции от напряженности магнитного поля (при первичном намагничивании) .....	168
Петля гистерезиса для мягкого железа и закаленной стали .....	169
Магнитострикция ферромагнетиков .....	169

Табл. 106. Индукция и потери на гистерезис в ферромагнетиках и ферритах .....	170
Табл. 107. Значения коэффициента $k$ для расчета индуктивности .....	170

### Г. Переменный электрический ток

Основные понятия и законы .....	171
Таблицы и графики .....	174
Сопrotивление при постоянном и переменном токах .....	174
Изменение индуктивного, емкостного и кажущегося сопротивлений в зависимости от частоты в последовательном резонансном контуре .....	175
Зависимость тока в последовательном резонансном контуре от частоты .....	175
Зависимость сопротивления $Z$ от частоты в параллельном резонансном контуре .....	176
Табл. 108. Глубина проникновения $\sigma$ токов высокой частоты .....	176

### Д. Электрические колебания и электромагнитные волны

Основные понятия и законы .....	177
1. Шкала электромагнитных волн .....	179
Табл. 109. Шкала электромагнитных волн .....	180
2. Излучение электромагнитных волн .....	182

## Глава V

### ОПТИКА

Основные понятия и законы .....	184
1. Фотометрия .....	184
2. Основные законы геометрической оптики .....	186
3. Линзы. Оптические приборы .....	188
4. Волновые свойства света .....	191
5. Квантовые свойства света .....	198
6. Типы спектров .....	199
7. Тепловое излучение .....	200
Таблицы и графики .....	203
Табл. 110. Относительная видимость $K_\lambda$ дневного зрения .....	203
График относительной видности при дневном и сумеречном зрении .....	203
Табл. 111. Яркость освещенных поверхностей .....	204
Табл. 112. Яркость источников света .....	204
Табл. 113. Освещенность в некоторых типичных случаях .....	204
Табл. 114. Коэффициент отражения ( $\rho$ , %) при различных углах падения для стекла и воды .....	205
Табл. 115. Отражение света при переходе из стекла в воздух .....	205
Зависимость коэффициента отражения света от угла падения на границе раздела воздух—стекло ( $n=1,52$ ) .....	205
Табл. 116. Длины волн видимой части спектра .....	206
Табл. 117. Длины волн ультрафиолетовой части спектра .....	206
Табл. 118. Отражение света металлами .....	206
Табл. 119. Предельные углы полного отражения .....	207
Табл. 120. Длины волн главных фраунгоферовых линий .....	207
Табл. 121. Показатели преломления для длин волн, соответствующих некоторым фраунгоферовым линиям .....	207
Табл. 122. Показатели преломления газов .....	208



Табл. 123. Показатели преломления твердых тел и жидкостей .....	208
Табл. 124. Зависимость показателя преломления от длины волны .....	209
Табл. 125. Диффузное отражение материалов (в %) в белом свете .....	210
Табл. 126. Постоянные Керра и Коттона—Мутона .....	210
Табл. 127. Удельная постоянная вращения $[\alpha]$ при 20 °С ..	211
Табл. 128. Вращательная дисперсия при 20 °С .....	211
Табл. 129. Спектры испускания металлов и газов .....	212
Табл. 130. Световая отдача, КПД и яркость источников света .....	213
Табл. 131. Работа выхода электронов и красная граница фотоэффекта .....	213

## Глава VI

### СТРОЕНИЕ АТОМА И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Основные понятия и законы .....	214
1. Единицы заряда, массы и энергии в атомной физике ...	214
2. Модель атома Резерфорда—Бора .....	215
3. Электронные оболочки в многоэлектронных атомах ...	216
4. Атомное ядро .....	217
5. Ядерные превращения .....	219
6. Волновые свойства частиц .....	221
7. Взаимодействие ядерных излучений с веществом .....	222
8. Единицы измерения радиоактивности и ионизирующих излучений .....	223
9. Классификация элементарных частиц .....	225
10. Превращения частиц .....	226
Таблицы и графики .....	227
Энергетические уровни атома водорода .....	227
Табл. 132. Периодическая система элементов Д. И. Менделеева .....	228
Табл. 133. Распределение электронов в атоме по слоям и оболочкам .....	230
Табл. 134. Основные линии рентгеновского характеристического спектра некоторых элементов (K-серия) .....	231
Табл. 135. Некоторые радиоактивные изотопы и их характеристики .....	231
Табл. 136. Некоторые искусственно полученные элементы .....	233
Табл. 137. Моменты импульсов $J$ и магнитные моменты $p$ ядер .....	233
Табл. 138. Элементарные частицы .....	234
Табл. 139. Источники излучения и детекторы для обнаружения элементарных частиц .....	235
Табл. 140. Эффективные сечения нейтронов .....	236
Табл. 141. Массовые коэффициенты ослабления рентгеновских лучей .....	236
Табл. 142. Массовые коэффициенты поглощения электронов в алюминии .....	237
Табл. 143. Предельно допустимые дозы облучения .....	237
Табл. 144. Профог $\alpha$ -частиц в воздухе, биологической ткани и алюминии .....	238
Компоненты полного ослабления $\gamma$ -лучей в свинце и алюминии .....	238
Энергия связи ядер .....	239
Примеры ядерных реакций .....	239
Синтез гелия из водорода .....	240
Реакции синтеза ядер .....	240

## ПРИЛОЖЕНИЯ

I. Некоторые часто встречающиеся числа .....	241
II. Формулы для приближенных вычислений .....	241
III. Элементы теории ошибок .....	241
IV. Приставки к обозначениям единиц .....	243
V. Меры различных величин .....	243
VI. Универсальные физические константы .....	244
VII. Система единиц СИ .....	245
VIII. Основные уравнения электромагнетизма, записанные в системах единиц СИ и СГС (гауссовой) .....	249
Предметный указатель .....	251

## 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 широкого круга 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 знаков: 21, 46, а латуни — с точностью до трех единиц второго знака: 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 заголовке последней графы таблицы 18 «Сжимаемость жидкостей» (стр. 52) имеется множитель  $10^{-6}$  и размерность  $\text{атм}^{-1}$ . В первой строке (ацетон при  $14,2^\circ\text{C}$ ) имеется число 111. Это означает, что сжимаемость ацетона равна  $111 \cdot 10^{-6} \text{ атм}^{-1}$ .

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 измерения физических величин можно найти в приложениях. В приложениях, кроме того, приведены формулы для приближенных вычислений.

# ВВЕДЕНИЕ

## Векторы и скаляры

В физике все величины разделяют на два вида: скалярные и векторные. Величины, для определения которых необходимо знать только численные значения, называются *скалярными*; величины, для определения которых необходимо знать не только их численное значение, но и направление, называются *векторными*.

Векторы изображаются на чертежах в виде отрезков со стрелками на концах; длина отрезка равна (в определенном масштабе) численному значению (модулю) вектора, а направление отрезка со стрелкой соответствует направлению вектора. Два вектора равны друг другу, если они имеют равные модули и одинаковые направления. Сложение векторов показано на рис. 1. Сложение, например, двух векторов  $a$  и  $b$  (рис. 1, а) можно провести двумя способами.

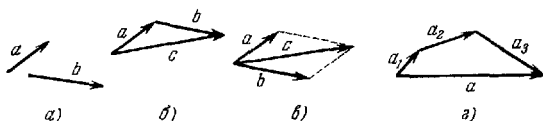


Рис. 1. Сложение векторов ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ), разложение вектора на его составляющие ( $a_1$ ,  $a_2$ ).

Первый способ (рис. 1, б): переносятся векторы  $a$  и  $b$  параллельно самим себе так, чтобы конец одного вектора совместился 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*.

Второй способ: 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.

### Системы единиц

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

Единица измерения — это значение физической величины, которая принимается за меру при сравнении однородных величин. Единицы измерения 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 физике используются в основном две системы — Международная система единиц (СИ) и система СГС. Система СИ согласно ГОСТ 9867—61 рекомендуется как предпочтительная.

Основными единицами в системе СИ являются метр ( $m$ ) — единица длины, килограмм ( $kg$ ) — единица массы, секунда ( $сек$ ) — единица времени, ампер ( $a$ ) — сила электрического тока, градус Кельвина ( $^{\circ}K$ ) — единица измерения температуры, свеча ( $св$ ) — единица измерения силы света.

*Метр* — длина, равная 1 650 763,73 длин волн в вакууме, излучаемых криптоном-86 и соответствующих оранжевому цвету (т. е. переходу между уровнями 5  $d$  и 2  $p$ , см. стр. 230).



*Килограмм* — это масса международного прототипа эталона.

*Секунда* —  $1/31\,556\,925,974\,7$  часть условного тропического года (для равномерно текущего времени). По новому проекту ГОСТ секунда равна  $9\,192\,631\,770$  периодам излучения атомов цезия-133 для спектральной линии сверхтонкой структуры (длина волны  $3,26$  см). Определение других основных величин дано в тексте: *ампер* — стр. 154, градус Кельвина — стр. 59, *свеча* (по новому проекту — *кандела* (кд)) — стр. 185.

В системе СГС основными единицами являются *сантиметр* (см) ( $1/100$  м), *грамм* (г) — ( $1/1000$  кг), *секунда*; диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума принимаются равными единице (см. стр. 154 и табл. VII в приложении).

# ГЛАВА I

## МЕХАНИКА

*Механическое движение* — изменение со временем положения тела относительно других тел. Это изменение положения определяется изменением расстояния между фиксированными точками тел.

### 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. Прямолинейное движение

*Равномерным движением* называется 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 ( $t$ ):

$$v = \frac{s}{t},$$

или

$$s = vt. \quad (1.1)$$

В случае *переменного* движения различают мгновенную и среднюю скорости. Если за время от момента  $t_0$  до момента  $t_0 + \Delta t$  тело пройдет путь  $\Delta s$ , то отношение

$$v_{\text{ср}} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

называется *средней скоростью* за промежуток времени  $\Delta t$ . *Мгновенной скоростью*, или скоростью в данный момент времени  $t_0$ , называется предел

$$v_{\text{м}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

Скорость — величина векторная. Сложение скоростей производится по правилу параллелограмма (векторно). Единицы скорости: *см/сек* (СГС), *м/сек* (СИ) и внесистемные единицы *км/сек*, *км/ч*.

Движение, в котором за любые равные промежутки времени скорость изменяется на одинаковую величину, называется *равнопеременным*. Величина, численно равная изменению скорости в единицу времени, называется *ускорением* ( $a$ ); точнее

$$a = \lim_{t \rightarrow t_0} \frac{v_t - v_0}{t - t_0}, \quad (1.2)$$

где  $v_t$  — скорость в момент времени  $t$ , а  $v_0$  — скорость в момент начала отсчета времени  $t_0$ . Ускорение является также векторной величиной. Единицами измерения ускорения служат: *см/сек<sup>2</sup>*, *м/сек<sup>2</sup>*, *км/сек<sup>2</sup>*.

Скорость равнопеременного движения в любой момент времени

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

где  $v_0$  — скорость в момент начала отсчета времени.

Ускорение может быть как положительным (*ускоренное движение*), так и отрицательным (*замедленное движение*).

Путь, пройденный за время  $t$  при равнопеременном движении:

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2. \quad (1.4)$$

В равнопеременном движении скорость в конце пройденного пути может определяться также начальной скоростью движения, ускорением и пройденным путем:

$$v_t^2 = v_0^2 + 2as. \quad (1.5)$$

Частным случаем прямолинейного движения с постоянным ускорением является падение тел с небольшой высоты (много меньшей радиуса Земли). Обозначив высоту для свободного падения ( $v_0=0$ ) через  $h$ , а ускорение падающих тел через  $g$ , имеем

$$h = \frac{1}{2}gt^2, \quad (1.4a)$$

где  $t$  — время падения.

## 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.

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

*Угловая скорость* равномерного вращения ( $\omega$ ) есть величина, измеряемая углом поворота за единицу времени:

$$\omega = \frac{\varphi}{t}, \quad (1.6)$$

где  $\varphi$  — угол поворота за время  $t$ , измеряемый в радианах (*рад*). Угловая скорость может быть выражена через число оборотов в единицу времени  $n$  или период обращения  $T$ :

$$\omega = 2\pi n, \quad (1.7)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (1.8)$$

*Линейной скоростью* точки во вращательном движении называется мгновенная скорость движущейся точки. Вектор скорости направлен по касательной к траектории. Угловая скорость  $\omega$  связана с линейной скоростью  $v$ :

$$v = \omega R, \quad (1.9)$$

где  $R$  — расстояние от точки до оси вращения.

В случае неравномерного вращательного движения различают мгновенную и среднюю угловые скорости. Если за время от момента  $t_0$  до момента  $t_0 + \Delta t$  тело повернулось на угол  $\Delta\varphi$ , то *средней угловой скоростью* ( $\omega_{\text{ср}}$ ) за промежуток времени  $\Delta t$  называется отношение

$$\omega_{\text{ср}} = \Delta\varphi / \Delta t.$$

Предел этого отношения есть, по определению, мгновенная угловая скорость в момент времени  $t_0$ :

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}. \quad (1.10)$$

Вращение, при котором за любые равные промежутки времени угловая скорость изменяется на одну и ту же величину, называется *равнопеременным*.

*Угловым ускорением* равнопеременного вращения  $\varepsilon$  называется величина, измеряемая изменением угловой скорости в единицу времени; точнее

$$\varepsilon = \lim_{t \rightarrow t_0} \frac{\omega_t - \omega_0}{t - t_0}, \quad (1.11)$$

где  $\omega_t$  — угловая скорость в момент времени  $t$ , а  $\omega_0$  — угловая скорость в момент начала отсчета времени  $t_0$ .

Угловая скорость  $\omega$  и угловое ускорение  $\varepsilon$  — величины векторные; направление вектора  $\omega$  определяется по правилу правого винта (рис. 2): если головку винта вращать по направлению вращения тела, то поступательное движение винта будет совпадать с направлением  $\omega$ ; вектор  $\omega$  направлен вдоль оси вращения. Направление вектора углового ускорения совпадает с направлением  $\omega$ , если угловая скорость увеличивается; при уменьшении угловой скорости направление вектора  $\varepsilon$  противоположно направлению  $\omega$ .

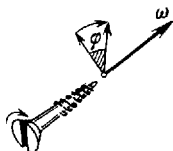


Рис. 2. Определение направления вектора угловой скорости по правилу правого винта.

Если равнопеременное вращательное движение характеризовать числом оборотов в единицу времени  $n$ , то можно ввести ускорение  $\varepsilon^*$ :

$$\varepsilon^* = \lim_{t \rightarrow t_0} \frac{n_t - n_0}{t - t_0}, \quad (1.12)$$

где  $n_t$  — число оборотов в момент времени  $t$ ,  $n_0$  — число оборотов в момент начала отсчета времени  $t_0$ .

Угловая скорость равнопеременного вращения и частота оборотов по истечении времени  $t$  после начала вращения равны

$$\omega = \omega_0 + \epsilon t, \quad n = n_0 + \epsilon^* t. \quad (1.13)$$

Угол поворота при равнопеременном вращении и число оборотов:

$$\varphi = \omega_0 t + \frac{1}{2} \epsilon t^2, \quad N = n_0 t + \frac{1}{2} \epsilon^* t^2. \quad (1.14)$$

При движении тела по криволинейной траектории скорость

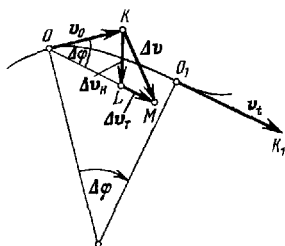


Рис. 3. Тангенциальное и нормальное ускорение. Вектор  $OK = v_0$  определяет скорость в точке  $O$  (в момент времени  $t_0$ ); вектор  $O_1K_1 = v_1$  определяет скорость в точке  $O_1$  (в момент времени  $t_0 + \Delta t$ ). Вектор  $v_1$  перемещается параллельно в точку  $O$  (отрезок  $OM$ ). Полное изменение скорости  $\Delta v$  определяется отрезком  $KM$ ; изменение скорости по модулю (тангенциальное изменение скорости  $\Delta v_T$ ) равно отрезку  $LM$  ( $OK = OL$ ); изменение нормальной составляющей скорости  $\Delta v_N$  равно отрезку  $KL$ .

Ускорения  $a$ ,  $a_T$ ,  $a_N$  будут равны соответствующим изменениям скорости за единицу времени.

называется *нормальным ускорением*:

$$a_N = \frac{\Delta v_N}{\Delta t}, \quad (1.18)$$

изменяется не только по величине, но и по направлению (рис. 3).

Изменение величины линейной скорости за единицу времени называется *тангенциальным ускорением*:

$$a_T = \frac{v_1 - v_0}{t - t_0} = \frac{\Delta v_T}{\Delta t}, \quad (1.15)$$

или, более строго,

$$a_T = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_T}{\Delta t}, \quad (1.16)$$

где  $v_1$  и  $v_0$  — величины линейных скоростей в моменты времени  $t_0 + \Delta t$  и  $t_0$ . Тангенциальное ускорение связано с угловым ускорением:

$$a_T = \epsilon R. \quad (1.17)$$

Направление  $a_T$  в данной точке траектории совпадает с направлением линейной скорости или противоположно ему.

Изменение скорости по направлению за единицу времени

или, более строго,

$$a_n = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_n}{\Delta t}. \quad (1.19)$$

Нормальное ускорение направлено по радиусу кривизны траектории (к оси вращения).

Например, при равномерном вращении тела точки его движутся с ускорением, так как направление их скорости все время меняется. Нормальное ускорение в этом случае направлено к оси вращения (т. е. перпендикулярно к направлению линейной скорости) и носит название *центростремительного ускорения*:

$$a_n = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R, \quad (1.20)$$

где  $v$  — линейная скорость,  $\omega$  — угловая скорость,  $R$  — радиус вращения точки.

Полное ускорение точки тела при равнопеременном вращательном движении (см. рис. 3)

$$a^2 = a_n^2 + a_t^2. \quad (1.21)$$

### 3. Движение тел в земном поле тяготения

На рис. 4 показаны траектории тел, вылетевших из точки  $A$ , лежащей вблизи поверхности Земли, с различными скоростями \*.) Во всех случаях скорость направлена горизонтально. Траекторией тела является окружность, если скорость тела  $v$  в точке  $A$  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

$$v = \sqrt{Rg} \approx 7,93 \text{ км/сек.}$$

Эта величина называется *первой космической скоростью*.

Если скорость тела в точке  $A$  больше 7,93 км/сек, но меньше 11,1 км/сек, то траектория тела представляет собой эллипс,

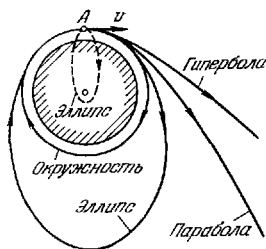


Рис. 4. Траектории движения тел в земном поле тяготения.

\*) Сопротивление воздуха не учитывается.

причем его фокус, ближайший к точке вылета, находится в центре Земли (на рис. 4 этот эллипс изображен сплошной линией). Если скорость тела равна  $11,16 \text{ км/сек}$  — второй космической скорости, то его траектория — парабола. При начальной скорости, большей  $11,16 \text{ км/сек}$ , 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 убегания (или скоростью освобождения). При движении тела со скоростями, меньшими  $7,93 \text{ км/сек}$ , траектории движущегося тела представляют собой отрезки эллипса (изображенного на рис. 4 пунктиром), дальний фокус которого совпадает с центром Земли.

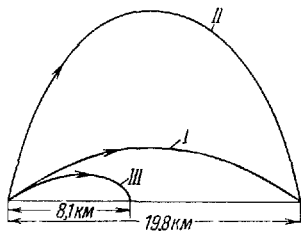


Рис. 5. Траектории тел, брошенных с поверхности Земли с начальной скоростью  $v_0 = 550 \text{ м/сек}$ . Кривая I относится к случаю  $\alpha = 20^\circ$ , кривая II — к случаю  $\alpha = 70^\circ$ , кривая III — также к случаю  $\alpha = 20^\circ$ , но с учетом сопротивления воздуха.

При движении со скоростями, значительно меньшими  $7,93 \text{ км/сек}$ , эти отрезки можно считать отрезками парабол.

Если тело брошено с поверхности Земли под углом  $\alpha$  с начальной скоростью  $v_0$ , значительно меньшей  $7,93 \text{ км/сек}$ , то ускорение свободного падения также можно считать постоянным как по величине, так и по направлению, а поверхность Земли рассматривать как плоскую. В этом случае траекторией является парабола (рис. 5), а дальность полета ( $S$ ) и наибольшая высота подъема ( $H$ ) вычисляются по формулам:

парабола (рис. 5), а дальность полета ( $S$ ) и наибольшая высота подъема ( $H$ ) вычисляются по формулам:

$$S = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}, \quad H = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}, \quad (1.22)$$

где  $v_0$  — скорость вылета тела.

Одна и та же дальность полета может быть получена при двух значениях угла бросания:  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , 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  $v_0 = 550 \text{ м/сек}$  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, $m/sec^2$	Замедленное движение	Ускорение (отриц.), $m/sec^2$
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	около 60
Пассажирский поезд . . . . .	0,35	60 $m/sec$ . . . . .	
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 обращения вокруг оси  $T_0$ , орбитальная скорость  $v_0$ , скорость освобождения  $v$ , число спутников  $N$ )

Планеты	$T_C$ (в годах)	$T_0$	$v_0$ , км/сек	$v$ , км/сек	$N$
Меркурий . . . . .	0,241	88 дней	48,8	4,20	—
Венера . . . . .	0,615	247 ± 5 дней	35,0	10,2	—
Земля . . . . .	1,00004	23 ч 56 мин 4 сек	29,8	11,16	1
Марс . . . . .	1,881	24 ч 37 мин 23 сек	24,2	5,01	2
Юпитер . . . . .	11,86	9 ч 51 мин	13,06	59,5	12
Сатурн . . . . .	29,46	10 ч 14 мин	9,65	35,4	9
Уран . . . . .	84,01	10 ч 49 мин	6,78	22,2	5
Нептун . . . . .	164,8	14 ч (?)	5,42	24,8	2
Плутон . . . . .	247,7	—	4,73	—	—
Луна . . . . .	(спутник Земли)	27 дней 7 ч 43 мин 11 сек	—	2,37	—

Таблица 3

**Зависимость скорости убегания  $v$  от высоты  $H$   
над поверхностью Земли**

$H, 10^3 \text{ км}$	$v, \text{ км/сек}$	$H, 10^3 \text{ км}$	$v, \text{ км/сек}$	$H, 10^3 \text{ км}$	$v, \text{ км/сек}$
0	11,19	5	8,37	30	4,68
0,5	10,77	10	6,98	40	4,15
1	10,40	20	5,50	50	3,76
2	9,76				

Таблица 4

**Период обращения  $T$  спутника Земли  
на разных высотах  $H$**

$H, \text{ км}$	$T, \text{ ч}$	$H, \text{ км}$	$T, \text{ ч}$	$H, \text{ км}$	$T, \text{ ч}$
0	1,41	1000	1,75	5000	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

## 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).

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

## 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 величину и направление скорости, когда на него 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. Опыт показывает, что всегда отношение величины силы к сообщаемому ей ускорению остается постоянным для данного тела (при небольших скоростях). Физическая величина, пропорциональная отношению величины действующей на тело силы к сообщаемому ей ускорению, называется *массой* данного тела:  $m = kF/a$ . Коэффициент  $k$  зависит от выбора системы единиц. Масса является мерой инертности тела.

Масса, входящая в законы Ньютона, характеризует инертные свойства; кроме того, масса входит в закон всемирного тяготения (см. стр. 30), где она характеризует гравитационные свойства, т. е. свойство тел притягивать друг друга. Следовательно, можно различать *инертную* и *гравитационную* массу. Однако все опытные факты говорят о том, что инертная и гравитационная массы тела равны друг другу. Поэтому в физике говорят просто о массе.

При больших скоростях, близких к скорости света в вакууме, масса зависит от скорости:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad (1.23)$$

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

**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:

$$a = k \frac{F}{m}. \quad (1.24)$$

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

В системе СИ за единицу силы принимают силу, которая телу массой в 1 кг сообщает ускорение 1 м/сек<sup>2</sup>. Эту единицу называют *ньютном* (Н).

Единицы силы: дина (СГС), ньютон (СИ);

$$1 \text{ н} = 10^5 \text{ дин.}$$

Произведение массы тела на его скорость называется *импульсом* тела (или *количеством движения*):  $p = mv$ . Импульс — величина векторная, совпадающая по направлению со скоростью.

Если приложенная к телу сила постоянна по величине и направлению, то закон Ньютона можно записать, используя (1.2), в следующем виде:

$$F = \frac{mv_t - mv_0}{t - t_0} \quad \text{или} \quad F = \frac{\Delta p}{\Delta t}. \quad (1.25)$$

Более строго соотношение (1.25) записывается в следующей форме:

$$F = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta p}{\Delta t}. \quad (1.26)$$

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

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

$$F_1 = -F_2,$$

или

$$m_1 a_1 = -m_2 a_2, \quad (1.27)$$

где  $F_1$  — сила, приложенная к первому телу,  $F_2$  — ко второму,  $m_1$  и  $m_2$  — массы соответственно первого и второго тел.

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:

$\Sigma p_i = \text{const}$ . Например, для системы, состоящей из двух тел, выполняется соотношение

$$m_1 u_1 + m_2 u_2 = m_1 v_1 + m_2 v_2,$$

где  $v_1$  и  $v_2$  — скорости первого и второго тел до взаимодействия, а  $u_1$  и  $u_2$  — после взаимодействия.

## 2. Динамика вращательного движения

Второй закон Ньютона для вращательного движения:

$$M = J\epsilon. \quad (1.28)$$

Здесь роль массы выполняет момент инерции  $J$ , силы — момент силы  $M$ , линейного ускорения — угловое ускорение  $\epsilon$ .

*Моментом силы* относительно оси называется величина, равная произведению силы на плечо (*плечо* — кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы).

Момент силы — величина векторная; ее направление определяется по правилу правого винта (см. ниже). Направления момента сил и углового ускорения совпадают.

Если на тело действуют два момента сил, вызывающих вращение в противоположных направлениях, то один из них условно считают положительным, а второй — отрицательным.

*Момент инерции* материальной точки относительно некоторой оси равен произведению ее массы на квадрат расстояния от точки до этой оси:

$$J = mR^2. \quad (1.29)$$

Момент инерции тела есть сумма моментов инерции материальных точек, составляющих это тело. Он может быть выражен через массу тела и его размеры.

Момент инерции тела относительно любой оси можно найти, если известны момент инерции тела относительно параллельной ей оси, проходящей через центр тяжести тела (см. стр. 41), масса тела  $m$  и расстояние между осями  $b$ :

$$J = J_0 + mb^2. \quad (1.30)$$

При равномерном вращательном движении сумма моментов действующих на тело сил равна нулю.

Второй закон Ньютона для вращательного движения можно выразить через импульс тела; для этого используется величина, называемая моментом импульса  $L$ . *Момент*

импульса — векторная величина, численно равная произведению импульса тела на плечо  $r$ :  $L = mvr = pr$ .

Направление вектора  $L$  определяется по правилу правого винта: если головку винта вращать по направлению вращения тела, то поступательное движение винта будет совпадать с направлением  $L$ . Аналогичным образом определяются направления  $M$  и  $\omega$ . Тогда закон вращательного движения можно сформулировать следующим образом: изменение момента импульса за единицу времени равно моменту сил, действующих на тело:

$$M = \frac{L - L_0}{t - t_0} \quad \text{или} \quad M = \frac{\Delta L}{\Delta t}, \quad (1.31)$$

где  $L_t$  и  $L_0$  — моменты импульсов во время  $t$  и  $t_0$ .

Векторная сумма моментов импульсов тел, входящих в замкнутую систему, является величиной постоянной:  $\Sigma L_i = \text{const}$  (закон сохранения момента импульса).

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*:

$$F_{\text{ц}} = \frac{mv^2}{R} = m\omega^2 R. \quad (1.32)$$

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

Единицы измерения: момента силы —  $\text{н} \cdot \text{м}$  (СИ),  $\text{дин} \cdot \text{см}$  (СГС); момента инерции —  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$  (СИ),  $\text{г} \cdot \text{см}^2$  (СГС);

$$1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 = 10^7 \text{ г} \cdot \text{см}^2.$$

### 3. Закон всемирного тяготения

Две материальные точки, обладающие массами  $m_1$  и  $m_2$ , притягиваются друг к другу с силой  $F$ :

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{R^2}, \quad (1.33)$$

где  $R$  — расстояние между точками, а  $\gamma$  — гравитационная

постоянная, равная  $6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г} \cdot \text{сек}^2$  (система СГС \*)). Гравитационная постоянная есть величина, численно равная силе притяжения двух материальных точек, имеющих массы, равные единице, и находящихся на единичном расстоянии. 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 притяжения между телом массы  $m$ , расположенным на поверхности Земли, и Землей

$$F = \gamma \frac{M_3 m}{R_3^2}, \quad (1.34)$$

где  $M_3$  — масса Земли, а  $R_3$  — радиус земного шара.

Все тела в данной точке Земли падают с одинаковыми ускорениями относительно ее поверхности. Это ускорение при свободном падении обозначается обычно буквой  $g$ . Вследствие суточного вращения Земли ускорение  $g$  будет

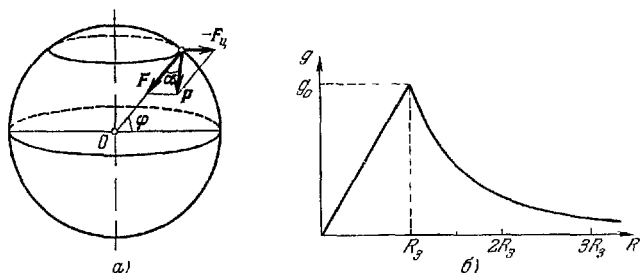


Рис. 6. а) Направление силы тяжести  $P$  и силы притяжения Земли  $F$ ; б) ускорение силы тяжести (напряженность поля тяготения) на различных расстояниях от центра Земли (Земля принята за однородный шар).

обусловлено векторной суммой двух сил: силой притяжения Земли  $F$  (см. (1.34)) и центробежной силой  $F_{ц}$  (см. (1.32)). Равнодействующая этих сил называется *силой тяжести*.

Сила тяжести тела с массой  $m$  определяется следующим выражением:

$$P = mg. \quad (1.35)$$

\* ) О системе единиц СГС см. стр. 245.

Сила тяжести  $P$  и сила притяжения к Земле  $F$  отличаются (незначительно) друг от друга по величине и по направлению. Угол  $\alpha$  между направлениями сил  $P$  и  $F$  (рис. 6, а) на широте  $\varphi$ :

$$\alpha = 0,0018 \sin 2\varphi.$$

Направление  $P$  совпадает с направлением отвеса; сила притяжения  $F$  всегда направлена к центру Земли; обе силы совпадают по направлению лишь на полюсах, где  $P = F$ , и на экваторе, где  $P = F - F_{ц}$ .

Вследствие этого и ввиду отличия Земли от шарообразной формы ускорение силы тяжести зависит от широты (см. табл. 13).

Ускорение силы тяжести (напряженность поля тяготения), в соответствии с законом тяготения, на высоте  $H$  от поверхности Земли выражается формулой

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

или

$$g = g_0 \frac{R_3^2}{(R_3 + H)^2}, \quad (1.36)$$

где  $g_0$  — ускорение на поверхности Земли.

В первом приближении при  $H \ll R_3$

$$g = g_0 \left(1 - 2 \frac{H}{R_3}\right). \quad (1.37)$$

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. 6, 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



ми 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).

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

$$F_T = kF_N, \quad (1.38)$$

где  $k$  — коэффициент трения, зависящий от природы и качества обработки трущихся поверхностей, незначительно — от скорости движения (этой зависимостью обычно пренебрегают). Коэффициент трения покоя  $k_p$  меняет

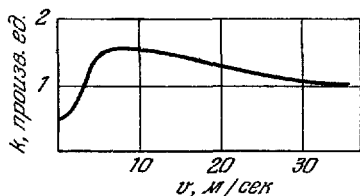


Рис. 7. Зависимость силы трения от скорости движения стальной пластинки по стальной поверхности.

свое значение с изменением абсолютной величины приложенной к телу силы; однако  $0 \leq k_p \leq k$ , где  $k$  — коэффициент трения скольжения.

На рис. 7 приводится примерная зависимость силы трения от скорости движения стальной пластинки по стальной поверхности. Значения величины  $k$  приведены в табл. 12.

Трение качения меньше трения скольжения. Сила трения качения зависит от радиуса  $R$  катящегося тела,

силы нормального давления и качества соприкасающихся поверхностей:

$$F_T = k' \frac{F_N}{R}, \quad (1.39)$$

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

В качестве примера можно привести следующие значения  $k'$  в см:

Колесо со стальным баидажом по стальному рельсу 0,05  
Чугунное колесо по стальному рельсу ..... 0,12

## 5. Плотность вещества

*Плотностью вещества* ( $\rho$ ) называют массу, приходящуюся на единицу его объема. Очень часто пользуются понятием удельного веса. *Удельным весом* ( $d$ ) называют вес вещества, заключенного в единице его объема:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1.40)$$

$$d = \frac{P}{V}, \quad (1.41)$$

где  $m$  — масса тела,  $P$  — его вес, а  $V$  — объем. В технике по отношению к неоднородным (например, сыпучим) телам пользуются понятием объемной плотности. *Объемной плотностью* называется масса единицы объема ( $1 \text{ м}^3$ ) данного вещества.

При определении объемной плотности объем определяется включая промежутки в сыпучих и рыхлых материалах (песок, зерно, каменный уголь, дрова и т. д.).

Единицы измерения: плотности —  $\text{кг/м}^3$  (СИ),  $\text{г/см}^3$  (СГС); удельного веса —  $\text{н/м}^3$  (СИ),  $\text{дин/см}^3$  (СГС);

$$1 \text{ кг/м}^3 = 10^{-3} \text{ г/см}^3.$$

## 6. Работа, мощность, энергия

*Работой* ( $A$ ) в физике называется величина, равная произведению силы на перемещение по направлению действия силы. Если сила не совпадает по направлению с

перемещением, то работа равна

$$A = F s \cos \alpha, \quad (1.42)$$

где  $\alpha$  — угол между направлениями силы и перемещения.

Работа при повороте на угол  $\varphi$  во вращательном движении при постоянном моменте силы  $M$  равна

$$A_{\text{в}} = M\varphi. \quad (1.43)$$

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

$$N = \frac{A}{t} = Fv, \quad (1.44)$$

где  $F$  — сила  $v$  — скорость.

Мощность вращающегося тела равна

$$N_{\text{в}} = M\omega, \quad (1.45)$$

где  $\omega$  — угловая скорость.

Физическая величина, определяющая способность тел совершать работу, называется *энергией*. Различают два вида механической энергии: энергию движения, или, иначе, *кинетическую энергию* ( $E_{\text{к}}$ ), зависящую от относительной скорости тел, и энергию положения, или, иначе, *потенциальную энергию* ( $E_{\text{п}}$ ), зависящую от расположения тел. Полной механической энергией системы называется сумма кинетических и потенциальных энергий всех тел, входящих в эту систему. Силы, работа которых не зависит от формы пути, называются *консервативными* (например, силы тяжести); силы трения не являются консервативными.

Если на тела систем: кроме внутренних консервативных сил, действуют внешние силы (см. стр. 28), то полная энергия системы изменяется.

Обозначая начальную и конечную энергию системы через  $E_1$  и  $E_2$ , получаем

$$E_2 - E_1 = A,$$

где  $A$  — работа внешних сил.

Изменение полной энергии системы тел, между которыми действуют консервативные силы, равно работе внешних сил, которые действуют на тела системы. В замкнутой системе тел (т. е. когда внешние силы отсутствуют и их работа  $A=0$ ) полная энергия системы остается постоянной. Это один из основных законов механики — *закон сохранения энергии*. Наличие в замкнутой системе (см. стр. 28)

неконсервативных сил (например, сил трения) приводит к уменьшению механической энергии. В этом случае механическая энергия переходит в другие виды энергии (см. стр. 60).

Кинетическая энергия тела равна

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2, \quad (1.46)$$

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

Кинетическая энергия вращающегося тела равна

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2, \quad (1.47)$$

где  $J$  — момент инерции,  $\omega$  — угловая скорость.

Потенциальная энергия тела в поле тяготения Земли равна

$$E_{\text{п}} = -\gamma \frac{M_{\text{з}} m}{R}, \quad (1.48)$$

где  $\gamma$  — гравитационная постоянная (стр. 31),  $M_{\text{з}}$  — 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 (1.48) 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 равна

$$E_{\text{п}} = mgh, \quad (1.49)$$

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 измерения: работы и энергии — джоуль (в системе СИ), эрг (в системе СГС); мощность — ватт (СИ) и эрг/сек (СГС).

$$1 \text{дж} = 10^7 \text{ эрг.}$$

# ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Таблица 5

## Плотность твердых тел (при 20 °С)

Вещество	10 <sup>3</sup> ρ, кг/м <sup>3</sup>	Вещество	10 <sup>3</sup> ρ, кг/м <sup>3</sup>
<b>Металлы и сплавы</b>		<b>Дерево (воздушно-сухое)</b>	
Алюминий .....	2,7	Бальса .....	0,2
Бронза .....	8,7—8,9	Бамбук .....	0,4
Ванадий .....	6,02	Береза .....	0,7
Висмут .....	9,8	Дуб, бук .....	0,7—0,9
Вольфрам .....	19,34	Железное дерево (бакаут) .....	1,1—1,4
Германий .....	5,3	Кедр .....	0,5—0,6
Диуралюминий .....	2,79	Орех .....	0,6—0,7
Железо .....	7,88	Сосна, ель .....	0,4—0,5
Золото .....	19,31	Черное дерево .....	1,1—1,3
Кобальт .....	8,8	Ясень, красное дерево .....	0,6—0,8
Константан .....	8,88		
Кремний .....	2,3	<b>Минералы</b>	
Латунь .....	8,4—8,7	Алмаз .....	3,51
Магний .....	1,76	Апатит .....	3,16—3,22
Манганин .....	8,5	Асбест .....	2,35—2,6
Медь .....	8,93	Барит .....	4,48
Молибден .....	10,2	Берилл .....	2,67—2,72
Натрий .....	0,975	Графит .....	2,21—2,25
Никелин .....	8,77	Кальцит .....	2,6—2,8
Никель .....	8,9	Каолинит .....	2,54—2,60
Ниобий .....	8,57	Кварц .....	2,65
Олово .....	7,29	Корунд .....	4,00
Пермаллой .....	8,6	Слюда .....	2,6—3,2
Пермэндур .....	8,2—8,3		
Платина .....	21,46	<b>Горные породы</b>	
Плутоний .....	19,25	Базальт .....	2,8—3,2
Свинец .....	11,35	Бокситы .....	2,9—3,5
Серебро .....	10,5	Граниты .....	2,5—3,0
Сталь .....	7,7—7,9	Каменный уголь (сухой) .....	1,2—1,5
Супермаллой .....	8,87	Мел (воздушно-сухой) .....	2,0
Таллий .....	11,86	Мрамор .....	2,5—2,8
Тантал .....	16,6		
Титан .....	4,5		
Торий .....	11,71		
Уран .....	19,1		
Хром .....	7,15		
Цинк .....	7,15		
Цирконий .....	6,5		
Чугун .....	7,0		

Таблица 5 (продолжение)

Вещество	$10^3 \rho, \text{кг/м}^3$	Вещество	$10^3 \rho, \text{кг/м}^3$
Различные материалы		Пластмассы и слоистые пластики	
Бакелитовый лак .	1,4	Аминопласты слоистые . . . . .	1,4
Воск пчелиный белый . . . . .	0,95—0,96	Винипласт . . . . .	1,38—1,4
Кость . . . . .	1,8—2,0	Плексиглас . . . . .	1,18
Лед (при 0 °С) . . . . .	0,917	Поливиниловый пластикат . . . . .	1,34—1,4
Резина твердая обыкновенная . . . . .	1,2	Полистирол . . . . .	1,06
Стекло зеркальное	2,55	Текстолит . . . . .	1,3—1,4
» кварцевое . . . . .	2,21	Фенопласт текстолитовый . . . . .	1,34—1,4
» пирекс . . . . .	2,59	Фторопласты . . . . .	2,1—2,4
» обыкновенное . . . . .	2,5	Целлон . . . . .	1,3
» термометрическое . . . . .	2,59		
Фарфор . . . . .	2,2—2,4		
Эбонит . . . . .	1,2		
Янтарь . . . . .	1,1		

Таблица 6

## Плотность жидкостей (при 20 °С)

Вещество	$10^3 \rho, \text{кг/м}^3$	Вещество	$10^3 \rho, \text{кг/м}^3$
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
Беизин . . . . .	0,68—0,72	» . . . . .	1,22
Бензол . . . . .	0,879	Нефть . . . . .	0,76—0,85
Бром . . . . .	3,12	Нитробензол . . . . .	1,2
Вода . . . . .	0,99823	Нитроглицерин . . . . .	1,6
» тяжелая (D <sub>2</sub> O) . . . . .	1,1086	Ртуть . . . . .	13,55
Гексан . . . . .	0,660	Серная кислота . . . . .	1,83
Гептан . . . . .	0,684	Соляная кислота (38%) . . . . .	1,19
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	Температура, °C	$\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$	Вещество	Температура, °C	$\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$
Алюминий	660	2,380	Натрий	100	0,928
	900	2,315		400	0,854
	1100	2,261		700	0,780
Висмут	300	10,03	Олово	409	6,834
	600	9,66		574	6,729
	962	9,20		704	6,640
Железо	1530	7,23	Свинец	400	10,51
Золото	1100	17,24		600	10,27
	1200	17,12		1000	9,81
	1300	17,00	Серебро	960,5	9,30
Калий	64	0,82		1092	9,20
				1300	9,00

Таблица 8

## Плотности воды и ртути при различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$10^3 \rho, \text{ кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$10^3 \rho, \text{ кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$10^3 \rho, \text{ кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$
а) Плотность воды							
-10	0,99815	6	0,99997	50	0,98807	250	0,794
-5	0,99930	7	0,99993	60	0,98824	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	(критическая температура*)	
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 давлении 1 ат)							
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

\*) О критической температуре см. стр. 63, 70.

