

Н. Кошкин  
Е. Васильчикова

# Элементарная физика

СПРАВОЧНИК





**Е. Н. Васильчикова  
Н. И. Кошкин**

# **ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ФИЗИКА**

**Справочник: определения  
физические величины  
законы  
справочные таблицы**

**Москва "СТОЛЕТИЕ" 1996**

# Основные и дополнительные единицы СИ

Физическая величина	Единица		Определение
	Наименование	Обозначение	
Основные единицы			
Длина	метр	m; м	<i>Метр</i> равен расстоянию, которое проходит плоская электромагнитная волна в вакууме за 1/299792458 долю секунды
Масса	килограмм	kg; кг	<i>Килограмм</i> равен массе международного прототипа килограмма
Время	секунда	s; с	<i>Секунда</i> равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133
Сила электрического тока	ампер	A; А	<i>Ампер</i> равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенными в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н
Термодинамическая температура	кельвин	K; К	<i>Кельвин</i> равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды
Количество вещества	моль	mol; моль	<i>Моль</i> равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг
Сила света	кандела	cd; кд	<i>Кандела</i> равна силе света в заданном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср
Дополнительные единицы			
Плоский угол	радиан	rad; рад	<i>РадIAN</i> равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу
Телесный угол	стерадиан	sr; ср	<i>Стерадиан</i> равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы

ББК 22.3  
К 76

**Н.И. Кошкин, Е.Н. Васильчикова**  
**К 76**      Элементарная физика. Справочник/ — М.:  
АО "СТОЛЕТИЕ", 1996 — 304 с. Илл.

Справочник для изучающих физику. Приведены основные понятия, определения и законы физики. Логика и структура изложения позволяют оперативно находить четкие и краткие ответы или справочные данные по различным вопросам элементарной физики.

К  $\frac{1604010000-007}{41A(03)-96}$  Без объявл

ISBN 5-7459-0056

© Кошкин Н.И., Васильчикова Е.Н., 1995  
© АО "СТОЛЕТИЕ", 1996

# Оглавление

Введение .....	9
Основные и дополнительные единицы СИ .....	14
Производные единицы международной системы единиц .....	16

## Глава I

### Механика

1. Кинематика .....	28
2. Кинематические величины .....	30
3. Основные уравнения кинематики материальной точки .....	33
4. Траектории движения тел в поле тяготения Земли .....	35
5. Движение тел у поверхности Земли .....	37
6. Законы динамики .....	37
7. Динамика вращательного движения .....	41
8. Моменты инерции однородных тел .....	43
9. Неинерциальные системы отсчета .....	44
10. Основной закон движения тел в неинерциальных системах отсчета. Силы инерции .....	45
11. Силы трения .....	46
12. Работа, мощность, энергия .....	47
13. Закон всемирного тяготения .....	51
14. Формулы расчета кинетической и потенциальной энергии .....	53
15. Законы сохранения в механике .....	54
16. Простейшие механизмы .....	55
17. Статика твердого тела .....	57
18. Центры масс однородных тел .....	58
19. Деформация и силы упругости .....	59
20. Механика жидкостей и газов .....	63
21. Коэффициенты гидродинамического сопротивления .....	67
22. Механические колебания и волны .....	68
23. Формулы расчета скорости волн в изотропных средах .....	82

## Глава II

### Термодинамика и молекулярная физика

1. Температура, теплота, теплоемкость .....	83
2. Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ-68) .....	86
3. Законы термодинамики .....	87
4. Фазовые переходы' .....	92
5. Идеальные газы .....	95
6. Реальные газы .....	98
7. Молекулярно-кинетическая теория .....	99
8. Теплопроводность и диффузия .....	103
9. Свойства жидкостей .....	106
10. Кристаллические и аморфные тела .....	108
11. Жидкие кристаллы .....	109
12. Полимеры .....	111
13. Плазма .....	113

## Глава III

### Электродинамика

1. Электрическое поле неподвижных зарядов (электростатика) .....	115
2. Напряженность электрического поля .....	124
3. Емкость конденсаторов и проводников ..	127
4. Постоянный электрический ток .....	128
5. Электрический ток в электролитах .....	137
6. Электропроводность газов и плазмы .....	140
7. Электропроводность полупроводников .....	142
8. Взаимодействие движущихся заряженных частиц .....	146
9. Магнитные поля токов различной конфигурации .....	152
10. Электромагнитная индукция .....	153
11. Индуктивность различных проводников .....	157
12. Намагничивание вещества .....	158
13. Уравнения Максвелла .....	162
14. Переменный электрический ток .....	164
15. Основные формулы расчета цепей переменного тока .....	166
16. Электрические колебания и электромагнитные волны .....	168

## Глава IV

### Оптика

1. Фотометрические величины .....	172
2. Геометрическая оптика .....	174
3. Оптические приборы .....	181
4. Волновая оптика .....	185
5. Квантовая оптика .....	196

## Глава V

### Строение атома и элементарные частицы

1. Единицы, используемые в атомной и ядерной физике .....	203
2. Волновые свойства частиц .....	203
3. Строение атома .....	204
4. Атомное ядро .....	209
5. Радиоактивные процессы .....	213
6. Ядерные реакции .....	215
7. Взаимодействие ядерных излучений с веществом .....	218
8. Единицы радиоактивности и ионизирующих излучений .....	221
9. Фундаментальные взаимодействия .....	222
10. Элементарные частицы и их классификация ...	224
11. Основные характеристики элементарных частиц .....	227
12. Кварки и структура адронов .....	228

### Справочные таблицы

Табл. 1. Кинематические параметры планет .....	230
Табл. 2. Первая и вторая космические скорости ...	230
Табл. 3. Периоды обращения Т спутников Земли..	231
Табл. 4. Динамические характеристики планет Солнечной системы .....	231
Табл. 5. Напряженность земного поля тяготения (ускорение свободного падения) на уровне моря .....	232
Табл. 6. Плотности, модули упругости и коэффициенты Пуассона .....	232

Табл. 7.	Плотности воды и ртути при различных температурах .....	233
Табл. 8.	Плотность газов .....	233
Табл. 9.	Коэффициенты трения .....	234
Табл. 10.	Коэффициенты отражения звуковых волн полированными поверхностями металлов .....	235
Табл. 11.	Коэффициент поглощения звука в воздухе .....	235
Табл. 12.	Свойства Земли на различных глубинах и скорость сейсмических волн .....	236
Табл. 13.	Скорость звука в газах .....	236
Табл. 14.	Скорость звука в твердых изотропных материалах .....	237
Табл. 15.	Удельные теплоемкости $c_p$ , теплоты плавления $\lambda$ , теплоты парообразования $r$ , температуры плавления $t_{пл}$ , и кипения $t_{кп}$ .....	237
Табл. 16.	Температурный коэффициент длины твердых изотропных тел .....	238
Табл. 17.	Относительные изменения объема при плавлении .....	239
Табл. 18.	Удельная теплоемкость газов при нормальном давлении .....	239
Табл. 19.	Температурный коэффициент объема $\beta$ жидкостей .....	240
Табл. 20.	Критические параметры .....	240
Табл. 21.	Теплопроводность газов при нормальном давлении .....	241
Табл. 22.	Температурные коэффициенты давления газов .....	241
Табл. 23.	Коэффициенты диффузии газов в воздухе .....	242
Табл. 24.	Газокинетические диаметры молекул .....	242
Табл. 25.	Постоянные Ван-дер-Ваальса .....	242
Табл. 26.	Вязкость газов .....	243
Табл. 27.	Вязкость газов при различных давлениях .....	243
Табл. 28.	Вязкость воды при различных температурах .....	243
Табл. 29.	Вязкость жидкостей .....	244
Табл. 30.	Поверхностное натяжение жидкостей .....	244
Табл. 31.	Удельная теплота сгорания топлива .....	244
Табл. 32.	Электроизолирующие материалы .....	245



Табл. 33. Диэлектрическая проницаемость жидкостей .....	246
Табл. 34. Диэлектрическая проницаемость газов ...	247
Табл. 35. Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления металлов ...	247
Табл. 36. Сплавы с высоким активным сопротивлением .....	248
Табл. 37. Удельное сопротивление электролитов различных концентраций .....	248
Табл. 38. Свойства полупроводников .....	249
Табл. 39. Гальванические элементы и аккумуляторы .....	250
Табл. 40. Магнитные свойства магнито-мягких материалов .....	252
Табл. 41. Основные свойства магнито-твердых материалов .....	253
Табл. 42. Индукция и потери на гистерезис в ферромагнетиках и ферритах .....	254
Табл. 43. Шкала электромагнитных излучений .....	255
Табл. 44. Световая отдача, КПД, яркость источников .....	256
Табл. 45. Освещенность .....	256
Табл. 46. Поглощение Солнечной радиации поверхностью Земли .....	257
Табл. 47. Отражение света металлами .....	258
Табл. 48. Дисперсия показателя преломления .....	259
Табл. 49. Удельная постоянная вращения .....	260
Табл. 50. Спектры излучения металлов .....	260
Табл. 51. Спектры излучения газов .....	261
Табл. 52. Распределение электронов во внешних оболочках .....	261
Табл. 53. Массовые коэффициенты ослабления электронов в алюминии .....	263
Табл. 54. Средний массовый пробег протонов высокой энергии .....	263
Табл. 55. Относительная атомная масса и активность легких нуклидов .....	263
Табл. 56. Бета- и гамма-радиоактивные ядра .....	267
Табл. 57. Моменты импульсов и магнитные моменты нуклонов и ядер .....	268
Табл. 58. Реакции синтеза и энергосыделение .....	269
Табл. 59. Термоядерные реакции во Вселенной .....	270
Табл. 60. Дозовые пределы облучения .....	271

## Приложения

I. Расчет погрешностей .....	272
II. Множители для образования десятичных кратных и дольных единиц .....	275
III. Некоторые внесистемные единицы в единицах СИ .....	276
IV. Универсальные физические константы .....	278
V. Основные формулы и законы .....	279
VI. Периодическая система элементов Д.И. Менделеева .....	287

# ВВЕДЕНИЕ

## Скаляры и векторы

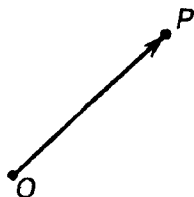


Рис. 1

Величина, значение которой определяется только положительными и отрицательными числами, называется *скаляром* (скалярной величиной). Примером скалярных величин является масса, заряд, плотность, работа. Величины, значения которых определяются не только действительными числами, но и направлением в пространстве, называются *векторами* (векторными величинами). Например, ускорение, скорость, сила, напряженность поля и т. п. — векторные величины. Вектор изображается направленным отрезком в пространстве (рис. 1). Точка  $O$  называется началом вектора,  $P$  — концом. Длина отрезка  $OP$  называется модулем вектора. Два вектора равны друг другу, если они имеют равные модули и одинаковые направления.

### Векторная сумма

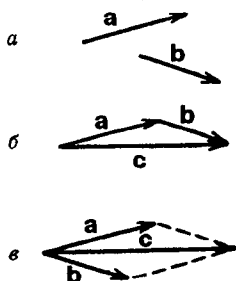


Рис. 2

Первый способ: переносятся векторы  $a$  и  $b$  (рис. 2,  $a$ ) параллельно самим себе так, чтобы конец одного вектора совпал с началом другого вектора; тогда вектор, проходящий через начало первого вектора и конец другого вектора (рис. 2,  $b$ ), равен сумме этих векторов. Эта сумма называется *векторной*;  $a+b=c$ .

Второй способ: переносятся векторы  $a$  и  $b$  параллельно самим себе так, чтобы начала их совместились (рис. 2, в), сумма векторов будет изображаться диагональю параллелограмма, построенного на этих векторах (на рис. 2, в сумма векторов равна  $c$ ). Поэтому иногда говорят, что векторы складываются по правилу параллелограмма.

### Разложение вектора

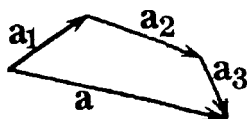


Рис. 3

Вектор  $a$  заменяется суммой нескольких векторов  $a_1, a_2$  и т.д. (рис. 3). Например, составляющими вектора  $a$  на рис. 3 являются векторы  $a_1, a_2, a_3$ :

$$a_1 + a_2 + a_3 = a$$

### Умножение вектора на скаляр

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

### Разность векторов

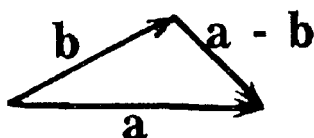


Рис. 4

Начала векторов  $a$  и  $b$  совмещаются (без изменения их направлений), затем проводится вектор от конца вычитаемого вектора  $b$  к концу уменьшаемого вектора  $a$ ; этот вектор будет равен разности векторов  $a$  и  $b$  (рис. 4).

## Скалярное произведение

Скалярное произведение  $ab$  двух векторов  $a$  и  $b$  равно произведению их модулей  $a$  и  $b$  (или  $|a|$  и  $|b|$ ) на косинус угла  $\varphi$  между ними, т. е.  $ab = ab \cos \varphi$ .

Угол между векторами изменяется в пределах от 0 до  $\pi$ . Скалярное произведение векторов — величина скалярная.

## Векторное произведение

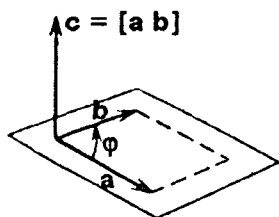


Рис. 5

Векторное произведение  $[ab]$  двух векторов  $a$  и  $b$  образует новый вектор  $c$ , направленный перпендикулярно к плоскости, в которой лежат векторы  $a$  и  $b$ , равный по модулю произведению их модулей на синус угла  $\varphi$  между ними, т. е.  $ab \sin \varphi$  (рис. 5). Обозначение векторного произведения  $[ab] = c$ .

## Правило винта

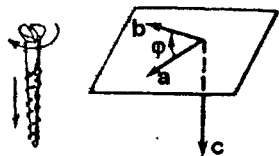


Рис. 6

Направление вектора  $c$  можно определить по *правилу правого винта*: если поворот головки винта соответствует повороту вектора  $a$  к вектору  $b$  по наименьшему углу, то поступательное перемещение винта будет указывать направление вектора  $c$  (рис. 6).

## Единичный вектор

Вектор называется *единичным*, если его модуль равен единице.

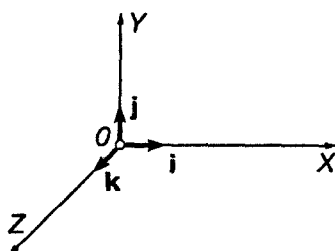


Рис. 7

Любой вектор можно представить как произведение его модуля на единичный вектор; например,  $b = |b|b_0$  ( $b_0$  — единичный вектор); единичный вектор не имеет размерности, его направление совпадает с направлением вектора  $b$ .

На рис. 7 указаны направления единичных векторов по осям координат  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ .

## Физическая величина

Количественная характеристика какого-либо свойства тела, его движения, изменения состояния или взаимодействия с другими телами.

## Единица физической величины

Это физическая величина, которой по определению присвоено числовое значение, равное единице. Единицы разделяются на два типа — основные и производные. Основные единицы устанавливаются независимо от единиц других величин; производные единицы определяются через основные единицы на основании зависимости между этой величиной и величинами, единицы которых выбраны в качестве основных.

## Системы единиц

Совокупность основных и производных единиц, связанных между собой определенными соотношениями, называется системой еди-

ниц. В соответствии с ГОСТ 8.417-81 (СЭВ 1052-78) в физике используется Международная система единиц (СИ). Допускается также применение некоторых внесистемных единиц.

#### Основные и дополнительные единицы

В СИ используются семь основных единиц: метр (м) — единица длины, килограмм (кг) — единица массы, секунда (с) — единица времени, ампер (А) — единица силы электрического тока, кельвин (К) — единица температуры, моль (моль) — единица количества вещества, кандела (кд) — единица силы света, а также две дополнительные единицы — плоский угол (радиан, рад) и телесный угол (стерадиан, ср). Наименование основных и дополнительных единиц СИ, а также их определения приводятся в таблице.