Таблица 9

**Плотность газов и паров**  
(при 0 °С и давлении 760 мм рт. ст.)

Вещество	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Вещество	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Азот .....	1,251	Неон .....	0,900
Аммиак .....	0,771	Озон .....	2,139
Аргон .....	1,783	Окись углерода ..	1,25
Ацетилен .....	1,173	Хлор .....	3,22
Водород .....	0,08988	Насыщенные пары при 0 °С	
Воздух .....	1,293	Бензол .....	0,012
Гелий .....	0,1785	Водяной пар .....	0,005
Двуокись углерода	1,977	Этиловый спирт ..	0,033
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 <sup>3</sup>	Материал	Объемная плотность, кг/м <sup>3</sup>
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 свежесвыпавший .....	80—190
Гравий воздушно-сухой .....	1840	» слежавшийся ...	200—400
Железобетон, 8% вес. влажн. ....	2200	Сукно .....	250
Известь (в порошок)	500	Цемент (в порошок)	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



## Моменты инерции однородных тел

Тело	Относительно оси	$J$
Тонкий стержень длины $l$	перпендикулярной к стержню и проходящей через его середину	$\frac{ml^2}{12}$
Круглый диск или цилиндр радиуса $r$	перпендикулярной к плоскости диска и проходящей через его центр	$\frac{mr^2}{2}$
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 к 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 $2a$	$m \frac{b^2 + c^2}{3}$

Примечание. В таблице даны моменты инерции тел относительно осей, проходящих через их центр тяжести. Моменты инерции относительно любой оси могут быть найдены по формуле (1.30). Так, момент инерции тонкого стержня относительно оси, перпендикулярной к стержню и проходящей через его конец, равен

$$J = \frac{ml^2}{12} + m \left( \frac{l}{2} \right)^2 = \frac{ml^2}{3}.$$

### Коэффициенты трения скольжения для различных материалов

Трущиеся поверхности	k
Бронза по бронзе .....	0,2
» » стали .....	0,18
Дерево сухое по дереву .....	0,25—0,5
Деревянные полозья по снегу и льду .....	0,035
то же, но полозья обиты железом .....	0,02
Дуб по дубу вдоль волокон .....	0,48
то же поперек волокон одного тела и вдоль волокон другого .....	0,34
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	$g, \text{ м/сек}^2$	Широта	$g, \text{ м/сек}^2$
0°	9,78030	55°45 (Москва)	9,81523
10°	9,78186	59°57 (Ленинград)	9,81908
20°	9,78634	60°	9,81914
30°	9,79321	70°	9,82606
40°	9,80166	80°	9,83058
50°	9,81066	90°	9,83216

Таблица 14

**Динамические характеристики Солнечной системы**  
 Расстояние от Солнца  $D$ , средний радиус планеты  $R$ ,  
 плотность вещества планеты  $\rho$ , ускорение свободного  
 падения на поверхности  $g$ , масса  $M$

Небесное тело	$D, 10^{12} \text{ см}$	$R, 10^8 \text{ см}$	$\rho, \text{ г/см}^3$	$g, \text{ м/сек}^2$	$M, 10^{27} \text{ г}$
Солнце	—	696	1,41	274	1 984 000
Меркурий ...	5,79	2,49	5,13	3,53	0,312
Венера	10,8	6,19	4,97	8,53	4,9
Земля ..	14,95	6,378	5,52	9,81	5,98
Марс ..	22,78	3,42	3,94	3,73	0,65
Юпитер	77,8	71,4	1,33	25,9	1901,4
Сатурн	142,6	60,4	0,69	11,1	568,8
Уран ..	286,8	23,5	1,56	10,5	87,7
Нептун	449,4	22,3	2,27	13,83	103
Плутон	589,6	—	—	—	—
Луна ..	0,03844 (от Земли)	1,738	3,34	1,62	0,0736

## В. СТАТИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

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

**Центр тяжести твёрдого тела или системы тел.** На каждую частицу тела действует сила тяжести. Точка, в которой приложена равнодействующая всех сил тяжести, действующих на отдельные точки тела, называется *центром тяжести*. Сумма моментов сил тяжести всех частиц тела относительно центра тяжести 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. 96) 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 называют *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, имеющего вес  $P$ , на наклонной плоскости, составляющей угол  $\alpha$  с горизонтом, нужно приложить силу  $F$ , равную  $F_1$ , причем

$$F_1 = P \sin \alpha;$$

сила  $F$  должна быть направлена вверх вдоль наклонной плоскости (рис. 8).

При этом тело давит на наклонную плоскость с силой  $F_2 = P \cos \alpha$ , а наклонная плоскость с такой же силой действует на лежащее на ней тело. Свободно лежащее тело будет покоиться на наклонной плоскости, пока скатывающая сила не станет больше силы трения

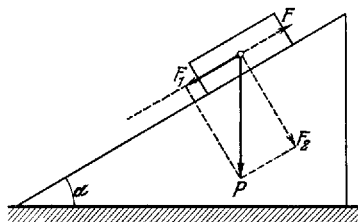


Рис. 8. Равновесие тела на наклонной плоскости.

покоя. Это произойдет, когда  $\operatorname{tg} \alpha > k$ , где  $k$  — коэффициент трения покоя.

**Рычаг.** Рычаг находится в равновесии, если векторная сумма моментов действующих на него сил равна нулю (рис. 9):

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

где  $a$  и  $b$  — плечи (см. стр. 29) сил  $F_1$  и  $F_2$ .

Условия равенства моментов сил применяются также к равновесию ворота (рис. 10, а) или лебедки.

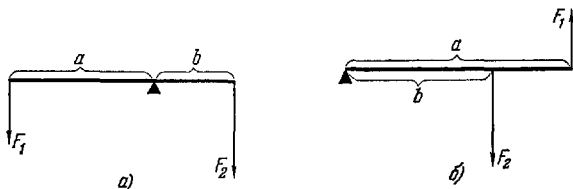


Рис. 9. Рычаги: а) рычаг с точкой опоры, находящейся между точками приложения действующих на него сил; б) рычаг, в котором точки приложения действующих сил находятся по одну сторону от точки опоры.

**Блоки.** Неподвижный блок (рис. 10, б) служит только для изменения направления действующей силы. Подвижный блок (рис. 10, в) позволяет получить выигрыш в силе. При покоящемся или равномерно вращающемся подвижном блоке сумма всех действующих сил и сумма всех моментов сил равны нулю.

Отсюда следует, что

$$P = 2F, \text{ или } F = P/2.$$

**Полиспаст.** Полиспаст (рис. 11, а) представляет собой систему подвижных и неподвижных блоков, соединенных в общем держателе. Если полиспаст имеет  $n$  подвижных и  $n$  неподвижных блоков, то сила  $F$ , уравнивающая силу  $P$ , равна  $F = P/2n$ .

**Винт.** При отсутствии трения сила  $P$ , действующая по оси винта, уравнивается силой  $F$ , приложенной к рукоятке (рис. 11, б):

$$F = Ph/2\pi R,$$

где  $R$  — расстояние от оси вращения до точки приложения силы, а  $h$  — шаг винта.

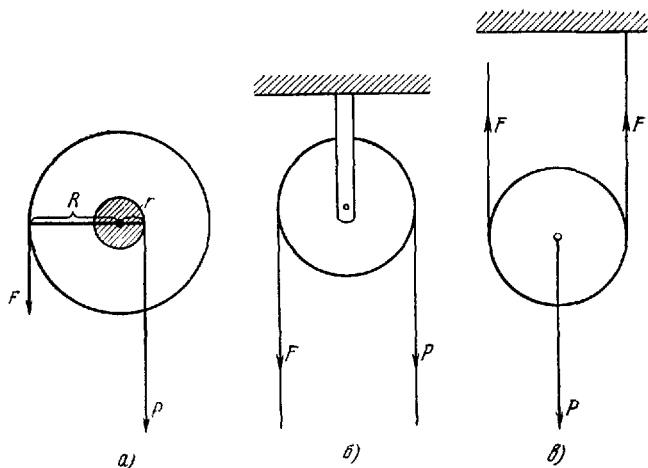


Рис. 10. Схема ворота (а), неподвижного блока (б) и подвижного блока (в).

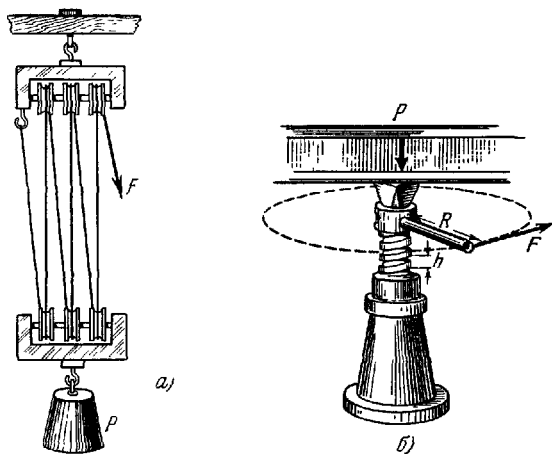


Рис. 11. Полиспаст (а) и винт (б).

Центры тяжести однородных тел  
(см. рис. 12)

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

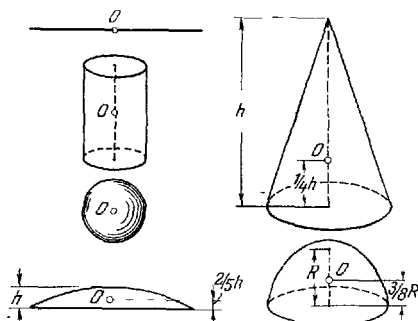


Рис. 12. Положение центра тяжести некоторых тел правильной геометрической формы.

### Г. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

#### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

Под воздействием внешних сил всякое твердое тело изменяет свою форму — деформируется. Деформация, исчезающая с прекращением действия сил, называется *упругой*.

При упругой деформации тела возникают внутренние силы упругости, стремящиеся вернуть телу первоначальную

форму. Величина этих сил пропорциональна деформации тела.

**Деформация растяжения и сжатия.** Возникающее удлинение образца ( $\Delta l$ ) под действием внешней силы ( $F$ ) пропорционально величине действующей силы, первоначальной длине ( $l$ ) и обратно пропорционально площади поперечного сечения ( $S$ ):

$$\Delta l = \frac{1}{E} \frac{lF}{S}, \quad (1.50)$$

где  $1/E$  — коэффициент пропорциональности. Формула (1.50) выражает закон Гука.

Величина  $E$  называется *модулем упругости первого рода* или *модулем Юнга* и характеризует упругие свойства материала. Величина  $F/S = p$  называется *напряжением*.

Деформация стержней любых длин и сечений (образцов) характеризуется величиной, называемой *относительной продольной деформацией*,  $\epsilon = \Delta l/l$ .

Закон Гука для образцов любых форм:

$$p = E\epsilon. \quad (1.51)$$

Модуль Юнга численно равен напряжению, увеличивающему длину образца в два раза. Однако разрыв образца наступает при значительно меньших напряжениях. На рис. 13 графически изображена экспериментальная зависимость  $p$

Рис. 13. Зависимость напряжения от относительной продольной деформации. Кривая I относится к пластичному материалу, а кривая II — к хрупкому. Точки O характеризуют разрушение материала.

от  $\epsilon$ , где  $p_{\text{макс}}$  — предел прочности, т. е. напряжение, при котором на стержне получается местное сужение (шейка),  $p_{\text{тек}}$  — предел текучести, т. е. напряжение, при котором появляется текучесть (т. е. увеличение деформации без увеличения деформирующей силы),  $p_{\text{упр}}$  — предел упругости, т. е. напряжение, ниже которого справедлив закон Гука \*).

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

\*) Имеется в виду кратковременное действие силы.



Совместно с деформацией растяжения наблюдается уменьшение диаметра образца. Если  $\Delta d$  — изменение диаметра образца, то  $\epsilon_1 = \Delta d/d$  принято называть относительной поперечной деформацией. Опыт показывает, что  $|\epsilon_1/\epsilon| < 1$ .

Абсолютная величина  $\mu = |\epsilon_1/\epsilon|$  носит название *коэффициента поперечной деформации* или *коэффициента Пуассона*.

**Деформация сдвига.**

*Сдвигом* называют деформацию, при которой все слои тела, параллельные некоторой плоскости, смещаются друг относительно друга. При сдвиге объем деформируемого тела не меняется.

Отрезок  $AA_1$  (рис. 14), на который сместилась одна плоскость относительно другой, называют *абсолютным сдвигом*. При малых углах сдвига угол  $\alpha \approx \text{tg } \alpha = AA_1/AD$  характеризует относительную деформацию и его называют *относительным сдвигом*.

Закон Гука для деформации сдвига может быть записан в виде

$$p = G\alpha, \quad (1.52)$$

где коэффициент  $G$  носит название *модуля сдвига*.

**Сжимаемость вещества.** Всестороннее сжатие тела приводит к уменьшению объема тела на  $\Delta V$  и возникновению упругих сил, стремящихся вернуть телу первоначальный объем. *Сжимаемостью* ( $\beta$ ) называется величина, численно равная относительному изменению объема тела  $\Delta V/V$  при изменении действующего по нормали к поверхности напряжения ( $p$ ) на единицу.

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

Изменение объема тела  $\Delta V$  при всестороннем увеличении давления на  $\Delta P$  вычисляется по формуле

$$\Delta V = -V\beta\Delta P, \quad (1.53)$$

где  $V$  — первоначальный объем тела.

**Соотношения между упругими постоянными.** Модуль Юнга, коэффициент Пуассона, модуль объемной упругости и модуль сдвига связаны между собой уравнениями:

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

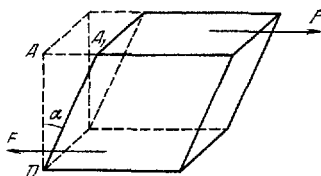


Рис. 14. Деформация сдвига.

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

Потенциальная энергия упругой деформации определяется по формуле

$$E_{\text{п}} = \frac{1}{2} F \Delta l, \quad (1.54)$$

где  $F$  — сила упругости, а  $\Delta l$  — величина деформации.

Единицы измерения модулей упругости:

н/м<sup>2</sup> (СИ), дин/см<sup>2</sup> (СГС), кг/м<sup>2</sup> (МКГСС) и кг/мм<sup>2</sup>;

1 кг/мм<sup>2</sup> = 9,8 · 10<sup>8</sup> н/м<sup>2</sup> = 9,8 · 10<sup>7</sup> дин/см<sup>2</sup> = 10<sup>8</sup> кг/м<sup>2</sup>.

## ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Таблица 16

### Пределы прочности некоторых материалов (кг/мм<sup>2</sup>)

Материал	Предел прочности	
	при растяжении	при сжатии
Амиопласты слоистые .....	8	20
Бакелит .....	2—3	8—10
Бетон .....	—	0,5—3,5
Винипласт .....	4	8
Гетинакс .....	15—17	15—18
Гранит .....	0,3	15—26
Графит .....	0,5—1,0	1,6—3,8
Дуб (при 15% влажности) вдоль волокон .....	9,5	5
то же поперек волокон .....	—	1,5
Кирпич .....	—	0,74—3
Латунь, бронза .....	22—50	—
Лед (0 °С) .....	0,1	0,1—0,2
Пенопласт плиточный .....	0,06	—
Полнакрилат (оргстекло) .....	5	7
Полистирол .....	4	10
Сосна (при 15% влажности) вдоль волокон .....	8	4
то же поперек волокон .....	—	0,5
Сталь для конструкций .....	38—42	—
> кремнехромомарганцовистая .....	155	—
> машиноподелочная (углеродистая) .....	32—80	—
> рельсовая .....	70—80	—
Текстолит ПТК .....	10	15—25
Фенопласт текстолитовый .....	8—10	10—26
Фторопласт-4 .....	2	—
Целлон .....	4	16
Целлулоид .....	5—7	—
Чугун белый .....	—	до 175
> серый мелкозернистый .....	21—25	до 140
> обыкновенный .....	14—18	60—100

## Модули упругости и коэффициенты Пуассона

Наименование материала	Модуль Юнга $E$ , $10^7 \text{ н/м}^2$	Модуль сдвига $G$ , $10^7 \text{ н/м}^2$	Коэффициент Пуассона $\mu$
Алюминиевая бронза, литье .	10300	4100	0,25 *)
Алюминий . . . . .	6300—7000	2500—2600	0,32—0,36
Бетон . . . . .	1500—4000	700—1700	0,1—0,15
Висмут . . . . .	3200	1200 *)	0,33 *)
Гранит, мрамор . . . . .	3500—5000	1400—4400	0,1—0,15
Дюралюминий катаный . . . . .	7000	2600	0,31 *)
Известняк плотный . . . . .	3500	1500	0,2
Инвар . . . . .	13500	5500	0,25 *)
Кадмий . . . . .	5000	1900 *)	0,3
Каучук . . . . .	0,79	0,27	0,46
Кварцевая нить (плавленная) .	7300	3100	0,17
Константан . . . . .	16000	6100	0,33
Латунь корабельная катаная	9800	3600 *)	0,36
» холодноотянутая . . . . .	8900—9700	3400—3600	0,32—0,42
Манганин . . . . .	12300	4600	0,33
Медь, литье . . . . .	8200		
» прокатанная . . . . .	10800	3900	0,31—0,34
» холодноотянутая . . . . .	12700	4800	0,33 *)
Никель . . . . .	20400	7900	0,28 *)
Плексиглас . . . . .	525	148	0,35 *)
Резина мягкая вулканизированная . . . . .	0,15—0,5	0,05—0,15	0,46—0,49
Серебро . . . . .	8270	3030	0,37 *)
Стали легированные . . . . .	20600	8000	0,25—0,30
» углеродистые . . . . .	19500—	800	0,24—0,28
	20500		
Стальное литье . . . . .	17000		
Стекло . . . . .	4900—7800	1750—2900	0,2—0,3
Титан . . . . .	11600	4400	0,32 *)
Фосфористая бронза катаная	11300	4100	0,32—0,35
Целлулоид . . . . .	170—190	65 *)	0,39
Цинк катаный . . . . .	8200	3100	0,27
Чугун белый, серый . . . . .	11300—	4400	0,23—0,27
	11600		
» ковкий . . . . .	15000		

\*) Расчетные значения

## Сжимаемость жидкостей при различных температурах

Вещество	Температура, °С	В интервале давлений, атм	Сжимаемость $\beta$ , $10^{-6} \text{ атм}^{-1}$
Ацетон .....	14,2	9—36	111
	0	100—500	82
	0	500—1000	59
	0	1000—1500	47
	0	1500—2000	40
Бензол .....	16	8—37	90
	20	99—296	78,7
	20	296—494	67,5
Вода .....	20	1—2	46
Глицерин .....	14,8	1—10	22,1
Касторовое масло ....	14,8	1—10	47,2
Керосин .....	1	1—15	67,91
	16,1	1—15	76,77
	35,1	1—15	82,83
	52,2	1—15	92,21
	72,1	1—15	100,16
94	1—15	108,8	
Кислота серная .....	0	1—16	302,5
Кислота уксусная ....	25	92,5	81,4
Ксилол .....	10	1—5,25	74
	100	1—5,25	132
Нитробензол .....	25	192	43,0
Оливковое масло .....	20,5	1—10	63,3
	14,8	1—10	56,3
Парафин (с температурой плавления 55 °С)	64	20—100	83
	100	20—400	24
	185	20—400	137
Ртуть .....	20	1—10	3,91
Спирт этиловый .....	20	1—50	112
	20	50—100	102
	20	100—200	95
	20	200—300	86
	20	300—400	80
100	900—1000	73	
Толуол .....	10	1—5,25	79
	20	1—2	91,5

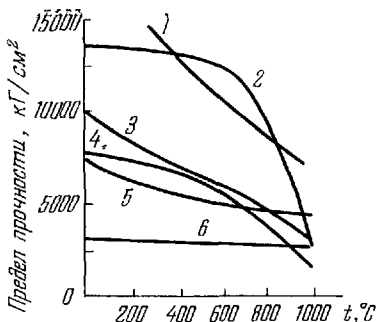


Рис. 15. Зависимость предела прочности от температуры. Кривая 1 — вольфрам, 2 — никелевая сталь, 3 — кобальтовая сталь, 4 — сталь N-155, 5 — Mo 0,5 Ti, 6 — Ti 36 Al.

## 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 к поверхности на единицу площади.

Единицы измерения давления:  $\text{н/м}^2$  (СИ),  $\text{дин/см}^2$  (СГС), атмосфера нормальная (*атм*), атмосфера техническая (*ат*).

$$1 \text{ н/м}^2 = 10 \text{ дин/см}^2;$$

$$1 \text{ атм} = 1,013 \cdot 10^6 \text{ н/м}^2;$$

$$1 \text{ ат} = 9,80665 \cdot 10^4 \text{ н/м}^2.$$

#### 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

$$p = \rho gh, \quad (1.55)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости или газа,  $g$  — ускорение свободного падения,  $h$  — высота столба. Величина давления не зависит от формы столба, а определяется только его высотой.

В сообщающихся сосудах высоты столбов жидкостей обратно пропорциональны плотностям жидкостей:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}. \quad (1.56)$$

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 протекают жидкость или газ.

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

$$S_1 v_1 = S_2 v_2, \quad (1.57)$$

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

$$\left. \begin{aligned} & p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{const}, \\ \text{или} & \\ & p_1 + \rho gh_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \rho gh_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}, \end{aligned} \right\} \quad (1.58)$$

где  $p$  — давление,  $\rho$  — плотность жидкости,  $h$  — высота данного сечения трубы над некоторым уровнем,  $v$  — скорость движения жидкости в данном сечении трубы (рис. 16, а).

Уравнение (1.58) носит название *уравнения Бернулли*. Из этого уравнения следует *закон Торричелли*:

$$v^2 = 2gH, \quad (1.59)$$

где  $v$  — скорость частиц жидкости при вытекании из малого отверстия в сосуде,  $H$  — высота поверхности жидкости над отверстием (рис. 16, б).

**Движение вязкой жидкости.** При движении в жидкости твердого тела (например, шара) ближайший слой жидкости

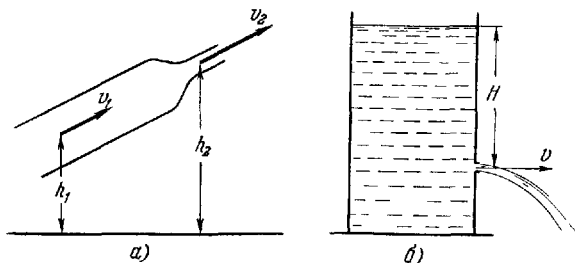


Рис. 16. а) Пояснение к формуле (1.58). б) Вытекание жидкости из малого отверстия.

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

$$F = 6\pi\eta Rv, \quad (1.60)$$

где  $\eta$  — коэффициент внутреннего трения (см. стр. 66), или *вязкость*.

Единицы измерения коэффициента внутреннего трения:  $\text{кг/м}\cdot\text{сек}$  (СИ),  $\text{г/см}\cdot\text{сек}$  — пуаз (СГС);

$$1 \text{ кг/м}\cdot\text{сек} = 10 \text{ г/см}\cdot\text{сек}.$$

Формула (1.60) носит название *формулы Стокса*.

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

$$v = g \frac{\rho - \rho_{\text{ж}}}{\eta} \frac{2R^2}{9}, \quad (1.61)$$

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

Объем жидкости, протекающей в единицу времени по капиллярной трубке радиуса  $R$  и длиной  $l$  при разности давлений  $p_1 - p_2$  на концах трубки, равен

$$V = \frac{1}{\eta} \frac{\pi R^4}{8l} (p_1 - p_2). \quad (1.62)$$

Вязкость жидкости и газа в значительной степени зависит от температуры.

## ТАБЛИЦЫ

Таблица 19

### Вязкость жидкостей (при 18 °С)

Вещество	$\eta, 10^{-2}$ кг/м·сек	Вещество	$\eta, 10^{-2}$ кг/м·сек
Анилин .....	0,46	Масло цилиндрическое очищенное (40 °С)	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 .....	0,06	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 °С)

Вещество	$\eta, 10^{-5}$ кг/м·сек	Вещество	$\eta, 10^{-5}$ кг/м·сек
Азот .....	1,67	Кислород .....	1,92
Аммиак .....	0,93	Метан .....	1,04
Водород .....	0,84	Окись азота .....	1,72
Воздух (своб. от CO <sub>2</sub> ) .....	1,72	, углерода .....	1,67
Гелий .....	1,89	Углекислый газ ..	1,40
Закись азота .....	1,38	Хлор .....	1,29



Таблица 21

**Вязкость газов при высоких давлениях**  
( $\eta$ ,  $10^{-6}$  кг/м·сек)

Газ	Температура, °С	Давление, атм			
		50	100	600	900
Азот .....	25	18,7	19,9	38,7	49,5
	75	20,7	21,7	36,1	44,2
Углекислота .....	40	18,1	48,3	—	—
Этилен .....	40	13,4	28,8	—	—

Таблица 22

**Вязкость воды при различных температурах**

$t$ , °С	0	5	10	15	20	25	30	40	50		
$10^{-6} \eta$ , кг/м·сек	1797	1518	1307	1140	1004	895	803	655	551		
$t$ , °С	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
$10^{-6} \eta$ , кг/м·сек	470	407	357	317	284	256	232	212	196	184	174

Таблица 23

**Вязкость жидкостей при различных температурах**  
( $\eta$ ,  $10^{-2}$  кг/м·сек)

Жидкость °С	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 воздуха при различных условиях**  
( $\eta$ ,  $10^{-6}$  кг/м·сек)

$p$ , ат	$t$ , °C			$p$ , ат	$t$ , °C		
	0	25	100		0	25	100
1	17,20	18,37	21,80	100	19,70	20,60	23,35
20	17,53	18,65	22,02	200	23,70	23,95	25,30
50	18,15	19,22	22,40	300	28,60	28,00	28,10

Таблица 25

**Вязкость металлов в жидком состоянии**

Вещество	$t$ , °C	$\eta$ , $10^{-3}$ кг/м·сек	Вещество	$t$ , °C	$\eta$ , $10^{-3}$ кг/м·сек
Алюминий	700	2,90	Олово .....	240	1,91
	800	1,40		400	1,38
Висмут ....	304	1,65		600	1,05
	451	1,28	20	1,54	
	600	0,99	50	1,40	
Калий ....	100	0,46	100	1,24	
	200	0,34	200	1,03	
	500	0,185	300	0,90	
	700	0,14	400	0,83	
			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

Система тел, которые совершенно не взаимодействуют с окружающими телами, называется *изолированной системой*.

Изолированная система (например, газ, находящийся в сосуде с непроводящими стенками) в конечном итоге переходит в такое состояние, которое в дальнейшем не изменяется. Такое состояние называется *тепловым равновесием*. Скалярная величина, определяющая тепловое равновесие между телами, которые обмениваются энергией посредством теплопередачи, называется *температурой*. Изменение температуры тела вызывает изменения свойств тела (размеров, плотности, упругости, электропроводности и т. п.).

Температура тела характеризует кинетическую энергию теплового движения его молекул или атомов (см. стр. 72).

По государственным стандартам приняты две температурные шкалы — термодинамическая (Кельвина) и практическая (Цельсия) со следующими обозначениями градуса:  $^{\circ}\text{K}$  (термодинамическая) и  $^{\circ}\text{C}$  (практическая). Величины градуса обеих шкал одинаковы.

В термодинамической шкале, в которой для температуры тройной точки воды установлено значение  $273,16^{\circ}\text{K}$  (точно), точка таяния льда при нормальном давлении лежит на  $0,01^{\circ}$  ниже тройной точки. Точка, лежащая на  $273,15^{\circ}$  ниже температуры плавления льда при нормальном давлении, называется *абсолютным нулем*. Эта точка является началом отсчета температуры по шкале Кельвина.

В шкале Цельсия за нуль принимается температура равновесия воды и льда, а за  $100^{\circ}$  принята температура кипения воды при нормальном давлении.

В качестве эталонных точек практической температурной шкалы приняты температуры кипения кислорода

( $-182,970^{\circ}\text{C}$ ) и серы ( $444,60^{\circ}\text{C}$ ) и температуры плавления серебра ( $960,8^{\circ}\text{C}$ ) и золота ( $1063,0^{\circ}\text{C}$ ) при нормальном атмосферном давлении.

## 1. Основы термодинамики. Теплоемкость

*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. 65) или теплового излучения (см. стр. 200). Количество энергии, передаваемое при тепловом взаимодействии тел, называется *количеством тепла* (или просто *теплом*).

В системе СИ теплота измеряется в джоулях. Однако она может измеряться и в особых единицах — калориях (*кал*):

$$1 \text{ кал} = 4,1868 \text{ дж.}$$

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

$$c_{\text{и}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

есть, по определению, *истинная удельная теплоемкость* при температуре  $t_0$ . Истинная удельная теплоемкость зависит от температуры. Однако в большинстве случаев этой зависимостью пренебрегают и считают, что истинная удельная теплоемкость (или просто удельная теплоемкость) численно равна количеству тепла, которое необходимо сообщить телу единичной массы для повышения его температуры от  $t^{\circ}\text{C}$  до  $(t+1)^{\circ}\text{C}$  при любом  $t$ .

Количество тепла  $\Delta Q$ , полученное телом массы  $m$  при увеличении его температуры на  $\Delta t$ , равно

$$\Delta Q = cm \Delta t, \quad (2.1)$$

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 *теплоемкостью при постоянном объеме* ( $c_v$ ). Всегда  $c_p > c_v$ ; для веществ в твердом состоянии теплоемкости  $c_p$  и  $c_v$  незначительно отличаются друг от друга.

Единицы измерения удельной теплоемкости:

$$\text{дж/кг}\cdot\text{град (СИ), кал/г}\cdot\text{град.}$$

Сумма количества тепла  $\Delta Q$ , которое получает тело при нагревании, и работы  $\Delta A$ , которая производится им при этом процессе, равна изменению внутренней энергии  $\Delta U$  (*первый закон термодинамики*):

$$\Delta Q + \Delta A = \Delta U.$$

Изменение  $\Delta U$  определяется конечным и начальным состояниями и не зависит от процесса нагревания;  $\Delta Q$  и  $\Delta A$  зависят от процесса перехода.

Тепло 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 своим свойствам частей системы. Например: лед, вода, водяной пар, составляющие систему, являются различными фазами; графит и алмаз — различные фазы твердого вещества (углерода).

Переход из одной фазы в другую сопровождается поглощением или выделением определенного количества тепла, которое называется *теплотой перехода*.

Для перехода вещества из твердого состояния в жидкое необходимо сообщить ему количество тепла

$$Q = \lambda t, \quad (2.2)$$

где  $t$  — масса расплавившегося тела,  $\lambda$  — удельная теплота плавления.

*Удельной теплотой плавления* называется количество тепла, которое нужно сообщить единице массы твердого

тела, находящегося при температуре плавления, для того чтобы перевести его в жидкое состояние. При кристаллизации (отвердевании) жидкости происходит выделение тепла.

Теплота плавления равна теплоте кристаллизации \*).

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

При данном давлении для каждого вещества существует определенная температура, называемая *температурой плавления*, при которой происходит переход вещества из твердого состояния в жидкое. Температура во время этого перехода остается постоянной. Температура плавления зависит от давления. Кривая, изображающая зависимость температуры плавления от давления, называется *кривой плавления*. Коэффициент изменения температуры плавления воды с давлением равен приблизительно  $-7,5 \cdot 10^{-3}$  град/атм.

Переход жидкости в газообразное состояние называется *испарением*; обратный переход называется *конденсацией*. Испарение твердых тел называется *сублимацией*. Молекулы, имеющие наибольшие скорости, при испарении вылетают через свободную поверхность тела, которое вследствие этого охлаждается.

Испарение, происходящее не только на поверхности, но и внутри жидкости, называется *кипением*. Кипение происходит при постоянной (для данного внешнего давления) температуре. Эта температура называется *температурой кипения*. Она остается постоянной во время кипения. Коэффициент изменения температуры кипения воды с давлением равен приблизительно  $1/26,12$  град/мм рт. ст.

Количество тепла, которое необходимо сообщить телу для того, чтобы перевести его в пар, называется *теплотой испарения* (или *теплотой парообразования* — при кипении):

$$Q = \tau m, \quad (2.3)$$

где  $m$  — масса испарившегося вещества,  $\tau$  — *удельная теплота испарения* (парообразования), равная теплоте испарения единицы массы.

При конденсации пара происходит выделение тепла; теплота парообразования равна теплоте конденсации.

---

\*) 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*.

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*).

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*.

Кривые плавления, испарения и сублимации определяют условия равновесия двух фаз — твердой и жидкой, жидкой и газообразной, твердой и газообразной. Точка пересечения всех трех кривых называется *тройной точкой* (рис. 17). 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 плотности их станут равными друг другу. При этом пропадет граница между ними. Такое состояние называется *критическим*, а соответствующие этому состоянию плотность, давление и температура называются *критическими* (см. стр. 70).

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 парообразова-*

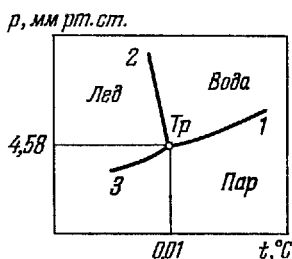


Рис. 17 Кривые испарения (1), плавления (2), сублимации (3) вблизи тройной точки (Тр) воды.

ния  $\rho$ ), и на работу, связанную с увеличением объема вещества при переходе в газообразное состояние (*внешняя теплота парообразования*  $\psi$ ). На рис 18 показаны зависимости  $r$ ,  $\rho$  и  $\psi$  от температуры  $t$  для воды.

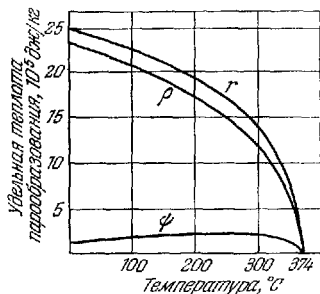


Рис. 18. Зависимость внешней ( $\psi$ ), внутренней ( $\rho$ ) и полной ( $r$ ) теплоты парообразования от температуры для воды.

### 3. Тепловое расширение твердых и жидких тел

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

$$l_t = l_0(1 + \alpha t). \quad (2.4)$$

*Коэффициентом линейного расширения* называется

величина, равная среднему (в интервале температур от  $0^\circ\text{C}$  до  $t^\circ\text{C}$ ) относительному удлинению тела:  $(1/t) \cdot (l_t - l_0)/l_0 = \alpha$ .

Аналогично для объема тела

$$v_t = v_0(1 + \beta t), \quad (2.5)$$

где  $\beta$  — коэффициент объемного расширения.

*Коэффициентом объемного расширения* называется величина, равная среднему (в данном интервале температур) относительному изменению объема тела:  $\beta = (1/t)(v_t - v_0)/v_0$ .

Для твердого изотропного тела (свойства которого одинаковы по всем направлениям)  $\beta = 3\alpha$ .

Коэффициенты объемного и линейного расширения выражаются в  $\text{град}^{-1}$ .

Более точными являются формулы:

$$\Delta l = l_0(at + bt^2), \quad l_t = l_0(1 + at + bt^2), \quad (2.6)$$

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 °С до 75 °С равен  $1,21 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ , а для интервала 0 °С — 750 °С равен  $1,52 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ .

При нагревании тел происходит изменение их плотности. Плотность тела при температуре  $t$ :

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta t}, \quad (2.7)$$

где  $\rho_0$  — плотность тела при 0 °С,  $\beta$  — коэффициент объемного расширения.

#### 4. Явления переноса

Теплота передается посредством конвекции, теплопроводности и излучения (см. тепловое излучение, стр. 200).

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

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.

Количество теплоты, переданное слоем вещества толщиной  $\Delta l$ , с площадью  $S$  при поддержании на его плоскостях разности температур  $\Delta T$  за время  $t$ :

$$Q = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta l} St, \quad (2.8)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности.

*Коэффициентом теплопроводности* называется величина, численно равная количеству теплоты, переданному в единицу времени через слой единичной толщины при разности температур поверхностей слоя в 1°, если площадь поверхности слоя равна единице.

**Диффузия.** *Диффузией*, называется процесс выравнивания концентраций, обусловленный переносом вещества посредством молекулярного движения. Масса вещества  $M$ , перенесенного через слой толщины  $\Delta l$ , с площадью  $S$  при поддержании на его плоскостях разности концентраций  $\Delta C$  за время  $t$ :

$$M = D \frac{\Delta C}{\Delta l} St, \quad (2.9)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии.

*Коэффициентом диффузии* называют величину, измеряемую массой диффундирующего вещества, переданного

через слой единичной толщины при разности концентраций на его поверхностях в 1 единицу.

Единицы измерения коэффициента диффузии:

$$m^2/сек (СИ), \text{ см}^2/сек (СГС),$$

$$1 m^2/сек = 10^4 \text{ см}^2/сек.$$

Единицы измерения коэффициента теплопроводности:

$$вт/м \cdot \text{град} (СИ); \text{ кал/см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}, \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град};$$

$$1 \text{ вт/м} \cdot \text{град} = 2,39 \cdot 10^{-2} \text{ кал/см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град} =$$

$$= 0,86 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}.$$

**Внутреннее трение (вязкость).** При относительном параллельном смещении слоев жидкости или газа в нем 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.

Величина силы внутреннего трения

$$F_{\tau} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta l} S, \quad (2.10)$$

где  $\Delta v/\Delta l$  — отношение разности скоростей слоев к расстоянию между ними,  $S$  — площадь соприкосновения слоев. Коэффициент внутреннего трения  $\eta$  измеряется силой трения, возникающей между двумя слоями с площадью, равной единице, при отношении  $\Delta v/\Delta l$ , равном единице.

Единицы измерения вязкости: пуаз —  $г/сек \cdot см$  (СГС),  $кг/сек \cdot м$  (СИ).

Соотношения (2.8) — (2.10) применимы при условии, что длина свободного пробега молекул жидкости или газа (см. стр. 70) 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 состоя-

нии. Эти силы направлены вдоль поверхностного слоя и называются *силами поверхностного натяжения*.

Величина силы поверхностного натяжения

$$F = \alpha l, \quad (2.11)$$

где  $l$  — длина края (периметр) поверхностного слоя жидкости,  $\alpha$  — коэффициент поверхностного натяжения.

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

Единицы измерения поверхностного натяжения: н/м (СИ), дин/см (СГС):

$$1 \text{ н/м} = 10^3 \text{ дин/см.}$$

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

$$pv = \frac{m}{\mu} RT. \quad (2.12)$$

Это уравнение называется *уравнением состояния идеального газа*, или *уравнением Клапейрона—Менделеева*. Здесь  $p$  — давление газа,  $v$  — объем, занимаемый  $m$  килограммами (граммами) газа,  $\mu$  — килограмм-моль (грамм-моль),  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $T$  — температура по термодинамической шкале.

Килограмм-моль (грамм-моль) — число килограммов (граммов) вещества, численно равное молекулярному весу.

В 1 моле любого вещества находится одинаковое число молекул. Это число молекул называется *числом Авогадро*  $N_A$ :

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ кг-моль}^{-1} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ г-моль}^{-1}.$$

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 (2.14) получаются законы Гей-Люссака, Шарля и Бойля—Мариотта. При постоянных  $p$  и  $m$  (так как

$R = \text{const}$ , а  $\mu$  постоянно для данного вещества)

$$v_1 = v_0 \frac{T_1}{T_0},$$

где  $v_0$  и  $T_0$  — объем и температура газа при  $0^\circ\text{C}$ . Отсюда следует закон Гей-Люссака (уравнение *изобарического процесса*):

$$v_t = v_0 \left(1 + \frac{1}{273} t\right), \quad (2.13)$$

где  $t$  — температура в  $^\circ\text{C}$ .

При постоянных  $v$  и  $t$  получается закон Шарля (уравнение *изохорического процесса*):

$$p = p_0 \left(1 + \frac{1}{273} t\right). \quad (2.14)$$

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

$$p_1 v_1 = p_2 v_2. \quad (2.15)$$

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

Плотность газа  $\rho$  может быть найдена из уравнения (2.12), если известны давление  $p$ , температура  $T$  и молекулярный вес газа:

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{\mu p}{RT}. \quad (2.16)$$

При изотермическом расширении (которое характеризуется постоянством температуры) 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 сжатии газа выделяется теплота, которая передается в окружающую среду.

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

$$p v^\gamma = \text{const}, \quad (2.17)$$

где  $\gamma = c_p/c_v$ .

Если плотность газа становится сравнимой с плотностью насыщающего пара при данной температуре, то наблюдаются значительные отступления от уравнения со-

стояния 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:

$$\left[ p + \left( \frac{m}{\mu} \right)^2 \frac{a}{v^2} \right] \left( v - \frac{m}{\mu} b \right) = \frac{m}{\mu} RT, \quad (2.18)$$

где  $v$  — объем, занимаемый  $m$  килограммами (граммами) газа,  $\mu$  — кг-моль (г-моль),  $a$  и  $b$  — постоянные Ван дер Ваальса, которые могут быть определены по критическим

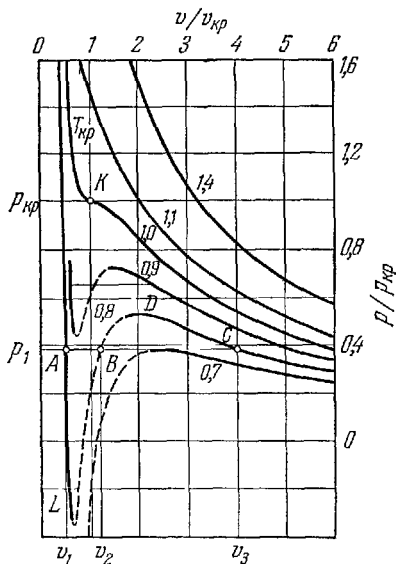


Рис. 19. Изотермы Ван дер Ваальса. По осям отложены относительные значения объема ( $v/v_{кр}$ ) и давления ( $p/p_{кр}$ ); цифры у кривых указывают температуру в относительных единицах ( $T/T_{кр}$ ).

параметрам для одного моля газа — объему  $v_{кр}$ , давлению  $p_{кр}$  и температуре  $T_{кр}$  вещества:

$$a = 3p_{кр} v_{кр}^2, \quad b = \frac{1}{3} v_{кр}, \quad R = \frac{8}{3} \frac{v_{кр} p_{кр}}{T_{кр}}. \quad (2.19)$$

Изотермы Ван дер Ваальса приведены на рис. 19. При температурах ниже  $T_{кр}$  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  $T_{кр}$  и выше ее изотермы не имеют S-образного изгиба. Температура  $T_{кр}$  является критической температурой (см. также стр. 63); соответствующие ей значения давления  $p_{кр}$  и объема  $v_{кр}$  называются *критическим давлением* и *критическим объемом*. Состояние вещества, которому соответствуют  $T_{кр}$ ,  $p_{кр}$  и  $v_{кр}$ , является *критическим состоянием*.

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. 63). При некоторых условиях изотерма может проходить по участкам  $AL$  (перегретая жидкость) и  $CD$  (пересыщенный пар); но такие состояния являются *неустойчивыми*.

Для ожижения газов посредством увеличения давления необходимо охладить их ниже критической температуры. Температура ожиженного газа определяется давлением, под которым он находится. В табл. 35 приводятся температуры кипения ожиженных 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

$$l = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 p}, \quad (2.20)$$

где  $k = R/N_A$  — постоянная Больцмана,  $\sigma$  — диаметр молекул,  $T$  — температура по шкале Кельвина,  $N_A$  — число Авогадро,  $p$  — давление,  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Закон, который описывает распределение молекул по скоростям, называется *функцией распределения*. Функция распределения молекул идеального газа (распределение Максвелла) представлена на рис. 20. На оси ординат указано относительное число молекул  $\Delta n/n$ , которые имеют

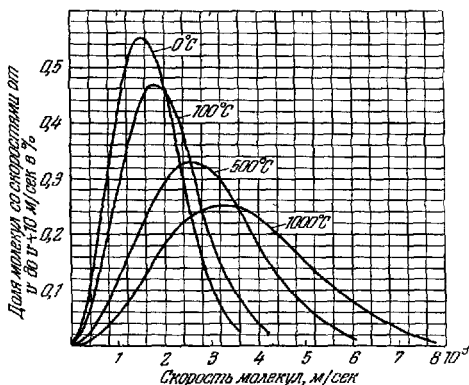


Рис 20. Распределение молекул водорода по скоростям для различных температур.

скорости от  $v$  до  $v + \Delta v$ ; на другой оси отложены значения скоростей.

Скорость, соответствующая максимуму на рис. 20, называется *наиболее вероятной скоростью*  $v_B$ .

*Средней скоростью* молекул называется скорость

$$v_c = \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_n}{n}, \quad (2.21)$$

где  $v_1, v_2, \dots, v_n$  — скорости молекул; значения скоростей берутся по абсолютной величине. *Средней квадратичной скоростью* называется скорость

$$v_k = \left( \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.22)$$

Из распределения Максвелла получаются следующие выражения для расчета скоростей:

$$v_B^2 = \frac{2kT}{m}, \quad v_c^2 = \frac{8kT}{\pi m}, \quad v_k^2 = \frac{3kT}{2m}, \quad (2.23)$$

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

Давление газа обусловлено ударами отдельных молекул о стенки сосуда. Оно равно

$$p = \frac{1}{3} n m v_{\text{к}}^2 = nkT, \quad (2.24)$$

где  $n$  — 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*):

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n. \quad (2.25)$$

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

$$E = \frac{1}{2} ikT, \quad (2.26)$$

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

$$E_{\mu} = \frac{1}{2} iRT. \quad (2.27)$$

Молекулы, которые обладают скоростями, большими скорости убегания (см. стр. 24), 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

$$p = p_0 e^{-\mu gh/RT}, \quad (2.28)$$

где  $\mu$  — средний молекулярный вес 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 (2.28) называется *барометрической формулой*.

В случае Земли эта формула может быть написана в виде

$$h = 8000 \lg \frac{p_0}{p},$$

где  $h$  — высота, выраженная в метрах.



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 °С составляет 760 мм рт. ст. и падение температуры с высотой равно 6,5° на 1000 м.

Соотношение между высотой, давлением, плотностью и температурой стандартной атмосферы приведено в табл. 54.