## Основные и дополнительные единицы СИ

Физическая величина	Единица		Определение
	Наименование	Обозначение	
Основные единицы			
Длина	метр	m; м	Метр равен расстоянию, которое проходит плоская электромагнитная волна в вакууме за 1/299 792 458 долю секунды
Масса	килограмм	kg; кг	Килограмм равен массе международного прототипа килограмма
Время	секунда	s; с	Секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.
Сила электрического тока	ампер	A; А	Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенными в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н
Термодинамическая температура	кельвин	K; К	Кельвин равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды



Физическая величина	Единица		Определение
	Наименование	Обозначение	
Количество вещества	моль	mol; моль	<i>Моль</i> равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг
Сила света	кандела	cd; кд	<i>Кандела</i> равна силе света в заданном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср
Дополнительные единицы			
Плоский угол	радиан	rad; рад	<i>Радиан</i> равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу
Телесный угол	стерадиан	sr; ср	<i>Стерадиан</i> равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы

## Производные единицы Международной системы единиц (СИ)

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
I. Пространство и время		
Площадь	<i>Квадратный метр</i> равен площади квадрата со сторонами, длины которых равны одному метру	$\text{м}^2$
Объем	<i>Кубический метр</i> равен объему куба с ребрами, длины которых равны одному метру	$\text{м}^3$
Скорость	<i>Метр в секунду</i> равен скорости скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой эта точка за время одна секунда перемещается на расстояние один метр	$\text{м/с}$
Ускорение	<i>Метр на секунду в квадрате</i> равен ускорению прямолинейно и равноускоренно движущейся точки, при котором за время одна секунда скорость точки изменяется на один метр в секунду	$\text{м/с}^2$
Угловая скорость	<i>РадIAN в секунду</i> равен угловой скорости равномерно вращающегося тела, все точки которого за время одна секунда поворачиваются относительно оси на угол один радиан	$\text{рад/с}$
Угловое ускорение	<i>РадIAN на секунду в квадрате</i> равен угловому ускорению равноускоренно вращающегося тела, при котором за время одна секунда изменяется угловая скорость на один радиан в секунду	$\text{рад/с}^2$

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
II. Периодические колебания		
Период	<i>Секунда</i>	с
Частота периодического процесса	<i>Герц равен частоте периодического процесса, при которой за время одна секунда совершается один цикл периодического процесса</i>	Гц
Волновое число	<i>Метр в минус первой степени равен волновому числу излучения с длиной волны один метр</i>	$\text{м}^{-1}$
Коэффициент затухания	<i>Секунда в минус первой степени равна коэффициенту затухания, при котором за время одна секунда амплитуда уменьшается в <math>e</math> раз (<math>e</math> — основание натуральных логарифмов)</i>	$\text{с}^{-1}$
III. Механика		
Плотность	<i>Килограмм на кубический метр равен плотности однородного вещества, масса которого при объеме один кубический метр равна одному килограмму</i>	$\text{кг}/\text{м}^3$
Удельный объем	<i>Кубический метр на килограмм равен удельному объему однородного вещества, объем которого при массе один килограмм равен одному кубическому метру</i>	$\text{м}^3/\text{кг}$
Количество движения (импульс)	<i>Килограмм-метр в секунду равен количеству движения материальной точки массой один килограмм, движущейся со скоростью один метр в секунду</i>	$\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}$
Момент количества движения (момент импульса)	<i>Килограмм-метр в квадрате на секунду равен моменту количества движения материальной точки, движущейся по окружности радиусом один метр и имеющей количество движения один килограмм-метр в секунду</i>	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
Момент инерции	<i>Килограмм-метр в квадрате</i> равен моменту инерции материальной точки массой один килограмм, находящейся на расстоянии один метр от оси вращения	кг · м <sup>2</sup>
Сила, сила тя- жести, вес	<i>Ньютон</i> равен силе, придающей телу массой один килограмм ускорение один метр на секунду в квадрате в направлении действия силы	Н
Момент силы, момент пары сил	<i>Ньютон-метр</i> равен моменту силы, равной одному ньютону, относительно точки, расположенной на расстоянии один метр от линии действия силы	Н · м
Импульс силы	<i>Ньютон-секунда</i> равна импульсу силы, равной одному ньютону и действующей в течение одной секунды	Н · с
Давление, напряжение (нормальное, касательное), модуль (сдвига, объемного сжа- тия, продоль- ной упругости)	<i>Паскаль</i> равен давлению, вызываемому силой один ньютон, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью один квадратный метр	Па
Динамическая вязкость	<i>Паскаль-секунда</i> равна динамической вязкости среды, касательное напряжение в которой при ламинарном течении и при разности скоростей слоев, находящихся на расстоянии один метр по нормали к направлению скорости, равной одному метру в секунду, равно одному паскалю	Па · с
Поверхностное натяжение	<i>Ньютон на метр</i> равен поверхностному натяжению жидкости, создаваемому силой один ньютон, приложенной к участку контура свободной поверхности длиной один метр и действующей нормально к контуру и по касательной к поверхности	Н/м

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
Работа, энергия	Джоуль равен работе силы один ньютон, перемещающей тело на расстояние один метр в направлении действия силы	Дж
Мощность	Ватт равен мощности, при которой работа один джоуль производится за время одна секунда	Вт
IV Теплота		
Температура Цельсия	Градус Цельсия по размеру равен кельвину	°C
Температурный коэффициент	Кельвин в минус первой степени равен температурному коэффициенту относительного изменения физической величины, при котором изменение температуры на один кельвин от принятой за начальную вызывает относительное изменение этой величины, равное единице	K <sup>-1</sup>
Температурный градиент	Кельвин на метр равен температурному градиенту поля, в котором на участке длиной один метр в направлении градиента температура изменяется на один кельвин	K/м
Теплота, количество теплоты	Джоуль равен количеству теплоты, эквивалентному работе один джоуль	Дж
Тепловой поток	Ватт равен тепловому потоку, эквивалентному мощности один ватт	Вт
Поверхностная плотность теплового потока	Ватт на квадратный метр равен поверхностной плотности теплового потока один ватт, равномерно распределенного по поверхности площадью один квадратный метр	Вт/м <sup>2</sup>

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
Теплопроводность	<i>Ватт на метр-кельвин</i> равен теплопроводности вещества, в котором при стационарном режиме с поверхностной плотностью теплового потока один ватт на квадратный метр устанавливается температурный градиент один кельвин на метр	Вт/(м · К)
Теплоемкость	<i>Джоуль на кельвин</i> равен теплоемкости системы, температура которой повышается на один кельвин при подведении к системе количества теплоты один джоуль	Дж/К
Удельная теплоемкость	<i>Джоуль на килограмм-кельвин</i> равен удельной теплоемкости вещества, имеющей при массе один килограмм теплоемкость один джоуль на кельвин	Дж/(кг · К)
Удельная газовая постоянная	<i>Джоуль на килограмм-кельвин</i> равен удельной газовой постоянной идеального газа массой один килограмм, совершающего при повышении температуры на один кельвин и при постоянном давлении работу один джоуль	Дж/(кг · К)
Теплота фазового превращения	<i>Джоуль</i> равен количеству теплоты, эквивалентному работе один джоуль	Дж
Удельная теплота фазового превращения	<i>Джоуль на килограмм</i> равен удельному количеству теплоты системы, в которой веществу массой один килограмм сообщается (или отбирается от него) количество теплоты один джоуль	Дж/кг

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
V. Электричество и магнетизм		
Количество электричества	Кулон равен количеству электричества, проходящему через поперечное сечение проводника при токе силой один ампер за время одна секунда	Кл
Напряженность электрического поля	Вольт на метр равен напряженности однородного электрического поля, создаваемой разностью потенциалов один вольт между точками, находящимися на расстоянии один метр на линии напряженности поля.	В/м
Электрическое напряжение	Вольт равен электрическому напряжению, вызывающему в электрической цепи постоянный ток силой один ампер при мощности один ватт	В
Электрический потенциал; разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	Вольт	В
Электрическое смещение	Кулон на квадратный метр равен электрическому смещению, при котором поток электрического смещения сквозь поперечное сечение площадью один квадратный метр равен одному кулону	Кл/м <sup>2</sup>
Электрическая емкость	Фарад равен емкости конденсатора, напряжение между обкладками которого один вольт при заряде один кулон	Ф

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	<i>Фарад на метр</i> равен абсолютной диэлектрической проницаемости среды, в которой напряженность электрического поля один вольт на метр создает электрическое смещение один кулон на квадратный метр	Ф/м
Электрический момент диполя	<i>Кулон-метр</i> равен электрическому моменту диполя, заряды которого, равные каждому кулону, расположены на расстоянии один метр один от другого	Кл • м
Плотность электрического тока	<i>Ампер на квадратный метр</i> равен плотности равномерно распределенного по поперечному сечению площадью один квадратный метр электрического тока силой один ампер	А/м <sup>2</sup>
Напряженность магнитного поля	<i>Ампер на метр</i> равен напряженности магнитного поля в центре длинного соленоида с равномерно распределенной обмоткой, по которой проходит ток силой, равной одной $n$ -й части единицы силы тока ампер, где $n$ — число витков на участке длиной один метр	А/м
Магнитная индукция	<i>Тесла</i> равен магнитной индукции, при которой через поперечное сечение площадью один квадратный метр проходит магнитный поток один вебер	Тл
Магнитный поток	<i>Вебер</i> равен магнитному потоку, при убывании которого до нуля в сцепленной с ним электрической цепи сопротивлением один ом через поперечное сечение проводника проходит количество электричества один кулон	Вб



Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
Индуктивность	<i>Генри</i> равен индуктивности электрической цепи, с которой при силе постоянного тока в ней один ампер сцепляется магнитный поток один вебер	Гн
Абсолютная магнитная проницаемость	<i>Генри на метр</i> равен абсолютной магнитной проницаемости среды, в которой напряженность магнитного поля один ампер на метр создает магнитную индукцию один тесла	Гн/м
Магнитный момент	<i>Ампер-квадратный метр</i> равен магнитному моменту электрического тока силой один ампер, проходящего по контуру площадью один квадратный метр	$A \cdot m^2$
Намагниченность (интенсивность намагничивания)	<i>Ампер на метр</i> равен намагниченности, при которой вещество объемом один кубический метр имеет магнитный момент один ампер на квадратный метр	A/м
Электрическое сопротивление	<i>Ом</i> равен сопротивлению проводника, между концами которого возникает напряжение один вольт при силе постоянного тока один ампер	Ом
Электрическая проводимость активная	<i>Сименс</i> равен электрической проводимости проводника сопротивлением один ом	См
Удельное электрическое сопротивление	<i>Ом-метр</i> равен удельному электрическому сопротивлению проводника площадью поперечного сечения один квадратный метр и длиной один метр, имеющего сопротивление один ом	$Om \cdot m$

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
Удельная электрическая проводимость	<i>Сименс на метр</i> равен удельной электрической проводимости проводника, который при площади поперечного сечения один квадратный метр и длине один метр имеет электрическую проводимость один сименс.	См/м
Электромагнитная энергия	<i>Джоуль</i> равен электромагнитной энергии, эквивалентной работе один джоуль	Дж
VI. Электромагнитное излучение (свет)		
Энергия излучения	<i>Джоуль</i> равен энергии излучения, эквивалентной работе один джоуль	Дж
Поток излучения, мощность излучения	<i>Ватт</i> равен потоку излучения, эквивалентному механической мощности один ватт	Вт
Поверхностная плотность потока излучения Энергетическая светимость (излучательность) Энергетическая освещенность (облученность)	Ватт на квадратный метр равен поверхностной плотности потока излучения, при которой поверхность площадью один квадратный метр излучает (или поглощает) поток излучения один ватт	Вт/м <sup>2</sup>
Энергетическая сила света (сила излучения)	<i>Ватт на стерадиан</i> равен электрической силе света точечного источника, излучающего в телесном угле один стерадиан поток излучения один ватт	Вт/ср

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
Энергетическая яркость (лучистость)	<i>Ватт настерадиан-квадратный метр</i> равен энергетической яркости равномерно излучающей плоской поверхности площадью один квадратный метр в перпендикулярном к ней направлении при энергетической силе света один ватт настерадиан	Вт/(ср · м <sup>2</sup> )
Световой поток	<i>Люмен</i> равен световому потоку, испускаемому точечным источником в телесном угле одинстерадиан при силе света однакандела	лм
Световая энергия	<i>Люмен-секунда</i> равен световой энергии светового потока в одинлюмен, действующего в течение одной секунды	лм · с
Яркость	<i>Кандела на квадратный метр</i> равна яркости светящейся поверхности площадью один квадратный метр при силе света одна кандела	кд/м <sup>2</sup>
Светимость	<i>Люмен на квадратный метр</i> равен светимости поверхности площадью один квадратный метр, испускающей световой поток один люмен	лм/м <sup>2</sup>
Освещенность	<i>Люкс</i> равен освещенности поверхности площадью один квадратный метр при падающем на нее световом потоке одинлюмен	лк
VII. Акустика		
Период звуковых колебаний	<i>Секунда</i>	с
Частота звуковых колебаний	<i>Герц</i>	Гц

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
Звуковое давление	<i>Паскаль</i>	Па
Длина волны	<i>Метр</i>	м
Скорость колебания частицы	<i>Метр в секунду</i>	м/с
Скорость звука	<i>Метр в секунду</i>	м/с
Звуковая энергия	<i>Джоуль</i>	Дж
Плотность звуковой энергии	<i>Джоуль на кубический метр равен плотности звуковой энергии в канале объемом один кубический метр при звуковой энергии один джоуль</i>	Дж/м <sup>3</sup>
Поток звуковой энергии; звуковая мощность	<i>Ватт</i>	Вт
Интенсивность звука	<i>Ватт на квадратный метр равен интенсивности звука в канале при потоке звуковой энергии один ватт и площади поперечного сечения один квадратный метр</i>	Вт/м <sup>2</sup>
<b>VIII. Физическая химия и молекулярная физика</b>		
Молярная масса	<i>Килограмм на моль равен молярной массе вещества, имеющего при количестве вещества один моль массу один килограмм.</i>	кг/моль
Молярный объем	<i>Кубический метр на моль равен молярному объему вещества, занимающего при количестве вещества один моль объем один кубический метр</i>	м <sup>3</sup> /моль

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
Молярная теплостоемость	Джоуль на моль-кельвин равен молярной теплоемкости вещества, имеющего при количестве вещества один моль теплоемкость один джоуль на кельвин	Дж/(моль • К)
Массовая концентрация	Килограмм на кубический метр равен концентрации раствора, в котором содержится растворенное вещество массой один килограмм в объеме один кубический метр раствора	кг/м <sup>3</sup>
Коэффициент диффузии	Квадратный метр на секунду равен коэффициенту диффузии, при котором через плоскость площадью один квадратный метр за время одна секунда переносится вещество массой один килограмм при градиенте плотности один килограмм на метр в четвертой степени	м <sup>2</sup> /с
Проводимость электролита	Сименс на метр равен проводимости электролита, который при площади поперечного сечения один квадратный метр и длине один метр имеет электрическую проводимость один сименс	См/м
Подвижность ионов	Квадратный метр на вольт-секунду равен подвижности, при которой под действием электрического поля напряженностью один вольт на метр устанавливается упорядоченное движение ионов (или электронов) со скоростью один метр в секунду	м <sup>2</sup> /(В • с)

## ГЛАВА I

# МЕХАНИКА

### Механическое движение. Система отсчета

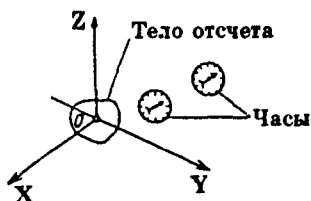


Рис. 1.1

В механике изучается простейший вид движения тел относительно друг друга или их отдельных частей; такое движение называется *механическим*.

Тело, относительно которого определяется положение других (движущихся) тел, называется *телом отсчета*. Тело отсчета, связанная с ним система координат и синхронизированные между собой часы образуют *систему отсчета* (рис. 1.1).

## 1. Кинематика

### Материальная точка. Траектория

В кинематике изучается механическое движение, но не рассматриваются причины этого движения. Тело, размерами которого можно пренебречь при изучении данного механического движения, называется *материальной точкой*.

Линия, вдоль которой движется материальная точка, называется *траекторией*.

Положение материальной точки определяется различными способами.

## Векторный способ

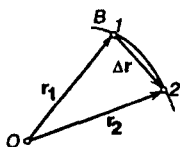


Рис. 1.2

Положение точки  $B$  определяется радиусом-вектором  $r_1$ , проведенным из точки  $O$  выбранной системы отсчета (рис. 1.2). За промежуток времени  $\Delta t$  точка  $B$  перемещается из позиции 1 в позицию 2, при этом положение точки  $B$  будет определяться радиусом-вектором  $r_2$ . Разностью векторов  $\Delta r = r_2 - r_1$  определяется изменение положения точки.

## Прямоугольная система координат

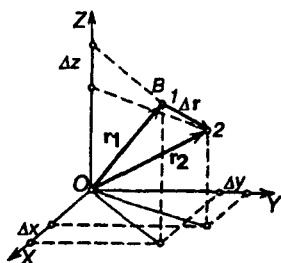


Рис. 1.3

Положение точки  $B$  определяется проекциями радиуса-вектора  $r$  на координатные оси (рис. 1.3). Изменение положения материальной точки при движении определяется изменением радиуса-вектора  $\Delta r$ , т. е. изменениями его проекций  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ .

## Дуговые координаты

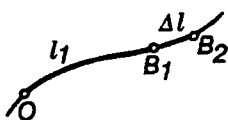


Рис. 1.4

Положение точки  $B_1$  определяется дуговой координатой  $l_1$ , которая равна расстоянию  $OB_1$ , вдоль траектории от начала отсчета в точке  $O$  (рис. 1.4).  $l_2 = OB_2$  — дуговая координата точки  $B_2$ . Изменение положения материальной точки при движении определяется изменением дуговой координаты  $l_2 - l_1 = \Delta l$ .

## Полярные координаты

Положение материальной точки  $B$  при движении по окружности

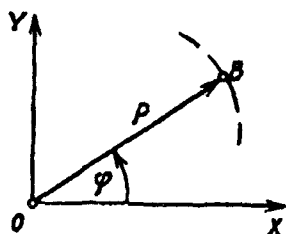


Рис. 1.5

определяется в полярной системе координат, т.е. модулем радиуса-вектора  $\rho$ , проведенного из центра окружности  $O$  (рис. 1.5), и углом  $\varphi$ , который отсчитывается от оси  $OX$  против хода часовой стрелки.

В этом случае дуговая координата  $l = \rho \varphi$  (угол  $\varphi$  определяется в радианах).

## 2. Кинематические величины

Перемещение (рис. 1.2)  $\Delta r = r_2 - r_1$ . (1.1)

Путь  $\Delta l = l_2 - l_1$  (1.2)

Средняя скорость  $v_{cp} = \Delta r / \Delta t$ , (1.3a)  
 $\Delta r$  — перемещение за время  $\Delta t$ .

Мгновенная скорость  $v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta r / \Delta t) = dr / dt$  (1.3б)

Среднее ускорение  $a_{cp} = \Delta v / \Delta t$ , (1.4a)  
 $\Delta v$  — изменение скорости за время  $\Delta t$ .

Ускорение  $a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta v / \Delta t)$  (1.4б)

Проекции скорости по координатным осям  $v_x = dx / dt$ ,  $v_y = dy / dt$ , (1.5)  
 $v_z = dz / dt$ .

Проекции ускорения  $a_x = dv_x / dt$ ,  $a_y = dv_y / dt$ , (1.6)  
 $a_z = dv_z / dt$ .

Модуль вектора скорости  $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$ . (1.7)

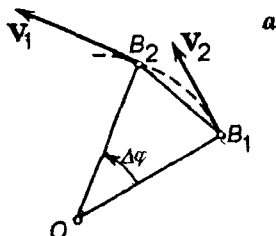


**Модуль вектора  
ускорения**

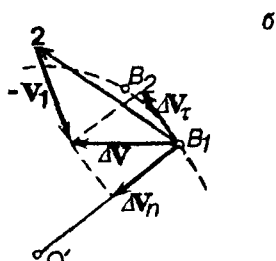
$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1.8)$$

**Вектор мгновенной  
скорости**

Направлен по касательной к траектории. Модуль этого вектора



$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta l / \Delta t) = dl / dt \quad (1.9)$$



$\Delta l$  — изменение дуговой координаты за промежуток времени  $\Delta t$ . На рис. 1.6, а изображены положения векторов  $v$  в различных точках траектории  $B_1$  и  $B_2$ , на рис. 1.6, б указаны изменения вектора  $\Delta v$ , а также его нормальной  $\Delta v_n$  и тангенциальной  $\Delta v_t$  составляющих.

При составлении векторной диаграммы 1.6, б вектор  $v_2$  из точки  $B_2$  перемещен в точку  $B_1$ , вектор  $v_1$  перемещается в конец вектора  $v_2$  с изменением направления на противоположное.

Рис. 1.6

**Тангенциальное  
ускорение**

Составляющая вектора ускорения, направленная по касательной к траектории; модуль тангенциального ускорения

$$a_t = dv_t / dt. \quad (1.10)$$

**Нормальное ускорение**

Составляющая вектора ускорения, направленная перпендикулярно касательной к траектории.

**Модуль нормального  
ускорения**

$$a_n = v^2 / \rho. \quad (1.11)$$

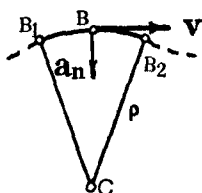


Рис. 1.7

Ускорение  
(полное ускорение)

Угол поворота  
радиуса-вектора

Средняя угловая  
скорость

Угловая (мгновенная)  
скорость

( $\rho$  — радиус кривизны траектории в точке  $C$ , равный радиусу окружности, проходящей через три точки  $B_1, B, B_2$ , расположенные на траектории на бесконечно малом расстоянии друг от друга (рис. 1.7).

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

$$\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (1.13)$$

(рис. 1.6, а)

$$\omega_{cp} = \Delta \varphi / \Delta t, \quad (1.14)$$

$\Delta t$  — время, за которое совершается поворот на угол  $\Delta \varphi$ .

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta \omega / \Delta t) = d\varphi / dt. \quad (1.15)$$

Направление вектора  $\omega$  определяется по *правилу правого винта*: если головку винта вращать по направлению смещения точки, то его поступательное перемещение будет соответствовать направлению вектора угловой скорости (рис. 1.8, а, см. также введение).

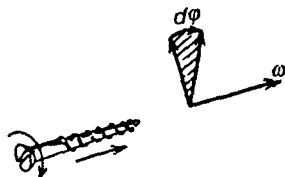


Рис. 1.8, а

Период обращения

$$T = 2\pi / \omega. \quad (1.16)$$

Угловое ускорение

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

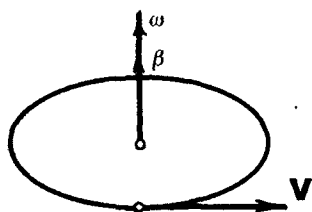


Рис. 1.8, б  
Единицы, их  
обозначения

( $\Delta\omega$  — изменение угловой скорости за время  $\Delta t$ ). Вектор углового ускорения совпадает по направлению с вектором угловой скорости  $\omega$ , если модуль угловой скорости увеличивается (рис. 1.8, б); в противном случае направления векторов  $\beta$  и  $\omega$  противоположны.

Перемещение, путь — метр, м.  
Скорость — метр в секунду, м/с.  
Ускорение — метр на секунду в квадрате, м/с<sup>2</sup>.  
Угловая скорость — радиан в секунду, рад/с.  
Угловое ускорение — радиан на секунду в квадрате, рад/с<sup>2</sup>.  
Период обращения — секунда, с

### 3. Основные уравнения кинематики материальной точки

Равномерное прямолинейное движение	Равномерное движение по окружности радиусом $R$
Скорость $v = \text{const},$ $v = s/t$ (1.18)	Угловая скорость $\omega = \text{const},$ $\omega = \varphi/t$ (1.19)
	Модуль линейной скорости $v_{\text{л}} = R \omega,$ (1.20)
	вектор $v_{\text{л}}$ направлен по касательной к окружности.

Равномерное прямолинейное движение	Равномерное движение по окружности радиусом $R$
Ускорение $a = 0$	Угловое ускорение $\beta = 0$ Модуль нормального ускорения, которое называется в этом случае центростремительным ускорением: $a_u = v^2/R$ (1.21)
Путь, проходимый материальной точкой за время $\Delta t$ , $\Delta s =  \Delta r  = v \Delta t$ (1.18a)	Угол поворота за время $\Delta t$ $\Delta \phi = \omega \Delta t$ (1.22) Путь, проходимый по дуге окружности материальной точкой за время $\Delta t$ , $\Delta s = R \omega \Delta t = v \Delta t$ (1.23)
Равноускоренное прямолинейное движение	Равноускоренное движение по окружности радиусом $R$
Ускорение $a = \text{const}$	Угловое ускорение $\beta = \text{const}$ Линейное ускорение $a = \beta R$ (1.24)
Скорость (по определению) $v = dr/dt$	Угловая скорость (по определению) $\omega = d\phi/dt$
Скорость в момент времени $t$ $v_t = v_0 \pm at$ (1.25a) ( $v_0$ — скорость в момент времени $t=0$ )	Угловая скорость в момент времени $t$ $\omega_t = \omega_0 \pm \beta t$ (1.256) ( $\omega_0$ — угловая скорость в момент времени $t=0$ )
Путь, пройденный материальной точкой за время $t$ , $s = v_0 t \pm at^2/2$ (1.26a)	Угловая координата в момент времени $t$ $\phi_t = \omega_0 t \pm \beta t^2/2$ (1.266)

Примечание. Минус относится к равнозамедленному движению.

## 4. Траектории движения тел в поле тяготения Земли

Ускорение свободного падения

Движение тел в поле тяготения Земли происходит с ускорением (ускорение свободного падения)  $g$ :

$$g = \gamma \frac{M_z}{(R + h)^2} \quad (1.27)$$

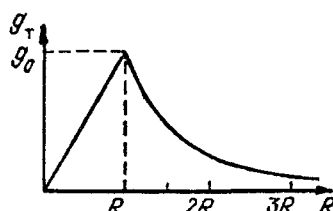


Рис. 1.9, а

$\gamma$  — гравитационная постоянная (см. п. 13 гл.1),  $M_z$  — масса Земли,  $R$  — ее радиус,  $h$  — расстояние от поверхности Земли.

На рис. 1.9, а представлена зависимость ускорения от расстояния от центра Земли; в качестве масштаба по оси абсцисс выбран радиус Земли;  $g_0$  — ускорение у поверхности Земли.

Траектории движения тел при запуске их с поверхности Земли в горизонтальном направлении с различными начальными скоростями  $v_0$  приведены на рис. 1.9, б.

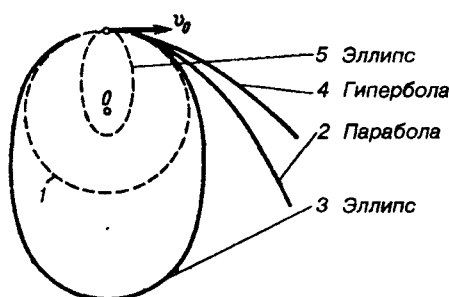


Рис. 1.9, б

Начальная скорость $v_0$	Траектория (см. рис. 1.9)
$v_0=v_1=\sqrt{Rg}=7,93$ км/с ( $R$ — радиус Земли, $g$ — ускорение свободного падения); $v_1$ называется первой космической скоростью	Окружность (кривая 1)
$v_0=v_2=v_1\sqrt{2}=11,16$ км/с; $v_2$ называется второй космической скоростью (или скоростью убегания)	Парабола (относительно Земли); тело не возвращается на Землю, но остается спутником Солнца (кривая 2)
Скорость $v_0$ находится в пределах $v_1 < v_0 < v_2$	Эллипс, ближайший фокус которого расположен в центре Земли $O$ (кривая 3)
$v_0 > v_2$	Гипербола (кривая 4)
$v_0 < v_1$	Эллипс, дальний фокус которого совпадает с центром Земли $O$ (кривая 5)
$v_0 < v_1$ (движение происходит вблизи поверхности Земли)	Участки эллиптической траектории можно рассматривать как параболы (рис. 1.10, а)

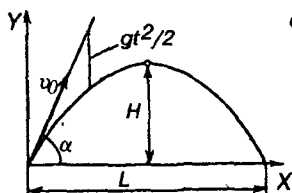
Примечание.

1. Для Луны  $v_1=1,68$  км/с,  $v_2=2,375$  км/с; для Венеры  $v_2=10,4$  км/с, для Марса  $v_2=5,0$  км/с.

2. Если  $v_0=v_3=\sqrt{2 \gamma M_c/R_c}=42,1$  км/с ( $\gamma$  — гравитационная постоянная,  $M_c$  — масса Солнца,  $R_c$  — расстояние между Солнцем и Землей), то тело уходит за пределы Солнечной системы, при этом траектория движения — парабола (относительно Солнца);  $v_3$  называется третьей космической скоростью.

3. При расчетах траекторий предполагалось, что  $v_0$  имеет горизонтальное направление, а масса тела значительно меньше массы Земли.

## 5. Движение тел у поверхности Земли



а Ускорение свободного падения  $g$  можно считать постоянным (по модулю и направлению), вблизи поверхности Земли, а небольшой участок поверхности Земли — плоскостью. Координаты тела относительно неподвижной инерциальной системы отсчета определяются следующими уравнениями ( $\alpha$  — угол между  $v_0$  и горизонтальной плоскостью (рис. 1.10, а)):

$$x = v_0 t \cos \alpha, \quad (1.28)$$

$$y = v_0 t \sin \alpha - gt^2/2. \quad (1.29)$$

Дальность полета  $L$  и наибольшая высота подъема  $H$  рассчитывается (без учета сопротивления воздуха) по формулам:

$$L = v_0^2 \sin(2\alpha)/g, \quad (1.30)$$

$$H = v_0^2 \sin^2 \alpha / (2g). \quad (1.31)$$

Наибольшая дальность полета (при постоянном значении  $v_0$ ) достигается при  $\alpha = \pi/4$  (рис. 1.10, б). При наличии сопротивления дальность полета и высота подъема уменьшаются в 1,5–2 раза.

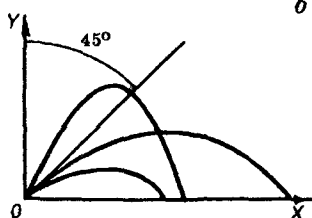
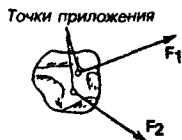


Рис. 1.10

## 6. Законы динамики

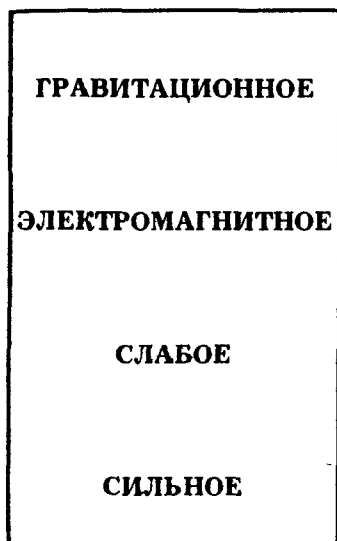
### Сила



Мерой действия на тело других тел или полей является величина, которая называется силой. Сила — векторная величина; она определяется модулем, направлением и точкой приложения  $O$  (рис. 1.11).

Рис. 1.11

## Фундаментальные взаимодействия



Из четырех видов фундаментальных (основных) взаимодействий (см. гл. 5 п. 9) — гравитационного, электромагнитного, слабого и сильного — в механике в основном изучаются гравитационные и электромагнитные; однако обычно указываются конкретные виды сил, проявляющиеся при определенных условиях. Например, сила земного притяжения, сила гравитационного взаимодействия двух материальных точек относятся к гравитационному взаимодействию; силы, действующие между заряженными частицами, взаимодействие проводников, обусловленное протекающими по ним электрическими токами, упругие силы, силы трения относятся к электромагнитному взаимодействию.

### Поле сил

Если на тело, размещаемое в различных точках пространства, действует сила, то говорят, что оно находится в поле сил, Примеры: поле сил тяжести, поле гравитационных сил, поле гидродинамических сил, электромагнитное поле (см. гл. III) и т. д.

### Инертность и масса

Свойство тела оказывать сопротивление изменению его скорости (как по модулю, так и по направлению) называется *инертностью*. Физическая величина, характеризующая инертность тела, называется *инертной массой*.



Кроме того, масса является количественной характеристикой гравитационного взаимодействия (мерой тяготения); в этом случае масса называется *гравитационной*. Из опытов следует, что инертная и гравитационная массы одного и того же тела равны.

## Плотность

Масса единичного объема:  
 $\rho = m/V$ ,  $m$  — масса,  $V$  — объем.

## Единицы:

сила — ньютон, Н;  
масса — килограмм, кг;  
плотность — килограмм на кубический метр, кг/м<sup>3</sup>.

## Первый закон Ньютона

### ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Существуют такие системы отсчета, относительно которых тело, на которое не действуют другие тела, движется равномерно и прямолинейно. Такие системы отсчета называются *инерциальными*. По-иному этот закон формулируется следующим образом: тело находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, если на него не действуют силы.

## Второй закон Ньютона

$$F = ma = dp/dt$$

Ускорение тела в результате действия на него силы пропорционально отношению модуля этой силы к массе; векторы ускорения и силы имеют одинаковые направления:  
 $a = kF/m$ .

Единицы силы и массы выбирают таким образом, чтобы было  $k=1$ . Тогда

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} = m d\mathbf{v}/dt = d\mathbf{p}/dt, \quad (1.32)$$

$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$  — количество движения (или импульс) тела. Если на тело одновременно действуют несколько сил  $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_n$ , то

$$\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n = m\mathbf{a}. \quad (1.33)$$

Второй закон Ньютона является основным уравнением динамики материальной точки.