В окружающем нас воздухе всегда находится некоторое количество водяного пара. Масса водяного пара, находящегося в 1 м<sup>3</sup> 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 м<sup>3</sup> воздуха.

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

Коэффициенты теплопроводности, вязкости и диффузии газа ( $\lambda$ ,  $\eta$ ,  $D$ ) вычисляются по формулам:

$$\lambda = \frac{1}{3} \rho v_c l c^v, \quad (2.29)$$

$$\eta = \frac{1}{3} \rho v_c l, \quad (2.30)$$

$$D = \frac{1}{3} v_c l, \quad (2.31)$$

где  $\rho$  — плотность газа,  $v_c$  — средняя скорость молекул газа,  $c_v$  — теплоемкость при постоянном объеме,  $l$  — длина свободного пробега.

Если длина свободного пробега больше размеров сосуда, то внутреннее трение отсутствует, а коэффициент трения о стенки сосуда при движении газа равен

$$\eta = \frac{1}{6} \rho v_c; \quad (2.32)$$

коэффициент теплопроводности при этом равен

$$\lambda = \frac{1}{6} \rho v_c c_v. \quad (2.33)$$

\*) В определенных условиях может произойти пересыщение паров.

## ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Таблица 26

**Удельные теплоемкость  $c_p$ , теплота плавления  $\lambda$ ,  
теплота испарения  $r$ , температуры плавления  $t_{пл}$   
и кипения  $t_{кп}$  некоторых веществ**

Вещество	$10^3 \frac{c_p}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ при 20 °С	$t_{пл}, \text{°С}$	$\lambda, 10^3$ дж/кг	$t_{кп}, \text{°С}$	$r, 10^3$ дж/кг
Алюминий ...	0,88	658,7	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	271,3	50	1560	855
Глицерин .....	2,4	—	176	290	825
Германий .....	0,31	958	478	2700	—
Дерево:					
дуб 6—8% в. с.					
влажн. ....	2,4	—	—	—	—
сосна 8% в. с.					
влажн. ....	1,7	—	—	—	—
Железо .....	0,45	1530	293	3050	6300
Золото .....	0,13	1063	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	960,8	88	2160	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

## Относительное изменение объема вещества при плавлении

Вещество	$\Delta v/v, \%$	Вещество	$\Delta v/v, \%$
Алюминий .....	6,6	Магний .....	4,2
Алюминиевые сплавы .....	4,5—5,9	Медные сплавы ..	3,0—4,5
Висмут .....	-3,32	Натрий .....	2,5
Галлий .....	-3	Олово .....	2,6
Золото .....	5,19	Ртуть .....	3,6
Индий .....	2,5	Свинец .....	3,6
Кадмий .....	4,74	Серебро .....	4,99
Калий .....	2,41	Сталь углеродистая	4,5—6,0
Лед (вода) .....	-8,3	Сурьма .....	-0,94
Литий .....	1,5	Цезий .....	2,6
		Цинк .....	6,9
		Чугун серый .....	2,4—3,6

## Температура плавления огнеупорных материалов

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

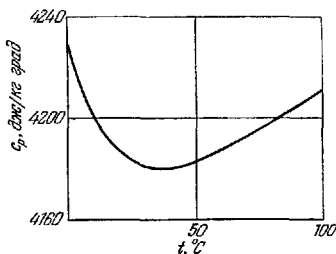


Рис. 21. Удельная теплоемкость воды при различных температурах

**Удельная теплоемкость твердых веществ  
при низких температурах  
(дж/кг·град)**

Вещество	Температура, °К							
	20 (ки- пе- ние Н <sub>2</sub> )	50	77 (ки- пе- ние N <sub>2</sub> )	90 (ки- пе- ние O <sub>2</sub> )	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	9,8	202	237	260	331	366	396
Никель ...	5,0	68,6	168	209	238	336	392	445
Плавл. кварц ....	25,7	115	201	244	274	420	540	740
Сталь (нерж.)	4,6	67	163	214	244	364	424	477
Фторо- пласт-4 ...	77,6	210	316	364	399	553	695	1120

Примечание. В интервале температу от 0 °С до 300 °С средняя теплоемкость меди равна 410 дж/кг·град, плавленного кварца — 880 дж/кг·град.

Таблица 30

**Удельная теплоемкость жидкого этилового спирта  
при различных температурах и давлениях  
(с<sub>p</sub>, 10<sup>3</sup> дж/кг·град)**

Температура, °С	Давление, кг/см <sup>2</sup>							
	—60	—40	—20	0	20	40	60	
10	1,59	1,79	1,99	2,20	2,41	2,62	2,84	
	60	1,59	1,78	1,98	2,17	2,38	2,79	
Температура, °С	Давление, кг/см <sup>2</sup>							
	80	100	120	140	160	180	200	
10	3,06	3,28	3,52	3,75	—	—	—	
	60	3,00	3,21	3,44	3,66	3,90	4,19	
							4,57	

**Удельная теплоемкость газов**  
( $c_p, 10^3$  дж/кг·град при давлении 1 атм)

Температура, °C	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	При температуре	$r, 10^3$ дж/кг
Бензин . . . . .	50—120 °C	230—314
Воздух (20% O <sub>2</sub> ) . . . . .	—	213
Глицерин . . . . .	100 °C	828
Керосин . . . . .	160—230 °C	210—230
Кислота азотная . . . . .	—	482
»    серная . . . . .	—	512
Нафталин . . . . .	220 °C	316
Фреон-11 (CFCl <sub>3</sub> ) . . . . .	0 °C	189
Фреон-12 (CFCl <sub>2</sub> ) . . . . .	0 °C	155
Хлороформ . . . . .	61,2 °C	247

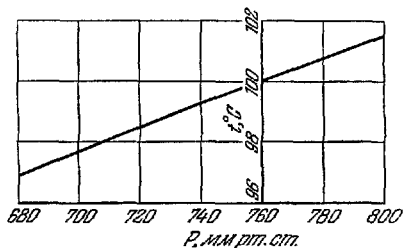


Рис. 22. Температура кипения обычной воды в зависимости от атмосферного давления.

Таблица 33

Удельная теплота парообразования при различных температурах  
( $r$ ,  $10^4$  дж/кг)

$t$ , °С	Спирты			Этиловый эфир	Уксусная кислота	Бензол
	метиловый	этиловый	пропиловый			
0	122	92,7	—	38,8	—	—
20	119	92,5	—	36,7	35,2	—
40	116	92,0	—	34,7	36,5	—
60	113	89,4	—	32,9	37,6	—
80	109	86,6	72,6	30,8	38,4	40,1
100	103	82,7	68,8	28,7	38,7	38,3
120	97,4	77,3	64,2	26,1	39,6	36,3
140	90,6	71,7	59,8	23,4	38,5	34,7
160	83,1	65,8	54,1	19,3	37,6	33,1
180	74,3	58,4	48,8	13,4	36,8	31,3
200	68,8	48,7	42,9	—	35,8	28,8
220	47,2	37,0	35,8	—	34,4	26,1
240	—	16,9	26,6	—	32,8	22,7
260	—	—	14,1	—	30,3	18,4
280	—	—	—	—	26,6	11,5

Таблица 34

Удельная теплота парообразования углекислоты при различных температурах

Температура, °С	$r$ , $10^3$ дж/кг	Температура, °С	$r$ , $10^3$ дж/кг
—50	338	0	237
—40	320	20	155
—30	304	30	63
—10	262	31,1	0,0

Таблица 35

Температура плавления  $T_{пл}$  в тройной точке, теплота плавления  $\lambda$ , температура кипения  $T_{кп}$  при нормальном давлении и теплота парообразования  $r$  охлажденных газов

Ожиженный газ	$T_{пл}, ^\circ\text{К}$	$\lambda$ , дж/г·моль	$T_{кп}, ^\circ\text{К}$	$r$ , дж/г·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 5 ат)	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 15 °С $\rho$ , $10^3 \text{ кг/м}^3$	Содержание NaCl, кг на 100 кг воды	Температура отвердевания, °С	Температура кипения, °С
1,01	1,5	—0,9	100,2
1,02	3,0	—1,8	100,4
1,03	4,5	—2,6	100,6
1,04	5,9	—3,5	100,8
1,05	7,5	—4,4	101,2
1,06	9,0	—5,4	101,4
1,07	10,6	—6,4	101,7
1,08	12,3	—7,5	102,0
1,09	14,0	—8,6	102,3
1,10	15,7	—9,8	102,7
1,11	17,5	—11,0	103,1
1,12	19,3	—12,2	103,5
1,13	21,2	—13,6	103,9
1,14	23,1	—15,1	104,4
1,15	25,0	—16,0	104,9
1,16	26,9	—18,2	105,4
1,17	29,0	—20,0	105,9
1,75	30,1	—21,2	106,2

Таблица 37

**Максимальные температуры кипения  
водных растворов солей при нормальном давлении**

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

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

Таблица 38

**Свойства обычной и тяжелой воды**

	$t_{пл}$ , °C	Температура максимальной плотности	$t_{кп}$ , °C	Критическая температура, °C	Критическое давление, атм	Плотность в крит. сост. $\rho$ , 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>	Наибольшая плотность $\rho$ , 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>
Вода .....	0	3,98	100	374,15	225,65	0,315	1
Тяжелая вода .....	3,82	11,23	101,43	371,5	218	0,363	1,106



## Критические параметры

Вещество	$t_{кр}, ^\circ\text{C}$	$P_{кр}, \text{атм}$	$\rho_{кр}, 10^3 \text{ кг/м}^3$
Азот .....	-147,1	33,5	0,311
Ацетон .....	235	47	0,268
Бензол .....	288,6	47,7	0,304
Вода .....	374,15	225,65	0,315
Водород .....	-239,9	12,8	0,031
Гелий .....	-267,9	2,26	0,069
Кислород .....	-118,8	49,7	0,430
Кислота уксусная .....	321,6	57,2	0,351
Метан .....	-82,5	45,8	0,162
Нафталин .....	468,2	39,2	—
Спирт метиловый .....	240	78,7	0,272
Спирт пропиловый .....	263,7	49,95	0,273
Спирт этиловый .....	243,1	63,1	0,276
Толуол .....	320,6	41,6	0,292
Углекислота .....	31,1	73	0,460

Таблица 40

Температура и давление для тройных точек  
некоторых веществ

Вещество	$T, ^\circ\text{K}$	$10^5 P, \text{н/м}^2$	Вещество	$T, ^\circ\text{K}$	$10^5 P, \text{н/м}^2$
Азот .....	63,15	0,1253	Вода .....	273,16	0,0061
Кислород ..	54,33	0,00152	Аммиак ...	195,5	0,0606
Неон .....	24,56	—	Углекислота	216	5,18
Параводород	13,81	0,0704			

Таблица 41

## Свойства насыщенного водяного пара

Давление, $\text{кг/см}^2$	Температура, $^\circ\text{C}$	Удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$	Удельная теплота паро- образования $r, 10^3 \text{ дж/кг}$
0,006	0	207	2500
0,02	17,2	63,3	2457
0,1	45,4	14,96	2388
0,2	59,7	7,8	2360
0,4	75,4	4,071	2322
0,6	85,45	2,785	2297

Таблица 41 (продолжение)

Давление, кг/см <sup>2</sup>	Температура, °С	Удельный объем, м <sup>3</sup> /кг	Удельная теплота паро- образования г, 10 <sup>3</sup> дж/кг
0,8	93,0	2,127	2278
0,9	96,2	1,905	2269
1	99,1	1,726	2262
1,0333	100	1,674	2260
1,23	105	1,42	2242
1,8	116,3	0,996	2215
2	119,6	0,902	2206
3	132,9	0,617	2168
4	142,9	0,4708	2137
5	151,1	0,3818	2111
6	158,1	0,3214	2088
7	164,2	0,2778	2067
8	169,6	0,2448	2048
9	174,5	0,2189	2031
10	179,0	0,1980	2014
12	187,1	0,1663	1984
14	194,1	0,1434	1956
16	200,4	0,1261	1930
18	206,2	0,1125	1907
20	211,4	0,1015	1882
30	232,8	0,0679	1790
40	249,2	0,0506	1712
56,1	270	0,0356	1605
75,9	290	0,0255	1480
101	310	0,0183	1320
131	330	0,0130	1140
169	350	0,00881	893
215	370	0,00493	440
225,2	374	0,00347	113
225,65	374,15	0,00326	0

Таблица 42

Коэффициент объемного расширения жидкостей  
(для температур около 18 °С)

Вещество	$\beta$ , 10 <sup>-4</sup> град <sup>-1</sup>	Вещество	$\beta$ , 10 <sup>-4</sup> град <sup>-1</sup>
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 .....	9,40
» » 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		

**Коэффициент линейного расширения твердых тел  
(для температур около 20 °С)**

Вещество	$\alpha, 10^{-6}$ <i>град</i> <sup>-1</sup>	Вещество	$\alpha, 10^{-6}$ <i>град</i> <sup>-1</sup>
Алмаз .....	0,91	Лед (от -10° до 0 °С) .....	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-ирридиевый сплав .....	8,7
Дерево поперек волокон .....	50—60	Свинец .....	28,3
Дюралюминий .....	22,6	Сталь-3 (марка 20) .	11,9
Железо кованое .....	11,9	Сталь нержавеющая	11,0
»    литое .....	10,2	обычное .....	8,5
Золото .....	14,5	»    пирекс .....	3
Инвар (36,1%) .....	0,9	Углерод (графит) ...	7,9
Ирридий .....	6,5	Фарфор .....	3,0
Кварц (плавленный) .	0,5	Цемент и бетон .....	12,0
Кирпичная кладка .	5,5	Цинк .....	30,0
Константан .....	17,0	Чугун .....	10,4
Латунь .....	18,9	Эбонит .....	70

**Коэффициент линейного расширения  
при различных температурах  
( $\alpha, 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>)**

Материал	Температура, °К				
	0	40	100	200	300
Алюминий .....	0	1	11	19,5	23
Медь .....	0	1	9,5	15	17,5
Сталь малоугле- родистая .....	0	0,5	5	10	11,5
Сталь нержаве- ющая .....	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 °С)**

Вещество	$10^{-3} \alpha, \text{н/м}$	Вещество	$10^{-3} \alpha, \text{н/м}$
Азотная кислота ..	59,4	Нефть .....	26
Анилин .....	42,9	Нитробензол ....	43,9
Ацетон .....	23,7	Серная кислота	
Бензол .....	29,0	85% .....	57,4
Вода .....	72,8	Спирт метиловый	22,6
Глицерин .....	59,4	» пропиловый	23,8
Керосин .....	28,9(0 °С)	» этиловый ...	22,8
Масло касторовое ..	36,4(18 °С)	Толуол .....	28,5
» оливковое ..	33,06(18 °С)	Уксусная кислота	27,8
		Эфир этиловый ...	16,9

Таблица 46

**Поверхностное натяжение воды и этилового спирта  
при различных температурах  
( $\alpha, 10^{-3} \text{н/м}$ )**

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

Таблица 47

## Поверхностное натяжение металлов в жидком состоянии

Металл	Температура, °С	$\alpha$ , $10^{-3}$ н/м
Алюминий	750	520
Висмут	300	376
	400	370
	500	363
Каллий (в атм. $\text{CO}_2$ )	64	410
Натрий	100	206,4
	250	199,5
Олово	300	526
	400	518
	500	510
Ртуть	20	465
	112	454
	200	436
	300	405
	354	394
Свинец	350	442
	450	438
	500	431

Таблица 48

## Коэффициент теплопроводности материалов

Вещество	Влажность весо- вая, %	$\lambda$ , вт/м·град
Металлы		
Алюминий .....	—	209,3
Железо .....	—	74,4
Золото .....	—	312,8
Латунь .....	—	85,5
Медь .....	—	389,6

Таблица 48 (продолжение)

Вещество	Влажность весовая, %	$\lambda$ , вт/м-град
Ртуть .....	—	29,1
Серебро .....	—	418,7
Сталь .....	—	45,4
Чугун .....	—	62,8
<b>Термоизоляционные материалы</b>		
Асбестовая бумага	Воздушно-сухая	0,177—0,134
Асбестовый картон	Воздушно-сухой	0,157
Войлок асбестовый	Воздушно-сухой	0,052—0,093
Войлок шерстяной	Воздушно-сухой	0,047—0,058
Вата стеклянная ..	—	0,035—0,081
Газостекло (пено- стекло) .....	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
Торфоплиты .....	—	0,047—0,07
Шлак котельный ..	Воздушно-сухой	0,233—0,372
<b>Другие материалы</b>		
Бакелитовый лак ..	—	0,29
Бетон с каменным щебнем .....	8	1,28
Бумага обыкновенная ....	Воздушно-сухая	0,14
Винипласт .....	—	0,126
Гравий .....	Воздушно-сухой	0,36
Граиит .....	—	3,14
Глина .....	15—20	0,7—0,93
Дуб вдоль волокон	6—8	0,35—0,43
Дуб поперек воло- кон .....	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 .....	Воздушно-сухая	0,14—0,16
Лед .....	—	2,21
Пробковые плиты ..	0	0,042—0,054
Снег свежесвыпавший	—	0,105
Снег уплотненный	—	0,35
Снег начавший таять	—	0,64
Сосна вдоль волокон	8	0,35—0,41
» поперек волокон	8	0,14—0,16
Стекло (обычно- венное) .....	—	0,74
Фторопласт-3 .....	—	0,058
Фторопласт-4 .....	—	0,233
Шлакобетон .....	13	0,698
Штукатурка .....	6—8	0,791

Таблица 49

**Коэффициент теплопроводности асбеста  
при различных температурах  
( $\rho = 576 \text{ кг/м}^3$ )**

$t, ^\circ\text{C}$	0	50	100	150
$\lambda, \text{вт/м}\cdot\text{град}$	0,15	0,18	0,195	0,205

Таблица 50

**Коэффициент теплопроводности пенобетона  
при различных температурах  
( $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$ )**

$t, ^\circ\text{C}$	-18	65	90	126	160
$\lambda, \text{вт/м}\cdot\text{град}$	0,11	0,11	0,125	0,17	0,175

Таблица 51

**Коэффициент теплопроводности жидкостей  
при различных температурах  
(по линии насыщения,  $\text{вт/м}\cdot\text{град}$ )**

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
Масло касторовое .....	0,184	0,177	0,172
Спирт метиловый ....	0,214	0,207	—
Спирт этиловый .....	0,188	0,177	—
Толуол .....	0,142	0,129	0,119

Таблица 52

**Коэффициент теплопроводности газов  
при нормальном давлении**

Вещество	Температура, °С	$\lambda, 10^{-4}$ вт/м·град
Азот .....	15	251
Аргон .....	41	187
Водород .....	15	1754
Воздух .....	20	257
Гелий .....	43	1558
Кислород .....	20	262
Метан .....	0	307
Углекислый газ .....	20	162

Таблица 53

**Термические коэффициенты давления газов**

Газ	Азот	Ам- ми- ак	Во- до- род	Воз- дух без СО <sub>2</sub>	Ге- лий	Ки- сло- род	Уг- ле- кис- лый газ
$\alpha, 10^{-3}$ град <sup>-1</sup>	3,674	3,802	3,662	3,674	3,660	3,674	3,726

Таблица 54

**Стандартная атмосфера**

(p<sub>0</sub> и  $\rho_0$  — давление и плотность воздуха при нормальных условиях)

Вы- сота, м	Давле- ние, p/p <sub>0</sub>	Плот- ность, $\rho/\rho_0$	Темпе- ратура, °С	Вы- сота, м	Давле- ние p/p <sub>0</sub>	Плот- ность, $\rho/\rho_0$	Тем- пера- тура, °С
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
4000	0,608	0,669	-11	10 000	0,261	0,337	-50
5000	0,533	0,601	-17,5				



**Коэффициент диффузии газов и паров в воздухе  
(при 0 °С и давлении 760 мм рт. ст.)**

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

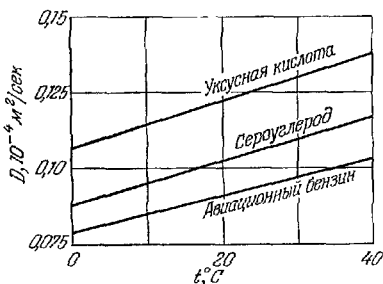


Рис. 23. Зависимость коэффициента диффузии газов и паров в воздухе от температуры.

**Газокинетические диаметры молекул**

Вещество	Диаметр $d, 10^{-10} \text{ м}$	Вещество	Диаметр $d, 10^{-10} \text{ м}$
Азот .....	3,7	Метан .....	4,44
Аргон .....	3,6	Неон .....	3,54
Водород .....	2,7	Окись углерода ..	3,70
Гелий .....	2,15	Ртуть .....	3,0
Кислород .....	3,56	Углекислый газ ..	4,54
Криптон .....	3,14	Хлор .....	5,44
Ксенон .....	4,0		

Таблица 57

## Коэффициент диффузии водных растворов в чистой воде

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	Концентрация раствора	$D, 10^{-9} \text{ м}^2/\text{сек}$
Аммиак .....	12	1,0	1,64
	4	3,55	1,23
		3,75	0,52
Глицерин .....	10,14	0,125	0,412
		0,875	0,396
		1,75	0,347
Калий хлористый ....	17,5	0,02	1,57
	18	1,0	1,54
		3,8	1,55
Кальций хлористый	10	0,27	0,79
		2,0	0,79
Кислота азотная .....	19,5	0,10	2,4
		0,90	2,62
		3,90	2,85
Кислота серная .....	18	0,35	1,53
		2,85	1,85
		4,85	2,20
Кислота соляная .....	19,2	0,10	2,56
		0,90	3,04
		3,20	4,5
Медный купорос .....	17	0,10	0,45
		0,50	0,34
		1,95	0,27
Натрий хлористый ...	15	0,02	1,09
		0,1	1,09
		0,9	1,12
		3,9	1,18
Сахар тростниковый ..	18,5	0,30	0,36
		0,97	0,28
		1,97	0,50
Серебро азотнокислое	12	0,02	1,19
		0,10	1,13
		0,90	1,02
		3,9	0,61
Спирт этиловый .....	11	0,05	0,84
		0,25	0,8
		0,75	0,72
		3,75	0,52

## Константы Ван дер Ваальса

Вещество	$\frac{\text{дж} \cdot \text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{моль}^2}$	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{моль}}$	Вещество	$\frac{\text{дж} \cdot \text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{моль}^2}$	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{моль}}$
	$a, 10^5$	$b, 10^{-3}$		$a, 10^5$	$b, 10^{-3}$
Азот .....	1,41	39,2	Ксенон .....	4,15	51
Аммиак ....	4,22	37,2	Метан .....	2,28	27,1
Аргон .....	1,36	32,3	Неон .....	0,22	17,1
Ацетон .....	14,1	98,5	Пропан .....	0,88	84,5
Бензол .....	18,2	115	Ртуть .....	8,2	16,7
Вода .....	5,55	30,5	Спирт метиловый	15,2	67
Водород ....	2,47	26,6	> пропиловый	15	101
Гелий .....	0,035	23,8	> этиловый	12,2	840
Кислород ...	1,38	31,8	Эфир этиловый	17,5	134
Криптон ...	2,34	39,9			

Таблица 59

## Удельная теплота сгорания топлива

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

Топливо	$W_B, 10^8 \text{ дж/кг}$	$W_H, 10^8 \text{ дж/кг}$
Твердое		
Антрацит (марки «А») .....	320—340	190—270
Бурые угли .....	250—290	100—170
Горючие сланцы .....	270—330	63—84
Динамит 75% .....	—	54
Древесный уголь (сухой) .....	300	—
Дрова .....	190	100
Каменные угли длиннопламенные (Д) .....	310—320	210—240
Порох .....	—	30—31
Торф .....	220—250	84—110

Таблица 59 (продолжение)

Топливо	$W_B, 10^8 \text{ дж/кг}$	$W_H, 10^8 \text{ дж/кг}$
Жидкое		
Бензин высшего качества .....	—	441
» III сорта .....	—	436
Дизельное автотракторное горючее .....	—	427
Керосин торговый .....	—	430
Мазут .....	—	390—410
Этиловый спирт .....	—	272
Газообразное		
Водород .....	—	110
Коксогаз .....	—	160—190
Окись углерода .....	—	130
Природный газ .....	—	360
Светильный газ .....	—	175—210

Таблица 60

**Психрометрическая таблица относительной  
влажности воздуха**

Показа- ния су- хого тер- мометра, °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

*Колебательными движениями (или колебаниями)* в физике и технике называют такие виды движений (или изменения состояния), которые обладают какой-либо степенью повторяемости.

Если колебание характеризуется изменением только механических величин (смещения, скорости, плотности, ускорения и т. п.), то оно называется *механическим*.

*Периодическим колебанием* называют колебательное движение, в котором 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  $\nu$  измеряется в герцах (или циклах в секунду); 1 герц (*гц*) есть частота такого периодического колебания, период которого равен 1 сек.

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

$$x = A \sin(\omega t + \varphi). \quad (3.1)$$

Положительная величина  $A$  в (3.1) называется *амплитудой* гармонического колебания,  $(\omega t + \varphi)$  — *фазой* гармонического колебания,  $\varphi$  — *начальной фазой*,  $\omega$  — *циклической (или круговой) частотой*:

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

Фаза гармонического колебания определяет значение изменяющейся величины в данный момент времени. Фаза измеряется в угловых единицах (радианах или градусах). Циклическая частота измеряется в радианах в секунду (*рад/сек*).

Примером гармонического колебания может служить движение проекции шарика, равномерно вращающегося по окружности с угловой скоростью  $\omega$  (рис. 24). Для шариков 1 и 2 смещения проекций соответственно равны:

$$x_1 = R \sin \alpha = R \sin \omega t,$$

$$x_2 = R \sin (\alpha + \varphi) = R \sin (\omega t + \varphi).$$

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 (рис. 24) при любом выборе начала отсчета времени равен  $\varphi$ .

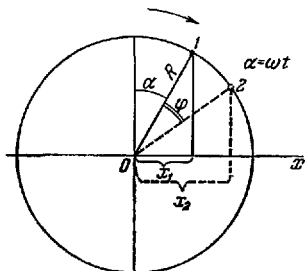


Рис. 24. Гармонические колебания проекций шариков, равномерно вращающихся по окружности.

Гармонические колебания тела возникают при воздействии на него квазиупругой силы. *Квазиупругими силами* называют 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

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

где  $k$  — коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом квазиупругой силы*,  $x$  — смещение; знак минус указывает на то, что сила направлена к положению равновесия.

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 силы тяжести.

Колебания грузика, подвешенного на пружине, можно считать гармоническими, если амплитуда колебаний лежит в пределах выполнимости закона Гука (см. стр. 48), а силы трения достаточно малы.

Период колебаний грузика:

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

где  $m$  — масса груза,  $k$  — коэффициент упругости пружины, численно равный силе, необходимой для растяжения пружины на 1 см \*\*).

*Крутильный маятник* представляет собой тело, совершающее вращательно-колебательное движение под действием пружины (например, балансир в наручных часах и будильниках). При определенных условиях (амплитуда

---

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

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

колебаний достаточно мала и, кроме того, достаточно малы силы трения) эти колебания также можно считать гармоническими. Период колебаний крутильного маятника:

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

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

Период колебаний физического маятника:

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

где  $J$  — момент инерции тела относительно оси, проходящей через точку подвеса,  $a$  — расстояние от центра тяжести до этой оси,  $m$  — масса тела,  $g$  — ускорение силы тяжести.

Величина  $l = J/mga$  — 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

Колебания, которые будет совершать тело, если его каким-либо образом вывести из состояния равновесия и затем предоставить самому себе, называют *свободными* (или *собственными*) *колебаниями*.

Если собственные 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:  $F_{\text{тр}} = -rv^*$ ), где  $v$  — скорость), называют *затухающими колебаниями*. При затухающих колебаниях смещение

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

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

$$\delta = r/2m \quad (3.9)$$

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



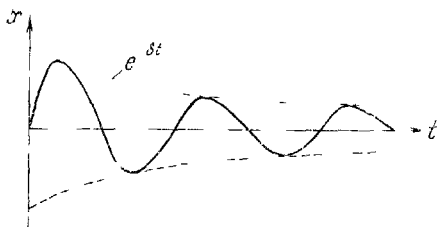


Рис. 25 затухающие колебания

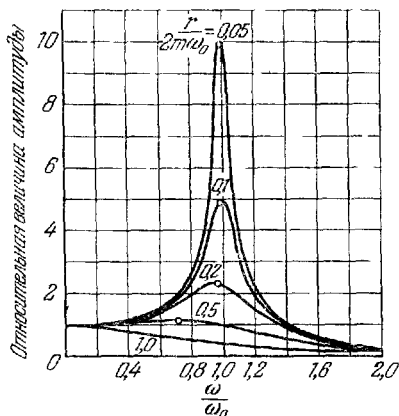


Рис. 26. Резонансные кривые при различных затуханиях. По оси ординат отложены относительные значения амплитуды смещения  $\frac{B}{F_0/k}$ , где  $B$  — амплитуда смещения,  $F_0/k$  — статическое смещение, равное тому смещению, которое вызвала бы постоянная сила с величиной, равной амплитуде действующей силы. По оси абсцисс отложены относительные изменения частоты  $\omega/\omega_0$ , где  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$  — частота собственных колебаний при отсутствии трения. Кривые относятся к различным значениям  $r/2m\omega_0$ . Кружочки указывают положение максимального значения амплитуды смещения.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{r^2}{4m^2}}, \quad (3.10)$$

где  $r$  — коэффициент сопротивления,  $m$  — масса тела,  $k$  — коэффициент квазиупругой силы.

Затухающие колебания изображаются кривой, показанной на рис. 25.

Колебания тела, вызванные воздействием на тело периодической внешней силы, называются *вынужденными*.

Амплитуда вынужденных колебаний резко возрастает, если период синусоидальной внешней силы приближается к периоду собственных колебаний тела (рис. 26). Это явление называют *резонансом*.

Если силы трения велики (большое затухание), то резонанс выражен слабо (см. рис. 26) или совсем не проявляется (например, при  $r/2m\omega_0 > 1$ ).

Незатухающие колебания, которые поддерживаются воздействием внешних сил на систему в определенные моменты времени, определяемые самой системой, называются *автоколебаниями*.

При автоколебаниях сама система управляет внешним воздействием (например, маятник 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.

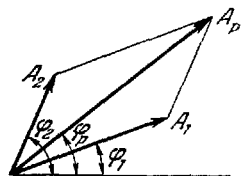


Рис. 27. Сложение амплитуд смещений гармонических колебаний с одинаковым направлением.

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

$$x_1 = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1),$$

$$x_2 = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2),$$

амплитуда результирующего смещения  $A_P$  находится по правилу параллелограмма, как показано на рис. 27. Результирующее смещение для этого случая:

$$x_P = A_P \sin(\omega t + \varphi_P),$$

где

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

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

$$x = A_1 \sin \omega t,$$
$$y = A_2 \sin (\omega t + \varphi),$$

и траектория движения описывается уравнением эллипса (рис. 28)

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1A_2} \cos \varphi = \sin^2 \varphi.$$

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

*Волнами* называют процесс распространения любого вида возмущений (т. е. изменений состояния).

Например, при ударе по одному концу металлического стержня на этом конце образуется местное сжатие, которое затем распространяется с определенной скоростью вдоль стержня.

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

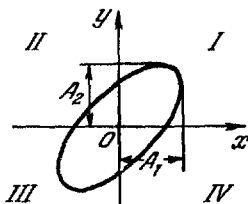


Рис. 28. Сложение взаимно перпендикулярных гармонических колебаний.

Если при распространении волн величины, характеризующие состояние среды (например, плотность, смещение частиц, давление и т. п.) изменяются в любой точке пространства по синусоидальному закону, то такие волны называются *синусоидальными*.

Важной характеристикой синусоидальных волн является длина волны. *Длина волны  $\lambda$*  — это расстояние, на которое распространяется волна в течение одного периода:

$$\lambda = vT, \quad (3.11)$$

$$v = \frac{v}{\lambda}, \quad (3.12)$$

где  $v$  — скорость распространения волн,  $\nu$  — частота,  $T$  — период.

Математическое выражение вида

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

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

В этом уравнении  $A$  — амплитуда волны,  $\omega$  — циклическая 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*; выражение  $\omega t - kr$  называется *фазой волны*.

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

По форме волновых поверхностей различают волны *плоские* (плоские волновые поверхности), *цилиндрические* (цилиндрические волновые поверхности) и *сферические* (сферические волновые поверхности).

Уравнение цилиндрических волн:

$$x = \frac{A}{\sqrt{r}} \sin (\omega t - kr);$$

сферических волн:

$$x = \frac{A}{r} \sin (\omega t - kr).$$

---

\*) Под  $x$  здесь можно подразумевать любой параметр, характеризующий состояние среды (например, величину давления, температуру и т. д.).

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

$$v_{пс} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (3.13)$$

где  $E$  — модуль Юнга,  $\rho$  — плотность.

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

$$v_{п\infty} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (3.14)$$

где  $\rho$  — плотность вещества,  $E$  — модуль Юнга,  $\mu$  — коэффициент Пуассона (см. табл. 17).

Скорость продольных волн в тонких пластинках:

$$v_{пп} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}. \quad (3.15)$$

Скорость продольных волн в жидкостях:

$$v_{ж} = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho\beta_{из}}}, \quad (3.16)$$

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

Скорость поперечных (сдвиговых) волн:

$$v_c = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (3.17)$$

где  $G$  — модуль сдвига (см. стр. 49).

\*) Сжимаемость — см. стр. 49; изотермическая сжимаемость отвечает процессу сжатия, происходящему при постоянной температуре.

Скорость звуковых волн в газах:

$$v_{\Gamma} = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}, \quad (3.18)$$

где  $\gamma = c_p/c_v$ ,  $p$  — давление.

Формула (3.18) применима к идеальным газам, причем в этом случае ее можно записать в виде ( $R$  и  $T$  см. на стр. 67)

$$v_{\Gamma} = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu'}}, \quad (3.19)$$

$\mu'$  — молекулярный вес.

Волны на поверхности жидкости не являются ни поперечными, ни продольными. Движение частиц воды в поверхностных волнах более сложное (рис. 29).

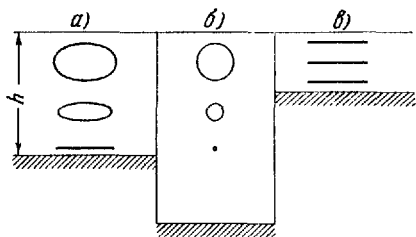


Рис. 29. Траектории частиц воды при распространении поверхностных волн; а) в неглубокой воде; б) в глубокой воде (отношение  $2\pi h/\lambda$  очень велико); в) в мелкой воде (отношение  $2\pi h/\lambda$  очень мало).

Скорость поверхностных волн \*):

$$v_{\text{пов}} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi\alpha}{\lambda\rho}}, \quad (3.20)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести,  $\lambda$  — длина волны,  $\alpha$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $\rho$  — плотность.

Формулу (3.20) можно применять, если глубина жидкости не меньше  $0,5\lambda$ .

\*) Формула (3.20) применима для волн на границе раздела жидкость — газ, когда плотность жидкости много больше плотности газа.

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

$$v_{\text{пов}} = \sqrt{gh}. \quad (3.21)$$

При распространении волн переносится энергия, но частицы среды при этом не перемещаются по направлению распространения волн, а лишь совершают колебательное движение около положений равновесия (если волны имеют малую амплитуду и распространяются в невязкой среде). *Интенсивностью волны* называют величину, численно равную средней энергии, переносимой волной за 1 сек через  $1 \text{ см}^2$  волиевой поверхности.

Интенсивность измеряется в  $\text{вт/см}^2$  или  $\text{эрг/см}^2 \cdot \text{сек}$ .

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 циклической частотой  $\omega$  имеет величину  $x_0$ , то амплитуда колебательной скорости будет иметь значение

$$u_0 = \omega x_0, \quad (3.22)$$

амплитуда ускорения

$$a_0 = \omega^2 x_0, \quad (3.23)$$

интенсивность

$$I = \frac{1}{2} \rho v u_0^2, \quad (3.24)$$

где  $\rho$  — плотность среды,  $v$  — скорость волны.

## 6. Звук

*Звук* называют механические колебания в упругих средах и телах (твердых, жидких и газообразных), частоты которых лежат в пределах от  $17$ — $20 \text{ гц}$  до  $20\,000 \text{ гц}$ . Эти частоты механических колебаний способно воспринимать человеческое ухо. Механические колебания с частотами ниже  $17 \text{ гц}$  называют *инфразвуками*, а свыше  $20\,000 \text{ гц}$  — *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  $\Delta p_0$  связана с максимальной колебательной скоростью соотношением

$$\Delta p_0 = \rho v u_0. \quad (3.25)$$

Интенсивность плоских звуковых волн уменьшается вследствие поглощения в среде по закону

$$I_x = I_0 e^{-2\alpha x}, \quad (3.26)$$

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

Величина  $\alpha$ , 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 такого звука называют *порогом болевого ощущения*.

Изменение интенсивности принято измерять в единицах, называемых *децибелами*.

Число децибел равно десятичному логарифму отношения интенсивностей, умноженному на 10, т. е.  $10 \lg (I/I_0)$ .

Обычно в акустике за  $I_0$  принимается интенсивность  $10^{-9}$  эрг/см<sup>2</sup>·сек, примерно равная интенсивности на пороге слышимости при 1000 гц.



# ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Таблица 61

## Скорость звука в чистых жидкостях и маслах

Жидкость	$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м/сек}$	$\alpha, \text{м/сек}\cdot\text{град}$
Чистые жидкости			
Анилин .....	20	1656	-4,6
Ацетон .....	20	1192	-5,5
Бензол .....	20	1326	-5,2
Вода морская .....	17	1510—1550	—
Вода обычная .....	25	1497	2,5
Глицерин .....	20	1923	-1,8
Керосин .....	34	1295	—
Ртуть .....	20	1451	-0,46
Спирт метиловый .....	20	1123	-3,3
Спирт этиловый .....	20	1180	-3,6
Масла			
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,  $\alpha$  — температурный коэффициент, указанный для чистых жидкостей в последней графе,  $t$  — температура, при которой рассчитывается скорость,  $t_0$  — указанная в таблице температура.

## Скорость звука в твердых материалах

(при 20 °С)

( $v_{\text{ПС}}$  — скорость продольных волн в стержнях  $v_{\text{П}}^{\infty}$  — скорость продольных волн в неограниченной среде,  $v_{\text{С}}$  — скорость поперечных (сдвиговых) волн в неограниченной среде.)

Материал	$v_{\text{ПС}}$ , м/сек	$v_{\text{П}}^{\infty}$ , м/сек	$v_{\text{С}}$ , м/сек
Алюминий .....	5080	6260	3080
Гипс .....	—	4970	2370
Железо .....	5170	5850	3230
Известняк .....	—	6130	3200
Каучук .....	—	1479	—
Латунь .....	3490	4430	2123
Лед .....	3280	3980	1990
Медь .....	3710	4700	2260
Мрамор .....	—	6150	3260
Никель .....	4785	5630	2960
Олово .....	2730	3320	1670
Песчаник .....	—	3700—4900	—
Плексиглас .....	—	2670	1121
Полистирол .....	—	2350	1120
Пробка .....	500	—	—
Резина .....	46	1040	27
Свинец .....	2640	3600	1590
Слюда .....	—	7760	2160
Сталь углеродистая	5050	6100	3300
Стекло кварцевое .	5370	5570	3515
› кронглас .	5300	5660	3420
› легкий флинт	4550	4800	2950
› тяжелый крон	4710	5260	2960
› флинт	3490	3760	2220
Фарфор .....	4884	5340	3120
Цинк .....	3810	4170	2410
Шифер .....	—	5870	2800
Эбонит .....	1570	2405	—

### Свойства Земли на разных глубинах $H$ и скорость сейсмических волн

Механические волны, распространяющиеся в толще земной коры, называют *сейсмическими*.

Сейсмические волны могут быть как продольными  $v_p$  (волны сжатия), так и поперечными  $v_c$  (волны сдвига); также указаны плотность —  $\rho$ , давление —  $p$ , ускорение —  $g$ .

$H, км$	$\rho,$ $10^3 кг/м^3$	$v_p,$ $10^3 м/сек$	$v_c,$ $10^3 м/сек$	$p,$ $10^{11} н/м^2$	$g,$ $м/сек^2$
33	3,32	8,18	4,63	0,009	9,85
100	3,38	8,18	4,63	0,031	9,89
200	3,47	8,29	4,63	0,065	9,92
500	3,89	9,65	5,31	0,174	9,99
1000	4,68	11,42	6,36	0,392	9,95
2000	5,24	12,79	6,93	0,88	9,86
4000	10,8	9,51	—	2,40	8,00
5000	11,5	10,44	—	3,18	6,13

### Скорость звука в газах (при давлении 1 атм)

Газ	$t, ^\circ C$	$v, м/сек$	$\alpha, м/сек \cdot град$
Азот .....	0	334	0,6
Аммиак .....	0	415	—
Бензол (пар) .....	97	202	0,3
Водород .....	0	1284	2,2
Водяной пар .....	134	494	—
Воздух .....	0	331	0,59
Гелий .....	0	965	0,8
Кислород .....	0	316	0,56
Неон .....	0	435	0,8
Спирт метиловый .....	97	335	0,46
"  этиловый .....	97	269	0,4
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  $\alpha$  изменения скорости (см. примечание к 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.

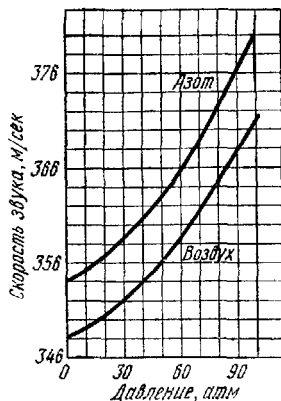


Рис. 30. Зависимость скорости звука в воздухе и азоте от давления. Приведенные зависимости относятся к температуре 20 °С и диапазону частот от 200 кГц до 500 кГц.

Таблица 65

### Шкала механических волн

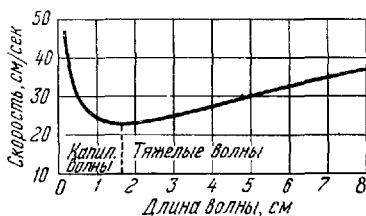
Частота, гц	Наименование	Способы возбуждения	Применения
0,5—20	Инфразвуки	Колебания воды в больших водоемах, биения сердца	Предсказание погоды, диагностика заболеваний сердца
20—2·10 <sup>4</sup>	Слышимые звуки	Голос человека и животных, музыкальные инструменты, свистки, сирены, громкоговорители и т. д.	Для связи и сигнализации, а также измерения расстояний (звукометрия)
2·10 <sup>4</sup> —10 <sup>10</sup>	Ультразвуки	Магнитострикционные и пьезоэлектрические излучатели, свисток 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 <sup>11</sup> и выше	Гиперзвуки	Тепловые колебания молекул	В научных исследованиях

## Сила звука и звуковое давление

Децибелы	$I, \text{вт/м}^2$	$\Delta p, \text{н/м}^2$	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. 31. 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. 31; соотношение (3.20)), если глубина жидкости достаточно велика ( $h > 0,5\lambda$ ).

### Уровни громкости звука при слуховом восприятии

На рис. 32 приведены кривые интенсивности звуков равной громкости. Верхняя кривая соответствует порогу

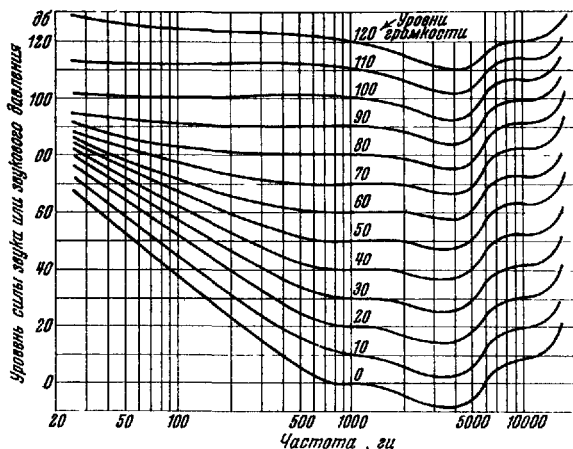


Рис. 32. Уровни громкости.