### Третий закон Ньютона

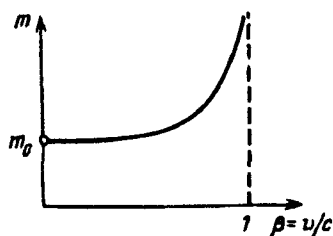
$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}. \quad (1.34)$$

Силы, с которыми действуют друг на друга две материальные точки, равны по модулю, приложены к различным точкам и направлены в противоположные стороны вдоль прямой, соединяющей эти точки.  $\mathbf{F}_{12}$  — сила, приложенная к первому телу,  $\mathbf{F}_{21}$  — сила, приложенная ко второму телу

Ускорения  $a_1, a_2$ , которые получают два тела массами  $m_1, m_2$  при взаимодействии, определяются из соотношения

$$m_1 a_1 = -m_2 a_2.$$

### Зависимость массы от скорости



При больших скоростях ( $v \sim c$ ,  $c$  — скорость света в вакууме) следует учитывать зависимость массы от скорости движущегося тела (рис. 1.12):

$$m = m_0 / \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (1.35)$$

$m_0$  — масса неподвижного тела (масса покоя),  $m$  — масса движущегося тела,  $\beta = v/c$ .

Рис. 1.12

## 7. Динамика вращательного движения

### Момент силы относительно точки

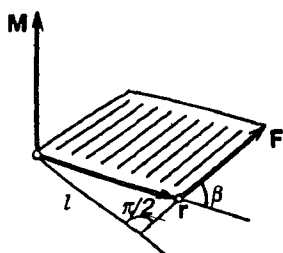


Рис. 1.13

### Момент силы относительно оси

### Момент количества движения (импульса) относительно точки

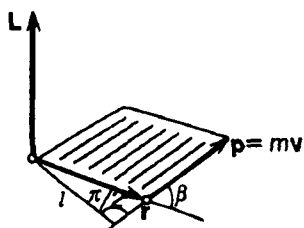


Рис. 1.14

Векторная величина  
 $M = [rF]$ , (1.36)

модуль которой равен произведению модуля силы на проекцию  $l$  радиуса-вектора  $r$ , проведенного из точки  $O$  в точку приложения силы  $F$ , на направление, перпендикулярное направлению этой силы:

$$M = Fr \sin \beta,$$

$\beta$  — угол между векторами  $r$  и  $F$  (рис. 1.13).

Скалярная величина, равная проекции момента силы на ось вращения.

Векторная величина  
 $L = [rp]$ , (1.37)

модуль которой равен произведению модуля количества движения (импульса) на проекцию  $l$  радиуса-вектора  $r$  на направление, перпендикулярное вектору скорости (импульса):

$$L = mvr \sin \beta,$$

$\beta$  — угол между векторами  $r$  и  $p = mv$  (рис. 1.14).

## Момент инерции материальной точки

Скалярная величина

$$I = mr^2, \quad (1.38)$$

$m$  — масса материальной точки,  
 $r$  — ее расстояние от оси вращения.

## Момент количества движения (импульс) относительно оси

Скалярная величина, равная проекции момента импульса  $L$  на ось вращения.

## Уравнения динамики вращательного движения

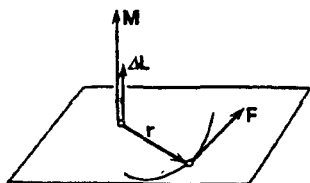


Рис. 1.15

$$M = \frac{dL}{dt}$$

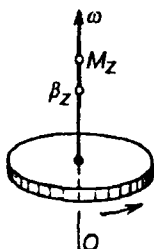


Рис. 1.16

Основное уравнение динамики вращательного движения материальной точки (уравнение моментов):

$$M = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{dL}{dt}, \quad (1.39)$$

$\Delta L$  — изменение момента количества движения (импульса) за время  $\Delta t$  (рис. 1.15).

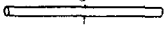


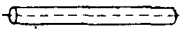

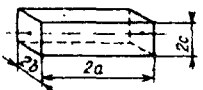
Уравнение динамики вращения твердого тела вокруг неподвижной оси:

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

$I$  — момент инерции тела относительно оси вращения, равный сумме моментов инерции материальных точек:  $I = \sum_i m_i r_i^2$ ;

$M_z$  — алгебраическая сумма моментов внешних сил,  $\beta_z$  — проекция углового ускорения на ось  $Oz$  (рис. 1.16).

## 8. Моменты инерции однородных тел

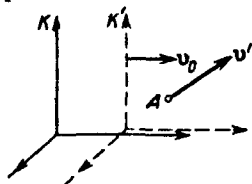
Тело	Относительно оси	$I_u$
Тонкий стержень длины $l$ 	перпендикулярной стержню и проходя- щей через его середину	$ml^2/12$ (1.41)
Круглый диск или цилиндр радиуса $r$ 	перпендикулярной плоскости диска и проходящей через его центр	$mr^2/2$ (1.42)
Шар радиуса $r$ 	совпадающей с диаметром	$2mr^2/5$ (1.43)
Тонкая труба или кольцо радиуса $r$ 	совпадающей с осью трубы	$mr^2$ (1.44)
Круглый цилиндр длины $l$ и радиуса $r$ 	перпендикулярной к оси цилиндра и проходящей через его середину	$m \left( \frac{l^2}{12} + \frac{r^2}{4} \right)$ (1.45)
Прямоугольный параллелепипед с ребрами $2a$ , $2b$ , $2c$ 	проходящей через центр и параллельной ребру длины $2a$	$\frac{m}{3} (b^2 + c^2)$ (1.46)

Примечание. В таблице даны моменты инерции тел  $I_u$  относительно осей, проходящих через их центры масс. Моменты инерции относительно осей, которые параллельны оси, проходящей через центр масс, можно рассчитать по формуле  $I = I_u + mb^2$  ( $b$  — расстояние между осями).

## 9. Неинерциальные системы отсчета

Система отсчета, которая перемещается с ускорением относительно инерциальной системы, называется *неинерциальной системой*.

Система  $K'$  движется поступательно с переменной скоростью  $v_0$  и ускорением  $a_0$



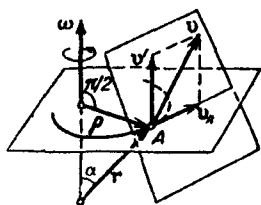
Если в системе  $K'$  скорость равна  $v'$ , а ускорение —  $a'$ , то в инерциальной системе  $K$  скорость будет равна

$$v = v' + v_0, \quad (1.47)$$

ускорение

$$a_{\text{и}} = a' + a_0 \quad (1.48)$$

Система  $K'$  вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega$  вокруг оси, которая неподвижна в инерциальной системе  $K$



Если в системе  $K'$  скорость материальной точки  $A$  равна  $v'$ , а ускорение равно  $a'$ , то в инерциальной системе  $K$  скорость

$$v = v' + [\omega r], \quad (1.49)$$

ускорение

$$a_{\text{и}} = a' + 2[\omega v'] - \omega^2 \rho, \quad (1.50)$$

$[\omega r] = [\omega \rho] = v_{\perp}$  — линейная скорость материальной точки  $A$ ,  
 $\rho = r \sin \alpha$ ;

$$a_{\text{кор}} = 2[\omega v'] \quad (1.51)$$

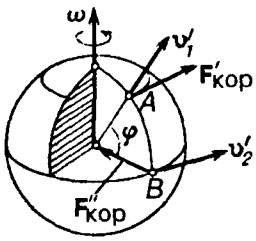
кориолисово ускорение;

$$a_{\text{ц}} = -\omega^2 \rho \quad (1.52)$$

центростремительное ускорение.

$$a_{\text{и}} = a' + a_{\text{кор}} + a_{\text{ц}}$$

## 10. Основной закон движения тел в неинерциальных системах отсчета. Силы инерции

<p>Неинерциальная система <math>K'</math> перемещается прямолинейно с ускорением <math>a_0</math> относительно инерциальной системы <math>K</math></p>	$ma' = F - ma_0, \quad (1.54)$ <p><math>a'</math> — ускорение в системе <math>K'</math>,  <math>a</math> — ускорение в системе <math>K</math>,  <math display="block">F_{\text{и}} = -ma_0 \quad (1.55)</math> — сила инерции  (поступательная сила инерции)</p>
<p>Неинерциальная система <math>K'</math> вращается вокруг оси с постоянной угловой скоростью <math>\omega</math></p> 	$ma' = F + m\omega^2\rho + 2m[v'\omega], \quad (1.56)$ <p><math>a'</math> — ускорение в системе <math>K'</math>,  <math display="block">F_{\text{цб}} = m\omega^2\rho \quad (1.57)</math> центробежная сила инерции;  <math display="block">F_{\text{кор}} = 2m[v'\omega] \quad (1.58)</math> сила Кориолиса (кориолисова сила)  В общем случае, когда система вращается и перемещается с постоянным ускорением <math>a_0</math>  <math display="block">ma' = F_{\text{и}} + F_{\text{цб}} + F_{\text{кор}} + F. \quad (1.59)</math> На рисунке указаны направления силы Кориолиса, которые действуют на движущееся тело по поверхности Земли: а) при перемещении по вертикали со скоростью <math>v'_1</math> в точке А; б) при перемещении по экватору со скоростью <math>v'_2</math> в точке В.</p>

$$ma' = F_{\text{и}} + F_{\text{цб}} + F_{\text{кор}} + F$$

Силы инерции — поступательные  $F_{\text{и}}$ , центробежные  $F_{\text{цб}}$  и кориолисовы  $F_{\text{кор}}$  — существуют только в неинерциальных системах отсчета.

## 11. Силы трения

### Силы трения

Силы, которые возникают на поверхности соприкосновения прижатых друг к другу тел при скольжении (относительном перемещении).

### Трение сухое

Трение между поверхностями соприкасающихся твердых тел при отсутствии прослойки жидкости (смазки). Сухое трение подразделяется на *трение скольжения* (одно тело скользит по поверхности другого) и *трение качения* (одно тело катится по поверхности другого).

### Силы трения покоя

Если внешняя сила недостаточна для относительного перемещения тел по поверхности их соприкосновения, то возникающая при этом сила трения равна внешней силе и изменяется от нуля до некоторого максимального значения  $F_m$ , которое называется *силой трения покоя*. Отношение силы трения покоя к силе давления  $P$ , сжимающей соприкасающиеся тела, называется коэффициентом трения покоя:  $f = F_m / P$ . (1.60)

### Силы трения скольжения

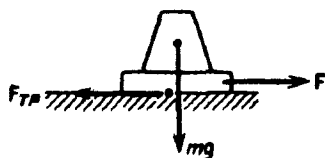


Рис. 1.17

После того как начнется скольжение, сила трения несколько уменьшается по сравнению с силой трения покоя. Сила трения при скольжении называется *силой трения скольжения*. Сила трения скольжения  $F_{тр}$  зависит



от материала и качества обработки соприкасающихся поверхностей, от силы, сжимающей трущиеся поверхности (силы давления  $P$ ). На рис. 1.17 сила давления  $P$ , распределенная по поверхности соприкосновения тел, равна силе тяжести  $mg$ .

Модуль силы трения скольжения  $F_{\text{тр}} = fP$ , (1.61)

$f$  — коэффициент трения скольжения, зависящий от тех же факторов, что и сила трения; незначительно  $f$  зависит от относительной скорости смещения тел (этой зависимостью обычно пренебрегают).

## Трение качения

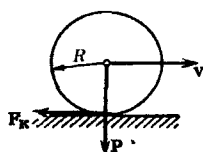


Рис. 1.18

Коэффициент сцепления  $\psi$



Рис. 1.19

Сила трения качения

$$F_k = f_k P / R, \quad (1.62)$$

$R$  — радиус катящегося цилиндра,  $f_k$  — коэффициент трения качения, имеющий размерность длины.

Отношение силы трения скольжения  $F_{\text{тр}}$ , которая возникает при торможении между шиной автомобиля и дорожным покрытием, к силе давления  $P$ :

$$\psi = F_{\text{тр}} / P. \quad (1.63)$$

## 12. Работа, мощность, энергия

При движении тел силы, действующие на них, могут изменяться как по модулю, так и по направлению.

# Элементарное перемещение (элементарный участок пути)

Малый участок перемещения (или пути), в пределах которого можно считать силу постоянной.

## Элементарная работа силы

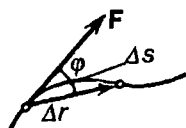


Рис. 1.20, а

## Работа на конечном перемещении

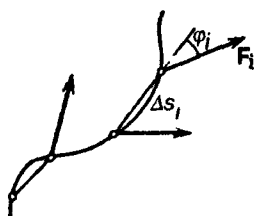


Рис. 1.20, б

Скалярная величина

$$\Delta A = F \Delta r \cos \varphi = F \Delta s \cos \varphi, \quad (1.64)$$

$\Delta r$  — элементарное перемещение,

$\Delta s$  — элементарный путь (рис. 1.20, а).

$$A = \sum_{i=1}^n F_i \Delta s_i \cos \varphi_i, \quad (1.65)$$

$n$  — количество элементарных участков пути, на которые разбивается конечный путь (рис. 1.20, б).

Вообще

$$A = \int_s F \cos \varphi \, ds \quad (1.66)$$

Если  $F = \text{const}$  и  $\varphi = \text{const}$ , то работа

$$A = F s \cos \varphi, \quad (1.67)$$

$s$  — пройденный путь (не перемещение!).

Работа — величина алгебраическая ( $A > 0$ , если  $\cos \varphi > 0$ ;  $A < 0$ , если  $\cos \varphi < 0$ ).

## Элементарная работа при вращательном движении

$$\Delta A_{\text{вр}} = M \Delta \varphi, \quad (1.68)$$

$\Delta \varphi$  — угол поворота относительно неподвижной оси.

## Мощность

Работа за время 1 с:

$$N = \Delta A / \Delta t = Fv, \quad (1.69)$$

$\Delta A$  — элементарная работа за время  $\Delta t$ ,  $v$  — скорость.

## Единицы

работа, энергия — джоуль, Дж;  
мощность — ватт, Вт.

## Энергия

Мера различных форм движения и взаимодействий.

Например, силы, приложенные к телу, увеличивают энергию этого тела на величину, равную работе этих сил.

Если санки перемещаются по горизонтальному пути с постоянной скоростью, то результирующая сила равна нулю, т. е. (см. рис. 1.21).  $F_s - F_{\text{тр}} = 0$ ; работа силы трения  $F_{\text{тр}}$  равна работе силы  $F_s$ , которая необходима для перемещения санок, но по знаку эти работы противоположны; работа результирующей силы равна нулю, поэтому энергия санок не изменяется.



Рис. 1.21

## Кинетическая энергия



Рис. 1.22

Энергия движущегося тела, определяемая соотношением

$$E_k = mv^2/2, \quad (1.70)$$

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

Изменение кинетической энергии равно работе сил.

## Потенциальное поле

Поле называется потенциальным, если работа сил этого поля при перемещении тела из одной точки в другую не зависит от формы траектории, по которой перемещается тело.

## Потенциальные (консервативные) силы

Силы потенциального поля называются *потенциальными* или *консервативными*.

## Работа консервативных сил



Рис. 1.23

Зависит лишь от положения (координат) начальной и конечной точки траектории (на рис. 1.23 — это точки A и B).

## Потенциальная энергия тела

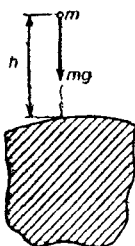


Рис. 1.24

Энергия, обусловленная взаимодействием этого тела с другими телами посредством консервативных сил (например, гравитационное взаимодействие тела с Землей). Потенциальная энергия зависит от расстояния между взаимодействующими телами. Например, при медленном перемещении в вертикальном направлении на высоту  $h$  тела массой  $m$  в поле тяготения Земли совершается внешними силами работа (рис. 1.24)

$$A = mgh, \quad (1.71)$$

при этом потенциальная энергия увеличивается на

$$\Delta U = mgh. \quad (1.72)$$

Работа силы тяжести при подъеме тела будет отрицательна. Вообще при перемещении тела из начального положения в конечное работа потенциальных сил равна изменению потенциальной энергии, взятому с обратным знаком:

$$\Delta A = -(U_2 - U_1), \quad (1.73)$$

$U_1, U_2$  — потенциальные энергии в начальном и конечном положениях,  $U_2 - U_1$  — приращение энергии. Начало отсчета потенциальной энергии выбирается произвольно; во многих случаях считают, что в поле тяготения Земли потенциальная энергия на ее поверхности равна нулю.

### Потенциальная энергия при деформации

В результате работы внешних сил при деформации потенциальная энергия тела увеличивается вследствие изменения расстояния между частицами (см. п. 19 гл. I).

## 13. Закон всемирного тяготения

### Закон всемирного тяготения

$$|F| = \gamma \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

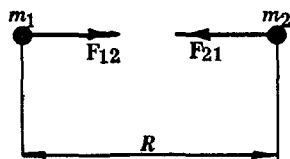


Рис. 1.30

Две материальные точки массы  $m_1$  и  $m_2$  притягиваются друг к другу силами

$$|F_{12}| = |F_{21}| = \gamma m_1 m_2 / R^2, \quad (1.74)$$

$R$  — расстояние между точками,

$\gamma$  — гравитационная постоянная. Эти силы называются *гравитационными*, или силами тяготения. Силы тяготения направлены вдоль прямой, проведенной через материальные точки. Эти силы равны по модулю, но противоположны по направлению.