болевого ощущения, нижняя — порогу слышимости. Значения частоты отложены в логарифмическом масштабе.

### Смещение и ускорение частиц воды при прохождении звуковых волн различной интенсивности

На рис. 33 и 34 приводятся амплитудные значения смещения и ускорения, рассчитанные по соотношениям (3.22) и (3.23). Расчеты произведены для значения  $\rho v = 1,5 \cdot 10^5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ . Шкалы по обеим осям — логарифмические.

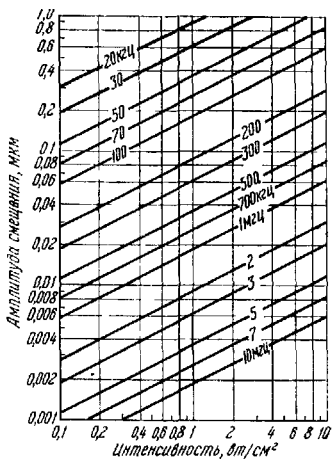


Рис. 33. Смещение частиц воды при распространении звуковых волн.

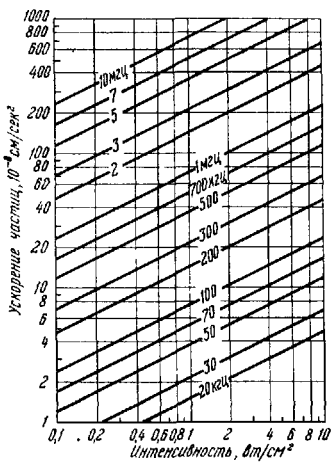


Рис. 34. Ускорения частиц воды при распространении звуковых волн.

Таблица 67

**Коэффициент отражения звуковых волн на границе  
раздела различных сред  
(при нормальном падении, в %)**

Коэффициент отражения равен отношению интенсивностей отраженного и проходящего звуков.

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 величины отношения толщины ее к длине волны.

Таблица 68

**Коэффициент поглощения звука в воздухе  
( $\alpha$ ,  $10^{-4}$  см<sup>-1</sup> при 20 °С)**

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 давлению, близким к нормальному.



Таблица 69

**Звукопоглощательная способность материалов**

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

Материал	Частота, <i>гц</i>					
	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 .....	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 (слой 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	<i>t</i> , °С	Диапазон частот <i>f</i> , Мгц	$10^{-17} \frac{\alpha}{f^2}$ , сек <sup>2</sup> /см
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
Эфир этиловый .....	25	10	140

Примечание. Указанные значения относятся к давлениям 1—20 ат. При этих значениях поглощение практически не зависит от давления.

Таблица 71

**Поглощение акустических волн в морской воде (при 15—20 °С)**

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

## ГЛАВА 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 ядра атома (см. стр. 215). Сумма положительных и отрицательных зарядов в атоме равна нулю; заряды распределяются таким образом, что атом в целом является нейтральным.

Процесс электризации заключается в том, что отрицательные и положительные заряды распределяются неравномерно между телами (например, при электризации трением или в гальваническом элементе, см. стр. 132) или между отдельными частями одного и того же тела (например, при электростатической индукции, см. стр. 157).

Электрические заряды не создаются и не исчезают; они могут перемещаться от одного тела к другому или смещаться внутри тела или молекул атомов (*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.

Величина любого заряда кратна (по абсолютной величине) заряду электрона. Заряд электрона имеет наимень-

шую величину; 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*) имеет следующий вид:

в системе СГСЭ

$$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon_a r^2}, \quad (4.1)$$

в системе СИ

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_a r^2}, \quad (4.2)$$

где  $F$  — сила взаимодействия,  $q_1$  и  $q_2$  — величины зарядов,  $\epsilon_a$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды,  $r$  — расстояние между точечными зарядами.

Численное значение  $\epsilon_a$  можно выразить в относительных единицах (по отношению к абсолютному значению диэлектрической проницаемости вакуума  $\epsilon_0$ ).

Величина  $\epsilon = \epsilon_a/\epsilon_0$  называется *относительной диэлектрической проницаемостью*; она показывает, во сколько раз взаимодействие между зарядами в безграничной однородной среде меньше, чем в вакууме;  $\epsilon = \epsilon_a/\epsilon_0$  часто называется просто диэлектрической проницаемостью.

Численное значение величины  $\epsilon_0$  и ее размерность зависят от выбора системы единиц; значение  $\epsilon$  от выбора системы единиц не зависит.

В системе СГСЭ  $\epsilon_0 = 1$  (эта величина является четвертой основной единицей); в системе СИ

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{\text{фарада}}{\text{метр}} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м} \quad (4.3)$$

(в этой системе  $\epsilon_0$  является производной величиной).

В системе СГСЭ за единицу заряда принимают величину такого заряда, который действует в вакууме на равный ему заряд, удаленный на 1 см, с силой в 1 дин. В системе СИ единицей заряда является кулон (к):

$$1 \text{ к} = 2,99793 \cdot 10^9 \text{ ед.зар. СГСЭ} \cong 3 \cdot 10^9 \text{ ед. зар. СГСЭ.}$$

Элементарный заряд  $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$  ед. зар. СГСЭ.

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:

$$E = \frac{F}{q}. \quad (4.4)$$

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

Все последующие формулы даны в системе СГСЭ и СИ. Напряженность электрического поля точечного заряда

$$E = \frac{q}{\epsilon r^2}, \quad E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}, \quad (4.5)$$

где  $r$  — расстояние от точки, в которой определяется напряженность, до точки, в которой помещен заряд  $q$ .

Напряженность электрического поля равномерно заряженной плоскости

$$E = \frac{2\pi\sigma}{\epsilon}, \quad E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon}, \quad (4.6)$$

где  $\sigma$  — величина заряда, приходящаяся на единицу поверхности.

Напряженность электрического поля равномерно заряженного шара

$$E = \frac{q}{\epsilon r^2}, \quad E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}. \quad (4.7)$$

Здесь  $r$  — расстояние от точки, в которой определяется напряженность, до центра шара.

Напряженность электрического поля заряженного цилиндра

$$E = \frac{q'}{\epsilon r}, \quad E = \frac{q'}{2\pi\epsilon_0\epsilon r}, \quad (4.8)$$

где  $q'$  — заряд, приходящийся на единицу длины цилиндра, а  $r$  — расстояние от точки, в которой определяется напряженность, до оси цилиндра.

Векторная величина  $D = \epsilon_a E$  называется *индукцией электрического поля*.

Линия, касательная в каждой точке которой совпадает с направлением вектора напряженности, называется *силовой линией* электрического поля. Расположение силовых линий в электрических полях различной структуры показано на рис. 35—37.

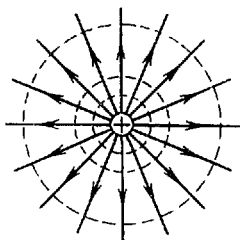
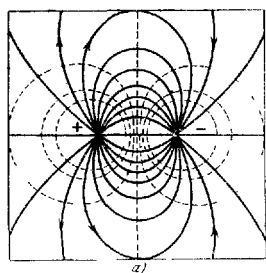
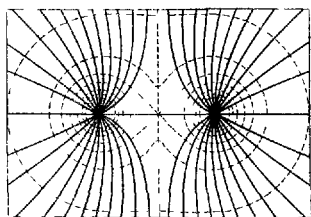


Рис. 35. Силовые линии поля точечной  $q$  электрического заряда.



*a)*



*б)*

Рис. 36. Силовые линии: *a)* поля двух разноименных точечных зарядов; *б)* поля двух одноименных точечных зарядов.

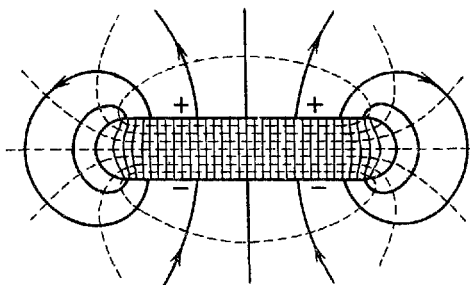


Рис. 37. Электрическое поле плоского конденсатора.

**Работа и напряжение.** При перемещении заряда электрическим полем 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 называется скалярная величина, численно равная потенциальной энергии единичного положительного заряда, помещенного в этой точке. Величина потенциала зависит от выбора точки с нулевым потенциалом; точка с нулевым потенциалом 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 равна

$$A = qU. \quad (4.9)$$

Напряжение в системе СИ выражается в вольтах ( $\text{в}$ ). 1 вольт — это такая разность потенциалов между двумя точками, когда при перемещении между ними положительного заряда в 1 кулон совершается работа в 1 джоуль. Поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал, называется эквипотенциальной поверхностью. На рис. 35—37 эквипотенциальные поверхности показаны пунктиром.

Силовые линии электростатического поля перпендикулярны к 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 \*)

$$E_A = -\frac{\Delta U}{\Delta l}, \quad (4.10)$$

где  $\Delta U$  — разность потенциалов между близко расположенными точками  $A$  и  $B$ ,  $\Delta l$  — расстояние по силовой ли-

---

\*) Точная формула:  $E = -\lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta l} = -\frac{dU}{dl}$ .

нки между эквипотенциальными поверхностями, проходящими через эти точки.

Величина  $-\Delta U/\Delta l$  называется *градиентом потенциала*.

Если электрическое поле однородно, т. е. напряженность во всех точках поля постоянна по величине и направлению (например, в плоском конденсаторе), то

$$E = -\frac{U}{l}, \quad (4.11)$$

где  $l$  — длина силовой линии. Напряженность поля в системе СИ измеряется в единицах вольт/метр (в/м). 1 в/м есть напряженность такого однородного поля, у которого разность потенциалов на концах 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 величины зарядов на обкладках равны по величине, но противоположны по знаку.

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

$$C = \frac{q}{U}. \quad (4.12)$$

Емкость в системе СИ измеряется в фарадах (ф). 1 фарада — емкость такого конденсатора, у которого при наличии заряда в 1 к (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:

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d}, \quad C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (4.13)$$

где  $S$  — величина поверхности одной пластины (меньшей, если они не равны),  $d$  — расстояние между пластинами,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость материала, находящегося между обкладками.

Емкость цилиндрического конденсатора и коаксиального кабеля:

$$C = \frac{\epsilon l}{2 \ln(b/a)}, \quad C = \frac{2\pi\epsilon_0 \epsilon l}{\ln(b/a)}, \quad (4.14)$$

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

Емкость сферического конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon}{\frac{1}{a} - \frac{1}{b}}, \quad C = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon}{\frac{1}{a} - \frac{1}{b}}, \quad (4.15)$$

где  $a$  и  $b$  — радиусы внутренней и внешней сфер.

Емкость двухпроводной линии:

$$C = \frac{\epsilon l}{4 \ln \frac{d}{a}}, \quad C = \frac{\pi\epsilon_0\epsilon l}{\ln \frac{d}{a}}, \quad (4.16)$$

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

$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n, \quad (4.17)$$

при последовательном соединении:

$$\frac{1}{C_{\text{пос}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (4.18)$$

Энергия, сосредоточенная в заряженном конденсаторе:

$$W = \frac{1}{2} CU^2. \quad (4.19)$$

В пространстве, где имеется электрическое поле, сосредоточена энергия. Величина этой энергии в единице объема (плотность энергии) для однородного поля может быть вычислена по формуле

$$w_{\text{э}} = \frac{\epsilon E^2}{8\pi}, \quad w_{\text{э}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2, \quad (4.20)$$

где  $E$  — величина напряженности поля \*).

**Проводники и изоляторы в электрическом поле.** В проводниках, помещенных в поле, наводятся (индуцируются) заряды противоположных знаков. Эти заряды рас-

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

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

Здесь  $\Delta W$  — энергия, сосредоточенная в объеме  $\Delta V$ , «сгущающемся» в точку. Если под  $E$  понимать напряженность именно в этой точке, то формула (4.20) оказывается справедливой и для произвольного поля.



полагаются 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. 36, а).

Вообще систему зарядов, внешнее поле которых аналогично полю двух разноименных точечных зарядов, равных по величине, называют *электрическим диполем* (рис. 38).

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

$$p_i = ql, \quad (4.21)$$

где  $l$  — расстояние между зарядами.

Направление вектора  $p_i$  принимается от  $-q$  к  $+q$ . Для оценки величины общей поляризации диэлектрика принимается *вектор поляризации*, равный векторной сумме всех электрических моментов диполей в единице объема:

$$P = \frac{1}{V} \sum p_i. \quad (4.22)$$

Векторы поляризации и индукции связаны соотношением:

$$D = E + 4\pi P \quad (\text{в системе СГСЭ}),$$

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (\text{в системе СИ}).$$

Молекулы некоторых диэлектриков даже в отсутствие электрического поля представляют собой диполи. Поляризация таких веществ 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 спонтанной поляризации называются *доменами* (см. также стр. 162). Электрические моменты доменов в отсутствие поля ориен-

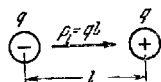


Рис. 38. Электрический диполь.

тированы 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  $\epsilon$  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 (Тк)*.

**Пьезоэлектрический эффект.** При механической деформации некоторых кристаллов в определенных направлениях на их поверхностях образуются электрические заряды противоположных знаков, а в самих кристаллах 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. Величина заряда, возникающего при пьезоэлектрическом эффекте, определяется соотношением

$$q = d_{11}F_x,$$

где  $F_x$  — величина силы, вызвавшей деформацию,  $d_{11}$  — постоянный для данного кристалла коэффициент, называемый *пьезоэлектрическим модулем* (см. табл. 77).

## 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. Величина заряда грозового облака равна 10—20 к (в отдельных случаях достигает 300 к).

2. Средняя поверхностная плотность заряда Земли равна  $-1,15 \cdot 10^{-9}$  к/м<sup>2</sup>. Заряд всей Земли —  $5,7 \cdot 10^5$  к.

## Электроизолирующие материалы

$\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость,  $E_{\text{пр}}$  — пробивная напряженность,  $d$  — плотность,  $\rho$  — удельное сопротивление.

Материал	$\epsilon$	$E_{\text{пр}}$ кв/мм	$d$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho$ , ом·см
Асбест .....	—	2	2,3—2,6	$2 \cdot 10^5$
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	$2 \cdot 10^9$
Канифоль .....	3,5	—	1,1	$5 \cdot 10^{16}$
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—	$5 \cdot 10^{15}$ — $5 \cdot 10^{17}$
			1,65	
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	$10^{13}$ — $10^{17}$
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 электро- технический	6,5	20	2,4	$3 \cdot 10^{14}$
Фибра сухая .....	2,5—8	2—6	1,1—1,94	$5 \cdot 10^9$
Фторопласт-3 .....	2,5—2,7	—	2,14	$1,2 \cdot 10^{18}$
Целлулоид .....	3—4	30	—	$2 \cdot 10^{10}$
Шелк натуральный	4—5	—	—	—
Шеллак .....	3,5	50	1,02	$1 \cdot 10^{16}$
Шифер .....	6—7	5—14	2,6—2,9	$10^9$
Эбоит (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 °С. Диэлектрическая проницаемость твердых тел мало изменяется с температурой, за исключением сегнетоэлектриков (см. рис. 39).

4. Об удельном сопротивлении см. стр. 128.

## Диэлектрическая проницаемость чистых жидкостей

Вещество	Температура						
	0 °С	10 °С	20 °С	25 °С	30 °С	40 °С	50 °С
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.

Диэлектрическая проницаемость газов  
(при 18 °С и нормальном давлении)

Вещество	$\epsilon$	Вещество	$\epsilon$
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.

## Пьезоэлектрические модули кристаллов

Кристалл	$d_{11}, 10^{-8}$ (в СГСЭ)	Кристалл	$d_{11}, 10^{-8}$ (в СГСЭ)
Кварц .....	6,9	Турмалин .....	5,78
Керамика титана- та барий .....	750	Фосфат аммония	148
Сегнетовая соль ..	7000	Фосфат калия	70
		Цинковая обманка	9,8

Примечания. 1. Некоторые кристаллы имеют различные модули в зависимости от направления деформации; в этом случае приводятся наибольшие значения.  
2. Для пересчета значения модуля из системы СГСЭ в систему СИ нужно умножить величину, указанную в таблице; на множитель  $3 \cdot 10^4$ . Единицей измерения модуля тогда будет к/н.

## Свойства сегнетоэлектрических кристаллов

(точка Кюри  $T_K$ , спонтанная поляризация  $P_s$ , диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ )

Кристалл	$T_K, ^\circ K$	$P_s$ (СГСЭ)	$\epsilon$
$NaK(C_4H_4O_6) \cdot 4H_2O$ (сегнетова соль)	297- 253	800	$\sim 9000$
$NaK(C_4H_2D_2O_6) \cdot 4D_2O$	308- 249	—	—
$LiNH_4(C_4H_4O_6) \cdot H_2O$	106	630	—
$KH_2PO_4$ (дигидрофосфат калия)	123	16 000	$\sim 10^5$
$KD_2PO_4$	218	18 000	—
$KH_2AsO_4$	96,5	—	—
$NH_4H_2PO_4$ (дигидрофосфат аммония)	$\sim 398$	—	90
$BaTiO_3$ (титанат бария)	391	48 000	$\sim 10^4$
$KNbO_3$ (ниобат калия)	708	78 000	—
$NaNbO_3$	913	—	—
$LiTiO_3$	—	70 000	—

Примечания. 1. Для некоторых сегнетоэлектриков их свойства проявляются в определенной области температур. В этих случаях указываются верхнее и нижнее значения температуры Кюри.

2. Приведены максимальные значения диэлектрической проницаемости.

3. Для пересчета значений спонтанной поляризации в систему СИ приведенные значения надо умножить на  $5,3 \cdot 10^{-12}$ .

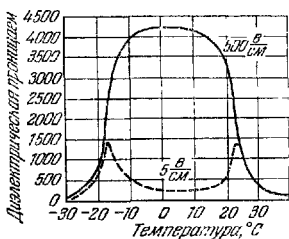


Рис. 39. Зависимость диэлектрической проницаемости незакрепленной пластинки сегнетовой соли от температуры. Две кривые соответствуют различным напряженностям поля.

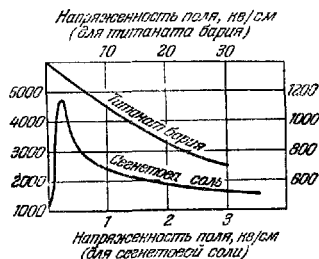


Рис. 40. Зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария (шкала справа) и сегнетовой соли (шкала слева) от напряженности поля (при  $20^\circ C$ ).

## Б. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

#### 1. Ток в металлах

Всякое упорядоченное движение носителей зарядов называют *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 пройдет количество электричества  $\Delta q$ , то *силой* (величиной) *тока* в момент  $t$  (или *мгновенным значением тока*) называется предел

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (4.23)$$

*Постоянный ток* — такой ток, при котором за любые равные промежутки времени через поперечное сечение проводника проходят одинаковые количества электричества. За единицу силы тока в системе СИ принят ампер ( $a$ ). Определение ампера приводится на стр. 154. При силе тока в  $1 a$  через поперечное сечение проводника за  $1 \text{ сек}$  проходит заряд в  $1 \text{ к}$ .

*Плотностью тока* ( $j$ ) называют величину тока, проходящего через единицу поперечного сечения проводника. За единицу плотности принимают  $a/\text{см}^2$ , т. е. такую плотность, при которой через площадку в  $1 \text{ см}^2$ , перпендикулярную к направлению движения зарядов, идет ток в  $1 a$ .

Плотность тока

$$j = nev, \quad (4.24)$$

где  $n$  — число носителей зарядов в единице объема,  $e$  — величина заряда носителя,  $v$  — средняя скорость их упорядоченного перемещения.

*Подвижность электронов* ( $u$ ) численно равна средней скорости их упорядоченного движения, которую они приобретают в поле напряженностью в  $1 \text{ в/см}$ :  $u = v/E$ ; тогда

$$j = ne u E = \sigma E, \quad (4.25)$$

где  $E$  — напряженность электрического поля внутри

Проводника,  $\sigma$  — удельная проводимость (см. ниже):

$$\sigma = ne\mu. \quad (4.26)$$

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:

$$j = \sum_i n_i e v_i. \quad (4.27)$$

Сила тока — величина скалярная, а плотность тока — величина векторная.

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* (ЭДС) называется величина, численно равная работе сторонних сил при перемещении единицы положительного заряда. ЭДС источника численно равна разности потенциалов на концах разомкнутого элемента. Электродвижущая сила измеряется в тех же единицах, что и напряжение (например, в вольтах).

ЭДС возникают при диффузии ионов в электролитах (см. стр. 133), при электромагнитной индукции (см. стр. 158), при освещении светом полупроводниковых фотоэлементов (см. стр. 198) и т. д.

*Электрической цепью* называется совокупность источников тока, соединительных проводников, приборов (или

других устройств), в которых ток производит работу (см. рис. 41). В конечном итоге работа в цепи производится за счет ЭДС источника.

Закон Ома для участка цепи, в котором не действуют сторонние силы: сила тока в проводнике пропорциональна напряжению на его концах, т. е.

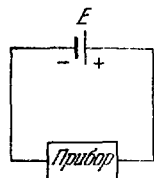


Рис. 41. Схема электрической цепи.

$$i = \frac{U}{R}. \quad (4.28)$$

В этом соотношении величина  $1/R$  является коэффициентом пропорциональности и называется *проводимостью*. Величина  $R$  называется *электрическим сопротивлением*.

Единица сопротивления в системе СИ — ом. 1 ом — сопротивление такого проводника, в котором устанавливается ток в 1 а при напряжении в 1 в на его концах.

Сопротивление проводника (постоянного сечения)

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (4.29)$$

где  $\rho$  — *удельное сопротивление*, равное сопротивлению проводника в единицу длины с поперечным сечением в единицу площади,  $l$  — длина проводника,  $S$  — площадь поперечного сечения. Величина  $\sigma = 1/\rho$  называется *удельной проводимостью*. В системе СИ  $\rho$  выражается в ом·м. В электротехнике  $l$  принято измерять в м, сечение  $S$  — в мм<sup>2</sup>; тогда  $\rho$  выражается в ом·мм<sup>2</sup>/м:

$$1 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м} = 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{м}.$$

С повышением температуры удельное сопротивление большинства металлов увеличивается; это изменение удельного сопротивления может быть приближенно описано соотношением

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t), \quad (4.30)$$

где  $\rho_t$  — удельное сопротивление при температуре  $t$ ,  $\rho_0$  — удельное сопротивление при 0 °С,  $\alpha$  — *температурный коэффициент сопротивления*; этот коэффициент численно равен изменению сопротивления при нагревании проводника на 1 °С, деленному на первоначальное сопротивление. При определенных низких температурах у некоторых металлов удельное сопротивление скачком уменьшается и становится равным нулю. Это явление называют *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.

$$R_{\text{пос}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n. \quad (4.31)$$

При параллельном соединении

$$\frac{1}{R_{\text{пар}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (4.32)$$

Закон Ома для участка цепи, в котором действует ЭДС: для участка цепи, в котором действует ЭДС, выполняется соотношение

$$i = \frac{U + \mathcal{E}}{R}, \quad (4.33)$$

где  $R$  — сопротивление участка,  $U$  — напряжение на участке,  $\mathcal{E}$  — величина ЭДС.

Следует иметь в виду, что знаки как  $\mathcal{E}$ , так и  $U$  могут быть положительными и отрицательными. ЭДС 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. 42) зарядный ток

$$i_{\text{зар}} = \frac{U - \mathcal{E}_a}{R_a},$$

где  $U$  — напряжение на клеммах источника при зарядке,  $\mathcal{E}_a$  — ЭДС заряжаемого аккумулятора,  $R_a$  — сопротивление аккумулятора (сопротивление соединительных проводников не учитывается).

Для участка  $ADB$  в том же случае

$$i_{\text{зар}} = \frac{\mathcal{E}_и - U}{r},$$

где  $\mathcal{E}_и$  — ЭДС источника,  $r$  — внутреннее сопротивление источника.

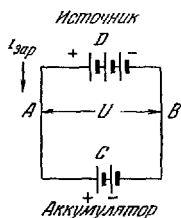


Рис. 42. Схема зарядки аккумулятора.

Для замкнутой неразветвленной цепи соотношение (4.33) принимает вид (в этом случае  $U = 0$ )

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R+r}, \quad (4.34)$$

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 ЭДС:

$$A = \frac{U^2}{R} t. \quad (4.36)$$

Работа, связанная с изменением внутренней энергии (независимо от наличия или отсутствия ЭДС на участке):

$$A = i^2 R t. \quad (4.37)$$

В качестве единицы работы (а также энергии) в системе СИ принят джоуль (*дж*); 1 *дж* есть работа постоянного тока силой в 1 *а* в течение 1 *сек* на участке с напряжением

в 1 *в*. Применяется также единица киловатт-час (*квт-ч*):

$$1 \text{ квт-ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ дж.}$$

**Правила Кирхгофа.** Расчет токов, напряжений и ЭДС в разветвленной цепи производится на основе правил Кирхгофа.

Рис 43. Узел токов.

Первое правило: алгебраическая сумма сил токов в участках цепи, сходящихся в любой точке разветвления, равна нулю. Например (рис. 43):

$$i_1 + i_2 + i_3 - i_4 = 0.$$

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.

При составлении указанной суммы положительными считаются те токи, направления которых совпадают с условно выбранным направлением обхода контура. Положительными считаются те ЭДС, которые повышают потенциал в направлении обхода (т. е. направление обхода совпадает с переходом от отрицательного полюса к положительному). Например (рис. 44):

$$i_1 R_1 + i_2 R_2 - i_3 R_3 = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_3.$$

При последовательном соединении одинаковых источников

$$i(nr + R) = n\mathcal{E}, \quad (4.38)$$

где  $n$  — число источников,  $r$  — внутреннее сопротивление одного источника,  $R$  — внешнее сопротивление,  $\mathcal{E}$  — ЭДС одного источника.

При параллельном соединении  $n$  одинаковых источников

$$i \left( R + \frac{r}{n} \right) = \mathcal{E}. \quad (4.39)$$

## 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 служат 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 ЭДС; 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:

$$j = n_+ e v_+ + n_- e v_-, \quad (4.40)$$

где  $n_+$  — концентрация катионов,  $e$  — заряд иона,  $v_+$  —

Направление обхода

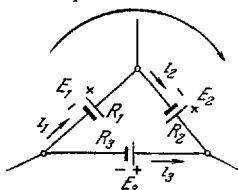


Рис. 44. Контур, выделенный из разветвленной цепи.

скорость упорядоченного движения катионов,  $n_-$ ,  $v_-$  — концентрация и скорость анионов.

Подвижность ионов численно равна средней скорости упорядоченного движения, которую получает ион в поле напряженностью 1 в/см. Плотность тока, выраженная через подвижности ионов  $u_+$  и  $u_-$ :

$$j = (n_+u_+ + n_-u_-) eE, \quad (4.41)$$

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:

$$m = KQ. \quad (4.42)$$

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:

$$K = C \frac{A}{Z}, \quad (4.43)$$

где  $A/Z$  — *химический эквивалент*, равный отношению атомного веса элемента к его валентности. Постоянная  $C$  имеет одно и то же значение для всех веществ. Размерность химического эквивалента — *г/г-эkv*.

**Число Фарадея.** Для выделения при электролизе количества вещества, равного химическому эквиваленту  $A/Z$  любого вещества, требуется одно и то же количество электричества, равное примерно 96 500 к (*число Фарадея*):

$$F \cong 96\,500 \text{ к/г-эkv}, \quad C = \frac{1}{F} \text{ г-эkv/к}.$$

**Гальванические элементы.** Между электродом, погруженным в электролит, и раствором устанавливается разность потенциалов. Эту разность называют *электрохимическим потенциалом* данного электрода в данном растворе.

*Абсолютными нормальными потенциалами* называют значения электрохимических потенциалов металлов в растворах с нормальной концентрацией их ионов (т. е.

с концентрацией  $1 \text{ г-экв}$  ионов на  $1 \text{ л}$ ). В этих условиях электрохимический потенциал зависит только от рода металла.

При погружении в электролит двух электродов между ними устанавливается разность потенциалов, равная разности электрохимических потенциалов электродов. Электролит с двумя погруженными в него разнородными электродами называют *гальваническим элементом* (например, медная и цинковая пластинки в растворе серной кислоты — так называемый *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 ампер-часах ( $a\text{-ч}$ ):

$$1 \text{ a-ч} = 3600 \text{ к.}$$

### 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. Энергия, необходимая для отрыва электрона от молекулы или атома, называется *работой ионизации*. Работу ионизации принято измерять в электрон-вольтах ( $\text{эв}$ ).  $1 \text{ эв}$  равен энергии, которую получит электрон, пройдя через поле с разностью потенциалов в  $1 \text{ в}$ .

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 неравномерного распределения ионов 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*. Условие, при котором электрон может вылететь из металла, имеет вид

$$\frac{1}{2} m v_n^2 \geq \varphi, \quad (4.44)$$

где  $m$  — масса электрона,  $v_n$  — проекция тепловой скорости электрона на направление нормали к поверхности,  $\varphi$  — работа выхода.

Наибольшее значение тока термоэлектронной эмиссии (при неизменной температуре) называют *током насыщения*. Плотность тока насыщения при термоэлектронной эмиссии определяется выражением

$$j = A' T^2 e^{-\varphi/(kT)}, \quad (4.45)$$

где  $A'$  — постоянная,  $T$  — абсолютная температура,  $k$  — постоянная Больцмана (см. стр. 70),  $e \cong 2,72$  — основание натуральных логарифмов. Величины  $A'$  и  $\varphi$  часто называют *эмиссионными постоянными*.

Согласно теории величина  $A'$  для всех чистых металлов должна быть одинакова ( $60,2 \text{ а/см}^2 \cdot \text{град}^2$ ). На опыте, однако, получаются различные значения.

Широкое применение на практике получили так называемые 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). Величина напряжения, необходимая для пробоя, зависит от материала, формы и размеров электродов, расстояния между электродами, а также от свойств 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 остаётся постоянным, то величина пробивного напряжения не изменяется.

Расстояние между электродами, при котором наступает пробой при данном напряжении, называют *искровым промежутком*. По величине искровых промежутков можно определять величину напряжения между электродами.

#### 4. Полупроводники

*Полупроводниками* называют 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. 216); 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. 216). Этот закон называется *принципом Паули*.

У изолированных атомов какого-либо вещества все уровни энергии одинаковы. При взаимодействии уровней энергии каждого атома незначительно изменяются по сравнению с уровнями энергии невзаимодействующих атомов; уровни энергии взаимодействующих атомов будут отличаться друг от друга.

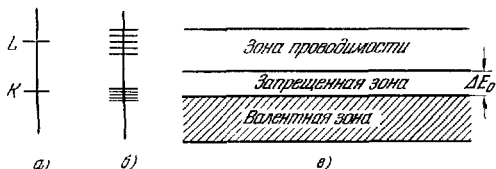


Рис. 45. Схема уровней энергии электронов в полупроводниках.

На рис. 45, а для примера изображены уровни энергии K и L невзаимодействующих атомов; при взаимодействии n атомов каждый из уровней «расщепляется» на n различ-

ных уровней, что указано на рис. 45, б. Различие в энергиях «расщепленных уровней» равно приблизительно  $10^{-22}$ — $10^{-23}$  эв. Совокупность расщепленных уровней энергии образует зону дозволённых (разрешённых) уровней энергии. Зоны отделяются друг от друга интервалами недозволённых 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  $0^\circ\text{K}$  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  $0^\circ\text{K}$  нет ни одного электрона; эта зона называется *зоной проводимости*. Заполнённая зона и зона проводимости разделены запрещённой зоной (рис. 45, в). Энергия, необходимая для перехода электрона из заполнённой зоны в зону проводимости, называется *шириной запрещённой зоны* ( $\Delta E_0$ ). У металлов зона проводимости и валентная зона перекрываются; у изоляторов  $\Delta E_0 > 2\text{эв}$ .

Возникновение электропроводности связано с 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

$$n = A e^{-\Delta E_0/2kT}, \quad (4.46)$$

где  $A$  — постоянная,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура.

Удельная электропроводность

$$\sigma \simeq \sigma_0 e^{-\Delta E_0/2kT}. \quad (4.47)$$

После перехода электрона в зону проводимости в валентной зоне возникают вакантные уровни. При наличии внешнего электрического поля электроны будут перемещаться в обеих зонах. Проводимость, обусловленная перемещением электронов в зоне проводимости, называется *электронной* ( $n$ -) *проводимостью*; проводимость, обусловленная движением электронов в валентной зоне, называется *дырочной* ( $p$ -) *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.

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 ЭДС, возникающей в спаях. Возникающая в этих условиях ЭДС называется термоэлектродвижущей силой (ТЭДС), а само явление называют *термоэлектричеством*.

Величина ТЭДС в некоторых интервалах температур приблизительно пропорциональна разности температур. В этом случае ее величина  $\mathcal{E}_T = \alpha(T_1 - T_2)$ . Величина  $\alpha$  называется *дифференциальной ТЭДС* (или *коэффициентом ТЭДС*); она численно равна ТЭДС, возникающей при разности температур в  $1^\circ\text{C}$ .

## ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

### Электрические токи в атмосфере Земли

Под действием электрического поля Земли (см. табл. 72 на стр. 122) 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/см<sup>2</sup>. Токи противоположного направления создаются в районах с грозовой деятельностью.

Плотность тока в гидросфере  $10^{-6}$  а/см<sup>2</sup>.

Плотность токов, обусловленных движением зарядов на каплях дождя, снега, града, равна:

при спокойных дождях  $10^{-11} - 10^{-10}$  а/см<sup>2</sup>,

при грозовых ливнях и граде до  $10^{-8}$  а/см<sup>2</sup>.

Сила тока в молнии достигает 500 000 а (наиболее часто сила тока в молнии лежит в пределах от 20 000 до 40 000 а).

Напряжение в молнии достигает  $10^9$  в, длительность молнии около  $10^{-3}$  сек, длина примерно 10 км, толщина канала до 20 см.

Т а б л и ц а 78

### Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления металлов (при 20 °С)

Металл	$\rho$ , ом · мм <sup>2</sup> /м	$\alpha$ , град <sup>-1</sup>
Алюминий .....	0,028	0,0049
Бронза фосфористая .....	0,08	0,0040
Вольфрам .....	0,055	0,0045
Железо .....	0,098	0,0062
Латушь .....	0,025—0,06	0,002—0,007
Медь .....	0,0175	0,0039
Молибден .....	0,057	0,0033
Никель .....	0,100	0,0050
Олово .....	0,115	0,0042
Ртуть .....	0,958	0,0009
Свинец .....	0,221	0,0041
Серебро .....	0,016	0,0036
Тантал .....	0,155	0,0031
Хром .....	0,027	—
Цинк .....	0,059	0,0035

**П р и м е ч а н и е.** 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  $1/273^\circ = 0,00367$  град<sup>-1</sup>.

Рис. 46. Изменение концентрации электронов в атмосфере с высотой (определенное измерениями на спутниках и ракетах). Пунктиром указаны предполагаемые значения.

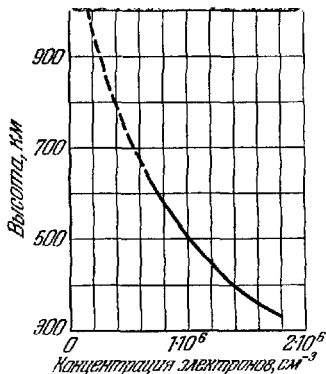


Таблица 79

**Температура перехода металлов и сплавов  
в сверхпроводящее состояние**

Вещество	T, °K	Вещество	T, °K
<b>Металлы</b>		<b>Сплав</b>	
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		
<b>Соединения</b>			
NiBi .....	4,2	Nb <sub>2</sub> C .....	9,2
PbSe .....	5,0	NbC .....	10,1—10,5
NbV <sub>2</sub> .....	5,5	NbN .....	15—16
NbV .....	6	V <sub>3</sub> Si .....	17,1
MoC .....	7,6—8,3	Nb <sub>3</sub> Sn .....	18

**Примечания.** 1. Имеется несколько сверхпроводящих сплавов с большим числом компонент: металл Розе (8,5 °K), металл Ньютона (8,5 °K), металл Вуда (8,2 °K), Pb-As-Bi (9,0 °K), Pb-As-Bi-Sb (9,0 °K).

2. Сопротивление у соединений и сплавов при переходе к сверхпроводимости изменяется в значительном интервале температур (иногда около 2 °K). Кроме того, температура перехода зависит от способа термической обработки сплава или соединения. В таких случаях в таблице указаны границы изменения температуры перехода.

### Сплавы с высоким омическим сопротивлением (при 20 °C)

Сплавы (состав в %)	$\rho, \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	$\alpha, \text{град}^{-1}$	$t_{\text{макс}}, ^\circ\text{C}$
Константан (58,8 Cu, 40 Ni, 1,2 Mn) .....	0,44—0,52	0,00001	500
Манганин (85 Cu, 12 Mn, 3 Ni)	0,42—0,48	0,00003	100
Нейзильбер (65 Cu, 20 Zn, 15 Ni) .....	0,28—0,35	0,00004	150—200
Никелин (54 Cu, 20 Zn, 26 Ni)	0,39—0,45	0,00002	150—200
Нихром (67,5 Ni, 15 Cr, 16 Fe, 1,5 Mn) .....	1,0—1,1	0,0002	1000
Реоган (84 Cu, 12 Mn, 4 Zn) ..	0,45—0,52	0,0004	150—200
Фехраль (80 Fe, 14 Cr, 6 Al) .	1,1—1,3	0,0001	900

Примечания. Указаны средние значения температурного коэффициента сопротивления  $\alpha$  в интервале температур от 0 °C до 100 °C. В последней графе указаны максимально допустимые рабочие 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 токи в изолированных проводах при продолжительной работе, $a$

Сечение, $\text{мм}^2$	Материал							
	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

Ток, $a$	5	15	30	60	100
Диаметр медной луженой проволоки, мм .....	0,213	0,508	0,914	1,42	2,03

Примечание. Номинальный ток, указанный на предохранителе, является предельным током, который может протекать долгое время. Ток в 1,8—2 раза больше номинального быстро расплавляет проволоку в предохранителе.

**Удельное сопротивление электролитов для различных концентраций  $p'$  (при 18 °С)**

Растворенное вещество	$p'$ , %	$d$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_t$ , ом·см	$\kappa$ , град <sup>-1</sup>
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  $\rho_t$  может быть подсчитано по формуле (ср. с (4.30))  $\rho_t = \rho_{18^\circ} [1 - \kappa(t - 18^\circ)]$ , где  $\kappa$  — температурный коэффициент, указанный в таблице,  $\rho_{18^\circ}$  — удельное сопротивление при 18 °С,  $t$  — температура, при которой рассчитывается  $\rho_t$ ;  $d$  — плотность

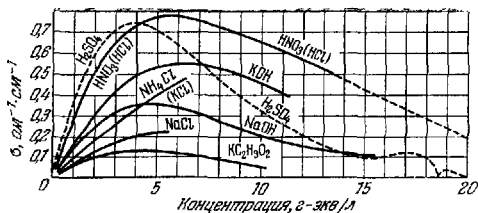


Рис. 47. Зависимость электропроводности от концентрации водных растворов некоторых соединений (при 18 °С).

Таблица 84

**Термоэлектродвижущая сила некоторых пар металлов, мВ**

Температура спая, °С	Платина—платина с 10% родия	Железо—константан	Медь—константан	Температура спая, °С	Платина—платина с 10% родия	Железо—константан
—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 °С.

Таблица 85

**Дифференциальная ТЭДС (α) относительно платины (при 0 °С)**

Металл	α, мкВ/град	Металл	α, мкВ/град
Висмут .....	—65,0	Никель .....	—16,4
Железо .....	16,0	Сурьма .....	17,0
Захись меди .....	1000	Сурьмянистый цинк	200
Константан .....	—34,4	Теллурный свинец .....	—300
Медь .....	7,4		

Примечание. Знаки указывают, что ток в нагретом спая течет от металла с меньшим алгебраическим значением α. Например, в паре медь—константан (рис. 48) ток в нагретом спая будет идти от константана к меди.

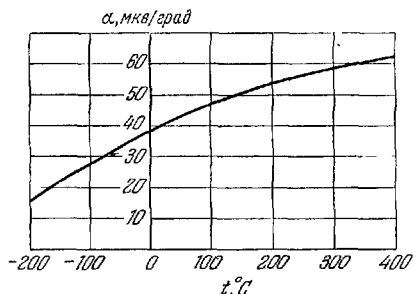


Рис. 48. Зависимость дифференциальной ТЭДС от температуры для пары медь—константан.

Т а б л и ц а 86

### Электрохимические эквиваленты

Ион	z-эков	K, мг/к	Ион	z-эков	K, мг/к
H <sup>+</sup>	1,008	0,0104	CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	30,0	0,3108
O <sup>--</sup>	8,0	0,0829	Cu <sup>++</sup>	31,8	0,3297
Al <sup>+++</sup>	9,0	0,0936	Zn <sup>++</sup>	32,7	0,3387
OH <sup>-</sup>	17,0	0,1762	Cl <sup>-</sup>	35,5	0,3672
Fe <sup>+++</sup>	18,6	0,1930	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	48,0	0,4975
Ca <sup>++</sup>	20,1	0,2077	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	62,0	0,642
Na <sup>+</sup>	23,0	0,2388	Cu <sup>+</sup>	63,6	0,6590
Fe <sup>++</sup>	27,8	0,2895	Ag <sup>+</sup>	107,9	1,118

Примечание. Число плюсов или минусов у символов показывает число элементарных зарядов, переносимых одним ионом.

Т а б л и ц а 87

### Абсолютные нормальные потенциалы металлов

Металл	U <sub>H</sub> , в	Металл	U <sub>H</sub> , в
Железо .....	-0,17	Ртуть .....	1,13
Кадмий .....	-0,13	Свинец .....	0,15
Марганец .....	-0,78	Серебро .....	1,07
Медь .....	0,61	Хром .....	-0,29
Никель .....	0,04	Цинк .....	-0,50

## ЭДС гальванических элементов

Название элемента	Отрицательный полюс	Положительный полюс	Раствор	ЭДС, в
Аккумулятор кислотный свинцовый	Губчатый свинец	Перекись свинца $PbO_2$	27—28% раствор $H_2SO_4$ , свободный от хлора, плотность 1,20	2,0—1,9 при 15 °С
Аккумулятор щелочной серебряно-цинковый	Окись цинка	Серебро	Раствор едкого кали (KOH)	1,5
Аккумулятор щелочной железоникелевый (или никелькадмиевый)	Порошкообразное железо (или кадмий с примесью окислов железа)	Двоокись никеля	20% раствор едкого кали (KOH)	1,4—1,1
Элемент Вестона (нормальный)	Амальга 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



## Зарядка и разрядка аккумуляторов

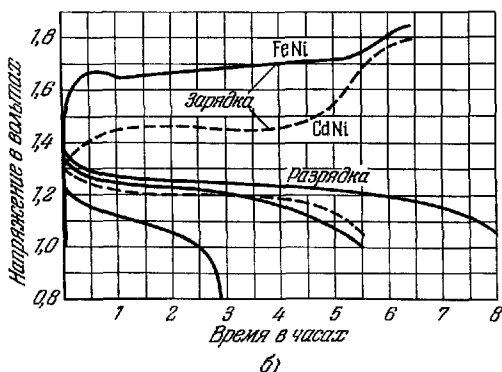
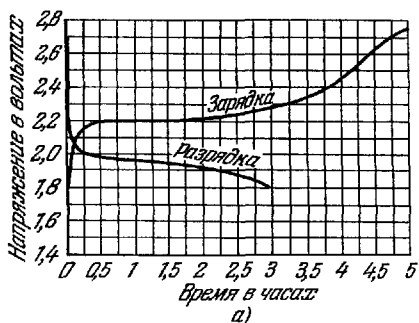


Рис. 49. а) Изменение напряжения на одной банке кислотного аккумулятора при зарядке нормальным током  $\frac{Q}{4} a$  ( $Q$  — емкость аккумулятора в а-ч) и при разрядке током для трехчасового режима ( $\frac{Q}{3} a$ ); б) изменение напряжения на одной банке при зарядке и разрядке кислотно-никелевых (сплошные линии) и кадмиево-никелевых (пунктирная линия) аккумуляторов. Зарядка ведется при нормальном режиме  $\frac{Q}{6} a$  (6 ч), разрядка — при пятичасовом режиме ( $\frac{Q}{5} a$ ) Для железо-никелевых аккумуляторов указаны кривые для восьмичасового ( $\frac{Q}{8} a$ ) и трехчасового ( $\frac{Q}{3} a$ ) режима разрядки.

## Подвижность ионов в водных растворах (при 18 °С)

Катионы	$см^2/сек \cdot в$	Катионы	$см^2/сек \cdot в$
H <sup>+</sup>	0,003263	ОН <sup>-</sup>	0,00180
K <sup>+</sup>	0,000669	Сl <sup>-</sup>	0,00068
Na <sup>+</sup>	0,000450	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,00062
Ag <sup>+</sup>	0,00056	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	0,00068
Zn <sup>++</sup>	0,00048	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	0,00062
Fe <sup>+++</sup>	0,00046		

Примечания. 1. При повышении температуры на 1 °С подвижности ионов возрастают примерно на 2%.

2. Число плюсов или минусов у символа определяет число элементарных зарядов, переносимых одним ионом.

Подвижность электронов в металлах (в  $см^2/сек \cdot в$ )

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 0,001 в/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.

**Подвижность ионов в газах**  
(при 760 мм рт. ст. и 20 °С, см<sup>2</sup>/сек.в).

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	Пары ртути (давл. 1 мм рт. ст.) .....	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 0,1 мм рт. ст. до 60 ат). 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	$E_{\text{ион}}, \text{эВ}$	Ионизация	$E_{\text{ион}}, \text{эВ}$
He $\rightarrow$ He <sup>+</sup>	24,5	H $\rightarrow$ H <sup>+</sup>	13,5
Ne $\rightarrow$ Ne <sup>+</sup>	21,5	O $\rightarrow$ O <sup>+</sup>	13,5
N <sub>2</sub> $\rightarrow$ N <sup>+</sup>	15,8	H <sub>2</sub> O $\rightarrow$ H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	13,2
Ar $\rightarrow$ Ar <sup>+</sup>	15,7	Xe $\rightarrow$ Xe <sup>+</sup>	12,8
H <sub>2</sub> $\rightarrow$ H <sub>2</sub> <sup>+</sup>	15,4	O <sub>2</sub> $\rightarrow$ O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	12,5
N $\rightarrow$ N <sup>+</sup>	14,5	Hg $\rightarrow$ Hg <sup>+</sup>	10,4
CO <sub>2</sub> $\rightarrow$ CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	14,4	Na $\rightarrow$ Na <sup>+</sup>	5,1
Kr $\rightarrow$ Kr <sup>+</sup>	13,9	K $\rightarrow$ K <sup>+</sup>	4,3

## Эмиссионные постоянные металлов и полупроводников

Элемент	$\varphi, \text{эВ}$	$A', \text{а/см}^2 \times \text{град}^2$	Элемент	$\varphi, \text{эВ}$	$A', \text{а/см}^2 \times \text{град}^2$
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	$\varphi, \text{эВ}$	$A', \text{а/см}^2 \cdot \text{град}^2$
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	$\varphi, \text{эВ}$	$A', \text{а/см}^2 \cdot \text{град}^2$
Барий на окисленном вольфраме . .	1,10	0,3
Никель — ВаО — SrO . . . . .	1,20	0,96
Барий—кислород—вольфрам . . . . .	1,34	0,18
Pt — Ni; ВаО — SrO . . . . .	1,37	2,45
ВаО на никелевом сплаве . . . . .	1,50—1,83	0,087—2,18
Ториево-оксидный катод (среднее значение) . . . . .	2,59	4,35

## Свойства полупроводников

$t_{пл}$  — температура плавления,  $\Delta E_0$  — ширина запрещенной зоны,  $\mu_-$ ,  $\mu_+$  — подвижность электронов и дырок

Вещество	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	$\Delta E_0, \text{эВ}$	$\mu_-, \text{см}^2/\text{сек}\cdot\text{в}$	$\mu_+, \text{см}^2/\text{сек}\cdot\text{в}$
Бор (В)	2300	1,1	10	10
Графит (С)	—	0,1	—	—
Алмаз (С)	—	6—7	1800	1200
Кремний (Si)	1414	1,12	1900	500
Германий (Ge)	958	0,75	3900	1900
Олово (серое) Sn	—	0,08	3000	—
Сера (S)	113	2,4	—	—
Селен (серый) Se	220	2,3	—	—
Теллур (Te)	452	0,36	1700	1200
Иод (I)	113,5	1,3	25	—
$\text{Ag}_2\text{Te}$	955	0,17	4000	—
$\text{HgTe}$	670	0,2	10000	100
$\text{V}_2\text{Te}_3$	585	0,25	600	150
$\text{Mg}_2\text{Sn}$	778	0,36	200	150
$\text{PbSe}$	1065	0,5	1400	1400
$\text{ZnTe}$	1240	0,6	100	—
$\text{PbS}$	1114	1,2	650	800
$\text{AgBr}$	430	1,35	35	—
$\text{CdTe}$	1045	1,45	450	100
$\text{Cu}_2\text{O}$	1232	1,5—1,8	—	100
$\text{Al}_2\text{O}_3$	2050	2,5	—	—
$\text{ZnO}$	1975	3,2	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* ( $E_{кр}$ ). При  $t = 20^\circ\text{C}$  в

$$n\text{-германий } E_{кр} = 900 \text{ в/см}$$

$$p\text{-германий } E_{кр} = 1400 \text{ »}$$

$$n\text{-кремний } E_{кр} = 2500 \text{ »}$$

$$p\text{-кремний } E_{кр} = 7500 \text{ »}$$

С понижением температуры критическое поле уменьшается.

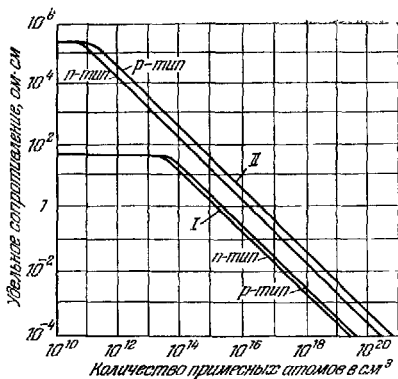


Рис. 50. Зависимость удельного сопротивления германия (I) и кремния (II) от концентрации примесных атомов. Температура около 20 °С.

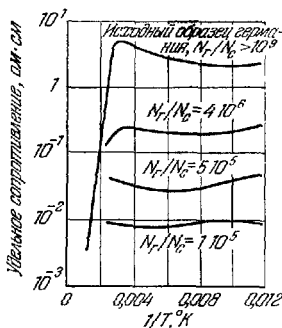


Рис. 51. Зависимость сопротивления германия от температуры. По оси ординат отложены значения сопротивления в логарифмическом масштабе, по оси абсцисс — величина, обратная абсолютной температуре;  $N_r$  — число атомов германия,  $N_c$  — число атомов сурьмы

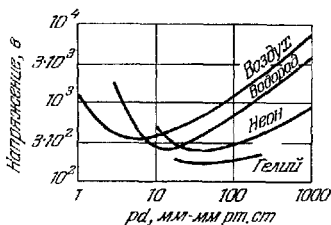


Рис. 52. Зависимость напряжения пробоя для плоских металлических электродов от величины  $pd$  ( $p$  — давление газа,  $d$  — расстояние между электродами).

**Искровые промежутки для воздуха**  
(мм при давлении 760 мм рт. ст.)

Напряжение, в	Форма металлических электродов		
	Два острия	Два шара диаметром 5 см	Две плоскости
20 000	15,5	5,8	6,1
40 000	45,5	13	13,7
100 000	200	45	36,7
200 000	410	262	75,3
300 000	600	530	114

## В. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

#### 1. Индукция магнитного поля. Взаимодействие токов. Магнитный момент

Два проводника с токами, проводник с током и магнит, два магнита взаимодействуют между собой. Это взаимодействие осуществляется посредством поля, которое называется *магнитным*. Магнитное поле возникает в результате упорядоченного движения зарядов; магнитное поле магнитов создается упорядоченным движением электронов в атомах. Вокруг неподвижных зарядов магнитное поле не возникает.

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 *индукцией магнитного поля*. Направление вектора индукции магнитного поля совпадает с направлением силы, действующей на северный конец магнитной стрелки, помещенной в данную точку поля. Величина силы, которая действует на проводник с током, помещенный в магнитное поле, определяется *законом Ампера*:

$$\Delta F = k_i \Delta l B \sin \beta, \quad (4.48)$$

где  $i$  — сила тока,  $\Delta l$  — малая (элементарная) длина проводника (элемент длины проводника),  $B$  — индукция магнитного поля,  $\beta$  — угол между  $B$  и  $\Delta l$ ; элемент длины проводника  $\Delta l$  является вектором, направление которого совпадает с направлением тока; произведение  $i \Delta l$  называется *элементом тока*. Коэффициент пропорциональности  $k$  зависит от выбора единиц измерения; при измерении всех величин в одной системе  $k = 1$ .

*Индукция магнитного поля* численно равна силе, с которой действует магнитное поле на единичный элемент тока ( $i \Delta l = 1$ ), расположенный перпендикулярно к вектору индукции.

Магнитная индукция зависит от свойств среды.

В системе СИ единицей для измерения индукции является тесла (*тл*). 1 тесла — это индукция такого поля, которое действует на единичный элемент тока  $i \Delta l = 1$  а·м, расположенный перпендикулярно к вектору индукции, с силой в 1 н.

При измерениях величин, характеризующих магнитное поле, часто пользуются системой единиц СГСМ (см. стр. 154), в которой за единицу силы тока принимается величина 10 а. В этой системе единицей измерения индукции является гаусс (*гс*).

1 гаусс — это индукция такого поля, которое действует на элемент тока  $i \Delta l = 10$  а·см, расположенный перпендикулярно к вектору индукции, с силой в 1 дин;

$$1 \text{ тл} = 10^4 \text{ гс.}$$

Для характеристик магнитного поля в вакууме вводится величина, которая называется *напряженностью магнитного поля*. Напряженность магнитного поля  $H$  численно равна индукции магнитного поля в вакууме. Размерности  $B$  и  $H$  в системе СГСМ одинаковы, в системе СИ отличаются друг от друга.

Чтобы определить напряженность магнитного поля, необходимо удалить вещество из пространства, в котором имеется поле, а затем измерить силу, действующую на единичный элемент тока ( $i \Delta l = 1$ ), расположенный перпендикулярно к вектору индукции.

Напряженность магнитного поля не зависит от свойств среды, а определяется только силой тока и формой проводника.

Отношение  $B/H = \mu_a$  называется абсолютной магнитной проницаемостью среды.

*Напряженность магнитного поля* — векторная величина, совпадающая (в однородной среде) по направлению с



вектором магнитной индукции, но по величине в  $\mu_a$  раз меньше его.

Численное значение  $\mu_a$  выражают в относительных единицах (по отношению к абсолютному значению магнитной проницаемости вакуума  $\mu_0$ ). Величина  $\mu = \mu_a/\mu_0$  называется *относительной магнитной проницаемостью* (или просто *магнитной проницаемостью*). Она не зависит от выбора системы единиц.

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).

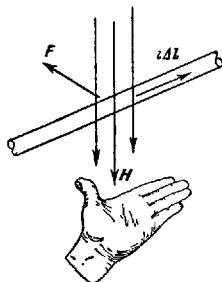


Рис. 53. Правило левой руки.

Два достаточно длинных параллельных и параллельных проводника с током взаимодействуют друг с другом так, что если токи имеют одинаковое направление, то они притягиваются, а если противоположные, — то отталкиваются.

Математическое выражение этого закона имеет следующий вид:

$$F = \frac{2\mu i_1 i_2}{a} l \text{ (СГСМ)}, \quad (4.49)$$

$$F = \frac{\mu \mu_0 i_1 i_2}{2\pi a} l \text{ (СИ)}, \quad (4.50)$$

где  $a$  — расстояние между проводниками,  $l$  — длина проводников,  $i_1$ ,  $i_2$  — силы тока в них,  $\mu$  — магнитная проницаемость среды.

На движущийся заряд в магнитном поле действует сила (называемая *силой Лоренца*)

$$F_L = qvB \sin \alpha, \quad (4.51)$$

где  $q$  — заряд частицы,  $v$  — скорость,  $\alpha$  — угол между направлением скорости и индукцией  $B$ . Сила Лоренца направлена перпендикулярно к плоскости, в которой лежат векторы  $B$  и  $v$ .

На плоский контур тока, помещенный в магнитное поле, действует момент сил  $M$ :

$$M = iSB \sin \alpha, \quad (4.52)$$

где  $i$  — сила тока,  $S$  — площадь контура,  $B$  — индукция поля,  $\alpha$  — угол между нормалью к плоскости витка и вектором  $B$ .

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 частицы (с зарядом  $q$ ), движущейся по круговой орбите с радиусом  $R$  и линейной скоростью  $v$ , равен

$$p_m = \frac{1}{2} qvR. \quad (4.53)$$

## 2. Системы единиц СГСМ и СИ

В системе СГСМ в качестве основных единиц выбираются сантиметр, грамм (масса), секунда, а за основную единицу для электрических величин принимается магнитная проницаемость пустоты ( $\mu_0 = 1$ ). Единица силы тока в этой системе является производной и определяется из закона взаимодействия токов.

За единицу силы тока в системе СГСМ принимается такой постоянный ток, который, протекая по двум бесконечно длинным параллельным проводникам, расположенным в пустоте на расстоянии 1 см друг от друга, вызывает силу взаимодействия в 2 дин на 1 см длины. При этом имеется в виду, что оба проводника имеют достаточно малое сечение.

В системе СИ за основные единицы принимаются метр, килограмм (масса), секунда и сила тока, равная амперу.

За силу тока в 1 а принимается сила такого постоянного тока, который, протекая по двум тонким бесконечно длинным параллельным проводникам, расположенным в пустоте на расстоянии 1 м друг от друга, вызывает силу взаимодействия в  $2 \cdot 10^{-7}$  н на 1 м длины;

1 ампер = 0,1 единицы силы тока в системе СГСМ.

Магнитная проницаемость в системе СИ будет производной величиной. Для пустоты

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{генри}}{\text{метр}} = 1,26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{гн}}{\text{м}}.$$

### 3. Напряженность магнитных полей токов

Силowymi линиями магнитного поля называют такие линии, касательные к которым совпадают с направлением напряженности этого поля в данной точке. Магнитные силовые линии поля замкнуты (в отличие от силовых

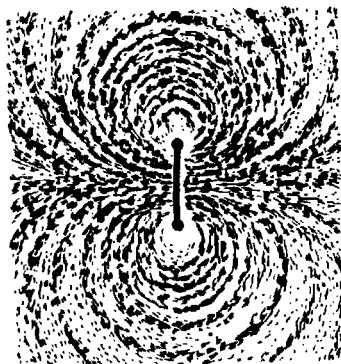


Рис. 54. Силовые линии магнитного поля кругового тока, обнаруживаемые по действию поля на железные опилки.

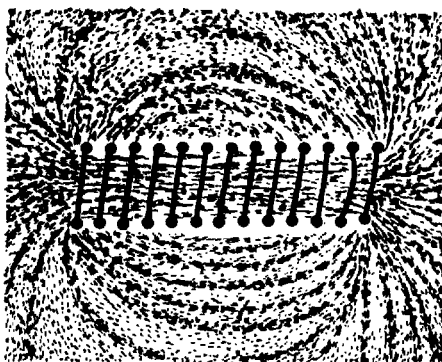


Рис. 55. Силовые линии магнитного поля соленоида, обнаруживаемые по действию поля на железные опилки.

линий электростатического поля); такие поля называют *вихревыми* (рис. 54—55). Силовые линии прямолинейного

тока представляют собой концентрические окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной к проводнику (рис. 56). 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.

Напряженность магнитного поля, создаваемая элементом тока  $i \Delta l$ , равна в системе СГСМ (рис. 56)

$$\Delta H = \frac{i \Delta l \sin \alpha}{r^2} \quad (4.54)$$

и в системе СИ

$$\Delta H = \frac{i \Delta l \sin \alpha}{4\pi r^2}, \quad (4.55)$$

где  $r$  — расстояние от элемента тока до точки, в которой определяется напряженность,  $\alpha$  — угол между  $r$  и  $i \Delta l$ . Это соотношение называется *законом Био—Савара—Лапласа*.

Напряженность магнитного поля прямого длинного провода с током (эта и нижеследующие формулы даны в системах СГСМ и СИ):

$$H = \frac{2i}{a}, \quad H = \frac{i}{2\pi a}, \quad (4.56)$$

где  $a$  — расстояние от проводника до точки поля, в которой определяется напряженность.

Напряженность магнитного поля в центре кругового тока:

$$H = \frac{2\pi i}{R}, \quad H = \frac{i}{2R}, \quad (4.57)$$

где  $R$  — радиус витка.

Напряженность поля внутри тороидальной катушки (рис. 57):

$$H = \frac{2Ni}{r}, \quad H = \frac{Ni}{2\pi r}, \quad (4.58)$$

где  $N$  — полное число витков,  $r$  — средний радиус тороида.

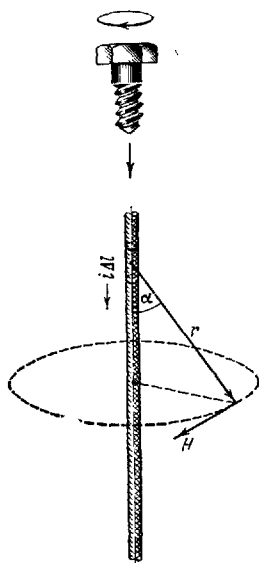


Рис. 56. К закону Био—Савара—Лапласа. Правильно винта.

Напряженность поля внутри прямого соленоида, длина которого значительно больше диаметра витков:

$$H = 4\pi ni, \quad H = ni, \quad (4.59)$$

где  $n$  — число витков на единицу длины соленоида. Напряженность поля в таком соленоиде имеет одинаковые величину и направление во всех точках, т. е. поле *однородно*.

Напряженность поля движущейся заряженной частицы (рис. 58):

$$H = \frac{qv \sin \vartheta}{r^2}, \quad H = \frac{qv \sin \vartheta}{4\pi r^2}, \quad (4.60)$$

где  $v$  — скорость частицы,  $r$  — расстояние от частицы до точки поля, в которой определяется напряженность,  $\vartheta$  — угол между направлением скорости и прямой, проведенной от частицы в данную точку поля.

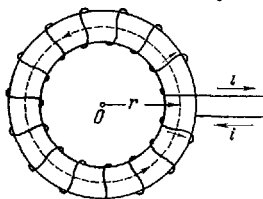


Рис. 57. Тороидальная катушка (тороид).

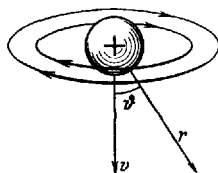


Рис. 58. Магнитное поле движущейся частицы.

Единицей напряженности магнитного поля в системе СГСМ является эрстед ( $\text{э}$ ), в системе СИ — ампер на метр ( $\text{а/м}$ ).  $1 \text{ а/м}$  — это напряженность магнитного поля, создаваемого прямолинейным бесконечно длинным проводником с током в  $4\pi \text{ а}$  на расстоянии  $2 \text{ м}$  от него.  $1 \text{ э}$  — это напряженность магнитного поля, создаваемого прямолинейным бесконечно длинным проводником с током в  $1 \text{ ед. СГСМ}$  ( $10 \text{ а}$ ) на расстоянии  $2 \text{ см}$  от него:

$$1 \text{ а/м} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ э}.$$

#### 4. Работа при перемещении проводника с током в магнитном поле. Электромагнитная индукция

При движении проводника с током в магнитном поле совершается работа

$$A = i(\Phi_2 - \Phi_1), \quad (4.61)$$

где  $\Phi_1$  — магнитный поток сквозь контур тока в начале перемещения,  $\Phi_2$  — магнитный поток в конце перемещения.

Магнитным потоком через какой-либо контур (в однородном поле) называют произведение магнитной индукции  $B$  на площадь этого контура  $S$  и на косинус угла  $\alpha$  между направлением поля и нормалью к поверхности контура (рис. 59):

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (4.62)$$

Единицей магнитного потока в системе СГСМ является максвелл ( $\text{мкс}$ ), в системе СИ — вебер ( $\text{вб}$ ).

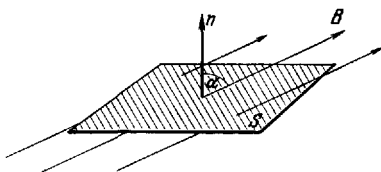


Рис. 59. Магнитный поток через площадку  $S$ .

Изменяющийся магнитный поток возбуждает электрическое поле с замкнутыми силовыми линиями (вихревое электрическое поле). В проводнике наведенное поле проявляется как действие сторонних сил (стр. 127). Это явление называется *электромагнитной индукцией*, а возникающая при этом электродвижущая сила — *ЭДС индукции*.

Токи, которые обусловлены ЭДС индукции, называются *индукционными*.

Индукционный ток имеет такое направление, что его магнитное поле препятствует изменениям того магнитного поля, которое вызывало появление индукционного тока (*закон Ленца*).

Величина электродвижущей силы индукции может быть рассчитана по формуле

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (4.63)$$

Таким образом, ЭДС индукции равна по абсолютной величине скорости изменения магнитного потока через площадь, ограниченную контуром.

Знаки ЭДС и  $\Delta \Phi / \Delta t$  противоположны (в соответствии с *законом Ленца*).

## 5. Самоиндукция

При любом изменении тока в проводнике возникает ЭДС индукции, которая возбуждается магнитным потоком этого тока. Такое явление называется *самоиндукцией*.

ЭДС самоиндукции можно найти из формулы

$$\mathcal{E} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}, \quad (4.64)$$

где  $L$  — коэффициент самоиндукции, или индуктивность,  $\Delta i/\Delta t$  — скорость изменения тока;  $L$  зависит от формы и размеров проводника и от свойств среды.

За единицу измерения индуктивности в системе СИ принимается генри (*гн*), в СГСМ — сантиметр (*см*).

1 генри есть индуктивность такого проводника, в котором при изменении тока в 1 ампер за 1 секунду возникает ЭДС самоиндукции, равная 1 вольту;

$$1 \text{ гн} = 10^9 \text{ см.}$$

Все формулы этого параграфа даны в системах СГСМ и СИ.

Индуктивность соленоида с сердечником:

$$L = k \frac{4\pi\mu SN^2}{l}, \quad L = k \frac{\mu\mu_0 SN^2}{l}, \quad (4.65)$$

где  $\mu$  — магнитная проницаемость,  $N$  — число витков,  $S$  — площадь поперечного сечения соленоида,  $l$  — длина катушки,  $k$  — коэффициент, зависящий от отношения длины катушки к диаметру катушки  $l/d$ . Значения  $k$  приводятся в табл. 107. Заметим, что при расчете  $L$  по формуле (4.65) учитывается, что величина  $\mu$  для ферромагнетиков зависит от формы сердечника.

Индуктивность коаксиального кабеля длиной  $l$ :

$$L = 2\mu l \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad L = \frac{\mu\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (4.66)$$

где  $R_2$  и  $R_1$  — радиусы внешнего и внутреннего цилиндров.

Индуктивность двухпроводной линии длиной  $l$  с радиусом сечения проводов  $r$ :

$$L = 4\mu l \ln \frac{a}{r}, \quad L = \frac{\mu\mu_0 l}{\pi} \ln \frac{a}{r}, \quad (4.67)$$

где  $a$  — расстояние между осями проводников (при условии  $r \ll a$ ).

Энергия магнитного поля вокруг проводника с током:

$$W = \frac{1}{2} Li^2. \quad (4.68)$$

В пространстве, где имеется магнитное поле, распределена энергия. Плотность энергии однородного магнитного поля (энергия в единице объема) определяется по формулам

$$w = \frac{\mu H^2}{8\pi}, \quad w = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}. \quad (4.69)$$

Подъемная сила электромагнита:

$$F = \frac{B^2 S}{8\pi}, \quad F = \frac{B^2 S}{2\mu_0}, \quad (4.70)$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения наконечника электромагнита.

*Вихревые токи* (или *токи Фуко*) — это индукционные токи, возникающие в массивных проводниках, помещенных в изменяющееся магнитное поле.

## 6. Магнитные свойства вещества

Во всех телах, помещенных в магнитное поле, возникает магнитный момент. Это явление называется *намагничиванием*.

Намагниченное тело (магнетик) создает дополнительное магнитное поле с индукцией  $B'$ , которая взаимодействует с индукцией  $B_0 = \mu_a H$ , обусловленной макроскопическими токами. Оба поля дают результирующее поле с индукцией  $B$ , которая получается в результате векторного сложения  $B'$  и  $B_0$ .

В молекулах вещества циркулируют замкнутые токи; каждый такой ток имеет магнитный момент (стр. 153); 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. Мерой намагничивания вещества (магнетика) является вектор намагничивания. *Вектор намагничивания*  $I$  равен векторной сумме всех магнитных моментов  $p_m$  молекул, заключенных в единице объема вещества:

$$I = \frac{1}{V} \sum p_m.$$



Вектор намагничивания пропорционален вектору напряженности магнитного поля:

$$I = \chi H. \quad (4.71)$$

Величина  $\chi$  называется *магнитной восприимчивостью*;  $\chi$  — величина безразмерная.

В системе СИ:	В системе СГСМ:	
$B' = \mu I,$	$B' = 4\pi I,$	(4.72)

$B = \mu_0 H + \mu_0 I,$	$B = H + 4\pi I,$	(4.73)
--------------------------	-------------------	--------

$\mu = 1 + \chi,$	$\mu = 1 + 4\pi\chi.$	(4.74)
-------------------	-----------------------	--------

Кривая, выражающая зависимость между  $H$  и  $B$  или  $H$  и  $I$ , называется *кривой намагничивания*.

Вещества, для которых  $\chi > 0$  (но незначительно), называются *парамагнитными (парамагнетиками)*; вещества, для которых  $\chi < 0$ , называются *диамагнитными (диамагнетиками)*. Вещества, у которых  $\chi$  намного больше единицы, называются *ферромагнетиками*.

Ферромагнетики отличаются от парамагнетиков и диамагнетиков рядом свойств.

а) Кривая намагничивания ферромагнетиков имеет сложный характер (см. рис. 60), 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 ( $\mu_{нач}$ ) — предельное значение магнитной проницаемости, когда напряженность и индукция поля близки к нулю, т. е.

$$\mu_{нач} = \lim_{H \rightarrow 0} \mu.$$

Кривая зависимости  $\mu$  от  $H$  для ферромагнетиков проходит через максимум (см. рис. 62, а). В таблицах обычно указывается и максимальное значение  $\mu_{макс}$ .

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 магнитным полем; зависимость  $B$  (или  $I$ ) от  $H$  при намагничивании будет выражаться кривой 0—1 (рис. 60). Эта кривая называется *начальной кривой намагничивания*. Намагниченность в слабых полях растет быстро, затем рост замедляется и, наконец, наступает состояние насыщения, при котором намагниченность практически остается постоянной при дальнейшем увеличении поля.

Максимальное значение намагниченности называется *намагниченностью насыщения* ( $I_s$ ).

При уменьшении  $H$  до нуля  $B$  (и  $I$ ) будут изменяться по кривой 1—2; происходит отставание изменения индукции от изменения напряженности поля. Это явление называется *магнитным гистерезисом*.

Рис. 60. Петля гистерезиса. 0—1 — кривая намагничивания из размагниченного состояния, 1—2—3 — кривая размагничивания.

Величина индукции, сохраняющаяся в ферромагнетике после снятия поля (когда  $H = 0$ ), называется *остаточной индукцией* ( $B_r$ ). На рис. 60  $B_r$  равна отрезку 0—2. Чтобы размагнитить ферромагнетик, нужно снять остаточную индукцию. Для этого необходимо создать поле противоположного направления. Изменение индукции в поле противоположного направления изобразится кривой 2—3—4.

Напряженность поля  $H_c$  (отрезок 0—3 на рис. 60), при которой индукция равна нулю, называется *коэрцитивной напряженностью* (силой).

Зависимость  $B$  (или  $I$ ) от периодически изменяющейся напряженности магнитного поля от  $+H$  до  $-H$  выражается замкнутой кривой 1—2—3—4—5—6—1. 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 называют *доменами*. Но расположение и намагниченность этих областей таковы, что в отсутствие поля общая намагниченность всего тела равна нулю.

Когда ферромагнетик находится в магнитном поле, границы между доменами смещаются (в слабых полях) и векторы намагниченности доменов поворачиваются по направлению намагничивающего поля (в более 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, называют *магнитными полюсами*. Таких точек на Земле две: северный магнитный полюс (в южном полушарии) и южный магнитный полюс (в северном полушарии).

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.

Напряженность магнитного поля на магнитном экваторе около 0,34 э, у магнитных полюсов около 0,66 э. В некоторых районах (в так называемых районах магнитных аномалий) напряженность резко возрастает. В районе Курской магнитной аномалии она достигает 2 э.

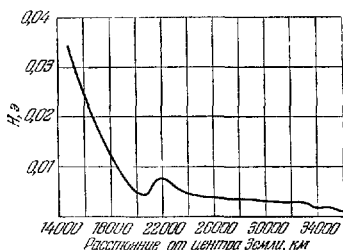


Рис. 61. Напряженность магнитного поля Земли на больших высотах

Таблица 98  
Свойства электротехнических сталей \*)

Марка стали	$\mu_{\text{нач}}$ , гс/э	$\mu_{\text{макс}}$ , гс/э	$H_c$ , э	$B$ (при 25 э), гс	$\rho$ , ом·мм <sup>2</sup> /м
Э 31	250	5 500	0,55	14 600	0,5
Э 41	300	6 000	0,45	14 600	0,6
Э 42	400	7 500	0,4	14 500	0,6
Э 45	600	10 000	0,25	14 600	0,6
Э 310	1000	30 000	0,12	17 500	0,5

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,  $\mu$  сильно зависит от механических напряжений.

Сплав	$\mu_{\text{нач}}$ , гс/э	$\mu_{\text{макс}}$ , гс/э	$H_c$ , э	$I_s$ , гс	$\rho$ , ом·мм/м
79 НМ	20 000	100 000	0,03	8 000	0,55
80 НХС	35 000	120 000	0,015	7 000	0,62
50 НСХ	3 000	30 000	0,2	10 000	0,85
50 Н	3 000	35 000	0,12	15 000	0,45
65 НП	3 000	100 000	0,1	13 000	0,35
50 НП	2 000	20 000	0,2	15 500	0,45
Мо-пермаллой	20 000	75 000	0,03	8 500	0,55
78,5 Ni-пермаллой	10 000	100 000	0,025	10 700	0,16

\*) Обозначения см. на стр. 161—162.

## Свойства магнитотвердых материалов

Эти материалы отличаются высокой коэрцитивной силой и применяются для изготовления постоянных магнитов. Важной характеристикой их является наибольшее значение величины  $H_B/8\pi$ . Эта величина пропорциональна максимальной энергии магнитного поля, окружающего ферромагнетик.

Материал магнита	$H_c, \text{э}$	$B_r, \text{гс}$	$H_B/8\pi, \text{эрг/см}^3$
Сплавы: альни 1 (АН1) .....	250	7 000	28 000
альни 3 (АН3) .....	500	5 000	36 000
альниси (АНК) .....	750	4 000	43 000
альнико 12 (АНКО 1) .....	500	6 800	55 000
альнико 18 (АНКО 3) .....	650	9 000	97 000
магнито (АНКО 4) ..	500	12 300	150 000
Стали: ЕХЗ .....	60	9 500	12 000
Е 7В6 .....	62	10 000	13 000
ЕХ 5К5 .....	100	8 500	18 000
ЕХ9К15М .....	170	8 000	28 000
Платиновые магнитные сплавы	$1,5-4 \cdot 10^3$	$3-6 \cdot 10^3$	$1-1,5 \cdot 10^4$
Бариевые ферриты .....	$1,6-2,9 \cdot 10^3$	$1,8-4 \cdot 10^3$	$3-15 \cdot 10^4$

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;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления.

Материал	$\mu, \text{гс/э}$	$\alpha, 10^{-6} \text{град}^{-1}$
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
Феррозласт К-9 .....	9—10	—50, + 50

## Основные свойства ферритов

Ферриты представляют собой смеси окислов металлов (никеля, цинка, железа), подвергаемые специальной термической обработке, в результате которой они приобретают большое удельное сопротивление;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления.

Название	$\mu_{\text{нач}}, \text{гс/э}$	$\alpha, 10^{-6} \text{град}^{-1}$	$\rho, \text{ом}\cdot\text{см}$
<b>Марганец-цинковые ферриты</b>			
4 000 НМ	4 000	2	} $10^3$
3 000 НМ	3 000	3	
2 000 НМ	2 000	0,6—1,5	
1 500 НМ	1 500	0,6—1,5	
1 000 НМ	1 000	1,5	
<b>Никель-цинковые и литий-цинковые ферриты</b>			
2 000 НН	2 000	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

## Температура Кюри металлов

Вещество	$T_K, ^\circ\text{C}$	Вещество	$T_K, ^\circ\text{C}$
Гадолиний .....	20	Магнетит .....	585
30-процентный пер- маллой .....	70	Железо электроли- тическое .....	769
Сплав Гейслера ...	200	Железо, переплав- ленное в водороде	774
Никель .....	358	Кобальт .....	1140
78-процентный пер- маллой .....	550		

Таблица 105

Удельная магнитная восприимчивость металлов  
(на 1 г при 18 °С в системе СГСМ)

Удельная восприимчивость  $\kappa_p$  равна отношению восприимчи-  
вости  $\kappa$  к плотности вещества  $\rho$ :  $\kappa_p = \kappa/\rho$ .

Металл	$\kappa_p, 10^{-6}$	Металл	$\kappa_p, 10^{-6}$
Алюминий .....	0,58	Натрий .....	0,6
Ванадий .....	1,4	Олово .....	0,03
Вольфрам .....	0,28	Ртуть .....	-0,19
Германий .....	-0,12	Свинец .....	-0,12
Индий .....	-0,11	Селен .....	-0,32
Кадмий .....	-0,18	Серебро .....	-0,20
Кальций .....	0,5	Сурьма .....	-0,87
Литий .....	0,5	Теллур .....	-0,31
Марганец .....	7,5	Хром .....	3,6
Медь .....	-0,086	Цинк .....	-0,157

**Зависимость магнитной проницаемости и индукции от напряженности магнитного поля (при первичном намагничивании)**

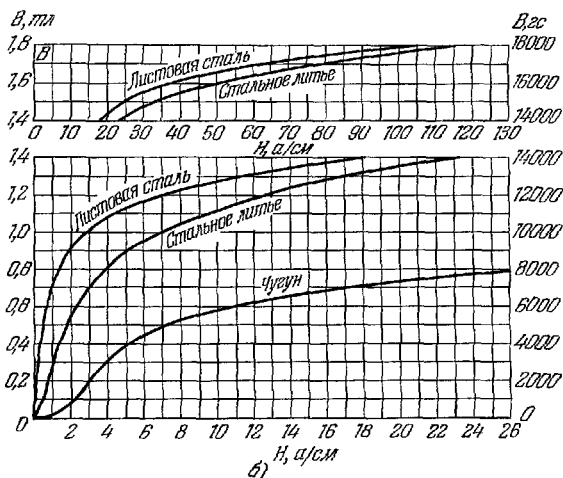
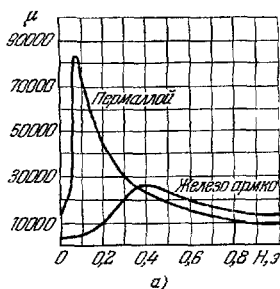


Рис. 62. а) Зависимость магнитной проницаемости железа и пермаллоя от напряженности в слабых полях; б) зависимость индукции в стали и чугуне от напряженности магнитного поля.



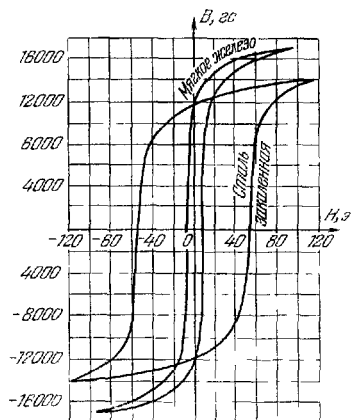


Рис 63. Петля гистерезиса для мягкого железа и закаленной стали (~1% С).

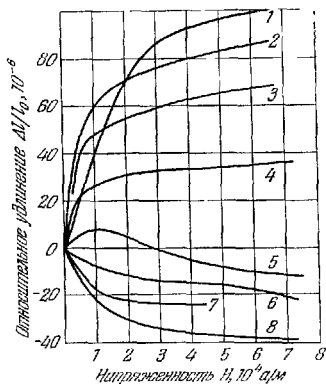


Рис. 64. Магнитострикция ферромагнетиков. 1—54% Pt, 46% Fe; 2—70% Co, 30% Fe; 3—50% Co, 50% Fe; 4—50% Ni, 50% Fe; 5—железо; 6—кобальт (отожженный); 7—феррит 20% Ni, 80% Zn; 8—никель.

### Индукция и потери на гистерезис в ферромагнетиках и ферритах

Материалы	Индукция $B$ (гс) для $H$ (э)						Потери на гистерезис, эрг $см^3 \cdot цикл$
	0,1	0,5	2,0	10,0	50	500	
Железо электролитическое .....	40	500	11000	15000	17000	21000	2500
Железо отожженное	100	750	14000	16500	17200	21000	600
> кремнистое							
листовое (4,3% Si)	200	4500	10000	13500	15300	19500	690
Железо кобальтовое (35% Co) . . .	—	—	4000	15000	21000	24200	3 500
Чугун отожженный	—	—	600	5000	8500	14000	10 000
Сталь мягкая (0,1% C) .....	30	300	6000	14000	17000	21000	5 000
Сталь листовая ...	40	400	9000	14500	16500	21000	2 500
Феррит Mn—Zn ..	80	500	2300	3600	—	—	—
> Ni—Zn ...	5	80	130	1500	2400	—	—
> Mg—Mn ...	—	100	2000	2300	—	—	—
> 30% Ni—Fe	—	—	—	2500	3100	—	—
> 70% Ni—Cu	—	—	—	600	1000	—	—

Примечания. 1. Численные значения следует рассматривать как ориентировочные, так как для различных образцов они могут изменяться.  
2. Значения потерь за один цикл перемагничивания в  $1 см^3$  вещества указаны для петли гистерезиса с максимальным значением индукции 1000 гс.

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  $k \approx 1$ .

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

*Переменным током* называется такой ток, сила или направление которого (или и то и другое вместе) изменяется во времени.

Токи, изменяющиеся только по величине, называют *пульсирующими* токами.

Наиболее часто используется переменный синусоидальный ток (рис. 65). Периодические несинусоидальные токи можно с любой степенью точности представить как сумму синусоидальных переменных токов (см. стр. 95).

Мгновенные значения переменного синусоидального тока и напряжения выражаются формулами:

$$i = I_0 \sin \omega t, \quad (4.75)$$

$$u = U_0 \sin (\omega t + \varphi), \quad (4.76)$$

где  $I_0$  и  $U_0$  — наибольшие (амплитудные) значения тока и напряжения,  $\omega$  — угловая (циклическая) частота тока,  $t$  — время,  $\varphi$  — разность фаз между током и напряжением (см. стр. 94),  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  — частота тока.

*Действующим* (или *эффективным*) значением переменного тока ( $I$ ) называют такое значение постоянного тока, который на том же омическом сопротивлении выделяет ту же мощность, что и переменный ток.

В большинстве случаев (но не всегда!) амперметры и вольтметры показывают действующее значение тока или напряжения ( $U$ ).

Для синусоидальных токов

$$I = \frac{I_0}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_0}{\sqrt{2}}. \quad (4.77)$$

Средняя мощность, выделяемая переменным током в цепи:

$$P = UI \cos \varphi. \quad (4.78)$$

Величина  $\cos \varphi$  называется *коэффициентом мощности*.

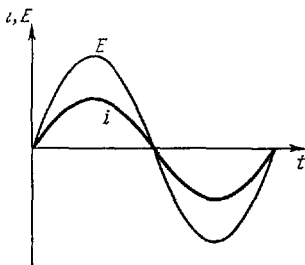


Рис. 65. Графики изменения переменных ЭДС и тока (синусоидальный закон изменения,  $\varphi=0$ ).

Индуктивность  $L$  в цепи переменного тока действует аналогично сопротивлению, включенному в цепь, т. е. уменьшает силу тока.

Величина индуктивного сопротивления:

$$R_L = \omega L. \quad (4.79)$$

Это сопротивление обусловлено возникающей в катушке ЭДС самоиндукции.

Переменный ток в цепи, обладающей только индуктивным сопротивлением, отстает на  $90^\circ$  по фазе от напряжения, которое приложено к цепи.

Емкость в цепи переменного тока пропускает ток (в отличие от постоянного тока!). Сопротивление, которое оказывает емкость переменному току, называют *емкостным*.

Емкостное сопротивление:

$$R_C = \frac{1}{\omega C}. \quad (4.80)$$

Ток в конденсаторе опережает напряжение на  $90^\circ$ .

При последовательном соединении сопротивления, индуктивности и емкости (рис. 66, а) полное сопротивление

$$Z = \sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2}. \quad (4.81)$$

Величина  $Z$  называется *кажущимся сопротивлением* (*импедансом*) в отличие от величины  $R$ , которая называется *активным сопротивлением*.

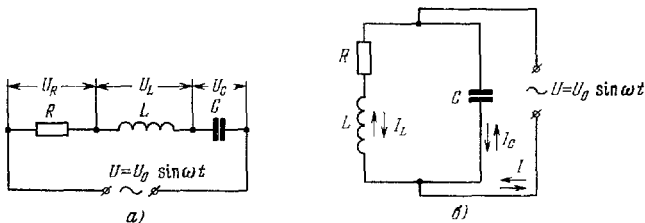


Рис. 66. Последовательный (а) и параллельный (б) резонансные контуры.

Амплитуда силы тока в последовательном резонансном контуре:

$$I = \frac{U_0}{Z} = \frac{I_0}{\sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}, \quad (4.82)$$

где  $Q$  — добротность (см. ниже); угол сдвига фаз между током и напряжением определяется из соотношений:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_L - R_C}{R}, \quad \cos \varphi = \frac{R}{Z}. \quad (4.83)$$

При  $R_L = R_C$   $\varphi = 0$ , сопротивление  $Z$  имеет наименьшее значение (см. рис. 68), а ток в цепи имеет наибольшее значение  $I_0$  (см. рис. 69).

Это явление называется *последовательным электрическим резонансом*. При резонансе напряжения на индуктивности и на емкости равны друг другу по величине, но противоположны по фазе; отношение напряжения на конденсаторе  $U_C$  (или  $U_L$ ) к напряжению  $U$ , приложенному к контуру, равно  $\omega_0 L/R = 1/\omega_0 C R = Q$ . Эта величина называется *добротностью контура*;  $\omega_0$  в этом выражении является резонансной частотой, определяемой из условия  $R_L = R_C$ . При добротностях контура  $Q \gg 1$  напряжения на индуктивности и емкости могут быть значительно больше приложенного напряжения  $U$ :  $U_L = U_C = QU$ . Поэтому это явление иначе называется *резонансом напряжений*.

При параллельном включении емкости и индуктивности с сопротивлением (рис. 66, б) кажущееся сопротивление

$$Z = R_C \sqrt{\frac{R^2 - R_L^2}{R^2 + (R_L - R_C)^2}}, \quad (4.84)$$

а сдвиг фаз определяется из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_L}{R} \left( 1 - \frac{R_L}{R_C} \right) - \frac{R}{R_C}. \quad (4.85)$$

При  $\varphi = 0$   $R_L \cong R_C$ , кажущееся сопротивление (см. рис. 70) имеет максимальное значение. Это явление называется *параллельным электрическим резонансом*.