По формуле (1.86) можно рассчитывать силу тяготения между двумя однородными телами сферической формы, при этом  $R$  будет соответствовать расстоянию между центрами этих шаров (рис. 1.30).

Гравитационная постоянная

$$\gamma \approx 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$$

Сила тяготения

$$F_T = \gamma m M_3 / R_3^2 \quad (1.75)$$

— сила тяготения между телом, расположенным на поверхности Земли, и Землей,  $m$  — масса тела,  $M_3$  — масса Земли,  $R_3$  — ее радиус;  $F_T$  направлена к центру Земли.

Сила тяжести

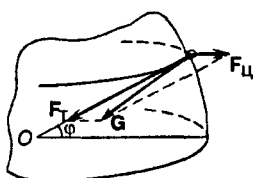


Рис. 1.31

Равнодействующая двух сил — силы тяготения  $F_T$  и центробежной силы инерции  $F_ц = m\omega^2 r$  (рис. 1.31):

$$G = F_T + F_ц. \quad (1.76)$$

Направление  $G$  совпадает с направлением отвеса; на полюсах Земли  $G = F_T$ , на экваторе  $G = F_T - F_ц$ .

Вес тела

Сила, с которой действует на горизонтальную опору (или отвес) тело, находящееся в поле силы тяжести:

$$P = G - ma, \quad (1.77)$$

$a$  — ускорение тела с опорой.

Напряженность поля тяготения

Величина, равная силе тяготения, действующей на тело единичной массы. Напряженность поля тяготения

## Движение планет

### Законы Кеплера

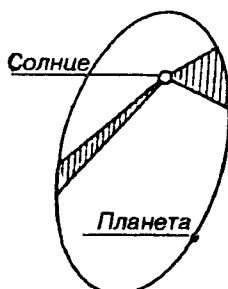


Рис. 1.32

$$g_T = F_T / m, \quad (1.78)$$

$m$  — масса тела,  $F_T$  — сила тяготения.

Планеты движутся под действием гравитационных сил, действующих между Солнцем и планетами.

**Первый закон.** Планеты движутся по эллиптическим орбитам, в одном из фокусов которой находится Солнце (рис. 1.32).

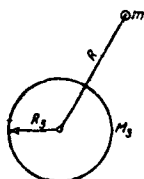
**Второй закон.** Радиус-вектор, проведенный из центра Солнца в центр планеты, описывает за равные промежутки времени одинаковые площади.

**Третий закон.** Отношение  $r^3/T^2 = \text{const} = 3,36 \cdot 10^{-18} \text{ м}^3/\text{с}^2$  для всех планет Солнечной системы;  $r$  — расстояние от Солнца до планеты,  $T$  — период обращения планеты.

## 14. Формулы расчета кинетической и потенциальной энергии

Кинетическая или потенциальная энергия	Формулы
Кинетическая энергия: — при движении тел со скоростями $v \ll c$ ( $c$ — скорость света в вакууме); — при вращении тела вокруг неподвижной оси с угловой скоростью $\omega$ ; — при движении с большими скоростями ( $v \sim c$ )	$E_k = m_0 v^2 / 2, \quad (1.79)$ <p><math>m_0</math> — масса покоя тела</p> $E_\omega = I \omega^2 / 2, \quad (1.80)$ <p><math>I</math> — момент энергии</p> $E_v = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right) \quad (1.81)$

Потенциальная энергия:  
— в поле тяготения Земли



— в однородном поле тяготения

— деформированного тела единичного объема (при продольной деформации стержня)

$$U_T = -\gamma M_3 m / R, \quad (1.82)$$

$\gamma$  — гравитационная постоянная,  $M_3$  — масса Земли,  $m$  — масса тела,  $R$  — расстояние между центром Земли и центром массы тела ( $R > R_3$ ,  $R_3$  — радиус Земли)

$$U = mgh, \quad (1.83)$$

$m$  — масса тела,  $g$  — ускорение свободного падения,  $h$  — высота над поверхностью Земли

$$U_E = \epsilon E^2 / 2, \quad (1.84)$$

$\epsilon$  — деформация,  $E$  — модуль Юнга (см. п. 21 гл. I).

## 15. Законы сохранения в механике

Законы сохранения энергии (кинетической и потенциальной), импульса и момента импульса выполняются в замкнутых системах.

Замкнутой системой называется система, не взаимодействующая с внешними телами.

Закон сохранения энергии

$$E_k + U = \text{const}$$

В инерциальных системах отсчета сумма кинетической и потенциальной энергий замкнутой системы тел, между которыми действуют лишь консервативные силы, остается постоянной:

$$E_k + U = \text{const}. \quad (1.85)$$



**Закон сохранения  
импульса (количества  
движения)**

$$\sum_i \mathbf{p}_i = \text{const}$$

В инерциальных системах отсчета векторная сумма импульсов тел замкнутой системы остается постоянной:

$$\sum_i \mathbf{p}_i = \text{const.} \quad (1.86)$$

**Закон сохранения  
момента импульса  
(количества движения)**

$$\sum_i \mathbf{L}_i = \text{const}$$

В инерциальных системах отсчета векторная сумма моментов импульсов тел замкнутой системы остается постоянной:

$$\sum_i \mathbf{L}_i = \text{const.} \quad (1.87)$$

## 16. Простейшие механизмы

**Наклонная плоскость**

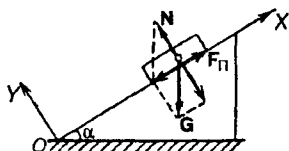


Рис. 1.25

На брусок, расположенный на наклонной плоскости, действуют: сила тяжести  $G$ , сила реакции опоры  $N$  и сила трения покоя  $F_{\text{н}}$ ; условие равновесия (без учета моментов сил)

$$G + N + F_{\text{н}} = 0. \quad (1.88)$$

Если ось  $OX$  прямоугольной системы координат направлена параллельно наклонной плоскости, ось  $OY$  — перпендикулярно, то условие равновесия в проекциях на эти оси (см. рис. 1.25):

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

При условии, что  $G \sin \alpha > F_{\text{тр}}$  ( $F_{\text{тр}}$  — максимальное значение силы трения покоя), равновесие нарушается, брусок будет смещаться вниз по наклонной плоскости.

## Рычаг

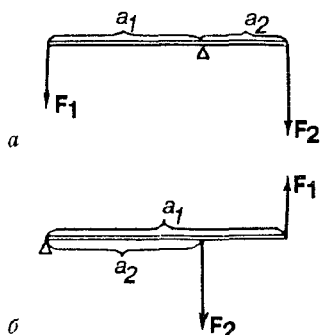


Рис. 1.26

Рычаг представляет собой стержень, который может вращаться вокруг неподвижной опоры или оси вращения. Рычаг находится в равновесии, если алгебраическая сумма действующих на него моментов сил равна нулю (рис. 1.26):

$$F_1 a_1 - F_2 a_2 = 0,$$

$a_1$  и  $a_2$  — плечи сил  $F_1$  и  $F_2$ .  
Условие равенства моментов сил применяется также к равновесию ворот или лебедки.

## Блок

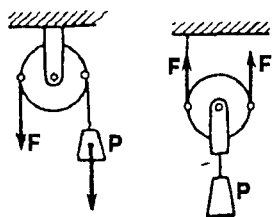


Рис. 1.27      Рис. 1.28

Блок, простейший механизм в форме диска с желобом по окружности для цепи, каната, троса, нити и т. д. Неподвижный блок (рис. 1.27) служит только для изменения направления перемещения. На подвижном блоке (рис. 1.28) сумма всех действующих сил и сумма всех моментов сил равны нулю:

$$P - 2F = 0.$$

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

## Полиспаст

Полиспаст представляет собой систему подвижных и неподвижных блоков, укрепленных в двух держателях. Если полиспаст имеет  $n$  подвижных и  $n$  неподвижных блоков, то для уравно-

вешивания силы  $P$  необходимо приложить силу  $F = P/(2n)$ . (1.89)

Домкрат винтовой

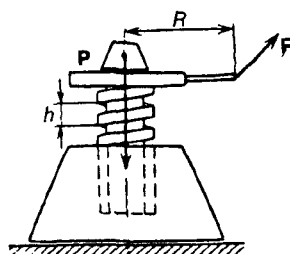


Рис. 1 29

При отсутствии трения сила  $P$ , действующая вдоль оси винта, уравнивается силой  $F$ , приложенной к рукоятке (рис. 1.29):  $F = Ph/(2\pi R)$ , (1.90)

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

## 17. Статика твердого тела

Условия равновесия

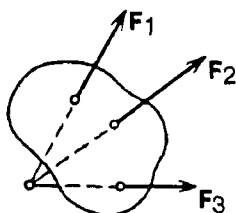


Рис. 1.30

Если на тело действует несколько сил, направления которых пересекаются в одной точке (рис 1.30), то в этом случае для равновесия необходимо, чтобы векторная сумма всех сил была равна нулю:

$$\sum_i F_i = 0. \quad (1.91)$$

Тело с неподвижной осью в точке  $O$  находится в равновесии, если алгебраическая сумма моментов относительно этой оси равна нулю:

$$\sum_i M_i = 0. \quad (1.92)$$

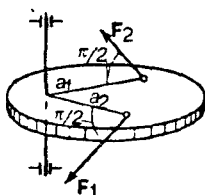


Рис. 1.31

Центр масс (центр инерции)

Центр тяжести

На рис. 1.31  $M_2 = F_2 a_2$  (вращение по часовой стрелке),  $M = -F_1 a_1$  (вращение против часовой стрелки); условие равновесия:  $M_1 + M_2 = F_2 a_2 - F_1 a_1 = 0$ .

Точка, положение которой определяется радиусом-вектором

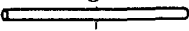
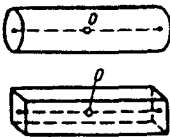
$$\mathbf{r}_c = \sum_i (m_i \mathbf{r}_i) / M, \quad (1.93)$$

$m_i$  и  $\mathbf{r}_i$  — массы и радиусы-векторы частиц,  $M$  — масса всех частиц.

Точка, в которой приложена равнодействующая всех сил тяжести, действующих на отдельные малые объемы тела. Сумма моментов сил тяжести относительно центра тяжести равна нулю.

В однородном поле тяготения центр тяжести и центр масс совпадают.

## 18. Центры масс однородных тел

Тело	Положение центра тяжести
<p>Тонкий стержень</p> 	На середине стержня
<p>Цилиндр или призма</p> 	На середине прямой, соединяющей центры оснований цилиндра или призмы

Тело	Положение центра тяжести
Шар 	В центре
Плоский сегмент малой толщины 	На оси симметрии, смещен от основания на $\frac{2}{5}$ его высоты
Пирамида или конус 	На отрезке, соединяющем вершину с центром основания; смещен от основания на $\frac{1}{4}$ этого отрезка
Полушарие 	На оси симметрии; смещен от центра на $\frac{3}{8}$ радиуса

## 19. Деформация и силы упругости

### Деформация

Изменение расстояния между точками тела под действием внешних сил.

### Упругая деформация

Деформация, исчезающая после прекращения действия внешних сил.

### Силы упругости

Возникающие при упругой деформации силы, которые проти-

Напряжение (вектор  
напряжения)

воздействуют изменению формы и  
объема тела.

Векторная величина, равная  
силе упругости, которая действу-  
ет на площадь сечения  $1 \text{ м}^2$  де-  
формированного тела:

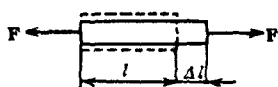
$$\sigma = F_y / S, \quad (1.94)$$

$F_y$  — сила упругости,  $S$  — пло-  
щадь сечения.

Нормальное  
напряжение  $\sigma_n$

Составляющая вектора напряже-  
ния, перпендикулярная плоскос-  
ти сечения.

Продольная деформация



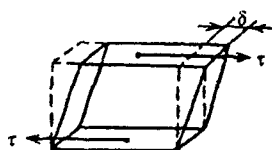
Отношение  $\Delta l / l = \epsilon$  ( $\Delta l$  — измене-  
ние длины стержня при растяже-  
нии (сжатии) стержня,  $l$  — длина  
стержня до деформации (рис.  
1.35)).

Рис. 1.35

Тангенциальное  
напряжение

Составляющая вектора напряже-  
ния, параллельная плоскости се-  
чения (обозначается  $\tau$ ).

Сдвиговая  
деформация



Отношение  $\gamma = \delta / l$  ( $\delta$  — смещение  
одной параллельной грани отно-  
сительно другой под действием  
сдвиговых напряжений,  $l$  — рас-  
стояние между этими гранями до  
деформации).

Рис. 1.36

## Поперечная деформация

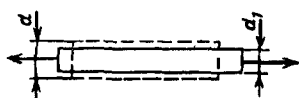


Рис. 1.37

Отношение  $\Delta d/d = \epsilon_1$  ( $\Delta d = d - d_1$  — изменение диаметра при продольной деформации,  $d$  — диаметр стержня до деформации).

## Коэффициент Пуассона

Отношение поперечной деформации к продольной:

$$\nu = \epsilon_1 / \epsilon . \quad (1.95)$$

## Сжимаемость

Относительное изменение объема  $\Delta V/V$  при изменении давления на один паскаль:

$$\beta = \Delta V / (V \Delta p) . \quad (1.96)$$

## Единицы:

деформация — безразмерная величина;

напряжение — паскаль, Па.

## Закон Гука

$$\sigma = E \epsilon$$

Механические напряжения пропорциональны деформациям. Этот закон выполняется при малых деформациях;

$$\sigma_n = E \epsilon \quad (1.97)$$

— при продольных деформациях изотропной среды;

$$\tau = G \gamma \quad (1.98)$$

— при деформациях сдвига изотропной среды;

$$P = K \Delta V / V \quad (1.99)$$

— при всестороннем сжатии изотропной среды.

## Модули упругости

$E = \sigma_n / \varepsilon$  — модуль Юнга

$G = \tau / \gamma$  — модуль сдвига, (1.100)

$K = P / (\Delta V / V)$  — модуль объемного сжатия.

Соотношение между модулями изотропной среды

$$\begin{aligned} E &= 2G(1+\nu), \\ E &= 3K(1-2\nu), \\ K &= 1/\beta. \end{aligned} \quad (1.101)$$

Зависимость нормального напряжения от продольной деформации

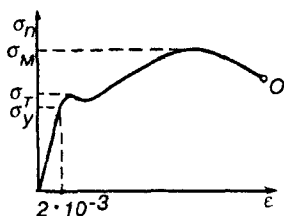


Рис. 1.38

На рис. 1.38 графически изображена экспериментальная зависимость  $\sigma_n$  от  $\varepsilon$ ;  $\sigma_M$  — предел прочности, т.е. напряжение, при котором на стержне получается местное сужение (шейка),  $\sigma_n$  — предел текучести, т.е. напряжение, при котором появляется текучесть (увеличение деформации без увеличения деформирующей силы),  $\sigma_y$  — предел упругости, т.е. напряжение, ниже которого справедлив закон Гука; в точке  $O$  происходит разрушение материала.



## 20. Механика жидкостей и газов

### Закон Паскаля

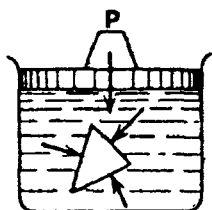


Рис. 1.39

### Закон Архимеда

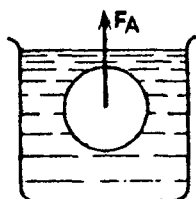


Рис. 1.40

Внешнее давление в неподвижной жидкости (газе), находящейся в замкнутом объеме, передается во все стороны равномерно; иначе — давление в неподвижной жидкости в некоторой точке одинаково во всех направлениях.

На тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная по модулю силе тяжести вытесненной им жидкости (газа); эта сила (архимедова сила)  $F_A$  приложена к центру масс погруженной части тела или к центру масс всего тела, если оно погружено в жидкость полностью. Сила Архимеда направлена вертикально вверх (рис. 1.40).

### Сообщающиеся сосуды

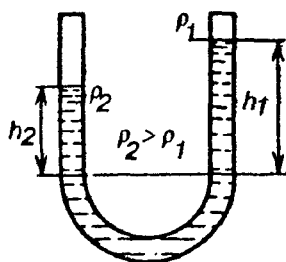


Рис. 1.41

Без учета поверхностного натяжения (см. гл. II) высоты уровней  $h$  жидкостей, находящихся в поле тяготения, обратно пропорциональны плотностям жидкостей (рис. 1.41):

$$h_1/h_2 = \rho_2/\rho_1 \quad (1.102)$$

(индексы 1 относятся к одной жидкости, индексы 2 — к другой).

Если  $\rho_1 = \rho_2$ , то уровни размещаются на одной высоте.