При параллельном резонансе ток  $I$  в общей цепи имеет наименьшую величину и совпадает по фазе с приложенным напряжением  $U$ , а токи  $I_L$  и  $I_C$ , проходящие через индуктивность и емкость, равны по величине, но противоположны по фазе, причем токи в ветвях могут быть значительно больше тока в общей цепи (при  $Q \gg 1$ ):  $I_C = I_L = QI$ . Поэтому параллельный резонанс иначе называется *резонансом токов*. Сопротивление  $Z$  (при  $Q > 1$ ) имеет при параллельном резонансе наибольшее значение  $Z_{\text{макс}}$ ; графики

зависимости  $Z/Z_{\text{макс}}$  от относительной частоты  $\omega/\omega_0$  приведены на рис. 70.

При прохождении переменного тока по проводнику в нем наводятся индукционные токи; плотность тока у поверхности проводника будет больше, чем в середине. Это различие будет тем больше, чем выше частота тока; при высоких частотах плотность тока в середине проводника может быть практически равна нулю. Это явление называют *поверхностным эффектом* (или *скин-эффектом*).

## ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

### Сопротивление при постоянном и переменном токах

Отношение сопротивлений на переменном и постоянном токах зависит от параметра  $\xi$ :

$$\xi = 0,14d\sqrt{\mu f/\rho},$$

где  $d$  — диаметр провода (см),  $f$  — частота (гц),  $\rho$  — удельное сопротивление (ом·см),  $\mu$  — магнитная проницаемость.

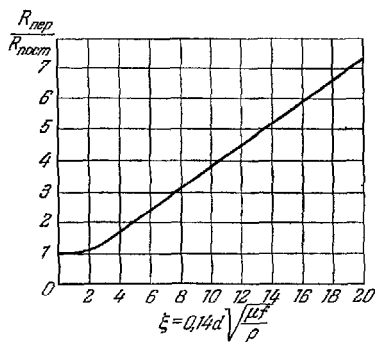


Рис. 67. График зависимости отношения сопротивлений на переменном и постоянном токах от  $\xi$ .

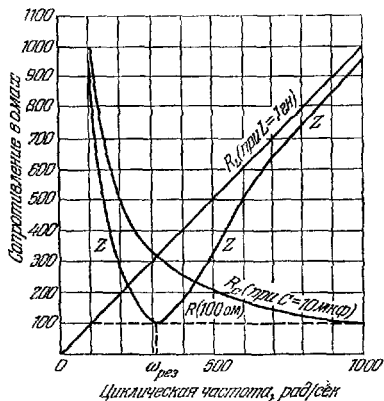


Рис. 68. Изменение индуктивного, емкостного и кажущегося сопротивлений в зависимости от частоты в последовательном резонансном контуре.

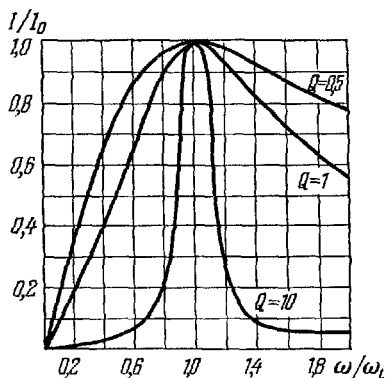


Рис. 69. Зависимость тока в последовательном резонансном контуре от частоты. Кривые рассчитаны по формуле (4.82). По осям отложены относительные значения  $I/I_0$  и  $\omega/\omega_0$ .

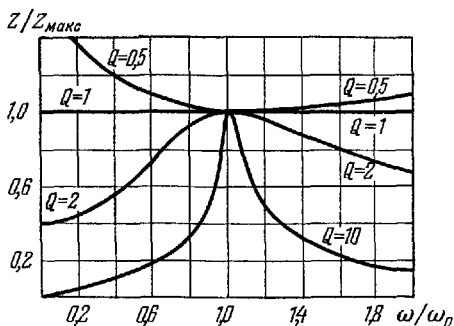


Рис 70. Зависимость сопротивления  $Z$  от частоты в параллельном резонансном контуре. По осям отложены относительные значения  $Z/Z_{\text{макс}}$  и  $\omega/\omega_0$ . Расчет проведен для случая, когда активные сопротивления в ветвях  $L$  и  $C$  равны.

Т а б л и ц а 108

### Глубина проникновения $\sigma$ токов высокой частоты (для круглого прямого провода из меди)

Частота, Мгц	0,01	0,1	1	10	100
$\sigma$ , мм	0,65	0,21	0,065	0,021	0,006

П р и м е ч а н и я. 1. Расчет для других значений частоты и других материалов может быть произведен по формуле

$$\sigma = 503,3 \sqrt{\rho/\mu f},$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление ( $\text{ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ),  $\mu$  — магнитная проницаемость материала,  $f$  — частота ( $\text{гц}$ )

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 ( $e \approx 2,72$ ).



## Д. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

Колебательные изменения в электрической цепи величин заряда, тока или напряжения называют *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 замкнутую цепь, состоящую из индуктивности  $L$  и емкости  $C$ .

*Период собственных колебаний контура:*

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (4.86)$$

Это соотношение называют *формулой Томсона*; оно справедливо для случая, когда отсутствуют потери энергии. При наличии потерь в контуре (например, при наличии омического сопротивления  $R$ ) собственные колебания контура являются затухающими, причем

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}, \quad (4.87)$$

а ток в контуре изменяется по закону затухающих колебаний:

$$i = I_0 e^{-\frac{R}{2L}t} \sin \omega t. \quad (4.88)$$

График затухающих колебаний см. на стр. 97.

При воздействии на колебательный контур переменной ЭДС 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 ЭДС (рис. 69).

Согласно закону Био — Савара — Лапласа (см. стр. 156) ток проводимости создает магнитное поле с замкнутыми силовыми линиями. Такое поле называется *вихревым*.

Переменный ток проводимости создает переменное магнитное поле. Переменный ток в отличие от постоянного проходит через конденсатор (см. стр. 172); 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 и переменный ток проводимости. Плотность тока смещения:

$$j = \frac{\Delta D}{\Delta t}, \quad (4.89)$$

где  $D$  — вектор индукции электрического поля.

В каждой точке пространства изменение во времени индукции электрического поля создает переменное вихревое магнитное поле (рис. 71, а). Векторы  $B$  возникающего магнитного поля лежат в плоскости, перпендикулярной к

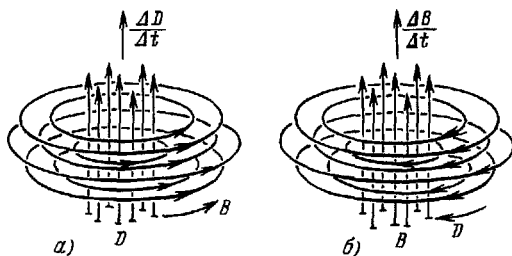


Рис. 71. а) Возникновение магнитного поля при изменении индукции электрического поля (первое уравнение Максвелла); б) возникновение вихревого электрического поля при изменении индукции магнитного поля (второе уравнение Максвелла).

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 ЭДС индукции (см. стр. 158). В каждой точке пространства изменение во времени вектора индукции магнитного поля создает переменное вихревое электрическое поле (рис. 71, б). Векторы  $D$  возникающего электрического поля лежат в плоскости, перпендикулярной к 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 возникшее в какой-либо точке изменение во времени электрического (или магнитного) поля будет перемещаться от одной точки к другой, при этом будут происходить взаимные превращения электрических и магнитных полей.

Электромагнитные волны представляют собой процесс одновременного распространения в пространстве изменяющихся электрического и магнитного полей. Векторы напряженностей электрического и магнитного полей ( $E$  и  $H$ ) в электромагнитной волне перпендикулярны друг к другу, а вектор  $v$  скорости распространения перпендикулярен к плоскости, в которой лежат оба вектора  $E$  и  $H$  (рис. 72). Это справедливо при распространении электромагнитных волн в неограниченном пространстве.

Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме не зависит от длины волны и равна

$$c = (2,997925 \pm 0,000003) \cdot 10^{10} \text{ см/сек.}$$

Скорость электромагнитных волн в различных средах меньше скорости в вакууме:

$$v = \frac{c}{n}, \quad (4.90)$$

где  $n$  — показатель преломления среды (см. стр. 187).

### 1. Шкала электромагнитных волн

Шкала построена в логарифмическом масштабе (см. табл. 109).

В первой графе указываются длины волн (слева — в различных единицах длины, справа — в см).

Во второй графе указываются частоты в герцах, в третьей графе — названия диапазонов волн, в четвертой графе — названия частот (или воли).

В пятой графе указаны основные способы получения и применения электромагнитных колебаний.

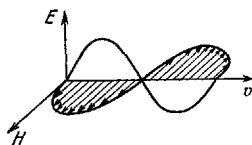


Рис. 72. Взаимное расположение векторов  $E$ ,  $H$  и  $v$  в электромагнитной волне.

## Шкала электромагнитных волн

Длина волн	Частота (гц)	Диапазоны	Название группы волн (или частот)	Основные способы получения и применения
$10^8 \text{ км}$	$10^{13}$	Низкочастотные волны	Инфранизкие частоты	Генераторы специальных конструкций
			Низкие частоты	
$10^6 \text{ км}$	$10^{11}$		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
$10^5 \text{ км}$	$10^{10}$		Звуковые частоты	
$10^3 \text{ км}$	$10^8$	Радиоволны	Длинные	Генераторы электрических колебаний различных конструкций. Используются в телеграфии, радиовещании, телевидении, радиолокации и т. д. Метровые и дециметровые волны используются для исследования свойств вещества
			Средние	
$1 \text{ км}$	$10^5$		Короткие	
			Метровые	
$1 \text{ м}$	$10^2$		Дециметровые	
$1 \text{ дм}$	$10$			

Таблица 109 (продолжение)

Длина волн	Частота (гц)	Диапазоны	Название группы волн (или частот)	Основные способы получения и применения
1 см — 1	$3 \cdot 10^{10}$	Радиоволны	Сантиметровые Миллиметровые	Получаются в магнетронных, клистронных генераторах и лазерах. Применяются в радиолокации, радиоспектроскопии и радиоастрономии
1 мм — $10^{-1}$	$3 \cdot 10^{11}$		Переходные	
		Инфракрасные лучи	Декиметровые Микронные	Излучение нагретых тел (дуговые и газоразрядные лампы и т.п.) Используются в инфракрасной спектроскопии, при фотографировании в темноте (в инфракрасных лучах)
1 мкм — $10^{-4}$	$3 \cdot 10^{14}$			
Световые лучи				
		Ультрафиолетовые лучи	Ближние Крайние	Излучение Солнца, ртутных ламп и т.п. Используются в ультрафиолетовой микроскопии, в медицине
1 нм — $10^{-7}$	$3 \cdot 10^{17}$			
		Рентгеновские лучи	Ультрамягкие	Получаются в рентгеновских трубках и в других приборах, где происходит торможение электронов с энергией более $10^4$ эв. Используются в медицине, для изучения строения вещества, в дефектоскопии
1 Å — $10^{-8}$	$3 \cdot 10^{18}$		Мягкие	
			Жесткие	
1 X — $10^{-11}$	$3 \cdot 10^{21}$	Гамма-излучение		Возникают при радиоактивных распадах ядер, при торможении электронов с энергией более $10^6$ эв и при других взаимодействиях элементарных частиц. Используются в дефектоскопии, при изучении свойств вещества

Наименьшую частоту имеют низкочастотные волны и радиоволны; эти волны излучаются различными искусственными вибраторами.

Инфракрасные лучи возникают главным образом при колебаниях молекул или групп атомов.

Световые волны излучаются атомами и молекулами вещества в результате изменения состояний электронов на их внешних оболочках (см. стр. 217).

Ультрафиолетовые лучи имеют такое же происхождение, что и световые волны.

Рентгеновские лучи возникают в результате изменений состояний электронов на внутренних оболочках атома (*характеристическое излучение*) или в результате резкого торможения электронов и других заряженных частиц.

Гамма-лучи излучаются возбужденными ядрами атомов и элементарными частицами в результате различных взаимодействий. Сведения о некоторых свойствах различных типов волн имеются в разделе «Оптика».

## 2. Излучение электромагнитных волн

Ускоренно движущиеся заряженные частицы излучают электромагнитные волны.

Диполь (см. стр. 121), расстояние между зарядами которого изменяется по закону  $l = l_0 \sin \omega t$  (при условии  $l_0 < \lambda$ , где  $\lambda$  — длина электромагнитной волны), излучает за 1 сек среднюю энергию

$$u = 1,11 \cdot 10^{-16} q^2 \omega^4 l_0^2 \text{ (вт)},$$

где  $q$  — заряд диполя (в к).

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*.

Плотность потока энергии (средняя энергия, переносимая электромагнитными волнами за 1 сек через площадь в 1 м<sup>2</sup>, расположенную перпендикулярно к направлению их распространения) равна

$$S = EH \text{ (вт)}. \quad (4.91)$$

Элемент тока  $i \, dL$ , изменяющийся по гармоническому закону  $i = I_0 \sin \omega t$ , создает на расстоянии  $r$  от него, много

большем длины волны излучения  $\lambda$  и длины элемента  $\Delta l$ , электромагнитное поле с напряженностью электрического поля  $E_{\vartheta}$  и напряженностью магнитного поля  $H_{\varphi}$ :

$$\begin{aligned} E_{\vartheta} &= -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} I_0 \frac{\Delta l}{\lambda r} \sin \vartheta \cdot \sin(\omega t - kr) = \\ &= -188,27 I_0 \frac{\Delta l}{\lambda r} \sin \vartheta \cdot \sin(\omega t - kr) \quad (\text{в/м}), \end{aligned} \quad (4.92)$$

$$H_{\varphi} = -\frac{1}{2} I_0 \frac{\Delta l}{\lambda r} \sin \vartheta \cdot \sin(\omega t - kr) \quad (\text{а/м}). \quad (4.93)$$

В этих выражениях  $\vartheta$  — угол между прямой, соединяющей элемент тока  $i \Delta l$  с точкой наблюдения, и направлением проводника,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число.

Полная средняя мощность, излучаемая элементом тока:

$$\tilde{W} = 788,6 \left( \frac{i \Delta l}{\lambda} \right)^2 \quad (\text{вт}). \quad (4.94)$$

## Г Л А В А V

### ОПТИКА

#### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

Свет представляет собой электромагнитное излучение с длиной волны от 0,4 до 0,8 мкм. Источником таких волн являются атомы и молекулы, в которых происходит изменение энергетического состояния электронов (см. стр. 216).

#### 1. Фотометрия

Фотометрия занимается изучением силы света, яркости и освещенности как по зрительному восприятию глаза, так и по лучистому потоку.

Величина энергии, излучаемой телом за 1 сек, называется *мощностью излучения*. Энергию, переносимую световой волной через площадку за 1 сек, называют *потоком лучистой энергии* через эту площадку. Поток лучистой энергии, оцениваемый по зрительному ощущению глаза, называется *световым потоком*. Ввиду того, что глаз неодинаково чувствителен к потокам с различными длинами волн, отношение потоков лучистой и световой энергии различно для различных длин волн. Обычно при дневном освещении глаз наиболее чувствителен к свету с длиной волны 5550 Å; отношение мощности излучения с длиной волны 5550 Å к мощности излучения с длиной волны  $\lambda$ , которое вызывает такое же зрительное ощущение, что и излучение с длиной волны 5550 Å, называется *относительной чувствительностью* глаза или *относительной видностью* ( $K_\lambda$ ). Графическая зависимость  $K_\lambda$  от  $\lambda$  называется *кривой видности*.

Максимальную чувствительность при сумеречном зрении имеет глаз к длинам волн около 5070 Å.

При дневном зрении 1 вт лучистой энергии с длиной волны 5550 Å соответствует световому потоку 680 люменов (см. ниже); при сумеречном зрении 1 вт лучистой энергии



с длиной волны 5070 Å соответствует световому потоку 1745 люменов.

*Силой света* ( $I$ ) называют световой поток, излучаемый точечным источником света в единичный телесный угол:

$$I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega}, \quad (5.1)$$

где  $\Delta\Phi$  — световой поток,  $\Delta\Omega$  — малый телесный угол.

За единицу силы света принята свеча (*св*).

Для определения свечи служит эталон специальной конструкции, излучение которого соответствует излучению абсолютно черного тела (см. стр. 202) при температуре затвердевания платины (2042 °К). Сила света, излучаемая таким источником в направлении нормали к его поверхности с площади  $1/60 \text{ см}^2$ , равна 1 свече.

За единицу светового потока принят люмен (*лм*). 1 люмен есть световой поток, распределенный в телесном угле в 1 стерадиан при силе света в 1 свечу.

*Освещенность* ( $E$ ) измеряется световым потоком, приходящимся на единицу поверхности:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}, \quad (5.2)$$

где  $\Delta S$  — величина поверхности, на которую падает световой поток.

Единицами освещенности являются люкс (*лк*) и фот (*ф*):

$$1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}^2, \quad 1 \text{ ф} = 1 \text{ лм/см}^2.$$

Освещенность  $E$  плоской поверхности, создаваемая точечным источником:

$$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2},$$

где  $I$  — сила света,  $r$  — расстояние до освещаемой поверхности,  $\alpha$  — угол между направлением светового потока и нормалью к поверхности.

*Яркость* ( $B$ ) является мерой излучения светящейся поверхности:

$$B = \frac{I}{S}, \quad (5.3)$$

где  $S$  — величина видимой поверхности (проекция наблюдаемой поверхности на плоскость, перпендикулярную к направлению наблюдения),  $I$  — сила света.

Единицами яркости являются нит (*нт*) и стильб (*сб*).

1 нит — яркость такого источника, который излучает с  $1 \text{ м}^2$  светящейся поверхности свет силой в 1 свечу;

$$1 \text{ сб} = 10^4 \text{ нт.}$$

Яркость эталона для определения силы света равна 60 *сб*.

*Интенсивностью света* называется средний по времени поток электромагнитных волн через единицу поверхности, расположенной перпендикулярно к направлению распространения волн. Интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды  $E$  (или  $H$ ) (см. стр. 182).

## 2. Основные законы геометрической оптики

В геометрической оптике принимается, что свет распространяется в однородной среде прямолинейно.

*Углом падения* называется угол между направлением падающего луча и перпендикуляром к границе раздела сред, восставленным 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 сред угол отражения равен углу падения. Лучи падающий, отраженный и перпендикуляр к площадке в точке падения лежат в одной плоскости.

Для характеристики величины отражения вводят *коэффициент отражения*  $\rho$ , равный отношению потока энергии в отраженной волне к потоку в падающей волне. (Часто этот коэффициент выражается в процентах.)

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. Лучи падающий, преломленный и перпендикуляр к площадке в точке падения лежат в одной плоскости:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n. \quad (5.4)$$

Величина  $n$  называется *относительным показателем преломления* второй среды; она равна отношению скоростей света в средах:

$$n = \frac{v_1}{v_2}.$$

Показатель преломления относительно вакуума называют *абсолютным показателем преломления* среды. Величина  $n$  зависит от длины волны.

При переходе из среды с большим в среду с меньшим абсолютным показателем преломления луч может полностью отражаться. Это явление называют *полным отражением*. Угол падения  $i_{\text{пр}}$ , начиная с которого вся световая энергия отражается от границы раздела, называется *предельным углом полного отражения*. Величина угла  $i_{\text{пр}}$  определяется из соотношения

$$\sin i_{\text{пр}} = \frac{1}{n},$$

где  $n$  — показатель преломления среды, в которой происходит полное отражение, относительно среды, в которой распространяется свет.

Проходящие через призму лучи света преломляются (рис. 73). Угол  $P$  призмы называется *преломляющим углом*. Продолжения входящего и выходящего лучей образуют угол  $\delta$ , который называется *углом отклонения*:

$$\delta = i_1 + i_2 - P, \quad P = r_1 + r_2.$$

Угол  $\delta$  имеет наименьшее значение (для данного значения угла  $P$ ), когда  $i_1 = i_2$  (и, следовательно,  $r_1 = r_2$ ):

$$\delta_{\text{мин}} = 2i_1 - P.$$

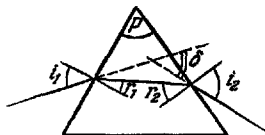


Рис. 73. Ход монохроматических лучей в призме.

Показатель преломления стекла  $n$ , из которого сделана призма, можно рассчитать по формуле

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2} (\delta_{\text{мин}} + P)}{\sin \frac{1}{2} P}.$$

Наибольший преломляющий угол призмы, при котором лучи еще проходят через преломляющие грани:

$$P_{\text{макс}} = 2i_{\text{пр}},$$

где  $i_{\text{пр}}$  — 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).

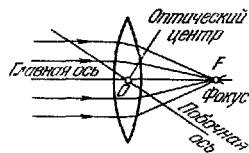


Рис. 74 Основные элементы тонкой линзы.

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 к главной оптической оси, называется *фокальной плоскостью*.

Формула тонкой линзы (рис. 75):

$$-\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{1}{f}, \quad (5.5)$$

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 линзы.

В формуле (5.5) величины  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $r_1$  и  $r_2$  считаются положительными, если направления отсчета их от оптического центра линзы совпадают с направлением распространения

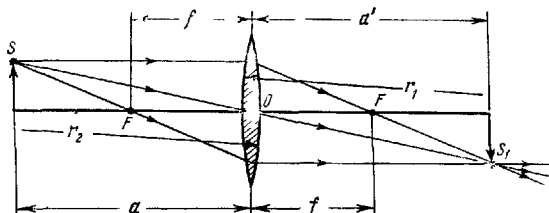


Рис 75. Ход лучей в тонкой собирающей линзе.

света; в противном случае эти величины считаются отрицательными.

Линзы являются основным элементом многих оптических приборов.

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.

Многие оптические приборы предназначены для получения изображений предметов на экранах, на светочувствительных пленках или в глазу.

Видимое увеличение оптического прибора:

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1},$$

где  $\varphi_2$  — угол зрения при наблюдении предмета через прибор,  $\varphi_1$  — 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).

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.

Увеличение лупы (рис. 76):

$$\Gamma_{\text{л}} = \frac{250}{f}, \quad (5.6)$$

где  $f$  — фокусное расстояние лупы в *мм*.

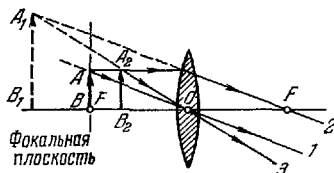


Рис. 76. Ход лучей в лупе.

Предмет  $AB$  располагается в фокальной плоскости  $F$ . Изображение получается в бесконечности (лучи 1, 2 идут параллельно). Возможно и такое расположение, когда предмет размещается вблизи фокальной плоскости  $A_2B_2$ . Изображение  $A_1B_1$  получается мнимым (на продолжении лучей 2, 3); оно располагается на таком расстоянии от глаза, которое является наиболее удобным для зрения.

**Увеличение микроскопа:**

$$\Gamma_{\text{м}} = \frac{\Delta}{f_{\text{об}}} \cdot \frac{250}{f_{\text{ок}}}, \quad (5.7)$$

где  $f_{\text{об}}$  и  $f_{\text{ок}}$  — фокусные расстояния объектива и окуляра в *мм*,  $\Delta$  — расстояние от заднего фокуса объектива до переднего фокуса окуляра в *мм* (рис. 77).

Увеличение зрительной трубы:

$$\Gamma_{\text{т}} = \frac{f_{\text{об}}}{f_{\text{ок}}}, \quad (5.8)$$

где  $f_{\text{об}}$  и  $f_{\text{ок}}$  — фокусные расстояния объектива и окуляра (рис. 78).

Величина, обратная фокусному расстоянию, называется *оптической силой* линзы:  $D = 1/f$ . За единицу оптической силы линзы принята диоптрия ( $D$ ), равная оптической силе линзы с фокусным расстоянием 1 м.

Оптическая сила двух тонких линз, сложенных вместе, равна сумме их оптических сил.

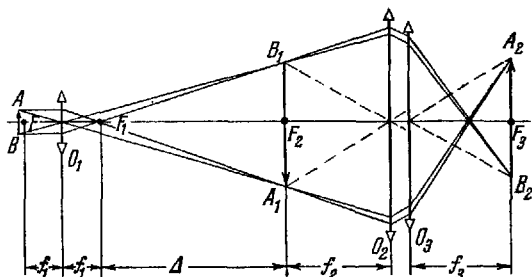


Рис. 77. Ход лучей в микроскопе.

$AB$  — предмет;  $O_1$  — объектив микроскопа, который дает увеличенное обратное и действительное изображение предмета  $A_1B_1$ . 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  $O_3$  получается действительное изображение предмета  $A_2B_2$ . Возможно и такое расположение  $O_1$  и  $O_2$ , когда  $A_1B_1$  располагается между  $F_2$  и  $O_2$ .

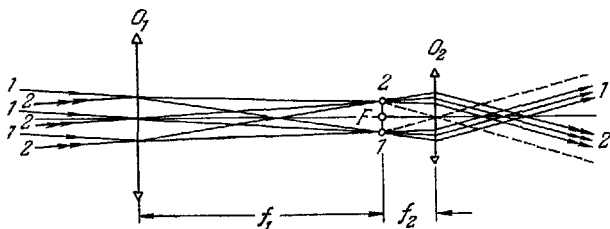


Рис. 78. Ход лучей в зрительной трубе.

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 также 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. 98). При распространении нескольких электромагнитных волн колебания векторов напряженности электрического и магнитного полей волн  $E$  и  $H$  в каждой точке пространства складываются как векторы (см. стр. 15).

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*.

Например, если две плоские электромагнитные волны с одинаковыми амплитудами и направлениями распространения

$$E_1 = E_0 \sin(\omega t - kx_1),$$

$$E_2 = E_0 \sin(\omega t - kx_2),$$

прошли от источника пути  $x_1$  и  $x_2$  до точки их наблюдения, то результирующая волна определяется выражением

$$E_p = E_1 + E_2 = 2E_0 \cos \frac{k(x_2 - x_1)}{2} \sin \left[ \omega t - \frac{k(x_2 + x_1)}{2} \right].$$

При  $k(x_2 - x_1)/2 = \frac{1}{2} m\pi$  (где  $m = 1, 3, 5, \dots$ ) величина

$E_p = 0$ ; при этом разность хода волн  $x_2 - x_1 = \frac{1}{2} m\lambda$ , т. е. равна нечетному числу полуволн.

Если свет проходит различные пути  $x_1$  и  $x_2$  в средах с различными показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ , то при сложении волн минимальное значение амплитуды результирующей волны будет при  $x_2 n_2 - x_1 n_1 = \frac{1}{2} m\lambda$  ( $m$  — нечетное целое число).

Произведение геометрического пути на показатель преломления среды называют *оптической длиной пути*.

Интерференция любых (в том числе и световых) волн возникает лишь тогда, когда взаимодействующие волны имеют одинаковую частоту и не зависящий от времени сдвиг фаз в каждой точке. Источники, излучающие такие волны, называются *когерентными*. Для интерференции поляризованных волн (см. стр. 196) необходимо, кроме того, чтобы их плоскости поляризации совпадали.

Когерентные источники в оптике могут быть созданы только искусственным путем.



Цвета тонких пленок при освещении естественным светом зависят от интерференции лучей 1, 2 (в отраженном свете) или лучей 1', 2' (в проходящем свете) (рис. 79).

Оптическая разность хода интерферирующих лучей в этом случае равна

$$\Delta = 2dn \cos r + \frac{\lambda}{2},$$

где  $\lambda/2$  учитывает изменение фазы волны на  $\pi$  для вектора напряженности электрического поля при отражении от оптически более плотной среды (при углах падения, которые не превышают величину угла полной поляризации, см. ниже).

**Дифракция.** Отклонение световых лучей от прямолинейного пути при прохождении вблизи краев экранов, отверстий называется *дифракцией*.

Интенсивность волн при дифракционных явлениях можно приближенно рассчитать, пользуясь принципом Гюйгенса—Френеля. Согласно этому принципу точки волновой поверхности (стр. 100) 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).

При дифракции параллельного пучка света, падающего нормально на узкую длинную щель, интенсивность  $I_{\beta}$  волн, распространяющихся под углом  $\beta$ , определяется следующим соотношением:

$$I_{\beta} = I_0 \sin^2 \left( \frac{\pi b}{\lambda} \sin \beta \right) / \left( \frac{\pi b}{\lambda} \sin \beta \right)^2,$$

где  $I_0$  — интенсивность волн, распространяющихся в направлении  $\beta=0$ ,  $b$  — ширина щели,  $\beta$  — угол между перпендикуляром к плоскости щели и направлением распространения дифрагированных лучей (рис. 80),  $\lambda$  — длина волны света.

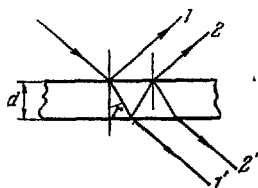


Рис. 79. Интерференция лучей, падающих на плоскопараллельную пластинку.

Направления, в которых интенсивность дифрагированного света от одной щели равна нулю, определяются из условия

$$\sin \beta_{\text{мин}} = m \frac{\lambda}{b} \quad (m = 1, 2, 3, \dots). \quad (5.9)$$

Совокупность большого числа узких параллельных щелей, имеющих одинаковую ширину и расположенных в плоскости на одинаковом расстоянии друг от друга, называется плоской дифракционной решеткой. Расстояние,

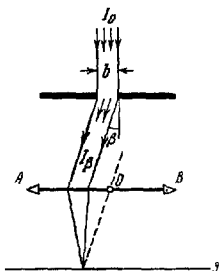


Рис. 80. Дифракция параллельных лучей от одной щели. АВ — линза, О — ее оптический центр, Э — экран, расположенный в фокальной плоскости линзы.

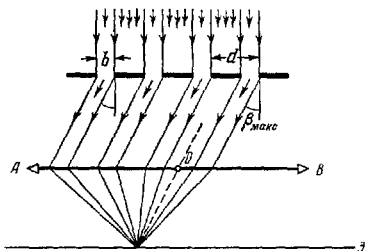


Рис. 81. Дифракция параллельных лучей от дифракционной решетки. АВ — линза, О — ее оптический центр, Э — экран, расположенный в фокальной плоскости линзы.

равное сумме ширины одной щели и ширины промежутка между соседними щелями, называется *постоянной* (или *периодом*) дифракционной решетки.

На рис. 81 приведена схема дифракционной решетки. Направления, в которых будет наблюдаться максимальная освещенность на экране, определяются из условия (при нормальном падении света)

$$d \sin \beta_{\text{макс}} = m \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (5.10)$$

где  $d$  — период решетки.

Направления, в которых интенсивность будет равна нулю, определяются из условия (5.9).

Эти направления называются главными минимумами. Кроме этих направлений, имеется еще ряд таких, в которых интенсивность дифрагированного света равна нулю. На-

правления для дополнительных минимумов определяются из условия

$$\sin \beta_{д.м} = m' \frac{\lambda}{d}$$

$$\left( m' = \frac{1}{N}, \frac{2}{N}, \dots, \frac{N-1}{N}, \frac{N+1}{N}, \dots \right),$$

где  $N$  — число щелей в решетке.

Разрешаемый дифракционной решеткой интервал длин волн ( $\Delta\lambda$ ) определяется из условия

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN.$$

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 ( $\delta$ ).

Для микроскопа разрешаемое расстояние

$$\delta \geq \frac{\lambda}{2n \sin u}, \quad (5.11)$$

где  $u$  — *апертурный угол* (половина угла между крайними лучами, падающими от точки предмета на объектив и достигающими глаза наблюдателя или экрана),  $n$  — показатель преломления среды.

**Дисперсия света.** Скорость света в данной среде зависит от длины волны. Это явление называют *дисперсией скорости 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  $E$  (а следовательно, и  $H$ ) имеют всевозможные направления (однако они остаются, взаимно перпендикулярными и плоскость, в которой они лежат, перпендикулярна к направлению распространения света). Такой свет называют *естественным*.

Из естественного света можно выделить, например, пропуская его через турмалиновую пластинку (или через поляроид), такие волны, в которых вектор  $E$  будет совершать колебания в одной и той же плоскости на всем пути

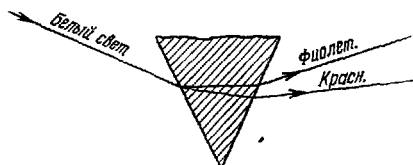


Рис 82. Ход лучей с различной длиной волны в стеклянной призме.

распространения волны. Такие волны называются *линейно поляризованными*.

Плоскость, в которой лежат векторы  $H$  в линейно поляризованной волне, называются *плоскостью поляризации*; плоскость, в которой лежат векторы  $E$ , называется *плоскостью колебаний*.

Естественный свет при отражении от поверхности диэлектриков частично поляризуется. Отраженный свет поляризован полностью при угле падения, определяемом соотношением

$$\operatorname{tg} i_B = n, \quad (5.12)$$

где  $n$  — относительный показатель преломления диэлектрика, от которого происходит отражение. Угол  $i_B$  называется *углом Брюстера*.

Проходящий через диэлектрик свет также частично поляризуется.

После прохождения света через некоторые кристаллы (например, кварц, исландский шпат) из них выходят два луча, линейно поляризованные в двух взаимно перпендикулярных плоскостях; в кристалле эти лучи 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  $E$  совершает колебания перпендикулярно к оптической оси кристалла, называется *обыкновенным*. Его скорости по различным направлениям в кристалле одинаковы.

Второй луч, у которого направления колебаний вектора  $E$  составляют различные углы с оптической осью (в зависи-

мости от угла и положения плоскости падения света), называется *необыкновенным*.

Скорость необыкновенного луча зависит от направления в кристалле. 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 искусственно путем деформаций или наложения электрического и магнитного полей. В этом случае среда действует на свет как одноосный кристалл с оптической осью, параллельной направлению деформации (или поля).

Разность оптических длин пути (для обыкновенного и необыкновенного лучей) при деформации равна

$$\Delta p = KPl, \lambda,$$

где  $K$  — постоянная, зависящая от природы вещества,  $P$  — механическое напряжение,  $l$  — толщина деформируемого слоя,  $\lambda$  — длина волны света.

Разность оптических длин пути для обоих лучей при наложении электрического или магнитного полей на вещество перпендикулярно к направлению распространения света равна

$$\Delta_E = 1,11 \cdot 10^{-8} VE^2 l, \quad \Delta_H = 1,58 CH^2 l,$$

где  $V$  и  $C$  — соответственно постоянные Керра и Коттона—Мутона,  $E$  — напряженность электрического поля ( $\text{в/см}$ ),  $H$  — напряженность магнитного поля ( $\text{а/см}$ ),  $l$  — толщина слоя вещества, проходимого светом ( $\text{см}$ ).

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*  $[\alpha] = 100 \varphi/l\rho'$ , где  $\varphi$  — угол поворота плоскости поляризации,  $l$  — толщина слоя оптически активного вещества,  $\rho'$  — число граммов растворенного вещества в  $100 \text{ см}^3$  раствора.  $[\alpha]$  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*).

Величина радиационного давления:

$$p = \frac{W}{c} (1 + \rho), \quad (5.13)$$

где  $W$  — количество лучистой энергии, падающей нормально на  $1 \text{ см}^2$  поверхности за  $1 \text{ сек}$ ,  $c$  — скорость света,  $\rho$  — коэффициент отражения.

Давление, которое производят на земную поверхность солнечные лучи в яркий день, равно приблизительно  $0,4 \text{ дин/м}^2$  ( $4 \cdot 10^{-5} \text{ дн/см}^2$ ).

## 5. Квантовые свойства света

Энергия любого вида электромагнитного излучения, в том числе и светового, всегда состоит из отдельных порций. Эти порции энергии, обладающие свойствами материальной частицы, называются *квантами излучения* или *фотонами*. Фотон — это элементарная частица (см. стр. 225). Энергия фотона  $\epsilon$  зависит от частоты излучения  $\nu$ :

$$\epsilon = h\nu,$$

где  $h = 6,625 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{сек}$  называется *постоянной Планка*.

Согласно основным положениям современной физики изменению энергии какой-либо системы на величину  $\epsilon$  соответствует изменение ее массы на величину  $\epsilon/c^2$  ( $c$  — скорость света в вакууме). Поэтому при излучении одного фотона масса излучающего тела уменьшается на величину

$$\Delta m = \frac{h\nu}{c^2} :$$

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 (*фотоэлектронная эмиссия*), возникновение ЭДС, изменение электропроводности.

Фотоэффект является одним из примеров проявления корпускулярных свойств света. Вылет электронов из освещенных тел называют *внешним фотоэффектом*.

**Законы внешнего фотоэффекта.** 1. Число электронов, освобожденных светом за 1 сек (или ток насыщения), прямо пропорционально световому потоку (при неизменном его спектральном составе).

2. Наибольшая скорость вылетевших электронов  $v_{\text{макс}}$  не зависит от силы света, а определяется частотой падающего света. Эта скорость может быть определена из уравнения Эйнштейна:

$$h\nu = \varphi + \frac{mv_{\text{макс}}^2}{2}, \quad (5.14)$$

где  $h\nu$  — энергия светового фотона,  $\varphi$  — работа выхода (см. стр. 134),  $m$  — масса электрона.

3. Для каждого вещества существует определенная частота, ниже которой фотоэффект не наблюдается. Эта частота называется *красной границей фотоэффекта* ( $\nu_k$ ). Она определяется из соотношения

$$h\nu_k = \varphi. \quad (5.15)$$

Сущность *внутреннего фотоэффекта* состоит в том, что при освещении полупроводников и диэлектриков от некоторых атомов отрываются 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. 135) 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 явлениях фотоэффекта 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. 95). 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 называют *спектрами испускания* (или иначе — *эмиссионными спектрами*).

*Спектром поглощения* называется зависимость поглощательной способности вещества от длины волны света. Спектры поглощения могут быть сплошными, полосатыми и линейчатыми.

В спектрах излучения источников света, внутренние зоны которых окружены более холодными слоями паров, наблюдаются узкие 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*.

*Линии Фраунгофера* в солнечном спектре являются линиями спектра поглощения, возникающими в результате поглощения из сплошного спектра Солнца излучения определенных длин волн парами, находящимися в его атмосфере.

## 7. Тепловое излучение

Нагретые тела излучают, кроме световых волн, также и невидимые — так называемые *ультрафиолетовые* и *инфракрасные волны*. Длина волны ультрафиолетовых волн (см. табл. 117) меньше 4000 Å; длина волны инфракрасных волн больше 8000 Å.



Электромагнитное излучение, которое возбуждается тепловым движением атомов или молекул, называется тепловым излучением.

Распределение лучеиспускательной (излучательной) способности (см. ниже) в спектре излучения абсолютно черного

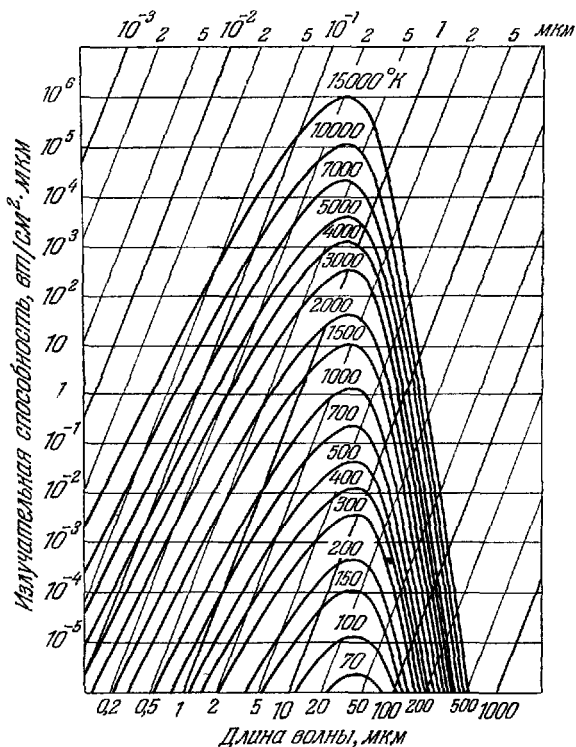


Рис. 83. Излучение абсолютно черного тела для различных температур.

тела приводится на рис. 83. Для построения использована косоугольная система координат с логарифмическими шкалами; по горизонтальной оси отложены длины волн, по наклонной оси — излучательная способность; цифры

у соответствующих кривых указывают абсолютную температуру.

Тело, полностью поглощающее падающее на него электромагнитное излучение, называют *абсолютно черным телом* (или *полным излучателем*). Такое тело можно изготовить в виде полого ящика с малым отверстием.

Отношение мощности излучения с единицы поверхности тела к соответствующему интервалу длин его волн при данной температуре называется *лучеиспускательной способностью* тела  $E_{\lambda T}$ .

Лучеиспускательная способность равна испускаемой с единицы поверхности мощности, которая приходится на единицу интервала длин волн при данной температуре.

Отношение мощности, поглощаемой единицей поверхности тела, к мощности падающего на эту поверхность потока излучения с единичным интервалом длин волн называется *поглощательной способностью*  $A_{\lambda T}$  тела при данной температуре. Лучеиспускательная способность при данной температуре пропорциональна поглощательной способности при той же температуре (*закон Кирхгофа*):

$$\frac{E_{\lambda T}}{A_{\lambda T}} = \varepsilon_{\lambda T}, \quad (5.16)$$

где  $\varepsilon_{\lambda T}$  — при данной температуре постоянная для всех тел величина.

Для абсолютно черного тела при всех длинах волн  $A_{\lambda T} = 1$  и, стало быть,  $E_{\lambda T} = \varepsilon_{\lambda T}$ .

Мощность излучения всех длин волн абсолютно черным телом ( $\varepsilon$ ) пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры  $T$  (*закон Стефана—Больцмана*):

$$\varepsilon = \sigma T^4, \quad (5.17)$$

где коэффициент пропорциональности (*постоянная Стефана—Больцмана*)

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ вт/см}^2 \cdot \text{град}^4.$$

На рис. 83 видно, что наибольшая излучательная способность приходится на определенную длину волны  $\lambda_{\text{макс}}$ . Длина волны  $\lambda_{\text{макс}}$ , которой соответствует максимальная излучательная способность абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре  $T$  (*закон смещения Вина*):

$$\lambda_{\text{макс}} \cdot T = c_1, \quad (5.18)$$

где  $c_1$  — постоянная, равная  $0,2898 \text{ см} \cdot \text{град}$ .

Испускательная способность абсолютно черного тела:

$$\epsilon_{\lambda T} = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{hc/(k\lambda T)} - 1} \quad (5.19)$$

Соотношение (5.19) называется *формулой Планка*; здесь  $c$  — скорость света в вакууме,  $\lambda$  — длина волны,  $k$  — постоянная Больцмана,  $h$  — постоянная Планка. Графически функция (5.19) представлена на рис. 83 (для различных температур).

## ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Таблица 110

Относительная видимость  $K_{\lambda}$  дневного зрения

(см. рис. 84)

Длина волны, Å	$K_{\lambda}$	Длина волны, Å	$K_{\lambda}$	Длина волны, Å	$K_{\lambda}$
4000	0,0004	5200	0,710	6400	0,175
4200	0,0040	5400	0,954	6600	0,061
4400	0,023	5600	0,995	6800	0,017
4600	0,060	5800	0,870	7000	0,0041
4800	0,139	6000	0,631	7200	0,00105
5000	0,323	6200	0,381	7400	0,00025
				7600	0,00006

Примечание. Значения относительной видимости различны для разных людей. Однако эти значения не очень сильно отличаются для людей с нормальным зрением. В таблице приведены средние значения  $K_{\lambda}$ .

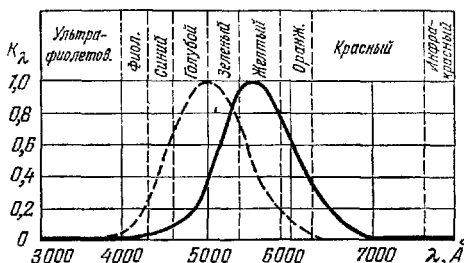


Рис. 84. График относительной видимости при дневном и сумеречном зрении (пунктирная кривая).