## Течение идеальной жидкости

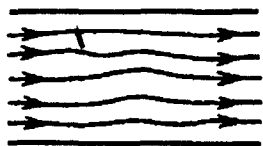


Рис. 1.42

*Идеальной* называется такая жидкость, в которой отсутствуют силы трения. Течение жидкости называется *ламинарным*, если скорость и давление в каждой точке не зависят от времени. Графически течение изображается *линиями тока* (рис. 1.42); эти такие линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора скорости.

## Трубка тока



Рис. 1.43

## Уравнение Бернулли

$$p + \rho gh + \rho v^2 / 2 = \text{const}$$

В одной и той же трубке тока для любого ее сечения выполняется условие (рис. 1.43)

$$p + \rho gh + \rho v^2 / 2 = \text{const} \quad (1.103)$$

$p$  — давление,  $v$  — скорость,  $h$  — высота, на которой расположено данное сечение.

## Формула Торичелли

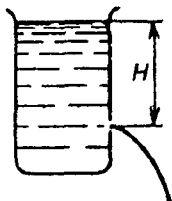


Рис. 1.44

Скорость  $v$ , с которой вытекает жидкость из малого отверстия в сосуде, определяется по формуле (рис. 1.44)

$$v^2 = 2gH, \quad (1.104)$$

$H$  — расстояние от верхнего уровня жидкости до отверстия.

## Течение вязкой жидкости. Вязкость

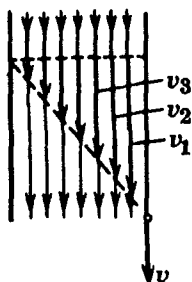


Рис. 1.45

### Градиент скорости

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

$$F_{\text{вт}} = -\eta S \Delta v / \Delta l \quad (1.105)$$

$\Delta v$  — разность скоростей движущихся слоев,  $\Delta l$  — расстояние между этими слоями по направлению перпендикулярному скорости;

$\eta$  — динамическая вязкость — сила внутреннего трения, действующая между двумя слоями площадью  $1 \text{ м}^2$ , которые находятся друг от друга на расстоянии  $1 \text{ м}$  по нормали к вектору скорости, при разности скоростей между этими слоями  $1 \text{ м/с}$ .

Векторная величина, модуль которой равен:

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

называется градиентом скорости.

### Единица вязкости

Паскаль-секунда, Па·с.

### Движение твердого тела в вязкой жидкости

При движении в жидкости твердого тела (например, шара, пластины) ближайший слой жидкости прилипает к нему и движется



Рис. 1.46

вместе с ним; остальные слои скользят друг относительно друга.

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

#### Гидродинамическая сила

Гидродинамическую силу можно рассчитать по формуле:

$$F_{гд} = C_x \rho v^2 S / 2, \quad (1.106)$$

$C_x$  — безразмерная величина, которая называется *коэффициентом гидродинамического сопротивления*;  $\rho$  — плотность жидкости,  $S$  — площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную вектору скорости  $v$ .

Значения  $C_x$  приводятся в таблице (см. ниже п. 21).

#### Формула Стокса

При движении шара в вязкой жидкости сила трения, действующая на него, рассчитывается по формуле

$$F_{ш} = -6\pi\eta Rv, \quad (1.107)$$

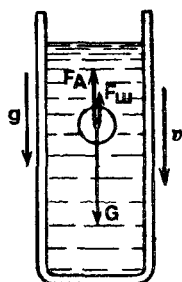


Рис. 1.47

$\eta$  — динамическая вязкость жидкости,  $R$  — радиус шара,  $v$  — его скорость.

При падении шара в вязкой жидкости, находящейся в поле тяготения Земли, устанавливается движение с постоянной скоростью  $v_y$  при условии  $F_A + F_{\text{ш}} = -G$  (рис. 1.47,  $F_A$  — сила Архимеда,  $G$  — сила тяжести).

Скорость  $v_y$  рассчитывается по формуле

$$v_y = 2g(\rho - \rho_{\text{ж}})R^2 / (9\eta), \quad (1.108)$$

$g$  — ускорение свободного падения,  $\rho$  — плотность материала, из которого изготовлен шар,  $\rho_{\text{ж}}$  — плотность жидкости,  $R$  — радиус шара.

#### Формула Пуазейля

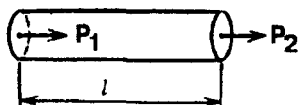


Рис. 1.48

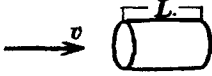
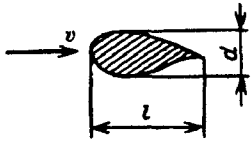
При ламинарном течении объем вязкой жидкости (или газа), вытекающей из трубы с круглым сечением за время 1 с, рассчитывается по следующей формуле:

$$V = \pi R^4 (p_1 - p_2) / (8\eta l), \quad (1.109)$$

$(p_1 - p_2)$  — разность давлений на концах трубы длиной  $l$  (рис. 1.48).

## 21. Коэффициенты гидродинамического сопротивления

	Полусфера	0,34
		1,33

	Конус $\alpha=30^\circ$ 0,34 $\alpha=60^\circ$ 0,51	
	Круглый цилиндр: $L/R=2$ 0,63 4 0,68 10 0,74 20 0,82 80 0,98 $\infty$ 1,20	
	Круглый цилиндр: $L/R=0$ 1,11 2 0,91 4 0,85 8 0,87 14 0,99	
	Специальный профиль: $l/d=2$ 0,2 3 0,1 5 0,06 10 0,08 20 0,09	

## 22. Механические колебания и волны

### Колебания

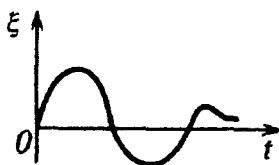


Рис. 1.49

Ограниченные перемещения материальной точки или тела (или изменения состояний), повторяющиеся полностью или частично в окрестности некоторого значения изменяющейся величины, называются *колебаниями*. Колебания называются *механическими*, если они характеризуются изменением только механических величин (смещения, скорости, ускорения, давления и т. п.).

## Периодические колебания

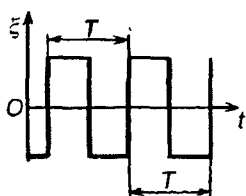


Рис. 1.50

Колебания, в которых каждое значение изменяющейся величины повторяется неограниченное число раз через одинаковые промежутки времени.

Наименьший промежуток времени, по истечении которого повторяется каждое значение изменяющейся величины, называется периодом колебания  $T$ .

Число колебаний за время, одна секунда называется частотой периодических колебаний  $f$ ;

$$T=1/f. \quad (1.110)$$

## Гармонические колебания

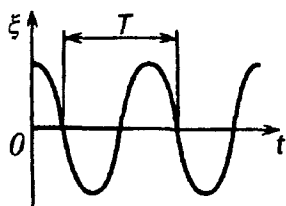


Рис. 1.51

Периодические изменения любой величины, которые могут быть выражены гармонической функцией (синуса или косинуса)

$$\xi=A_0 \cos(\omega t+\varphi), \quad (1.111)$$

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

$$\omega=2\pi/T=2\pi f. \quad (1.112)$$

## Математический маятник

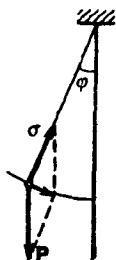


Рис. 1.52

Подвешенное на тонкой нити тело малых размеров, совершающее колебания под действием силы тяжести (при отсутствии трения о воздух и в точке подвеса).

Колебания математического маятника при малых углах отклонения (меньше 5 градусов) можно считать гармоническими.

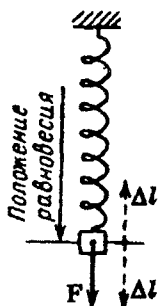


Рис. 1.53

Период колебания математического маятника

$$T=2\pi \sqrt{l/g}, \quad (1.113)$$

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

Колебания в вертикальном направлении тела, подвешенного на пружине, можно считать гармоническими, если при ее деформации (сжатии и растяжении) выполняется закон Гука (см. п. 5 гл. I), силы трения малы, а массой пружины  $M$  можно пренебречь по сравнению с массой  $m$  тела, совершающего колебания ( $M \ll m$ ); при этих условиях период колебаний тела, подвешенного на пружине, рассчитывается по формуле

$$T=2\pi \sqrt{m/k}, \quad (1.114)$$

$k$  — жесткость пружины — величина, равная отношению внешней силы  $F$  к изменениям длины пружины  $\Delta l$  (рис. 1.53),

$$k=F/\Delta l. \quad (1.115)$$

### Квазиупругие силы

По формуле (1.114) можно рассчитать период гармонических колебаний, которые возбуждаются не только упругими силами, но и другими силами, которые пропорциональны смещению тела от положения равновесия (такие силы называются квазиупругими):

$$F_k = -k_y u, \quad (1.116)$$

$k_y$  — коэффициент квазиупругой силы,  $u$  — смещение.



### Крутильный маятник

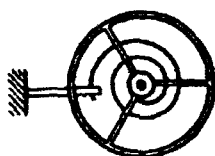


Рис. 1.54

Тело, совершающее вращательно-колебательное движение под действием пружины (например, баланси́р в механических часах, рис. 1.54). Когда амплитуда смещения и силы трения достаточно малы, эти колебания можно считать гармоническими; в этом случае период колебаний крутильного маятника

$$T = 2\pi \sqrt{I/D}, \quad (1.117)$$

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

### Физический маятник

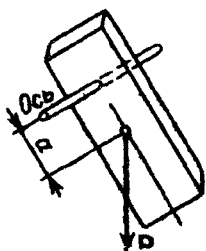


Рис. 1.55

Тело, совершающее колебания вокруг горизонтальной оси под действием силы тяжести (рис. 1.55). Период колебаний физического маятника

$$T = 2\pi \sqrt{I/(mga)}, \quad (1.118)$$

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

### Приведенная длина

$$l_n = I/(ma) \quad (1.119)$$

называется *приведенной длиной* физического маятника.

## Затухающие колебания

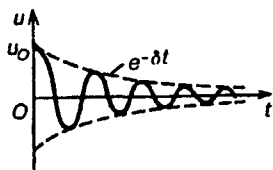


Рис. 1.56

Колебания, амплитуда которых уменьшается со временем, называются затухающими (рис. 1.56). Уравнение затухающих колебаний  $u = u_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi)$ , (1.120)

$u$  — смещение тела от положения равновесия; положительная величина  $u_0$  называется начальной амплитудой,  $\delta$  — коэффициент затухания;  $u_0 e^{-\delta t}$  — амплитуда смещения в момент времени  $t$ ,  $\omega$  — угловая частота,  $e$  — основание натуральных логарифмов;

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

$r$  — коэффициент сопротивления, равный отношению силы трения к скорости колебаний частиц,  $m$  — масса тела,  $k_y$  — коэффициент квазиупругой силы,  $\omega_0^2 = k_y/m$ .

## Вынужденные колебания

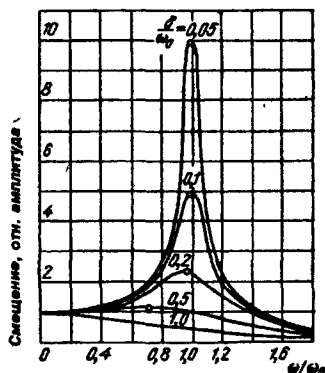


Рис. 1.57

Колебания, которые совершает тело под действием периодической внешней силы  $F = F_0 \cos \omega t$ .

Частота установившихся вынужденных колебаний равна частоте внешней периодической силы. Амплитуда смещения вынужденных колебаний резко возрастает, если период гармонической внешней силы приближается к периоду свободных колебаний тела. Это явление называется *резонансом*. Если силы трения велики (большое затухание), то резонанс выражен слабо или совсем не проявляется (например, при  $\delta/\omega_0 \geq 1$ , (рис. 1.57).

На рис. 1.57 по оси  $X$  отложены значения  $\omega/\omega_0$  ( $\omega_0$  — частота свободных колебаний тела в отсутствии трения), по оси  $Y$  — значения  $A/A_0$ ,  $A$  — амплитуда смещения вынужденных колебаний,  $A_0$  — статическое смещение, которое вызвала бы постоянная сила, равная амплитуде  $F_0$  гармонической силы. Кривые относятся к различным значениям  $\delta/\omega_0$ .

### Сложение гармонических колебаний

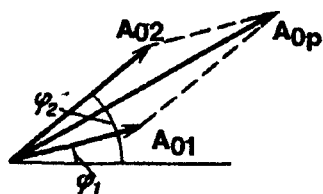


Рис. 1.58

Амплитуда результирующего смещения  $A$  при сложении двух колебаний, имеющих одинаковое направление и частоту, находится по фазовой диаграмме (рис. 1.58):

$$A_{0p}^2 = A_{01}^2 + A_{02}^2 + 2A_{01}A_{02} \cos(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (1.121)$$

$A_{01}$  и  $A_{02}$  — амплитуды колебаний,  $\varphi_2 - \varphi_1$  — разность фаз.

### Гармоники

Негармоническое колебание можно представить как результат сложения гармонических колебаний с различными частотами, амплитудами и начальными фазами. Такие гармонические колебания называются *гармониками*.

### Сложение гармонических колебаний с кратными частотами

При сложении гармонических колебаний, имеющих одинаковые направления, но различные (кратные) частоты, образуются

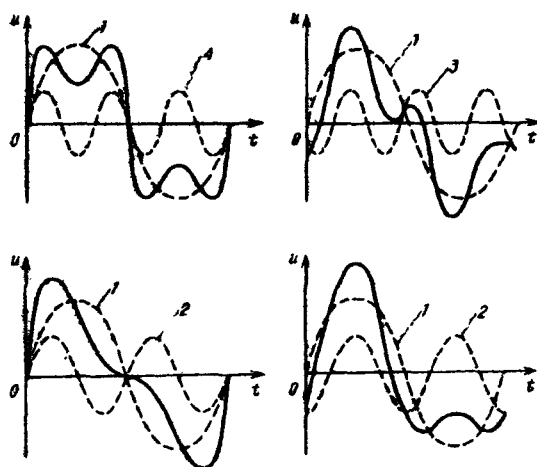


Рис. 1.59

негармонические колебания, которые зависят от амплитуд и начальных фаз гармоник, а также от их количества.

На рис. 1.59 показаны результаты сложения первой (основной), второй, третьей, четвертой гармоник; цифры указывают номера гармоник; сплошной линией изображены результирующие колебания.

### Фигуры Лиссажу

При сложении двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаний траекториями результирующих движений являются кривые, которые называются *фигурами Лиссажу*. При равенстве частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$  фигуры Лиссажу — эллипсы, которые при разностях начальных фаз  $\phi = m\pi$  ( $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) вырождаются в отрезки прямых. Если отношение частот равно рацио-

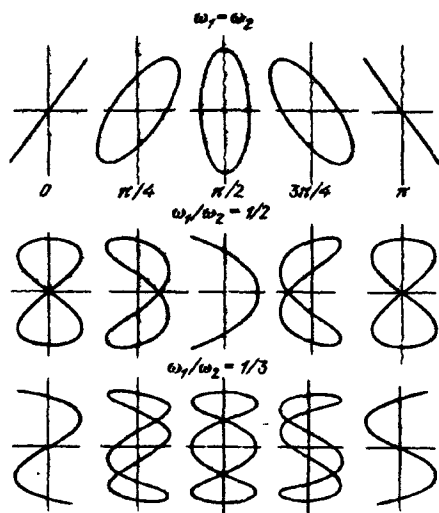


Рис. 1.60

начальному числу, то фигуры Лиссажу не изменяются; форма их зависит от отношения частот и разности начальных фаз (см. рис. 1.60).

## Волны

Распространяющиеся в пространстве изменения любой физической величины.

Скорость волны — скорость распространения возмущения в среде.

## Скорость колебания частиц

Скорость колебательного движения частиц около положения равновесия при распространении волн.

## Гармонические волны

Если при распространении волн величины, характеризующие состояние среды (например, плот-

ность, смещение частиц, давление и т. п.), изменяются в любой точке пространства по гармоническому закону, то такие волны называются *гармоническими*.

## Длина волны

Расстояние, на которое распространяется волна за время, равное одному периоду:

$$\lambda = vT = v/f, \quad (1.122)$$

$v$  — скорость волн,  $f$  — частота.

## Уравнение плоской гармонической волны

Математическое выражение вида

$$\xi = A \cos (\omega (t - r/v)) = A \cos (\omega t - kr), \quad (1.123)$$

которое описывает изменение состояния среды при распространении гармонических волн;  $\xi$  — любой параметр, характеризующий состояние среды, например, давление, температура и т. д.;  $A$  — амплитуда;  $\omega$  — угловая частота;  $r$  — расстояние от источника, возбуждающего волну, до точки пространства, в которой рассматривается изменение соответствующей величины,  $v$  — скорость волны;  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число;  $(\omega t - kr)$  — фаза волны. Амплитуда плоской волны не зависит от  $r$ .