Таблица 111

## Яркость освещенных поверхностей

Освещенная поверхность	Яркость, <i>нт</i>
Экран в кинотеатре .....	5—20
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, <i>нт</i>
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 .....	$1,5 \cdot 10^6$ — $2 \cdot 10^6$
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 .....	20—80
От полной Луны .....	0,2
От ночного неба в безлунную ночь .....	0,0003

### Коэффициент отражения ( $\rho$ , %) при различных углах падения для стекла и воды

Угол падения, в градусах										
	0	20	30	40	50	60	70	80	89	90
Вещество										
Вода .....	2	2,1	2,2	2,5	3,4	6,0	13,5	34,5	90,0	100
Стекло .....	4,7	4,7	4,9	5,3	6,6	9,8	18	39	91	100

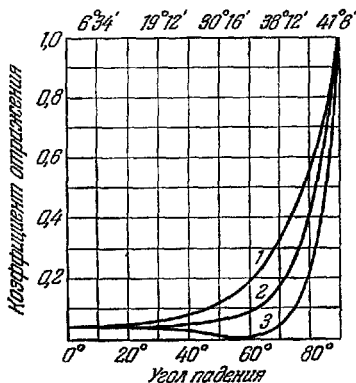
Примечание. Для стекла с пленкой кремнезема с показателем преломления 1,5 при нормальном падении  $\rho \approx 2,5$ . Для стекла с пленкой кремнезема с показателем преломления 1,9 при нормальном падении  $\rho \approx 0,8$ .

### Отражение света при переходе из стекла в воздух

Угол падения	0°	10°	20°	30°	35°	39°	39°30'	40°	60°
Угол преломления	0°	15°40'	32°	51°	63°	79°	82°	90°	—
Доля отраженной энергии, % .....	4,7	4,7	5,0	6,8	12	36	47	100	100

Примечание. Таблица составлена для стекла с показателем преломления 1,56, для которого предельный угол полного отражения равен 40°.

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 к плоскости падения); 2 — отражение неполяризованного света; 3 — отражение плоскополяризованных волн (вектор  $E$  лежит в плоскости падения). Наверху указаны углы падения при переходе света из стекла в воздух.



## Длины волн видимой части спектра

Цвет	Границы, Å	Цвет	Границы, Å
Фиолетовый ...	3800—4500	Желто-зеленый	5500—5750
Синий .....	4500—4800	Желтый .....	5750—5850
Голубой .....	4800—5100	Оранжевый ...	5850—6200
Зеленый .....	5100—5500	Красный .....	6200—7600

Таблица 117

## Длины волн ультрафиолетовой части спектра

Диапазон	Границы, Å	Производимое действие
Длинноволновый ультрафиолет	3150—3800	Загар
Средневолновый ультрафиолет	2800—3150	Эритемное действие
Коротковолновый ультрафиолет .....	2000—2800	Бактерицидное действие
Вакуумный ультрафиолет ...	< 2000	Озонообразующее действие

Таблица 118

## Отражение света металлами

Числа, приведенные в таблице, показывают долю отраженного света (в %) полированной поверхностью (при нормальном падении).

Название группы волн	Длина волны, Å	Алюминий	Медь	Сталь (1% С)	Серебро	Никель	Хром	Цинк	Кремний
Ультрафиолетовые .....	1 880	—	—	22	76	—	33	17	64
	2 000	—	—	27	76	—	36	22	73
	2 510	30	26	38	34	38	—	39	75
	3 050	—	25	44	9	44	37	48	73
	3 570	84	27	50	75	49	41	51	60
Световые .....	5 000	88	44	56	91	61	55	55	34
	6 000	89	72	57	93	65	—	58	32
	7 000	87	83	58	95	69	56	61	—
Инфракрасные	8 000	85	89	61	97	70	—	62	—
	10 000	93	90	63	97	72	57	69	—
	50 000	94	98	90	99	94	81	97	—
	100 000	97	98	94	99	—	93	—	—

**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 углов при отражении на границе с воздухом (для линии натрия  $D$ , 5893 Å).

**Длины волн главных фраунгоферовых линий**

Обозначение линий	Элемент	$\lambda$ , Å	Обозначение линий	Элемент	$\lambda$ , Å
$A$	Кислород .	7621	$b_4$	Железо, магний	5167,4
$a$	» .....	7185	$c$	» .....	4957,6
$B$	» .....	6870	$F$	Водород .....	4861,3
$C$	Водород ..	6582,8	$d$	Железо .....	4668
$\alpha$	Кислород .	6278,1	$e$	» .....	4383,6
$D_1$	Натрий ..	5895,9	$f$	Водород .....	4340,5
$D_2$	» .....	5890,0	$G'$	Железо .....	4325,8
$D_3$	Гелий .....	5875,6	$G$	» , кальций	4307,9
$E$	Железо ...	5269,6	$g$	Кальций .....	4226,7
$b_1$	Магний .	5183,6	$h$	Водород .....	4101,7
$b_2$	» .....	5172,7	$H$	Кальций .....	3963,6
$b_3$	Железо ...	5169,0	$k$	» .....	3933,6

**Показатели преломления для длин волн, соответствующих  
некоторым фраунгоферовым линиям**

Фраунгоферова линия		$A$	$B$	$D$	$F$	$H'$
Длина волны, Å		7590	6870	5890	4860	3970
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

## Показатели преломления газов

Газ или пар	$n$	Газ или пар	$n$
Азот .....	1,000297	Ртуть .....	1,000933
Аммиак .....	1,000377	Селен .....	1,001565
Ацетилен .....	1,000606	Сернистый ангидрид	1,000737
Бензол .....	1,001812	Сероводород .....	1,000641
Водород .....	1,000138	Теллур .....	1,002495
Водяной пар .....	1,000257	Углекислый газ ...	1,000450
Воздух .....	1,000292	Хлороформ .....	1,001455
Гелий .....	1,000035	Цинк .....	1,002050
Кислород .....	1,000272	Четыреххлористый	
Метан .....	1,000441	углерод .....	1,001763

Примечание. Значения показателей преломления, указанные в таблице, относятся к длине волны, соответствующей желтой линии натрия ( $D$ ), и приведены к плотности, соответствующей  $0^\circ\text{C}$  и давлению 760 мм рт. ст., на основании соотношения  $(n-1)/\rho = \text{const}$  (для данного газа).

Показатели преломления твердых тел и жидкостей  
(при  $15^\circ\text{C}$ , для  $D$ -линии натрия, относительно воздуха)

Вещество	$n$	Вещество	$n$
<b>Твердые тела</b>		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
<b>Жидкости</b>		<b>Масла</b>	
Анилин .....	1,590	Гвоздичное .....	1,532
Бензол .....	1,504	Кедровое .....	1,516
Вода ( $20^\circ\text{C}$ ) .....	1,333	Коричное .....	1,601
Глицерин .....	1,47	Оливковое .....	1,46
Канадский бальзам	1,53	Парафиновое .....	1,44
Серная кислота ..	1,43		



Зависимость показателя преломления от длины волны

Название волн	Длина волны, $\lambda$	Стекло (15 °С)		Кварц (18 °С)		Плавленый кварц	Вода при 20 °С	Сильвин (КС) при 18 °С
		легкий крон	тяжелый крон	обыкновенный луч	необыкновенный луч			
Инфракрасные	223 000	—	—	—	—	—	—	1,3712
	94 290	—	—	—	—	—	—	1,4587
	42 000	1,4946	1,6153	1,4569	1,5261	—	—	1,4720
	21 720	1,5042	1,6268	1,5180	1,5402	—	—	1,4750
Видимые	12 560	—	—	1,5316	—	—	1,3210	1,4778
	6 708	1,5140	1,6434	1,5415	1,5505	1,4561	1,3308	1,4866
	6 438	1,5149	1,6453	1,5423	1,5514	1,4568	1,3314	1,4877
	5 893	1,5170	1,6499	1,5443	1,5534	1,4585	1,3330	1,4904
	4 864	1,5230	1,6637	1,5497	1,5590	1,4632	1,3371	1,4983
	4 047	1,5318	1,6852	1,5572	1,5667	1,4697	1,3428	1,5097
Ультрафиолетовые	3 034	1,5552	—	1,5770	1,5872	1,4869	1,3581	1,5440
	2 144	—	—	1,6305	1,6427	1,5339	1,4032	1,5618
	1 852	—	—	1,6759	1,6901	1,5743	—	1,8270
Температурный коэффициент, град <sup>-1</sup>	—	—1·10 <sup>-6</sup>	3·10 <sup>-6</sup>	—	—5·10 <sup>-6</sup>	—3·10 <sup>-6</sup>	—8·10 <sup>-6</sup>	—4·10 <sup>-6</sup>

Примечания. 1. Показатели преломления даны относительно воздуха.

2. Температурный коэффициент есть изменение показателя преломления при повышении температуры на 1 °С. 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.

## 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, окрашен-	
» шоколадного		ные белилами .....	50
» цвета .....	4	Материалы, окрашен-	
Зельвет черный .....	0,4	ные желтым .....	40
Дерево (сосна) .....	40	Почва влажная .....	8
Глиняная глина (желтая)	24		

## Постоянные Керра и Коттона—Мутона

Вещество	$B, 10^{-7}$	$C, 10^{-12}$
Бензол .....	0,60	7,5 (26 °С, 5800 Å)
Сероуглерод .....	3,21	-4,0 (28 °С, 5400 Å)
Хлороформ .....	-3,46	-0,8 (20 °С, 5460 Å)
Вода .....	4,7	-0,014 (20 °С, 5460 Å)
Хлорбензол .....	10,0	10,2 (25 °С, 5460 Å)
Нитротолуол .....	123	
Нитробензол .....	220	24,1 (20 °С, 5890 Å)

Примечания. 1. Значения  $B$  указаны для температуры 20 °С и длины волны натрия 5890 Å.

2. Знак минус указывает на то, что скорость луча, направление колебаний которого совпадает с направлением поля, будет больше по сравнению с лучом, направление колебаний которого перпендикулярно к направлению поля.

**Удельная постоянная вращения  $[\alpha]$  при 20 °С  
(в угловых градусах/дм)**

Вещество	Растворитель	$[\alpha]$ ( $\lambda = 5893 \text{ \AA}$ )	Концентрация $p'$
Тростниковый сахар	Вода ..	$66,47 + 1,27 \cdot 10^{-2} p' - 3,8 \cdot 10^{-4} (p')^2$	0—50
Глюкоза .....	Вода ..	$52,50 + 1,88 \cdot 10^{-2} p' + 5,17 \cdot 10^{-4} (p')^2$	0—35
Винокаменная кислота .....	Вода ..	$14,83 - 0,146 p'$	0—50
Скипидар .....	Чистый	-37	—
Камфора .....	Спирт .	$40,9 + 0,135 p'$	10—50
Хинин .....	Спирт .	-169	2,0
Миндальная кислота	Вода ..	+156	3,2

Примечание. Минус показывает, что вращение происходит против часовой стрелки, если смотреть на вещество против хода лучей.

**Вращательная дисперсия при 20 °С**

Тростниковый сахар в воде ( $p' = 10-26$ )		Винная кислота в воде ( $p' = 28,62$ )		Кварц (вдоль оптической оси)	
$\lambda, \text{ \AA}$	$[\alpha]$	$\lambda, \text{ \AA}$	$[\alpha]$	$\lambda, \text{ \AA}$	$[\alpha]$
3000	309	2750	-296,8	1854	370,9
4861	100,3	3000	-166,0	1935	322,8
5351	81,8	3500	-16,8	2571	143,3
5893	66,5	4500	6,6	4340	41,92
6563	52,9	5500	8,4	4861	32,76
		5890	9,8	5893	21,72
				6563	17,32

Примечание При повышении температуры на 1 °С  $[\alpha]$  увеличивается на 0,003 первоначального значения (для  $\lambda = 5893 \text{ \AA}$ )

## Спектры испускания металлов и газов

Алюминий (дуга)	Медь (ду- га в ва- кууме)	Ртуть (ртутная лампа)	Натрий (в пла- мени)	Кадмий (дуга)	Цинк (ду- га в ва- кууме)
3083	3248	3126	<u>5889,97 о</u>	3261	3036
3093	3274	3131	<u>5895,93 о</u>	3404	3072
3944 ф	4023 ф	3650		3466	3345
3962 ф	4063 ф	4046,8 ф		3611	4680 з
4663 з	5105,5 з	<u>4358,3 ф</u>		3982 ф	4722 з
5057 з	5153,3 з	4916,4		4413 з	4811 з
5696 ж	5218,2 з	4959,7 з		4678 з	4912 з
5723 ж	5700	5460,7 з		4799,9 з	4925 з
	<u>5782,1 ж</u>	5769,6 ж		<u>5085,8 з</u>	6103 о
	<u>5782,2</u>	5790,7 ж		5338 з	6362 о
		6152,0 о		5379 з	
		6232,0 о		6438,5 к	
Азот	Аргон	Водород	Гелий	Кислород	Неон
(в газовом разряде)					
5754	3949,0	4101,7	3888,6	5200	4537,8
5803	4044,4	4340,4	<u>4026,2</u>	5300	4575,9
5853	<u>4158,6</u>	4340,5	<u>4120,8</u>	(полоса)	4704,4
5904	4164,2	4861,28	5015,7	5550	4708,9
5957	4181,9	4861,36	5875,6	5640	4715,3
6012	4190	6562,71	<u>6678,1</u>	(полоса)	4788,9
6068	4191,0	6562,85	<u>7065,2</u>		5330,8
6251	<u>4198,3</u>				5341,1
6321	<u>4200,7</u>				5358,0
6393	<u>4251,2</u>				5400,6
6467	<u>4259,4</u>				5852,5
6543	<u>4266,3</u>				5881,9
6622	<u>4272,2</u>				5965,4
6703	<u>4300,1</u>				6143,1
6787	<u>4333,6</u>				6266,5
	4335,4				6383,0
					6402,2
					<u>6506,5</u>
					7173,9
					7245,2

Примечания. 1. Длины волн измерены в воздухе при 15 °С и давлении 760 мм рт. ст.  
2. Цвета видимых линий обозначены начальными буквами соответствующего цвета.  
3. Наиболее яркие линии подчеркнуты.

## Световая отдача, КПД и яркость источников света

Тип лампы	лм/вт	КПД, %	$t, ^\circ\text{K}$	Яркость, нт
50 вт, пустотная угольная	2,5	0,4	2095	$5 \cdot 10^5$
50 вт, пустотная вольфрамовая .....	10	1,6	2460	$15 \cdot 10^5$ — $20 \cdot 10^5$
50 вт, газонаполненная вольфрамовая .....	10	1,6	2685	$5 \cdot 10^6$
500 вт, газонаполненная вольфрамовая .....	17,5	2,8	2900	$10^7$
2000 вт, газонаполненная вольфрамовая .....	21,2	3,5	3020	$13 \cdot 10^8$ — $15 \cdot 10^8$
Вольтова дуга .....	25	4	4000	$15 \cdot 10^7$ (в кратере)
Люминесцентная лампа	40—60	6,4	—	$1,5 \cdot 10^4$

Примечание. Световая отдача есть отношение полного светового потока к мощности тока, питающего источник света.

КПД есть отношение мощности светового излучения для длины волны  $5550 \text{ \AA}$  к мощности, потребляемой источником света:

$$\text{КПД} = F/(680 W),$$

где  $F$  — световой поток в лм,  $W$  — мощность, потребляемая источником, в вт.

Таблица 131

## Работа выхода электронов и красная граница фотоэффекта

Вещество	$\phi, \text{эв}$	$\lambda_K, \text{ \AA}$
Закись меди .....	5,15	2 500
Слюда .....	4,8	2 548
Хлористый натрий .....	4,2	2 950
Бромистое серебро .....	3,7—5,14	3 350—2 400
Торий на вольфраме .....	2,62	4 730
Натрий на вольфраме .....	2,10	5 900
Цезий на вольфраме .....	1,36	9 090
» » платине .....	1,31	8 950
Барий на вольфраме .....	1,1	11 300
Окись бария на окисленном вольфраме	1,0—1,1	12 400—11 300

# 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

$$e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ к.}$$

За единицу массы принимается  $1/12$  часть массы изотопа (см. стр. 218) углерода с массовым числом 12. Эта единица называется *атомной единицей массы* (сокращенно а.е.м.);

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$$

Масса наилегчайшего атома — атома водорода — равна 1,008 а.е.м.

За единицу энергии принимается электрон-вольт (эв), см. стр. 133.

$$1 \text{ эв} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ дж} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг.}$$

Моменты импульсов частиц (или моменты количества движения) измеряются в единицах  $h/2\pi$ . Магнитные моменты электронов измеряются в единицах  $eh/4\pi mc$ ; эта единица называется *магнетон Бора*. В этом выражении  $h$  — постоянная Планка,  $e$  — заряд электрона,  $m$  — его масса,  $c$  — скорость света в вакууме. Магнитные моменты ядер измеряются в ядерных магнетонах; ядерный магнетон равен  $eh/4\pi Mc$ , где  $M$  — масса протона,  $e$  — его заряд.

$$\text{Магнетон Бора} \quad \mu_B = 9,273 \cdot 10^{-21} \text{ эрг/гс,}$$

$$\text{Магнетон ядерный} \quad \mu_J = 5,050 \cdot 10^{-24} \text{ эрг/гс.}$$

## 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 атома водорода называется протоном. Масса протона равна  $1,66 \cdot 10^{-24}$  г, электрона —  $9,11 \cdot 10^{-28}$  г (1/1836 часть массы протона). Заряд электрона и протона равен элементарному электрическому заряду.

Число элементарных зарядов ядра равно порядковому номеру элемента в периодической системе Д. И. Менделеева. Количество электронов в атоме (нейтральном) равно числу элементарных зарядов ядра.

Движение электронов в атоме можно приближенно описывать как движение вокруг ядра по определенным круговым и эллиптическим орбитам (рис. 86). Эти орбиты

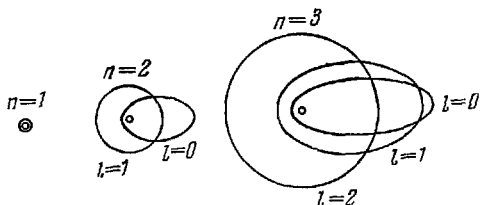


Рис. 86. Возможные орбиты электрона в атоме водорода (для различных квантовых чисел) Большие полуоси эллипса относятся как квадраты целых чисел  $1^2 : 2^2 : 3^2 : 4^2$  и т. д.

называют *стационарными*. Двигаясь по стационарным орбитам, электрон, несмотря на наличие у него ускорения, не излучает. Радиусы стационарных орбит определяются из условия

$$m v_n r_n = \frac{h}{2\pi} n, \quad (6.1)$$

где  $m$  — масса электрона,  $v_n$  — его линейная скорость,  $r_n$  — радиус  $n$ -й орбиты,  $h$  — постоянная Планка,  $n = 1, 2, 3, \dots$

Определенным стационарным орбитам электронов (точнее, стационарным состояниям атома) соответствуют определенные величины энергии (дискретные уровни энергии).

Уровни энергии ( $W_n$ ) и радиусы круговых орбит для атома водорода можно вычислить по формулам:

$$W_n = -\frac{2\pi^2 m e^4}{n^2 h^2}, \quad (6.2)$$

$$r_n = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m e^2}. \quad (6.3)$$

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 этом кванта (порции) энергии  $h\nu$  определяется условием

$$h\nu = W_2 - W_1, \quad (6.4)$$

где  $W_1$  и  $W_2$  — дискретные уровни энергии в атоме до и после перехода электрона.

По современным воззрениям стационарные орбиты не представляют действительных движений электрона в атоме и вопрос о строении атома трактуется иначе — с учетом волновых свойств частиц (см. стр. 221). Однако понятие об уровнях энергии в атоме остается в силе.

### 3. Электронные оболочки в многоэлектронных атомах

Состояние электрона в атоме определяется четырьмя квантовыми числами. *Главное квантовое число*  $n$  определяет уровни энергии (или большую ось эллипса). Второе квантовое число — *орбитальное квантовое число*  $l$  — связано с малой полуосью эллипса и определяет форму орбиты;  $l$  изменяется в пределах от 0 до  $n-1$ ; когда  $l = n-1$ , орбита является круговой. *Момент импульса* (или *угловой момент*) определяется этим числом:  $p = \sqrt{l(l+1)}\hbar$ , где  $\hbar = h/2\pi$ . Третье квантовое число — *магнитное квантовое число*  $m$  — определяет ориентацию орбиты в магнитном поле; орбиты ориентируются таким образом, что проекция момента импульса  $p_z$  на направление магнитного поля равны целым числам (в единицах  $\hbar$ ):  $p_z = m\hbar$ ;  $m$  изменяется в пределах от  $-l$  до  $+l$ .

Кроме орбитального момента импульса, электрон имеет *собственный момент импульса* (*спин*), равный по величине  $\sqrt{s(s+1)}\hbar$ , где  $s=1/2$ . Это — четвертое квантовое число, которое называется *спиновым квантовым числом*. Собственный момент импульса электрона имеет лишь



две проекции на направление магнитного поля:  $+1/2$  и  $-1/2$  (в единицах  $\hbar$ ). Принято говорить, что спин электрона (или другой частицы) равен половине ( $1/2$ ); при этом подразумевается, что проекции собственного момента импульса равны  $\pm(1/2)\hbar$ .

Четыре квантовых числа определяют энергетические уровни электрона.

Электроны в атоме подчиняются *принципу Паули*: в данном состоянии может находиться лишь один электрон.

При переходе электрона с одного энергетического уровня на другой изменяются квантовые числа. Как показывают теория и опыт, переход электрона возможен на такие уровни, когда изменение  $\Delta m = 0, \pm 1$ , изменение  $\Delta l = \mp 1$ .

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*.

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  $l = 0, 1, 2, 3$  и т. д.

Наибольшее число электронов в слое равно  $2n^2$ . Распределение электронов по слоям и оболочкам приводится в табл. 132 и 133.

Химические свойства атомов определяются электронами внешней его оболочки. Переходы электронов в этой оболочке создают 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 излучаются линейчатые спектры рентгеновского излучения, называемые *характеристическими*. Длины волн этих спектров определяются только дискретными уровнями энергии атомов данного вещества.

#### 4. Атомное ядро

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 нейтро-

нов, называются *изотопами*. Сумма нейтронов и протонов в ядре называется *массовым числом* ( $A$ ).

Число нейтронов в ядре  $N = A - Z$ , где  $Z$  — атомный номер ядра, равный порядковому номеру ядра в периодической системе. Заряд ядра равен  $Ze$ . Обе частицы — протон и нейтрон — называются *нуклонами* (ядерными частицами); они связаны внутри ядра особыми силами, которые называются *ядерными силами*. Нуклоны в ядре находятся на дискретных уровнях энергии. 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 большую стабильность.

Плотность вещества в ядре очень большая (порядка  $10^{11}$  кг/см<sup>3</sup>), размер ядра имеет порядок  $10^{-13}$  см (1 *ферми*). Радиус ядра определяется приближительной формулой

$$r = 1,2 A^{1/3} \text{ ферми},$$

где  $A$  — массовое число.

Спин ядра  $J$  складывается из спинов нуклонов и их моментов импульса; спин ядра имеет полуцелое значение при нечетном числе нуклонов; при четном числе нуклонов спин ядра равен нулю или целому числу. Спины ядер не превышают нескольких единиц (в единицах  $\hbar$ ).

Ядро обозначают символом химического элемента с указанием атомного номера и массового числа в качестве нижнего и верхнего индексов соответственно (например,  $Al_{13}^{27}$  — алюминий с атомным номером 13 и массовым числом 27).

Ядерные силы сильно изменяются с изменением расстояния; на расстоянии 1 *ферми* ядерные силы между протонами в 35 раз больше сил электрического отталкивания и в  $10^{38}$  раз больше гравитационного взаимодействия.

На расстояниях меньше 0,7 *ферми* ядерные силы действуют как силы отталкивания, на расстояниях больше 0,7 *ферми* — как силы притяжения; на расстоянии 2 *ферми* их действие равно нулю. Ядерные силы не зависят от электрического заряда и обладают свойством насыщения.

Ядерные силы имеют три составляющих: 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. Кривые потенциальных энергий, соответствующих компонентам ядерных сил для одинако-

вых нуклонов, приводятся на рис. 87 (для случая, когда  $l \perp J$ ). Сила равна изменению потенциальной энергии на единицу длины.

О величине и форме ядра судят по рассеянию электронов высоких энергий.

Электрический заряд распределен по ядру неравномерно; в сердцевине ядра плотность постоянна; сердцевина окружена оболочкой, в которой плотность уменьшается. Радиусом ядра принято считать расстояние от центра до

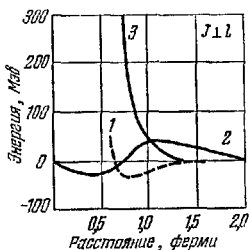


Рис. 87. Компоненты ядерных сил для одинаковых нуклонов (для случая, когда  $l \perp J$ ); кривая 1 — центральная сила, кривая 2 — спин-спиновая сила, кривая 3 — спин-орбитальная сила.

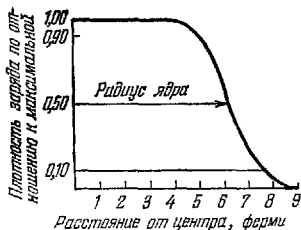


Рис. 88. Распределение заряда в ядре золота.

слоя, в котором плотность заряда равна половине его максимального значения.

Распределение заряда в ядре золота показано на рис. 88.

В зависимости от числа протонов и нейтронов ядра могут иметь форму сферы, сигары или груши.

## 5. Ядерные превращения

При образовании ядра из протонов и нейтронов масса полученного ядра будет меньше суммы масс всех протонов и нейтронов. Соответствующую разность масс называют *дефектом массы ядра*.

Энергия, выделяющаяся при образовании одного ядра из нейтронов и протонов, называется *энергией связи ядра* ( $E$ ). В расчетах обычно пользуются величиной  $E/A$ , т. е. величиной энергии связи, приходящейся на один нуклон.

Среднее значение величины  $E/A$  для тяжелых ядер принимается равным  $8 \cdot 10^6$  эв.

Некоторые из тяжелых ядер (уран, торий, радий) самопроизвольно распадаются с образованием новых ядер и выделением  $\alpha$ -частиц, электронов и фотонов большой энергии ( $\gamma$ -лучей, см. шкалу электромагнитных волн). Это свойство называется *естественной радиоактивностью*.

Для радиоактивности установлены следующие законы:

1. Радиоактивный распад не зависит от внешних условий (температуры, давления, химических взаимодействий).

2.  $\alpha$ - и  $\gamma$ - частицы имеют дискретные значения энергии;  $\beta$ -частицы имеют различные значения энергии;  $\beta$ -распад сопровождается излучением нейтрино и антинейтрино.

3. Изменение числа радиоактивных ядер определяется формулой

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 2^{-t/T}, \quad (6.5)$$

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,  $\lambda$  — вероятность распада одного ядра за 1 сек (постоянная распада). *Средним временем жизни ядра* называется величина  $\tau = 1/\lambda$ .

4. Новые ядра, получающиеся после радиоактивного распада, занимают в периодической системе элементов другие места: при  $\alpha$ -распаде порядковый номер уменьшается на 2, при электронном распаде — увеличивается на 1, при позитронном распаде — уменьшается на 1. Этот закон называется *законом смещения*.

Искусственные ядерные превращения можно вызвать путем облучения элементов протонами, нейтронами, ядрами дейтерия, гелия или более тяжелых элементов, а также  $\gamma$ -лучами. Это явление называется *искусственной радиоактивностью*. Превращения ядер при искусственной радиоактивности называются *ядерными реакциями*. При ядерных реакциях могут образовываться новые радиоактивные изотопы, которых нет на Земле. При искусственной радиоактивности ядра в основном испускают  $\beta$ -частицы и  $\gamma$ -лучи.

Число ядерных реакций  $K$ , проходящих в веществе за 1 сек при бомбардировке потоком частиц  $P$ , определяется формулой

$$K = \sigma n_0 P, \quad (6.6)$$

где  $n_0$  — число атомов в веществе,  $\sigma$  — коэффициент пропорциональности, который называется *эффективным сечением ядерной реакции*; этот коэффициент имеет размер-

ность площади и численно равен вероятности ядерной реакции за 1 сек при бомбардировке одного ядра потоком с плотностью в 1 частицу на  $1 \text{ см}^2$  за 1 сек.

Эффективные сечения ядерных реакций измеряются в барнах:  $1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2$ .

Эффективное сечение для быстрых частиц равно приблизительно площади поперечного сечения ядра, т. е.  $\sigma = \pi r_0^2$  ( $r_0$  — радиус ядра).

Среднее распределение энергии при делении одного тяжелого ядра:

кинетическая энергия нейтронов . . . . .	5 Мэв,
кинетическая энергия продуктов деления . . . . .	165 Мэв,
энергия $\gamma$ -излучения . . . . .	8 Мэв,
энергия, уносимая нейтрино . . . . .	11 Мэв,
энергия продуктов деления ( $\beta$ -распад и $\gamma$ -излучение) . . . . .	11 Мэв.

Ядерные превращения используются для освобождения ядерной энергии путем деления тяжелых ядер (например, урана  $U^{235}$ ) 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 называют *термоядерными*.

## 6. Волновые свойства частиц

Всякая движущаяся частица обладает волновыми свойствами.

Например, электроны, проходя через металлическую пленку, дают дифракционную картину, подобную

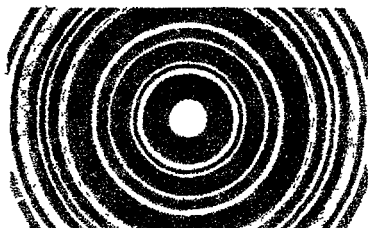


Рис 89. Дифракция электронов на тонкой серебряной фольге. дифракционной картине от рентгеновских и  $\gamma$ -лучей (рис. 89).

Длина волны частицы определяется из соотношения

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (6.7)$$

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; такие потери 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

$$N_d = N_0 e^{-\mu d}, \quad (6.8)$$

где  $N_0$  — начальная интенсивность пучка электронов,  $N_d$  — интенсивность пучка после прохождения слоя вещества толщиной  $d$ ,  $\mu$  — линейный коэффициент поглощения (в  $\text{см}^{-1}$ ),  $\mu/\rho$  — массовый коэффициент поглощения, который имеет приблизительно одинаковое значение в различных веществах (для одного излучателя),  $\rho$  — 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  $\alpha$ -частиц длина пробега (в  $\text{см}$ ) в воздухе (при нормальных условиях) определяется выражением

$$R = 0,309 E^{3/2}, \quad (6.9)$$

где  $E$  — энергия в  $\text{Мэв}$ , изменяющаяся в пределах от 4 до 7  $\text{Мэв}$ .

**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 изменяется кинетическая энергия.

После нескольких столкновений происходит захват нейтронов ядрами.

**Гамма-излучение.** Ослабление интенсивности пучка  $\gamma$ -лучей определяется соотношением

$$I = I_0 e^{-\mu d}, \quad (6.10)$$

где  $I_0$  — интенсивность пучка при входе в слой вещества,  $d$  — толщина слоя,  $\mu$  — линейный коэффициент ослабления,  $\mu/\rho$  — 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 (комptonовское). 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  $2mc^2$  ( $m$  — масса электрона,  $c$  — скорость света), может превратиться вблизи ядра в пару частиц — электрон и позитрон, которые производят ионизацию атомов вещества.

Таким образом, коэффициент полного ослабления

$$\mu = \sigma + \tau + \kappa, \quad (6.11)$$

где  $\sigma$ ,  $\tau$ ,  $\kappa$  — коэффициенты ослабления, учитывающие комptonовское рассеяние, фотоэлектрическое поглощение и образование электрон-позитронных пар соответственно.

## 8. Единицы измерения радиоактивности и ионизирующих излучений

Единица активности радиоактивных препаратов — *кюри\**) — равна активности изотопа, при которой в 1 сек происходит  $3,7 \cdot 10^{10}$  актов распада. Производными от

\*) В настоящее время активность измеряется числом распадов в секунду (*расп/сек*).

этой единицы являются *милликюри* ( $10^{-3}$  *кюри*) и *микрокюри* ( $10^{-6}$  *кюри*). Масса радиоактивного элемента, активность которого равна 1 *кюри*, может быть рассчитана по формуле

$$M = 8,9 \cdot 10^{-14} AT \text{ г,}$$

где  $A$  — массовое число,  $T$  — период полураспада (в *сек*).

Величина излучения, измеряемая по ионизации воздуха, называется *дозой облучения*. Доза облучения измеряется в рентгенах. *Рентген* ( $R$ ) — это такая доза облучения, под действием которой в 1  $\text{см}^3$  сухого воздуха при давлении 760 мм рт. ст. и температуре  $0^\circ\text{C}$  образуются ионы, несущие 1 ед. заряда СГСЭ. При дозе облучения 1  $R$  в 1  $\text{см}^3$  воздуха образуются  $2,08 \cdot 10^9$  пар ионов.

Доза, отнесенная к единице времени, называется *мощностью дозы*. Единицы измерения мощности дозы: рентген/час ( $R/\text{час}$ ), рентген/минута ( $R/\text{мин}$ ), рентген/секунда ( $R/\text{сек}$ ).

Энергия любого вида излучения, поглощаемая единицей массы облучаемой среды, называется *поглощенной дозой*. Поглощенная доза измеряется в *радах*. *Рад* — поглощенная доза излучения, равная 100 эрг на 1 г облученного вещества ( $\text{эрг/г}$ ).

Чтобы учесть различное биологическое действие любых видов излучений, вводится единица — биологический эквивалент рентгена (*бэр*). 1 *бэр* — количество энергии, поглощенной 1 г живой ткани при облучении любым видом ионизирующего излучения и вызвавшей такой же биологический эффект, как поглощенная доза в 1 *рад* рентгеновского или  $\gamma$ -излучения;

$$\text{доза (в бэр)} = \text{доза (в рад)} \times \text{ОБЭ,}$$

где ОБЭ — относительная биологическая эффективность, зависящая от вида излучения, рассматриваемого биологического процесса и мощности дозы. Ориентировочные значения ОБЭ приводятся ниже:

рентгеновские и $\gamma$ -лучи, электроны	1
$\alpha$ -частицы, протоны .....	10—20
тепловые нейтроны .....	3
быстрые нейтроны ..	10
многозарядные ионы .....	20

ОБЭ показывает, во сколько раз биологическое действие данного излучения отличается от действия рентгеновского излучения или  $\gamma$ -лучей.



## 9. Классификация 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 частицы и соответствующей античастицы по отношению друг к другу также являются частицами и античастицами.

*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,  $\pi$ -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  $\pi$ -мезонов —  $0$ .

Центры зарядовых мультиплетов гиперонов смещены по отношению к соответствующим центрам нуклонов. *Странность* — квантовое число, которое определяется как удвоенная величина смещения центра зарядового мультиплета. Для  $\pi$ -мезонов и нуклонов странность равна нулю.

## 10. Превращения частиц

Вследствие различного типа взаимодействий одни элементарные частицы превращаются в другие. Например, при слабом взаимодействии (которое, однако, в  $10^{26}$  раз сильнее гравитационного взаимодействия) нейтрон превращается в протон, электрон и антинейтрино:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu};$$

мезоны распадаются по схемам:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu},$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu} + \nu,$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu,$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}.$$

При столкновениях частиц и античастиц происходят превращения по следующим схемам:

электрон + позитрон  $\rightarrow$  два гамма-кванта,

т. е. 
$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma;$$

протон + антипротон  $\rightarrow$  пять пи-мезонов,

т. е. 
$$p + \bar{p} \rightarrow 2\pi^+ + 2\pi^- + \pi^0.$$

При торможении  $\gamma$ -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 из частиц, которые имеют массу покоя, образуются частицы ( $\gamma$ -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. 139.

## ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

### Энергетические уровни атома водорода

Энергетические уровни подсчитываются по формуле (6.2), где  $n$  полагается равным 1, 2, 3, 4 и т. д. Используя схему уровней, легко подсчитать частоты спектральных линий в спектре атома водорода из соотношения (6.4).

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 *серии Бальмера* (четыре линии этой серии лежат в видимой

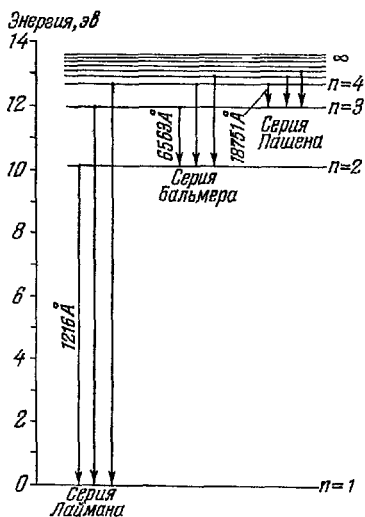


Рис. 90. Схема энергетических уровней и спектр излучения атома водорода.

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 в Å в данной серии ( $1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ см}$ ).

# ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

ПЕРИ- ОДЫ	РЯДЫ	ГРУППЫ							
		I	II	III	IV	V			
1	I	H 1 1,00797							
2	II	Li 3 6,939	Be 4 9,0122	5	B 6 10,811	C 7 12,01115	N 8 14,0067		
3	III	Na 11 22,9898	Mg 12 24,305	13	Al 14 26,9815	Si 15 28,086	P 16 30,9738		
4	IV	K 19 39,102	Ca 20 40,08	21	Sc 22 44,956	Ti 23 47,90	V 24 50,942		
	V	29	Cu 30 63,546	Zn 31 65,37	32	Ga 33 69,72	Ge 34 72,59	As 35 74,9216	
5	VI	Rb 37 85,47	Sr 38 87,62	39	Y 40 88,905	Zr 41 91,22	Nb 42 92,906		
	VII	47	Ag 48 107,868	Cd 49 112,40	50	In 51 114,82	Sn 52 118,69	Sb 53 121,75	
6	VIII	55	Ba 56 137,34	57	La * 58 138,91	Hf 59 178,49	Ta 60 180,948		
	IX	79	Au 80 196,967	81	Hg 82 200,59	Tl 83 204,37	Pb 84 207,19	Bi 85 208,980	
7	X	87	Fr (223)	88	Ra (226)	89	Ac ** (227)	104	Ku (260)

\* ЛАНТА

58	59	60	61	62	63	64
Ce 20 140,12	Pr 21 140,907	Nd 22 144,24	Pm 23 (147) *	Sm 24 150,35	Eu 25 151,96	Gd 26 157,25

\*\* А КТИ

90	91	92	93	94	95	96
Th 232,038	Pa (231)	U 238,03	Np (237)	Pu (244)	Am (243)	Cm (247)

В КВАДРАТНЫХ СКОБКАХ УКАЗАНЫ МАССОВЫЕ

Примечание: В клетках таблицы указаны: символ элемента, сверху — порядковый (атомный) номер, внизу — атомный вес элемента. Столбцы цифр указывают число электронов в оболочках:

## ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ЭЛЕМЕНТОВ											
VI		VII				VIII					
						He 2 4,0026 <sub>2</sub>					
8 O 15,9994 <sub>2</sub>		9 F 18,9984 <sub>2</sub>				Ne 10 20,179 <sub>2</sub>					
16 S 32,064 <sub>2</sub>		17 Cl 35,453 <sub>2</sub>				Ar 18 39,948 <sub>2</sub>					
24 Cr 51,996 <sub>2</sub>		25 Mn 54,9380 <sub>2</sub>		26 Fe 55,847 <sub>2</sub>		27 Co 58,9332 <sub>2</sub>		28 Ni 58,71 <sub>2</sub>			
34 Se 78,96 <sub>2</sub>		35 Br 79,904 <sub>2</sub>				36 Kr 83,80 <sub>2</sub>					
42 Mo 95,94 <sub>2</sub>		43 Tc (99)* <sub>2</sub>		44 Ru 101,07 <sub>2</sub>		45 Rh 102,905 <sub>2</sub>		46 Pd 106,4 <sub>2</sub>			
52 Te 127,60 <sub>2</sub>		53 I 126,9044 <sub>2</sub>				54 Xe 131,30 <sub>2</sub>					
74 W 183,85 <sub>2</sub>		75 Re 186,2 <sub>2</sub>		76 Os 190,2 <sub>2</sub>		77 Ir 192,2 <sub>2</sub>		78 Pt 195,09 <sub>2</sub>			
84 Po (210)* <sub>2</sub>		85 At (210) <sub>2</sub>				86 Rn (222) <sub>2</sub>					
(U)											

## НОИДЫ

65 Tь 158,924 <sub>2</sub>		66 Dy 162,50 <sub>2</sub>		67 Ho 164,930 <sub>2</sub>		68 Er 167,26 <sub>2</sub>		69 Tu 168,934 <sub>2</sub>		70 Yь 173,04 <sub>2</sub>		71 Lu 174,97 <sub>2</sub>	
-------------------------------	--	------------------------------	--	-------------------------------	--	------------------------------	--	-------------------------------	--	------------------------------	--	------------------------------	--

## НОИДЫ

97 Bk (247) <sub>2</sub>		98 Cf (252)* <sub>2</sub>		99 Es (254) <sub>2</sub>		100 Fm (257) <sub>2</sub>		101 Md (257) <sub>2</sub>		102 No (255) <sub>2</sub>		103 Lw (256) <sub>2</sub>	
-----------------------------	--	------------------------------	--	-----------------------------	--	------------------------------	--	------------------------------	--	------------------------------	--	------------------------------	--

ЧИСЛА НАИБОЛЕЕ УСТОЙЧИВЫХ ИЗОТОПОВ

первая цифра снизу — в слое K, вторая — в L, и далее в M, N, O, P, Q. В квадратных скобках приведены массовые числа наиболее устойчивых или лучше изученных\* изотопов.