Рис. 1.61

## Волновая поверхность

Поверхность, проведенная через точки, в которых совершаются колебания в одинаковых фазах.

Точечный источник

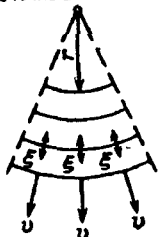


Рис. 1.62

### Уравнение цилиндрической волны

$$\xi_{\text{ц}} = \frac{A}{\sqrt{r}} \cos(\omega t - kr), \quad (1.124)$$

### Уравнение сферической волны

$$\xi_{\text{с}} = \frac{A}{r} \cos(\omega t - kr), \quad (1.125)$$

$A/\sqrt{r}$ ,  $A/r$  — амплитуды волн.

### Продольные и поперечные волны

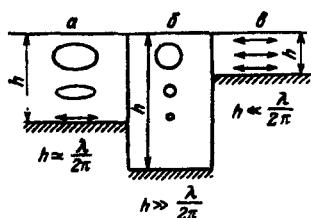


Рис. 1.63

Если смещение частиц среды происходит параллельно направлению распространения волны, то такая волна называется *продольной*; если смещение частиц  $u$  происходит в плоскости, перпендикулярной направлению распространения, то такая волна называется *поперечной*. Механические волны в жидких и газообразных средах являются продольными; в твердых телах возможны и продольные, и поперечные волны.

Волны на поверхности жидкости не являются ни поперечными, ни продольными. Движение частиц воды при распространении по-

верхностных волн зависит от отношения  $\lambda/h$  ( $\lambda$  — длина волны,  $h$  — глубина, рис. 1.63).

Смещение, скорость, ускорение

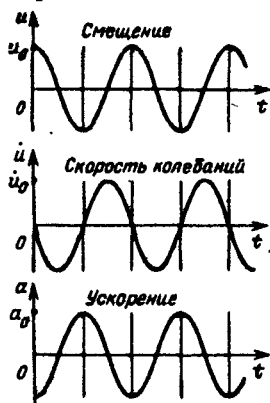


Рис. 1.64

Звук, инфразвук, ультразвук

При распространении гармонической волны амплитуда скорости колебаний частиц среды

$$\dot{u}_0 = \omega u_0, \quad (1.126)$$

амплитуда ускорения

$$a_0 = \omega^2 u_0, \quad (1.127)$$

$u_0$  — амплитуда смещения,  $\omega$  — угловая частота. Графики смещения, скорости колебаний частиц и ускорения приводятся на рис. 1.64.

Фаза гармонических колебаний скорости частиц отличается от фазы смещения на  $90^\circ$ , а фаза ускорения — на  $180^\circ$ .

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

Поток звуковой энергии, громкость, тембр

Энергия, которая переносится звуковыми волнами через волновую поверхность за время 1 с.

При восприятии звука ухом различают громкость, высоту тона и тембр. Громкость звука определяется амплитудой смещений, высо-



*та тона — частотой, тембр — частотами и амплитудами гармоник (см. стр. 73).*

## Интенсивность

Средняя энергия, переносимая волной за время 1 с через волновую поверхность площадью 1 м<sup>2</sup>. Интенсивность  $I$  звуковых волн иногда называют *силой звука*. Интенсивность гармонических звуковых волн рассчитывается по формуле

$$I = \rho v \dot{u}_0^2 / 2, \quad (1.128)$$

$\rho$  — плотность среды,  $v$  — скорость распространения звуковых волн,  $\dot{u}_0$  — амплитуда скорости колебаний частиц.

Относительная интенсивность звука определяется в децибелах (сокращенное обозначение дБ)

1 дБ =  $10 \lg(I/I_0)$ ,  $I_0 = 10^{-9}$  Вт/м<sup>2</sup>.

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. Наименьшая интенсивность при болевом восприятии звука называется *порогом болевого ощущения*.

На рис. 1.65 указаны уровни интенсивности (громкости) для различных частот. Нижний уровень соответствует порогу слышимости, верхний — порогу болевого ощущения.

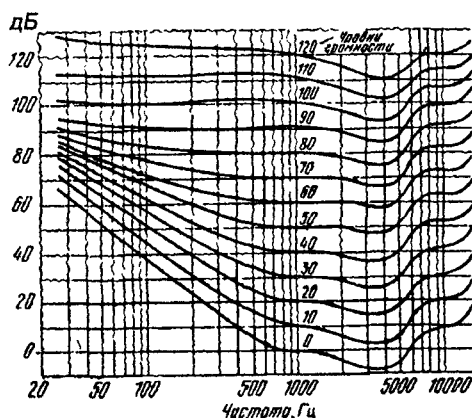


Рис 1.65

## Звуковое давление

Изменение давления в среде при распространении звуковых волн по сравнению с давлением при отсутствии волн. Амплитуда звукового давления

$$\Delta p_0 = \rho v \dot{u}_0, \quad (1.129)$$

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

## Поглощение звука

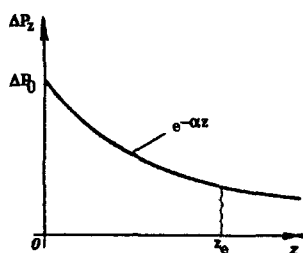


Рис. 1.66

Отношение поглощенного средой потока звуковой энергии к потоку энергии, входящему в эту среду, называется *коэффициентом поглощения*. Амплитуда звукового давления плоских звуковых волн уменьшается вследствие поглощения энергии средой по закону

$$\Delta p_z = \Delta p_0 e^{-\alpha z}, \quad (1.130)$$

$\Delta p_0$  — начальная амплитуда,  $\Delta p_z$  — амплитуда после прохождения волной расстояния  $z$ ,  $\alpha$  —

показатель (коэффициент) поглощения — величина, равная  $1/z_e$ , где  $z_e$  — расстояние, на котором амплитуда давления уменьшается в  $e$  раз. На рис. 1.66 представлена зависимость  $\Delta p_z$  от  $z$ .

## Отражение звука

Отношение отраженного потока звуковой энергии к падающему потоку звуковой энергии называется *коэффициентом отражения*; отношение проходящего потока звуковой энергии к падающему потоку звуковой энергии называется *коэффициентом пропускания*.

## Стоячие волны

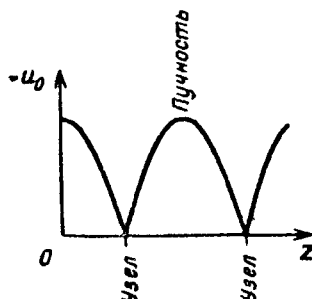


Рис. 1.67

Образуются при сложении двух монохроматических волн, распространяющихся в противоположных направлениях.

Уравнение стоячей волны смещений (при равенстве амплитуд и начальных фаз взаимодействующих волн):

$$u = 2A \cos(kz) \cos(\omega t); \quad (1.131)$$

амплитуда стоячей волны

$$u_0 = 2A |\cos(kz)|. \quad (1.132)$$

Точки, в которых амплитуды смещения имеют максимальные значения (рис. 1.67), называются *пучностями смещения*; пучности расположены на плоскостях, координаты которых удовлетворяют условиям

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

Точки, где амплитуды смещений равны нулю (рис. 1.67), называются *узлами смещения*; узлы расположены на плоскостях, определяемых условием

$$z = (2m+1)\lambda/4 \quad (m=0, 1, 2, \dots).$$

## 23. Формулы расчета скорости волн в изотропных средах

Виды волн	Формулы
Продольные волны в стержнях	$v_0^2 = E/\rho$ (1.133)
Волны объемного сжатия в твердом теле	$v_1^2 = E(1 - \nu)/(\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu))$ (1.134)
Поперечные волны (волны сдвига)	$v_2^2 = G/\rho$ (1.135)
Продольные волны в тонких пластинках	$v_{пл}^2 = F/(\rho(1 - \nu^2))$ (1.136)
Волны в жидкостях	$v^2 = 1/(\rho \beta_{ад})$ (1.137)
Волны в газовых средах	$v_r^2 = \gamma p/\rho$ (1.138)
Волны в идеальных газах	$v_{иг} = \gamma RT/\mu$ (1.139)
Поверхностные волны в жидкостях (на границе газ-жидкость)	$v_n^2 = g\lambda/(2\pi) + 2\pi\alpha/(\lambda\rho)$ (1.140)
Поверхностные волны в слое малой глубины ( $h < 0,5\lambda$ )	$v_m^2 = gh$ (1.141)

### Примечания.

1.  $E$  — модуль Юнга,  $G$  — модуль сдвига,  $\nu$  — коэффициент Пуассона,  $\beta_{ад}$  — адиабатическая сжимаемость (см. гл. II),  $\rho$  — плотность,  $\gamma$  — отношение удельных теплоемкостей  $c_p/c_v$ ,  $p$  — давление,  $\alpha$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $R$  — молярная газовая постоянная,  $\mu$  — молярная масса,  $T$  — температура,  $\lambda$  — длина волны,  $g$  — ускорение свободного падения,  $h$  — глубина слоя жидкости.
2. В кристаллах скорость волн зависит от направления распространения. Для расчета скоростей в кристаллах используется набор (матрица) независимых модулей, количество которых зависит от типа кристаллической решетки.

# **ТЕРМОДИНАМИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА**

В термодинамике изучаются закономерности превращения энергии; в молекулярной физике используются представления о молекулярном строении вещества, рассматриваются различные модели.

## **1. Температура, теплота, теплоемкость**

Термодинамическая система

Совокупность тел, которые могут обмениваться между собой, а также с телами вне системы энергией и веществом.

Термодинамические параметры

Величины, характеризующие состояние системы (объем  $V$ , давление  $P$ , температура  $T$  и др.).

Термодинамическое равновесие

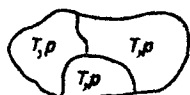


Рис. 2.1

Изолированная система приходит с течением времени в равновесие, т.е. все ее параметры во всех частях становятся одинаковыми; самопроизвольно выйти из равновесия система не может.

Температура



Рис. 2.2

Скалярная величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия и определяющая направление теплообмена между телами. В отношении системы, которая не находится в равновесии, понятие температуры не имеет смысла.

Единица температуры — кельвин, К

В СИ — одна из семи основных единиц (см. “Основные единицы”).

Установлена Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ-68) (см. ниже).

## Работа и теплота

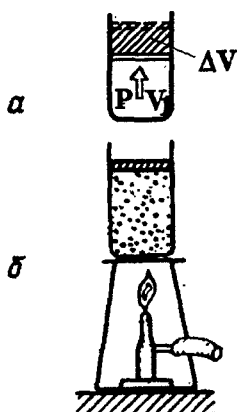


Рис. 2.3

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

Элементарная работа (см. гл. I п. 12) совершается системой при изменении ее объема:

$$\Delta A = p \Delta V, \quad (2.1)$$

$p$  — давление,  $\Delta V$  — элементарное (малое) изменение объема.

Аналогично элементарной работе, передаваемая (или получаемая) элементарная теплота при теплообмене:

$$\Delta Q = T \Delta S, \quad (2.2)$$

$T$  — температура,  $\Delta S$  — элементарное изменение параметра  $S$ , который называется энтропией (см. ниже).

При переходе системы из одного состояния в другое работа

$$\Delta A = p \Delta V$$

$$\Delta Q = T \Delta S$$

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV, \quad (2.1a)$$

теплота

$$Q = \int_{S_1}^{S_2} T dS, \quad (2.2a)$$

$V_1$  и  $V_2$ ,  $S_1$  и  $S_2$  — объемы системы и значения энтропии в начальном и конечном состояниях.

## Теплоемкость

Теплота, необходимая для изменения температуры тела на один кельвин. Теплоемкость данного тела зависит от температуры и процесса нагревания (охлаждения).

### Средняя теплоемкость

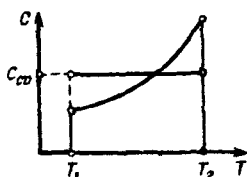


Рис. 2.4

Отношение теплоты  $Q$ , необходимой для изменения температуры тела от  $T_1$  до  $T_2$ , к разности температур  $T_2 - T_1$  называется средней теплоемкостью в интервале температур от  $T_1$  до  $T_2$ :

$$c_{cp} = \frac{Q}{T_2 - T_1}. \quad (2.3a)$$

### Средняя удельная теплоемкость

Средняя теплоемкость тела единичной массы

$$c_{cy} = \frac{Q}{m (T_2 - T_1)}. \quad (2.3b)$$

### Удельная теплоемкость (истинная)

$$c = \frac{1}{m} \lim_{\Delta T \rightarrow 0} (\Delta Q / \Delta T), \quad (2.4)$$

$\Delta Q$  — теплота, необходимая для изменения температуры на  $\Delta T$  тела массой  $m$ .

### Молярная теплоемкость

Теплоемкость тела, которое содержит количество вещества 1 моль,

$$C = c \mu, \quad (2.5)$$

$\mu$  — молярная масса, равная массе такого тела, которое содержит 1 моль вещества (см. "Основные единицы").

### Удельные теплоемкости

$c_p$  и  $c_v$

Теплоемкость при изобарическом процессе (нагревание происходит при постоянном давлении) называется теплоемкостью при постоянном давлении  $c_p$ ; теплоемкость при изохорическом процессе называется теплоемкостью при постоянном объеме  $c_v$ ; всегда  $c_p > c_v$ ; для твердых веществ  $c_p$  и  $c_v$  незначительно отличаются друг от друга.

Теплота, необходимая для нагревания тела

$$\Delta Q = c m \Delta T, \quad (2.6)$$

$c$  — удельная теплоемкость,  $m$  — масса тела,  $\Delta T$  — изменение температуры.

## 2. Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ-68)

Равновесие двух фаз, когда это не оговорено особо, предполагается при нормальном атмосферном давлении (1 атм =  $\approx 101325$  Па)



Состояние равновесия	Присвоенные значения температуры	
	К	°C
Тройная точка равновесного водорода	13,81	-259,34
Равновесия между жидкой и газообразной фазами водорода при давлении 3333,06 Па	17,042	-256,108
Равновесие между жидкой и газообразной фазами водорода	20,28	-252,87
Равновесие между жидкой и газообразной фазами неона	27,102	-246,048
Тройная точка кислорода	54,361	-218,789
Равновесие между жидкой и газообразной фазами кислорода	90,188	-182,962
Тройная точка воды	273,16	0,01
Равновесие между жидкой и парообразной фазами воды	373,15	100
Равновесие между твердой и жидкой фазами цинка	692,73	419,58
Равновесие между твердой и жидкой фазами серебра	1235,08	961,93
Равновесие между твердой и жидкой фазами золота	1337,58	1064,43

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

### 3. Законы термодинамики

#### Внутренняя энергия

Сумма кинетической энергии хаотического движения молекул и потенциальной энергии их взаимодействия; во внутреннюю энергию не входит кинетическая энергия тела и потенциальная энергия тела во внешнем поле (например, в поле тяготения);

она зависит только от параметров состояния.

## Обратимые процессы

Обратимым называется такой процесс, который может быть проведен в прямом и обратном направлениях, но при этом должны выполняться следующие условия:

а) при возвращении к первоначальному состоянию система проходит через те же самые состояния, что и в прямом процессе, но в обратном порядке; б) в системе и внешней среде по окончании обратного процесса не останется каких-либо изменений.

Например, при обратимом изотермическом расширении газа теплота подводится от нагревателя, но температуры газа и нагревателя должны отличаться лишь на бесконечно малую величину. Только при этом условии теплота, полученная газом при расширении, будет равна передаваемой внешним телам теплоте при обратном процессе (т.е. при сжатии), а работа при сжатии будет равна по модулю работе при расширении.

При наличии трения и вихреобразования в газе процессы будут необратимыми.

## Идеальная тепловая машина. Цикл Карно

Воображаемый круговой процесс, состоящий из ветвей обратимых процессов — адиабатических и изотермических, называ-

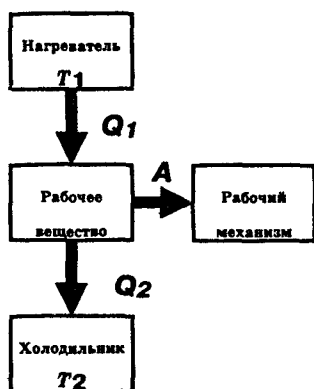


Рис. 2.5

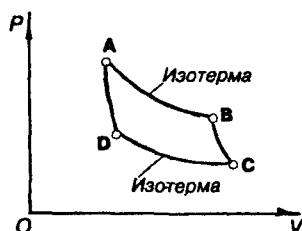


Рис. 2.6

ется циклом Карно. На рис. 2.5 представлена схема идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно (рис. 2.6).