## Распределение электронов в атоме по слоям и оболочкам

Слой	Оболочка	Квантовые числа				Максимальное число электронов
		$n$	$l$	$m$	$s$	
K	1s	1	0	0	$\pm 1/2$	2
	2s		0	0	$\pm 1/2$	2
L	2p	2	1	-1 0 +1	$\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$	6
	3s		0	0	$\pm 1/2$	2
M	3p		1	-1 0 +1	$\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$	6
	3d	3	2	-2 -1 0 +1 +2	$\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$	10
	4s		0	0	$\pm 1/2$	2
N	4p		1	-1 0 +1	$\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$	6
	4d		2	-2 -1 0 +1 -2	$\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$	10
	4f	4	3	-3 -2 -1 0 +1 +2 +3	$\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$ $\pm 1/2$	14

**Основные линии рентгеновского характеристического спектра некоторых элементов (K-серия)**

Элемент	Длина волны, Å		
	$\alpha_2$	$\alpha_1$	$\beta$
Алюминий .....		9,89	9,56
Кремний .....	7,128	7,125	6,768
Хром .....	2,294	2,290	2,085
Марганец .....	2,106	2,102	1,910
Железо .....	1,940	1,936	1,757
Кобальт .....	1,793	1,789	1,621
Никель .....	1,662	1,658	1,500
Медь .....	1,544	1,541	1,392
Цинк .....	1,439	1,435	1,295
Германий .....	1,258	1,254	1,129
Селен .....	1,109	1,105	0,992
Вольфрам .....	0,214	0,209	0,184
Золото .....	0,185	0,180	0,159
Свинец .....	0,170	0,165	0,146
Уран .....	0,131	0,126	0,111

Таблица 135

**Некоторые радиоактивные изотопы и их характеристики**

Элемент	Символ радиоактивного изотопа	Период полураспада	Энергия излучения, Мэв	
			$\beta$ -частицы	$\gamma$ -лучи
Углерод ...	$C_6^{14}$	5568 лет	0,155	—
Натрий ...	$Na_{11}^{24}$	15,0 ч.	1,39	1,38; 2,76
Фосфор ...	$P_{15}^{32}$	14,3 дн.	1,71	—
Сера .....	$S_{16}^{35}$	87,1 дн.	0,167	—
Хлор .....	$Cl_{17}^{36}$	$3,1 \cdot 10^5$ лет	0,714	—
Кальций ..	$Ca_{20}^{45}$	152 дн.	0,254	—
Скандий ...	$Sc_{21}^{46}$	85 дн.	0,36	0,89; 1,12
Титан .....	$Ti_{22}^{51}$	5,8 мин.	2,13	0,32; 0,61; 0,93
Хром .....	$Cr_{24}^{51}$	28 дн.	—	0,32; 0,57
Железо ...	$Fe_{26}^{55}$	2,9 года	—	0,21
	$Fe_{26}^{59}$	45 дн.	0,46; 0,27	1,1; 1,29
Кобальт ..	$Co_{27}^{60}$	5,3 года	0,3	1,17; 1,33

Таблица 135 (продолжение)

Элемент	Символ радиоактивного изотопа	Период полураспада	Энергия излучения, Мэв	
			β-частицы	γ-лучи
Селен . . . . .	Se <sup>75</sup> <sub>34</sub>	127 дн.	—	0,2—0,4
Стронций	Sr <sup>89</sup> <sub>38</sub>	51 дн.	1,46	—
Цирконий	Zr <sup>95</sup> <sub>40</sub>	65 дн.	0,36; 0,40; 0,88	0,23; 0,72; 0,75
Технеций	Tc <sup>99</sup> <sub>43</sub>	2,12·10 <sup>5</sup> лет	0,3	—
Серебро	Ag <sup>110</sup> <sub>47</sub>	270 дн.	{ 0,087; 0,53; 2,12; 2,86	0,1—2,5
	Ag <sup>111</sup> <sub>47</sub>	7,5 дн.	0,7; 0,8; 1,0	0,25; 0,34
Кадмий . . .	Cd <sup>109</sup> <sub>48</sub>	470 дн.	—	0,087
	Cd <sup>115</sup> <sub>48</sub>	43 дн.	0,7; 1,61	0,5—1,3
Сурьма . . . .	Sb <sup>115</sup> <sub>51</sub>	2,0 года	{ 0,25; 0,34; 0,61; 0,82	0,08—0,72
Иод . . . . .	I <sup>131</sup> <sub>53</sub>	8,14 дн.	{ 0,25; 0,34; 0,61; 0,82	0,08—0,72
Цезий . . . . .	Cs <sup>137</sup> <sub>55</sub>	27 лет	0,51; 1,17	0,66
Прометий	Pm <sup>147</sup> <sub>61</sub>	2,6 года	0,22	0,121
Европий	Eu <sup>155</sup> <sub>63</sub>	1,7 года	0,15; 0,24	0,06—0,132
Тулий . . . .	Tu <sup>170</sup> <sub>69</sub>	129 дн.	0,88; 0,97	0,08
Гафний . . . .	Hf <sup>181</sup> <sub>72</sub>	46 дн.	0,4	0,004—0,62
Таитал . . . .	Ta <sup>182</sup> <sub>73</sub>	111 дн.	0,53	0,06—1,6
Вольфрам	W <sup>186</sup> <sub>74</sub>	73,2 дн.	0,37; 0,43	{ 0,056; 0,57; 0,77
Иридий . . . .	Ir <sup>192</sup> <sub>77</sub>	74,4 дн.	{ 0,10; 0,26; 0,54; 0,67	0,2—0,9
Золото . . . .	Au <sup>198</sup> <sub>79</sub>	2,7 дн.	{ 0,29; 0,96; 1,37	0,41—1,09
	Au <sup>199</sup> <sub>79</sub>	3,15 дн.	{ 0,29; 0,44; 0,47	{ 0,05; 0,16; 0,21
Ртуть . . . . .	Hg <sup>205</sup> <sub>80</sub>	5,6 мин.	1,8	0,23
Таллий . . . .	Tl <sup>204</sup> <sub>81</sub>	4,1 года	0,77	—



## Некоторые искусственно полученные элементы

Атомный номер	Название	Символ	Массовые числа изотопов	Период полураспада
61	Прометий	Pm	146—151; <b>147</b>	2,6 года
85	Астат	At	<b>210</b> —219	8,3 ч.
87	Франций	Fr	219— <b>223</b>	23 мин.
93	Нептуний	Np	231—241; <b>237</b>	$2,2 \cdot 10^6$ лет
94	Плутоний	Pu	236—246; <b>244</b>	$7,5 \cdot 10^7$ лет
95	Америций	Am	240—246; <b>243</b>	$8 \cdot 10^3$ лет
96	Кюрий	Cm	238—250; <b>247</b>	$4 \cdot 10^7$ лет
97	Берклий	Bk	243—250; <b>247</b>	700 лет
98	Калифорний	Cf	244—254; <b>251</b>	660 лет
99	Эйнштейний	Es	247—255; <b>254</b>	~1 год
100	Фермий	Fm	250—256; <b>253</b>	4,5 года
101	Менделевий	Md	<b>255</b> ; <b>256</b>	30 мин.
102	Нобелий	No	<b>255</b>	
103	Лоуренсий	Lw	257	~8 сек.
104	Курчатовий	Ku	260	~0,3 сек.

Примечание. Жирным шрифтом набраны массовые числа изотопов с наибольшим периодом полураспада.

Моменты импульсов  $J$  и магнитные моменты  $p$  ядер

Z	Ядро	Массовое число	$J$ ( $\hbar/2\pi$ )	$p$ (в ядерных магнетонах)
0	n	1	1/2	-1,9125
1	H	1	1/2	2,7928
	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
80	Hg	199	1/2	0,5
		201	3/2	-0,6

Примечание. Знак минус указывает на то, что направления магнитного и механического моментов противоположны.

## Элементарные частицы

Частица	Символ	Заряд $ve$	Масса покоя, $M_{эв}$	Спин	Барионное число	Странность	Среднее время жизни, сек	Обычные продукты распада
Гипероны:								
кси-минус	$\Xi^-$	-1	1319	1/2	+1	-2	$2 \cdot 10^{-10}$	$\pi^- + \Lambda$
кси-нуль	$\Xi^0$	0	1311	1/2	+1	-2	$2 \cdot 10^{-10}$	$\pi^0 + \Lambda$
сигма-минус	$\Sigma^-$	-1	1196	1/2	+1	-1	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$\pi^- + n$
сигма-нуль	$\Sigma^0$	0	1192	1/2	+1	-1	$10^{-20}$	$\nu + \Lambda$
сигма-плюс	$\Sigma^+$	+1	1190	1/2	+1	-1	$0,8 \cdot 10^{-10}$	$\begin{cases} \pi^+ + n \\ \pi^0 + p \end{cases}$
лямбда-	$\Lambda$	0	1115	1/2	+1	-1	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$\pi^- + p$
Нуклоны:								
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	
Мезоны								
ка-нуль	$K^0$	0	498	0	0	+1	$1 \cdot 10^{-10}$ или $6 \cdot 10^{-8}$	$\begin{cases} \pi^+ + \pi^- \\ \pi^0 + \pi^0 \\ \pi^+ + \mu^- + \tilde{\nu} \end{cases}$
ка-плюс	$K^+$	+1	494	0	0	+1	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$\begin{cases} \mu^+ + \nu \\ \pi^+ + \pi^0 \end{cases}$
пи-плюс	$\pi^+$	+1	140	0	0	0	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu$
пи-нуль	$\pi^0$	0	135	0	0	0	$10^{-16}$	$\gamma + \gamma$
Фотон	$\gamma$	0	0	1	0	0	стабилен	-
Лептоны:								
мю-минус-мезон	$\mu^-$	-1	106	1/2	0	-	$2,26 \cdot 10^{-6}$	$e^- + \nu + \tilde{\nu}$
электрон	$e^-$	-1	0,511	1/2	0	-	стабилен	-
нейтрино	$\nu$	0	0	1/2	0	>	>	-

### Источники излучения и детекторы для обнаружения элементарных частиц

Частицы	Источник излучения	Что было измерено или наблюдалось	Способ наблюдения
$\tilde{\nu}$	Ядерный реактор	$p + \tilde{\nu} = p + e^+$ , аннигиляция $e^+$ , захват $p$	Счетчики
$e^-$	Катодно-лучевая трубка	Отношение заряда к массе	Флюоресцентный экран
$e^+$	Космические лучи	Отношение заряда к массе	Камера Вильсона
$\mu^+, \mu^-$	Космические лучи	Поглощение излучения при прохождении через свинец не наблюдалось, распадается в состоянии покоя	Камера Вильсона
$\pi^+$	Космические лучи	Распад в состоянии покоя	Эмульсия
$\pi^-$	Космические лучи	Ядерное взаимодействие в состоянии покоя	Эмульсия
$\pi^0$	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
$\Lambda^0$	Космические лучи	Распад на $p + \pi^-$	Камера Вильсона
$\tilde{\Lambda}^0$	Ускоритель	Распад на $p + \pi^+$	Эмульсия
$\Sigma^+$	Космические лучи	Распад в состоянии покоя	Эмульсия
$\Sigma^-$	Ускоритель	Распад на $\pi^- + p$	Диффузионная камера
$\Sigma^0$	Ускоритель	Распад на $\Lambda^0 + \gamma$	Пузырьковая камера
$\Xi^-$	Космические лучи	Распад на $\pi^- + \Lambda^0$	Камера Вильсона
$\Xi^0$	Ускоритель	Распад на $\pi^0 + \Lambda^0$	Пузырьковая камера
$\nu$	Ускоритель	$\pi \rightarrow \mu^+ + \nu$ $\nu + p \rightarrow p + \mu^-$	Искровая камера

## Эффективные сечения нейтронов

В первом столбце указан элемент, во втором — полное сечение поглощения и рассеяния быстрых нейтронов (3—10 Мэв); в третьем-пятом столбцах указаны эффективные сечения (в барн) для тепловых нейтронов (0,025 эв):  $\sigma_p$  — сечение рассеяния;  $\sigma_n$  — сечение поглощения;  $\sigma_a$  — сечение образования искусственного элемента (сечение активации) для различных изотопов.

Элемент	Быстрые нейтроны	Тепловые нейтроны		
		$\sigma_p$	$\sigma_n$	$\sigma_a$
H	0,9	38(H <sub>2</sub> )	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  $\sigma_a$  для различных изотопов; для урана-235 и плутония-239 указаны эффективные сечения реакции деления.

Таблица 141

Массовые коэффициенты ослабления рентгеновских лучей  
( $\mu/\rho$ , см<sup>2</sup>/г)

Длина волны, Å	Элементы							
	C	N	O	Al	Fe	Cu	Ag	Pb
0,2	0,167	0,177	0,183	0,27	1,06	1,45	5,4	4,6
0,4	0,243	0,34	0,336	1,05	7,1	10	37	33
0,6	0,40	0,73	0,730	3,3	23,5	32	17	77
0,8	0,80	1,51	1,53	7,3	50,7	71	39	147
1,0	1,40	2,6	—	14,0	95	134	71	77
1,2	2,5	—	—	24	170	218	120	128
1,4	3,9	—	—	36	270	42	174	180
1,6	5,8	—	—	55	390	60	250	258
1,8	7,9	—	—	79	61	85	354	360
2,0	10,0	—	—	106	78	119	436	—

### Массовые коэффициенты поглощения электронов в алюминии

Энергия, эв	$\mu/\rho, \text{см}^2/\text{г}$	Энергия, эв	$\mu/\rho, \text{см}^2/\text{г}$
$9 \cdot 10^2$	$2,5 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^5$	29
$5,8 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^5$	$4,6 \cdot 10^5$	9,0
$1,05 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^4$	$6,6 \cdot 10^5$	6,0
$4,66 \cdot 10^4$	$7,4 \cdot 10^3$		
$1,0 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^2$		

Таблица 143

### 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 большей 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, щитовидная железа, кости.

Категория облучения	Внешнее облучение		Внутреннее облучение					
			I группа		II группа		III группа	
	$\frac{\text{мбэр}}{\text{неделя}}$	$\frac{\text{бэр}}{\text{год}}$	$\frac{\text{мбэр}}{\text{неделя}}$	$\frac{\text{бэр}}{\text{год}}$	$\frac{\text{мбэр}}{\text{неделя}}$	$\frac{\text{бэр}}{\text{год}}$	$\frac{\text{мбэр}}{\text{неделя}}$	$\frac{\text{бэр}}{\text{год}}$
А — профессиональное . . . . .	100	5	100	5	300	15	600	30
Б — в смежных помещениях . . . . .	10	0,5	10	0,5	30	1,5	60	3
В — облучение всего населения	1	0,05	1	0,05	10	0,5	20	1

Во всех случаях к 30 годам суммарная доза не должна превышать 60 бэр.

### Пробег $\alpha$ -частиц в воздухе, биологической ткани и алюминии

Энергия, Мэв	В воздухе, см	В ткани, мкм	В алюминии, мкм
4,0	2,5	31	16
5,0	3,5	43	23
6,0	4,6	56	30
7,0	5,9	72	38
8,0	7,4	91	48
9,0	8,9	110	58
10,0	10,6	130	69

### Компоненты полного ослабления $\gamma$ -лучей в свинце и алюминии

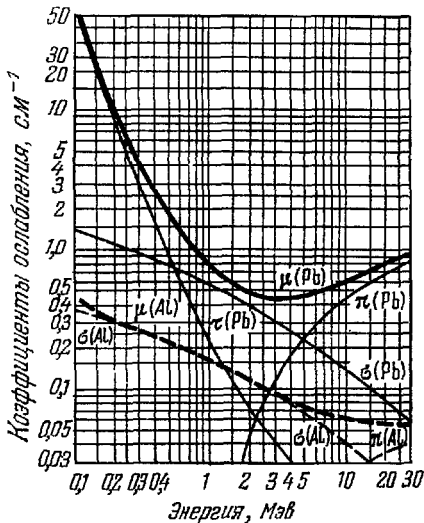


Рис. 91. Коэффициент полного ослабления  $\gamma$ -лучей  $\mu = \sigma + \tau + \kappa$ , где  $\sigma$ ,  $\tau$ ,  $\kappa$  — коэффициенты ослабления, учитывающие соответственно комптоновское рассеяние, фотоэлектрическое поглощение и образование электрон-позитронных пар, в свинце (Pb) и алюминии (Al). По оси абсцисс отложены значения энергии (в Мэв), по оси ординат — коэффициенты ослабления (в см<sup>-1</sup>); обе шкалы логарифмические.

## Энергия связи ядер

По оси абсцисс (рис. 92) отложены массовые числа, по оси-ординат — значения энергии связи, приходящейся на один нуклон, в Мэв. Значения энергии связи для легких ядер даны в виде отдельных точек; сплошная кривая представляет усредненные значения по изобарам; подъемы и впадины на кривой наблюдаются в эксперименте.

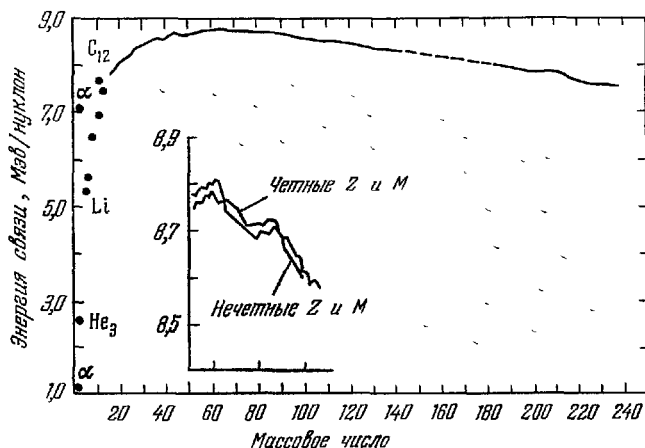


Рис. 92. Кривая энергии связи ядер.

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.

### 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

1.  $N_7^{14} + He_2^4 + 1,1 = O_8^{17} + H_1^1$ .
2.  $Li_3^{17} + H_1^1 = 2He_2^4 + 17,3$ .
3.  $Al_{13}^{27} + He_2^4 + 28,2 = P_{15}^{30} + n_0^1$ .
4.  $N_7^{14} + n = C_6^{14} + H_1^1 + 0,6$ .
5.  $Al_{13}^{27} + C_6^{12} = Cl_{17}^{34} + He_2^4 + n_0^1 + 28,2$ .
6.  $Th_{90}^{232} + n_0^1 \rightarrow Th_{90}^{233}$ ,  
 $Th_{90}^{233} \rightarrow Pa_{91}^{233} + e^-$ ,  
 $Pa_{91}^{233} \rightarrow U_{92}^{233} + e^-$ .

Примечания. 1. Стрелки в уравнениях указывают на то, что дальнейший ход реакции идет самопроизвольно.

2. При делении одного ядра урана освобождается энергия около 200 Мэв; энергия, освобождаемая 1 г урана, равна  $2 \cdot 10^8$  квт·ч.

### Синтез гелия из водорода

Большое теоретическое и практическое значение имеет получение ядер гелия путем синтеза ядер водорода, так как при этом выделяется большое количество энергии.

Ниже приводятся некоторые возможные реакции. Величина выделяющейся энергии указана в Мэв.

1.  $H_1^2 + H_1^2 \rightarrow He_2^4 + \gamma + 23,8$ .
2.  $H_1^2 + H_1^1 \rightarrow He_2^3 + \gamma + 5,4$ .
3.  $He_2^3 + H_1^1 \rightarrow He_2^4 + e^+ + 18,7$ .
4.  $He_2^3 + H_3^1 \rightarrow He_2^4 + H_1^2 + 14,3$ .

### Реакции синтеза ядер

Реакции синтеза ядер могут идти только при высоких температурах (десятки миллионов градусов). Ниже приведены примеры таких реакций.

1.  $C_6^{12} + H_1^1 \rightarrow N_7^{13} + \gamma + 1,9$ .
2.  $N_7^{13} \rightarrow C_6^{13} + e^+ + 1,2$ .
3.  $C_6^{13} + H_1^1 \rightarrow N_7^{14} + 7,5$ .
4.  $N_7^{14} + H_1^1 \rightarrow O_8^{15} + \gamma + 7,3$ .
5.  $O_8^{15} \rightarrow N_7^{15} + e^+ + 1,7$ .
6.  $N_7^{15} + H_1^1 \rightarrow C_6^{12} + He_2^4 + 4,9$ .



## ПРИЛОЖЕНИЕ

### I. Некоторые часто встречающиеся числа

$\pi = 3,141593$	$\sqrt{\pi} = 1,77245$	$1^\circ = 0,017453 \text{ рад}$
$4\pi = 12,56637$	$e = 2,718282$	$1' = 0,000291 \text{ «}$
$2/\pi = 0,63662$	$\sqrt{2} = 1,41421$	$1'' = 0,0000048 \text{ «}$
$\pi^2 = 9,86960$	$\sqrt{3} = 1,73205$	

### II. Формулы для приближенных вычислений

$$\frac{1}{1+x} = 1 - x \quad -0,031 < x < 0,031$$

$$\sqrt{1+x} = 1 + \frac{1}{2}x \quad -0,085 < x < 0,093$$

$$\frac{1}{\sqrt{1+x}} = 1 - \frac{1}{2}x \quad -0,052 < x < 0,052$$

$$\sin x = x \quad -0,077 < x < 0,077$$

$$e^x = 1 + x \quad -0,045 < x < 0,045$$

Неравенства показывают те пределы величины  $x$ , 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.

Формула	Абсолютная ошибка	Относительная ошибка	Формула	Абсолютная ошибка	Относительная ошибка
$A + B$	$\Delta A + \Delta B$	$\frac{\Delta A + \Delta B}{ A + B }$	$\frac{A}{B}$	$\frac{B \Delta A + A \Delta B}{B^2}$	$\frac{\Delta A}{ A } + \frac{\Delta B}{ B }$
$A - B$	$\Delta A + \Delta B$	$\frac{\Delta A + \Delta B}{ A - B }$	$A^n$	$n A^{n-1} \Delta A$	$n \frac{\Delta A}{ A }$
$A \cdot B$	$A \Delta B + B \Delta A$	$\frac{\Delta A}{ A } + \frac{\Delta B}{ B }$	$\sqrt[n]{A}$	$\frac{1}{n} A^{\frac{1-n}{n}} \Delta A$	$\frac{1}{n} \frac{\Delta A}{ A }$
$\sin A$	$ \cos A  \Delta A$	$ \operatorname{ctg} A  \Delta A$	$\cos A$	$ \sin A  \Delta A$	$ \operatorname{tg} A  \Delta A$

**Пример.** 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

$$\left(\frac{m}{V}\right)_{\text{ср}} (1 - 0,025) < \frac{m}{V} < \left(\frac{m}{V}\right)_{\text{ср}} (1 + 0,025).$$



## Теплопроводность

$$1 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град} = 2,778 \cdot 10^{-3} \text{ кал/см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град} = \\ = 1,162 \cdot 10^{-2} \text{ вт/см} \cdot \text{град}$$

## Работа и энергия

$$1 \text{ вт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ дж.}$$

$$1 \text{ дж (джоуль)} = 10^7 \text{ эрг} = 0,239 \text{ кал (калорин)}$$

$$1 \text{ кгМ (килограммометр)} = 9,81 \text{ дж}$$

$$1 \text{ ккал (килокалория)} = 1,16 \text{ вт} \cdot \text{ч}$$

$$1 \text{ эв (электрон-вольт)} = 1,6019 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 1,6019 \cdot 10^{-19} \text{ дж}$$

## Мощность

$$1 \text{ вт} = 10^7 \text{ эрг/сек}, 1 \text{ квт} = 102 \text{ кгМ/сек} = 1,36 \text{ л. с.}$$

## Емкостные характеристики

$$1 \text{ см} = 1,11 \text{ пф} = 1,11 \cdot 10^{-12} \text{ ф.}$$

## VI. Универсальные физические константы

Гравитационная постоянная $\gamma$	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ кг}^{-1} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{сек}^{-2}$
Объем грамм-молекулы идеального газа при нормальных условиях $V_{\mu}$	22,4207 л
Универсальная газовая постоянная $R$	$8,314 \text{ дж} \cdot \text{град}^{-1} \cdot \text{г-моль}^{-1}$
Число Фарадея $F$	$96520 \text{ к} \cdot \text{г-эв}^{-1}$
Число Авогадро $N_A$	$6,0247 \cdot 10^{23} \text{ г-моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана $k$	$1,3805 \cdot 10^{-16} \text{ эрг} \cdot \text{град}^{-1}$
Масса атома водорода $m_H$	$1,673 \cdot 10^{-24} \text{ г}$
Масса протона $m_p$	$1,672 \cdot 10^{-24} \text{ г}$
Масса электрона $m_e$	$9,108 \cdot 10^{-28} \text{ г}$
Заряд электрона $e$	$4,8029 \cdot 10^{-10} \text{ СГСЭ},$ $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ к}$
Скорость света в пустоте $c$	$2,99793 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{сек}^{-1}$
Постоянная Вина $c_1$	$0,289780 \text{ см} \cdot \text{град}$
Постоянная Планка $h$	$6,6254 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{сек}$
Постоянная Стефана—Больцмана $\sigma$	$5,6696 \cdot 10^{-12} \text{ вт} \cdot \text{см}^{-2} \times$ $\times \text{град}^{-4}$
Постоянная Ридберга для водорода $R_H$	$109677,576 \text{ см}^{-1}$
Постоянная Ридберга для дейтерия $R_D$	$109707,419 \text{ см}^{-1}$
Магнетон Бора $\mu_B$	$9,273 \cdot 10^{-21} \text{ эрг/гс}$
Магнетон ядерный $\mu_J$	$5,050 \cdot 10^{-24} \text{ эрг/гс}$

## VII. Система единиц СИ

В таблице даны наименования, условные обозначения и размерности наиболее употребительных единиц в системе СИ.

Для перехода к другим системам — СГСЭ и СГСМ — в последних столбцах приведены соотношения между единицами этих систем и соответствующими единицами системы СИ.

Для механических величин системы СГСЭ и СГСМ полностью совпадают; основными единицами здесь являются сантиметр, грамм (масса) и секунда.

Различие в системах СГС имеет место для электрических величин. Это обусловлено тем, что в качестве четвертой основной единицы в системе СГСЭ принята электрическая проницаемость пустоты ( $\epsilon_0=1$ ), а в системе СГСМ — магнитная проницаемость пустоты ( $\mu_0=1$ ).

В системе Гаусса основными единицами являются граммы, сантиметры, секунды,  $\epsilon_0=1$  и  $\mu_0=1$  (для вакуума). В этой системе электрические величины измеряются в системе СГСЭ, магнитные — в системе СГСМ.

Величина	Наименование	Размерность	Обозначение		Содержит единиц систем СГС
			русским шрифтом	латинским шрифтом	
Длина	метр	м	м	—	$10^2$ см
Масса	килограмм	кг	кг	—	$10^3$ г
Время	секунда	сек	сек	—	1 сек
Сила тока	ампер	а	а	—	$3 \cdot 10^9$
Температура	градус Кельвина	град	град	—	—
Сила света	свеча	св	св	—	—

### 1. Основные единицы

Величина	Наименование	Размерность	Обозначение		Содержит единиц систем СГС	
			русским шрифтом	латинским шрифтом	СГСЭ	СГСМ
<b>2. Механические единицы</b>						
Скорость .....	метр в секунду	$\frac{м}{сек}$	$\frac{м}{сек}$	$\frac{m}{sek}$	$10^2 \frac{см}{сек}$	$10^2 \frac{см}{сек}$
Ускорение .....	метр в секунду за секунду	$\frac{м}{сек^2}$	$\frac{м}{сек^2}$	$\frac{m}{сек^2}$	$10^2 \frac{см}{сек^2}$	$10^2 \frac{см}{сек^2}$
Энергия и работа	джоуль	$\frac{кг \cdot м^2}{сек^2} = дж$	дж	J	$10^7 эрг$	$10^7 эрг$
Сила .....	ньютон	$\frac{кг \cdot м}{сек^2} = \frac{дж}{м}$	н	N	$10^5 дин$	$10^5 дин$
Мощность ... ..	ватт	$\frac{кг \cdot м^2}{сек^3} = \frac{дж}{сек}$	вт	W	$10^7 \frac{эрг}{сек}$	$10^7 \frac{эрг}{сек}$
<b>3. Электрические единицы</b>						
Количество электричества ...	кулон	$а \cdot сек = к$	к	C	$3 \cdot 10^9 \frac{1}{300}$	$10^{-1}$
Напряжение, ЭДС	вольт	$\frac{кг \cdot м^2}{а \cdot сек^3} = в$	в	V	$\frac{1}{300}$	$10^8$
Напряженность электрического поля	вольт на метр	$\frac{кг \cdot м}{а \cdot сек^3} = \frac{в}{м}$	$\frac{в}{м}$	$\frac{V}{m}$	$\frac{1}{3} \cdot 10^{-4}$	$10^8$

Величина	Наименование	Размерность	Обозначение		Содержит единиц систем СГС
			русским шрифтом	латинским шрифтом	
Емкость	фарада	$\frac{a^2 \cdot \text{сек}^4}{\text{кг} \cdot \text{м}^3} = \frac{a \cdot \text{сек}}{b} = \frac{\text{сек}}{\text{ом}}$	$\phi$	F	$9 \cdot 10^{11} \text{ см}$ $10^{-9}$
Электрическое сопротивление	ом	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{a^2 \cdot \text{сек}^3} = \frac{b}{a}$	ом	$\Omega$	$\frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$ $10^9$
Удельное сопротивление	ом на метр	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{a^2 \cdot \text{сек}^3} = \text{ом} \cdot \text{м}$	ом·м	$\Omega \cdot \text{m}$	$\frac{1}{9} \cdot 10^{-9}$ $10^{11}$
Диэлектрическая проницаемость	фарада на метр	$\frac{a^2 \cdot \text{сек}^4}{\text{кг} \cdot \text{м}^3} = \frac{\phi}{\text{м}}$	$\frac{\phi}{\text{м}}$	$\frac{\text{F}}{\text{m}}$	$36\pi \cdot 10^9$ $4\pi \cdot 10^{-11}$
Магнитный поток	вебер	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{a \cdot \text{сек}^2}$	вб	Wb	$\frac{1}{300}$ $10^8 \text{ макс}$
Магнитная индукция	тесла	$\frac{\text{кг}}{a \cdot \text{сек}^2}$	тл	T	$\frac{1}{3} \cdot 10^{-6}$ $10^4 \text{ зс}$

## 4. Магнитные единицы

Величина	Наименование	Размерность	Обозначение		Содержит единиц систем СГС	
			русским шрифтом	латинским шрифтом	СГСЭ	СГСМ
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	$\frac{a}{M}$	$\frac{a}{M}$	$\frac{A}{m}$	$12\pi \cdot 10^7$	$4\pi \cdot 10^{-3} \text{ э}$
	генри	$\frac{кг \cdot м^2}{a^2 \cdot сек^2} = \frac{ом \cdot сек}{a}$	гн	H	$\frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$	$10^9 \text{ см}$
	Магнитная проницаемость	$\frac{гн}{M}$	$\frac{гн}{M}$	$\frac{H}{m}$	$\frac{1}{36\pi \cdot 10^{13}}$	$\frac{1}{4\pi} \cdot 10^7$
5 Оптические единицы						
Световой поток	люмен	св. стер	лм	lm	—	—
Яркость	нит	$\frac{св}{M}$	нпм	nt	—	—
Освещенность	люкс	$\frac{лм}{M^2}$	лк	lx	—	—



**VIII. Основные уравнения электромагнетизма,  
записанные в системах единиц СИ и СГС  
(гауссовой)**

	СИ	СГС
Закон Кулона . . . . .	$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$	$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$
Напряженность поля точечного заряда . . . . .	$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$	$E = \frac{q}{\epsilon r^2}$
Напряженность поля плоского конденсатора . . . . .	$E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}$	$E = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon}$
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 . . . . .	$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$	$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d}$
Момент электрического диполя . . . . .		$p = ql$
Плотность энергии электрического поля . . . . .	$w_{\text{э}} = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2}$	$w_{\text{э}} = \frac{\epsilon E^2}{8\pi}$
Закон Ома . . . . .		$i = \frac{U}{R}$
Мощность электрического тока . . . . .		$P = iU$
Электрическое сопротивление . . . . .		$R = \rho \frac{l}{S}$
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 . . . . .		$\Phi = BS$
Закон Био-Савара-Лапласа . . . . .	$\Delta H = \frac{i \Delta l \sin \alpha}{4\pi r^2}$	$\Delta H = \frac{1}{c} \frac{i \Delta l \sin \alpha}{r^2}$

	СИ	СГС
Напряженность магнитного поля прямого тока .....	$H = \frac{i}{2\pi r}$	$H = \frac{1}{c} \frac{2i}{r}$
Закон Ампера ....	$\Delta F = Bi \Delta l \sin \alpha$	$\Delta F = \frac{1}{c} Bi \Delta l \sin \alpha$
Сила Лоренца ....	$F = q v B \sin \alpha$	$F = \frac{1}{c} q v B \sin \alpha$
Закон электромагнитной индукции	$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$	$\mathcal{E} = - \frac{1}{c} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$
Индуктивность соленоида .....	$L = \frac{\mu \mu_0 N^2 S}{l}$	$L = \frac{4\pi \mu N^2 S}{l}$
Плотность энергии магнитного поля	$w_M = \frac{\mu \mu_0 H^2}{2}$	$w_M = \frac{\mu H^2}{8\pi}$
Формула Томсона	$T = 2\pi \sqrt{LC}$	$T = \frac{2\pi}{c} \sqrt{LC}$
Реактивное сопротивление .....	$R_{L,C} = \omega L - \frac{1}{\omega C}$	$R_{L,C} = \frac{\omega L}{c^2} - \frac{1}{\omega C}$
Плотность потока электромагнитных волн .....	$S = EH$	$S = \frac{c}{4\pi} EH$
Скорость света ....	$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \mu_0 \epsilon \epsilon_0}}$	$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}$

Примечание. Уравнения, имеющие одинаковый вид в обеих системах, записаны один раз (на границе раздела граф).

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абсолютно черное тело 202  
Абсолютный нуль 59  
Адиабата 68  
Аккумулятор 133, 145  
Альфа-частица 220  
Ампер 154  
Амплитуда 93, 96, 100  
Анион 131  
Аннигиляция 226  
Анод 131  
Антенна 182  
Античастицы 225  
Атмосфера стандартная 73, 88
- Баріоны 225  
Барн 221  
Барометрическая формула 72  
Биологический эквивалент рентгена (бэр) 224  
Блок 45
- Вебер 158  
Вектор намагничивания 160  
— поляризации 121  
Взаимодействие зарядов 115  
Винт 45  
Влажность 73  
Волна 99  
— линейно поляризованная 196  
— плоская 100  
— поперечная 101  
— продольная 101  
— синусоидальная 100  
— сферическая 100  
— цилиндрическая 100  
Вольт 118  
Ворот 45  
Восприимчивость магнитная 162  
— — удельная 167  
Вращение плоскости поляризации 197  
Вязкость 66
- Гаусс 152  
Генри 159  
Гистерезис 162  
Глубина проникновения токов 176  
Градиент потенциала 119  
Громкость звука 104
- Давление звуковое 104  
— критическое 63, 70  
— парциальное 72  
— радиационное 197  
Движение вращательное 20, 29  
— вязкой жидкости 54  
— идеальной жидкости 54  
— колебательное 94  
— криволинейное 22  
— механическое 18  
— прямолинейное 18  
— равномерное 18  
— равнопеременное 19  
— тела в поле тяготения 23  
Дефект массы 219  
Деформация 48  
— относительная поперечная 49  
— — продольная 48  
— растяжения (сжатия) 48  
— сдвига 49  
— упругая 47  
Децибел 104  
Джоуль 36  
Диаманетки 161  
Динамика 26  
— вращательного движения 29  
— жидкостей и газов 54  
Диоптрия 187  
Диполь электрический 121  
Дисперсия 193  
— вращательная 197  
Дифракционная решетка 194  
Дифракция 193  
Длина волны 100, 206  
— — частицы 222  
— свободного пробега 70

Доброгность контура 173  
Доза облучения 224  
Домены 121, 162

Единицы измерения (система)  
16, 154, 245

Жесткость крутильная 96  
Жидкие газы 79  
Жидкий воздух 79  
Жидкость идеальная 54

Закон Ампера 151  
-- Архимеда 54  
-- Био—Савара—Лапласа 156  
-- Бойля—Мариотта 68  
-- Брюстера 196  
-- всемирного тяготения 30  
-- Гей-Люссака 68  
-- Гука 48  
-- Кирхгофа 202  
-- Кирхгофа—Бунзена 200  
-- Ленца 158  
-- Ома 128, 129  
-- Паскаля 53  
-- сохранения зарядов 114  
-- Стефана—Больцмана 202  
-- Торричелли 55  
-- Шарля 68  
Законы внешнего фотоэффекта  
199  
- Ньютона 27, 28  
-- Фарадея 132  
Заряд отрицательный 114  
-- положительный 114  
-- элементарный 115  
Зарядка аккумуляторов 145  
Звук 103  
Зона валентная 136  
-- запрещенная 136  
-- проводимости 136

Излучение тепловое 200  
Изотопы 218  
Импульс тела 28  
Индукция магнитного поля 151  
-- электромагнитная 157  
-- электростатического поля 116  
Инертность (инерция) 27  
Интенсивность волн 103, 186  
Интерференция 191  
Инфразвук 103  
Ионизация газов 133  
Ионы 131  
Искровой промежуток 135

Источник (генератор) тока 127  
Источники когерентные 172

Калория 60  
Катионы 131  
Катод 131  
Катоды оксидные 134  
Квант излучения 198  
Квантовые числа 216  
Кинематика 18  
Кинетическая теория газов 70  
Колебания вынужденные 98  
-- гармонические 93  
-- затухающие 96  
-- свободные 96  
-- электрические 177  
Количество движения 28  
Конвекция 65  
Конденсаторы 119  
Константы универсальные 244  
Контур колебательный 177  
Коэрцитивная сила (напряженность) 162  
Коэффициент внутреннего трения 66  
-- давления термический 68  
-- затухания 96  
-- квазиупругой силы 94  
-- линейного расширения 64  
-- мощности 171  
-- объемного расширения 64  
-- отражения звука 112  
-- света 186  
-- поверхностного натяжения 66  
-- поглощения звука 104  
-- линейный 223  
-- массовый 223  
-- Пуассона 49  
-- самоиндукции (индуктивности) 159  
-- сопротивления температурный 128  
-- теплопроводности 65  
-- трения 33  
Кривая видности 184  
-- намагничения 162  
Кулон 115  
Кюри 223

Лептоны 225  
Линии силовые 116, 155  
-- Фраунгофера 200  
Лучеиспускающая способность 202  
Лучепреломление двойное 196  
Люкс 185  
Люмен 185

- Магнетики 160  
 Магнетон Бора 214  
 — ядерный 214  
 Магнитострукция 163  
 Максвелл 158  
 Массовое число 218  
 Маятник крутильный 95  
 — математический 95  
 — физический 96  
 Мезоны 225  
 Модель атома 215  
 Модули упругости 48, 49, 51  
 Модуль объемной упругости 49  
 — сдвига 49  
 — Юнга 48  
 Момент диполя 121  
 — импульса 29  
 — инерции 29  
 — контура магнитный 154  
 — силы 29  
 Моменты инерции однородных тел 41  
 Мощность 35  
 — излучения 184
- Намагничивание 162**  
 Напряжение механическое 48  
 — электрическое 118  
 Напряженность 32, 115, 155  
 Натяжение поверхностное 66  
 Нейтрон 217, 234  
 —, эффективное сечение 236  
 Нит 186  
 Нуклоны 218
- Оболочки электронные 216**  
 Ом 128  
 Оптика геометрическая 186  
 Орбита стационарная 215  
 Освещенность 185  
 Относительная биологическая  
 эффективность (ОБЭ) 224  
 — видность 184  
 Отражение диффузное 186  
 — полное 187  
 — света 186  
 Ошибки измерений 242
- Падение тел свободное 20  
 Пар насыщенный 63  
 Парамагнетики 162  
 Параметры критические 81  
 Период колебаний 93  
 — полураспада 220  
 — собственных колебаний кон-  
 тура 177
- Петля гистерезиса 162  
 Плотность вещества 31  
 — критическая 63  
 — объемная 34  
 — тока 126  
 — энергии 120, 160  
 Поверхность воливая 100  
 Поглощательная способность 202  
 Подвижность 132, 146  
 Показатель преломления 187  
 Поле вихревое электрическое  
 177  
 — магнитное 151  
 — тяготения 32  
 — электрическое 115  
 — электромагнитное 179  
 Полиспаст 45  
 Полный излучатель 202  
 Полупроводники 135  
 Поляризация света 195  
 Порог болевого ощущения 104  
 — слышимости 104  
 Постоянная Больцмана 70  
 — вращения 197  
 — гравитационная 31  
 — Планка 198, 205  
 Потенциал абсолютный нормаль-  
 ный 132  
 — электрического поля 118  
 — электрохимический 132  
 Поток лучистый 184  
 — магнитный 158  
 — световой 184  
 Правила Кирхгофа 130  
 Правило винта 21, 30  
 Предел прочности 48  
 — текучести 48  
 — упругости 48  
 Приборы оптические 188  
 Примеси акцепторные 137  
 — донорные 137  
 Пробой 134  
 Проводимость дырочная 186  
 — несамостоятельная 133  
 — самостоятельная 133  
 — электронная 136  
 Проницаемость диэлектрическая  
 115  
 — магнитная 152  
 — — начальная 162  
 Протон 217, 234  
 Психрометр 93  
 Пуаз 66  
 Пьезоэлектрический модуль 122  
 — эффект 122, 126
- Работа 34**  
 — выхода 134  
 — ионизации 133  
 — магнитного поля 157

- Равновесие безразличное 44  
 — динамическое 63  
 — на наклонной плоскости 41  
 — неустойчивое 44  
 — устойчивое 41  
 Рад 224  
 Радиоактивность естественная 220  
 — искусственная 220  
 Реакция термоядерная 221  
 — ядерная 220  
 Резонанс 98  
 — параллельный (токов) 173  
 — последовательный (напряжений) 173  
 Рентген 224  
 Рычаг 45  
  
 Самондукция 159  
 Сверхпроводимость 128  
 Свет естественный 195  
 Свеча 185  
 Сегнетоэлектрики 121, 125  
 Серия Бальмера 227  
 — Лаймана 227  
 — Пашена 227  
 Сжимаемость 49  
 — изотермическая 101  
 Сила 26  
 — квазиупругая 95  
 — Лоренца 153  
 — магнитная 151  
 — оптическая 190  
 — света 185  
 — сторонняя 127  
 — тока 126  
 — трения 32, 66  
 — центроострительная 23  
 Силовые линии 116, 155  
 Система единиц СГС и СИ 16, 154, 245  
 Скин-эффект (поверхностный эффект) 174  
 Скорость звука 105—107  
 — колебательная 99  
 — космическая 23, 24  
 — линейная 20  
 — мгновенная 19  
 — молекул 71  
 — равномерного движения 18  
 — сейсмических волн 107  
 — средняя 19  
 — убегания 24  
 — угловая 21  
 — электромагнитных волн 179  
 Сопrotивление 128  
 — активное 172  
 — емкостное 172  
 — индуктивное 172  
 — кажущееся 172  
  
 Спектры 199  
 — испускания 199  
 — линейчатые 199  
 — поглощения 199  
 — характеристические 217  
 Спин 216  
 Стильб 186  
 Страниость 225  
  
 Температура кипения 62  
 — критическая 63, 70  
 — Кюри 162  
 — плавления 62  
 Теория упругости 47  
 Тепловое расширение 64  
 Теплоемкости 61  
 Теплопроводность 65  
 Термоэлектродвижущая сила 137  
 Тесла 152  
 Ток насыщения 134  
 — переменный 171  
 — постоянный 126  
 — пульсирующий 171  
 — смещения 178  
 — эффективный 171  
 Токи вихревые (Фуко) 160  
 — допустимые 140  
 — индукционные 158  
 Точка матерьяльная 18  
 Траектория 18  
 Трение качения 33  
 — покоя 33  
 — скольжения 33  
 — сухое 33  
  
 Увеличение приборов 193  
 Угол апертурный 195  
 — отражения 186  
 — — предельный 187  
 — падения 186  
 — преломления 186  
 Удельная проводимость 128  
 — теплоемкость 60  
 — теплота парообразования 62  
 — — плавления 61  
 Удельное сопротивление 128  
 Удельный вес 34  
 Ультразвук 103  
 Уравнение аднабаты 68  
 — Бернулли 55  
 — Клапейрона—Менделеева 67  
 — Эйнштейна 199  
 — Максвелла 178  
 Уровни энергии 135, 216, 227  
 Ускорение 19  
 — полное 23  
 — тангенциальное 22  
 — угловое 21

- Фаза колебаний** 94  
 — начальная 94  
 — термодинамическая 61  
**Фарада** 119  
**Ферромагнетика** 162  
**Фокус линзы** 188  
**Формула Стокса** 55  
 — Томсона 177  
 — тонкой линзы 188  
**Фот** 185  
**Фотометрия** 184  
**Фотон** 198  
**Фотоэффект** 198
- Центр тяжести** 44
- Частицы элементарные** 234  
**Частота циклическая** 93, 97, 171  
**Число Авогадро** 67  
 — барионное 225  
 — Фарадея 132  
**Чувствительность глаза** 184
- Шкала механических волн** 108  
 — электромагнитных волн 180
- Экватор магнитный** 163  
**Эквивалент электрохимический** 132  
**Эквипотенциальная поверхность** 118  
**Электрическая цепь** 127  
**Электрод** 131  
**Электродвижущая сила** 127  
**Емкость** 119  
**Электролиз** 132  
**Электролиты** 131  
**Электрон-вольт** 133  
**Элемент тока** 152  
**Элементы гальванические** 132, 144  
 —, полученные искусственно 233  
**Эмиссия термоэлектронная** 134  
**Энергия кинетическая** 34  
 — потенциальная 34  
 — связи ядра 219, 239  
 — упругой деформации 50  
**Эрстед** 157
- Ядерные реакции** 220, 240  
 — —, сечение эффективное 220  
**Ядерные силы** 218  
**Яркость** 185

*Николай Иванович Кошкин*  
*Михаил Григорьевич Ширкевич*

**СПРАВОЧНИК  
ПО ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ФИЗИКЕ**

М., 1972 г., 256 стр. с илл.

Редактор *Л. А. Русаков*  
Техн. редактор *С. Я. Шкляр*  
Корректор *Л. С. Сомова*

Сдано в набор 8/IX 1971 г.  
Подписано к печати 10/V 1972 г.  
Бумага 70×90<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Физ. печ. л. 8.  
Условн. печ. л. 13,44. Уч.-изд. л. 13,29.  
Тираж 200 000 экз. Т-09027. Цена книги 69 коп.  
Заказ № 15008

Издательство «Наука»  
Главная редакция  
физико-математической литературы  
117071, Москва В-71, Ленинский проспект, 15.

Отпечатано в типографии Франклин,  
г. Будапешт