От нагревателя, имеющего температуру  $T_1$ , рабочее вещество получает теплоту  $Q_1$  при обратимом изотермическом расширении (участок AB). Из состояния B в состояние C рабочее вещество переходит при адиабатическом расширении (обратимом), температура уменьшается и становится равной  $T_2$ . Затем производится обратимое изотермическое сжатие при температуре холодильника  $T_2$  (участок CD), при этом холодильнику передается теплота  $Q_2$ . Из точки D обратимым адиабатическим сжатием (участок DA) рабочее вещество переходит в состояние с температурой  $T_1$ . Площадь замкнутого цикла ABCDA соответствует работе машины A за один цикл (рис. 2.6).

Согласно первому закону термодинамики разность  $Q_1 - Q_2$  равна работе A. Коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины (КПД)

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \quad (2.7a)$$

Если рабочим веществом является идеальный газ, то КПД

$$\eta = (T_1 - T_2) / T_1.$$

Из соотношения (2.7a) следует, что для обратимых циклов Карно

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}. \quad (2.76)$$

Идеальная тепловая машина имеет наибольший КПД по сравнению с КПД реальных машин с

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

## Первый закон термодинамики

теми же температурами нагревателей и холодильников.

Сумма теплоты  $\Delta Q$ , которую получает система при нагревании, и работы  $\Delta A$ , которая совершается над системой внешними силами, равна изменению внутренней энергии  $\delta U$

$$\Delta Q + \Delta A = \delta U \quad (2.8)$$

Изменение внутренней энергии  $\delta U$  не зависит от процесса и определяется параметрами начального и конечного состояний; напротив,  $\Delta Q$  и  $\Delta A$  зависят от процессов перехода из начального в конечное состояние.

При расчетах по формуле (2.8) теплота, подводимая к системе, считается положительной ( $\Delta Q > 0$ ); если система отдает теплоту во внешнюю среду, то она считается отрицательной ( $\Delta Q < 0$ ). Работа внешних сил считается положительной ( $\Delta A > 0$ ), работа, совершаемая самой системой, считается отрицательной ( $\Delta A < 0$ ).

## Второй закон термодинамики

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

Взаимные превращения теплоты и работы неравноценны; работа может полностью превратиться в теплоту, а теплоту невозможно полностью превратить в работу. Машина, которая бы полностью превращала теплоту в работу, называется вечным двигателем второго рода.

Вечный двигатель второго рода запрещается вторым законом термодинамики, хотя он и не противоречит первому закону термодинамики.

Этим законом устанавливается функция состояния — энтропия (см. ниже), изменение которой при обратимых процессах

$$dS = \frac{\delta Q}{T}. \quad (2.9)$$

### Формулировки второго закона

“В природе невозможен процесс, единственным результатом которого была бы механическая работа, полученная за счет охлаждения теплового резервуара” (У. Томсон).

“Теплота не переходит самопроизвольно от холодного тела к горячему” (Клаузиус).

### Энтропия

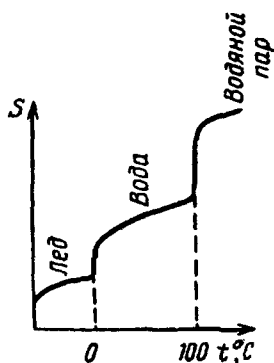


Рис 2.7

В цикле Карно отношение теплоты  $Q_1$ , полученной рабочим веществом от нагревателя, к его температуре  $T_1$  и отношение теплоты  $Q_2$ , которую отдает рабочее вещество холодильнику, к температуре  $T_2$  последнего является величиной постоянной для данного цикла:

$$Q_1/T_1 = Q_2/T_2 = \text{const} \quad (2.10a)$$

Величина

$$S = Q/T \quad (2.10б)$$

называется энтропией.

Энтропия — мера беспорядка в системе: полная упорядоченность частиц в системе (например, в кристаллах) соответствует

минимуму энтропии, полный беспорядок — максимуму, энтропия водяного пара больше, чем энтропия воды; в свою очередь, энтропия воды больше, чем энтропия льда (см. рис. 2.7).

### Неравенство Клаузиуса

В замкнутых системах самопроизвольные процессы увеличивают энтропию; в состоянии теплового равновесия система имеет максимальную энтропию.

В замкнутых системах изменение энтропии

$$dS \geq 0. \quad (2.10в)$$

Таким образом, изменение энтропии определяет направления термодинамических процессов.

### Третий закон термодинамики

$$S' \rightarrow 0 \\ (T \rightarrow 0)$$

Энтропия простых кристаллических тел стремится к нулю при  $T \rightarrow 0$ , вследствие чего теплоемкость при  $T \rightarrow 0$  также стремится к нулю.

## 4. Фазовые переходы

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

### Фаза

Часть системы, которая в отсутствие внешних воздействий имеет одинаковые физические свойства во всех своих точках и ограничена поверхностью разде-

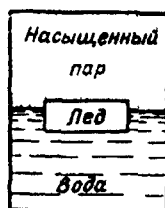


Рис. 2.8

## Теплота фазовых переходов

ла. Например, лед, вода, водяной пар, образующие систему, являются различными фазами (рис. 2.8); графит и алмаз — различные фазы твердого углерода. Система может состоять из одной фазы.

## Парообразование и сжижение (конденсация)

Поглощение или выделение определенного количества теплоты при фазовых переходах.

*Переход из пара в жидкость называется парообразованием, обратный переход — сжижением (конденсацией).*

## Испарение

Парообразование со свободной поверхности жидкости. При испарении жидкость охлаждается.

## Кипение

Парообразование во всем объеме жидкости (при постоянной температуре кипения).

## Сублимация

Переход из кристаллического состояния непосредственно в пар.

## Насыщенный пар

Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью в закрытом сосуде.

## Критическое состояние

Состояние, в котором плотности жидкости и ее насыщенного пара становятся одинаковыми, при этом граница раздела между жидкостью и паром исчезает. Соответствующие этому состоянию плотность, давление и температура называются *критическими параметрами*.

### Теплота фазовых переходов

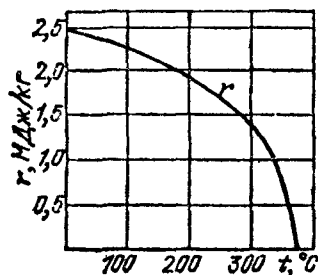


Рис. 2.9

### Теплота плавления

$$Q_{\text{пл}} = \lambda m, \quad (2.11)$$

$\lambda$  — удельная теплота плавления (теплота, необходимая для плавления кристалла или поликристалла массой 1 кг),  $m$  — масса расплавленного вещества.

### Теплота парообразования

$$Q_{\text{пар}} = r m, \quad (2.12)$$

$r$  — удельная теплота парообразования (теплота, необходимая для превращения в пар жидкости массой 1 кг).

На рис. 2.9 приводится зависимость  $r$  от температуры для воды.

### Изменение размеров тел при нагревании

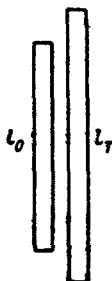


Рис. 2.10

Линейные размеры при температуре  $T$  рассчитываются по формуле

$$l_T = l_0 (1 + \alpha \Delta T), \quad (2.13)$$

$l_0$  — длина при температуре  $T_0 = 273,15$  К,  $\alpha$  — температурный коэффициент длины (относительное изменение длины при изменении температуры на 1 кельвин),  $\Delta T = T - T_0$ .



Объем при температуре  $T$  рассчитывается по формуле

$$V_T = V_0 (1 + \beta \Delta T), \quad (2.14)$$

$V_0$  — объем при температуре  $T_0 = 273,15$  К,  $\beta$  — температурный коэффициент объема (относительное изменение объема при изменении температуры на 1 кельвин).

В изотропных телах

$$\beta \approx 3 \alpha. \quad (2.15)$$

## 5. Идеальные газы

### Идеальный газ

Газ, свойства которого описываются уравнением

$$pV = mRT/\mu. \quad (2.16)$$

Это уравнение называется *уравнением состояния идеального газа* или *уравнением Менделеева-Клапейрона*;  $p$  — давление,  $V$  — объем,  $m$  — масса,  $\mu$  — молярная масса,  $R$  — молярная газовая постоянная, равная работе одного моля идеального газа при нагревании на 1 кельвин (при постоянном давлении). Уравнение применяется для расчета свойств газов, плотность которых меньше плотности их насыщенных паров при тех же температурах.

$$p V = \frac{m R T}{\mu}$$

Температурный  
коэффициент объема  
и давления

$$\beta = 1/(273,15)\text{К}^{-1}.$$

### Разность молярных теплоемкостей

$$C_p - C_v = R \quad (2.17)$$

## Закон Дальтона

В смеси химически не взаимодействующих газов давление равно сумме парциальных давлений  $p_i$ :

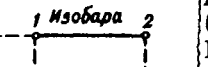
$$p = \sum_i p_i. \quad (2.18)$$

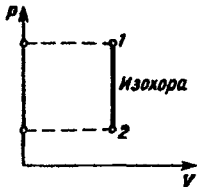
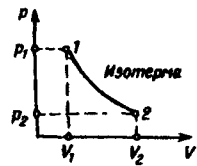
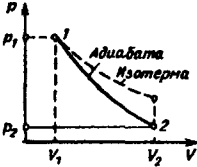
Парциальное давление — давление одного газа, занимающего тот же объем, что и смесь газов (при той же температуре).

## Термодинамические процессы

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

## Основные характеристики процессов

Процессы, графики в координатах $PV$	Уравнение состояния	Работа газа массой $m$	Изменение внутр. энергии 1 моля газа
<p>Изобарический</p>  <p>The diagram shows a coordinate system with pressure <math>P</math> on the vertical axis and volume <math>V</math> on the horizontal axis. A horizontal dashed line labeled "1 Изобара 2" connects two points on the same pressure level. The initial volume is <math>V_1</math> and the final volume is <math>V_2</math>.</p>	$V/T = \text{const}$ $m = \text{const}$ $p = \text{const}$ (закон Гей-Люссака)	$A_p = \frac{m R \Delta T}{\mu}$	$dU = C_v dT$   (2.19)

Процессы, графики в координатах $PV$	Уравнение состояния	Работа газа массой $m$	Изменение внутр. энергии 1 моля газа
<b>Изохорический</b> 	$p/T = \text{const}$ $m = \text{const}$ $V = \text{const}$ (закон Шарля)	$A_v = 0$	$dU = \Delta Q$   (2.20)
<b>Изотермический</b> 	$pV = \text{const}$ $m = \text{const}$ $T = \text{const}$ (закон Бойля-Мариотта)	$A_T = A_0 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) =$ $= A_0 \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right),$ $A_0 = \frac{m R T}{\mu}$	$dU = 0$   (2.21)
<b>Адиабатический</b> 	$pV^\gamma = \text{const}$ $\Delta Q = 0$ $\gamma = c_p/c_v$	$A_Q = \frac{m C_v}{\mu} (T_1 - T_2)$	$dU = - A_Q$   (2.22)

Примечание. Индексы 1 и 2 у  $U$ ,  $p$  и  $T$  указывают соответственно значения этих параметров в начальном и конечном состояниях;  $C_v$  — молярная теплоемкость при постоянном объеме; при изотермическом расширении газа теплота расходуется на работу против внешних сил, при сжатии теплота передается во внешнюю среду.

## 6. Реальные газы

Уравнение  
Ван-дер-Ваальса

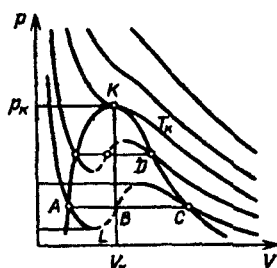


Рис. 2.11

Уравнение

$$(p + v^2 \frac{a}{V^2})(V - vb) = vRT \quad (2.23)$$

называется уравнением Ван-дер-Ваальса;  $v=m/\mu$ ,  $V$ — объем,  $m$ — масса газа,  $T$ — температура,  $\mu$ — молярная масса,  $p$ — давление,  $a$  и  $b$ — постоянные Ван-дер-Ваальса.

Изотермы Ван-дер-Ваальса приведены на рис. 2.11. При температурах ниже  $T_k$  изотермы имеют S-образный изгиб; при этих температурах одному значению давления  $p$  соответствуют три значения объема. При температурах  $T_k$  и выше изотермы не имеют S-образного изгиба. Температура  $T_k$  является *критической температурой*, соответствующие этому состоянию давление  $p_k$  и объем  $V_k$  называются *критическими*. В действительности на участках S-образного изгиба изотермы проходят параллельно оси абсцисс (например, через точки  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ). Эти участки соответствуют равновесию между жидкостью и ее насыщенным паром. При некоторых условиях изотерма может проходить по участкам  $AL$  (перегретая жидкость) и  $DC$  (пересыщенный пар), но такие состояния являются неустойчивыми.

## Влажный воздух

В окружающем нас воздухе всегда находится некоторое количество водяного пара. *Абсолютная влажность* воздуха — масса водяного пара, содержащегося в объеме  $1 \text{ м}^3$  влажного воздуха. *Относительной влажностью* воздуха называется отношение абсолютной влажности к максимально возможной абсолютной влажности при данном давлении и температуре, когда воздух насыщен водяным паром. Относительная влажность определяется в процентах.

## 7. Молекулярно-кинетическая теория

В основе молекулярно-кинетической теории лежит экспериментально доказанное утверждение, что все вещества состоят из молекул — наименьших частиц, сохраняющих все химические свойства вещества.

### Молекулярное взаимодействие

Взаимодействие между атомами и молекулами осуществляется посредством электромагнитных сил между электронами и ядрами различных атомов (см. гл. V); это силы притяжения и силы отталкивания; первые препятствуют растяжению тела, вторые препятствуют сжатию.

### Потенциальная энергия

Потенциальная энергия взаимодействия двух одинаковых атомов, образующих простейшие двухатомные молекулы (например,  $\text{H}_2$ ,

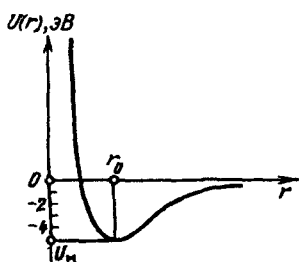


Рис. 2.12

$O_2$ ,  $N_2$ ,  $Cl_2$  и др.), представлена схематически на рис. 2.12 как функция расстояния  $r$  между ядрами атомов. Эта функция имеет глубокий минимум  $U_m$  при значениях  $r=r_0$ ; на расстояниях  $r < r_0$  происходит отталкивание, на расстояниях  $r > r_0$  атомы притягиваются; на расстояниях  $r=r_0$  молекулы находятся в устойчивом равновесии; приближенные значения  $r_0$  и  $U_m$

$$r_0 = 0,7 + 2,0 \cdot 10^{-8} \text{ см},$$

$$U_m = 4 + 8 \text{ эВ}.$$

Потенциальная энергия взаимодействия молекул графически представляется аналогичными кривыми, однако  $U_m$  имеет меньшие значения:  $U_m = 0,01 + 0,1 \text{ эВ}$ .

### Молекулярно-кинетическая модель идеального газа

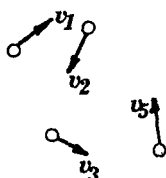


Рис. 2.13

Средняя длина свободного пробега

- молекулы движутся хаотически и имеют различные скорости;
- соударения молекул между собой и стенками сосуда упругие;
- между молекулами отсутствуют силы взаимодействия;
- собственный объем всех молекул мал по сравнению с объемом сосуда, в котором находится газ.

Средний путь, который проходят молекулы между двумя ближайшими соударениями:

$$l = kT / (\sqrt{2} \pi \sigma^2 p), \quad (2.24)$$

$k=R/N$  — постоянная Больцмана,  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $N$  — число молекул в одном моле (постоянная Авогадро);

$\sigma$  — диаметр молекулы,  $p$  — давление;  $T$  — температура.

### Распределение Максвелла

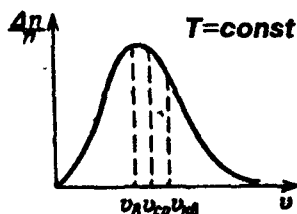


Рис. 2.14

Распределение молекул идеального газа по скоростям (функция распределения). Это распределение при одной температуре представлено на рис. 2.14. По оси ординат отложены значения  $\Delta n/n$ , по оси  $OX$  указаны скорости молекул;  $n$  — количество молекул в данном объеме;  $\Delta n$  — количество молекул, которые имеют скорости от  $u$  до  $u+\Delta u$ . Скорости молекул при фиксированной температуре имеют различные значения от нуля до бесконечности.

### Средняя скорость молекул

$$v_{cp} = \sum |v_i|/n = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}, \quad (2.25)$$

$\mu$  — молярная масса,  $|v_i|$  — модули скорости молекул,  $n$  — количество молекул в данном объеме.

### Средняя квадратичная скорость

$$v_{кв} = \sqrt{\sum v_i^2/n} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}. \quad (2.26)$$

### Наиболее вероятная скорость

Скорость, которую имеет наибольшее число молекул:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}, \quad (2.27)$$

$$v_{кв} > v_{cp} > v_0.$$

На рис. 2.15 приводится распределение молекул водорода по скоростям (распределение Максвелла) для различных температур.

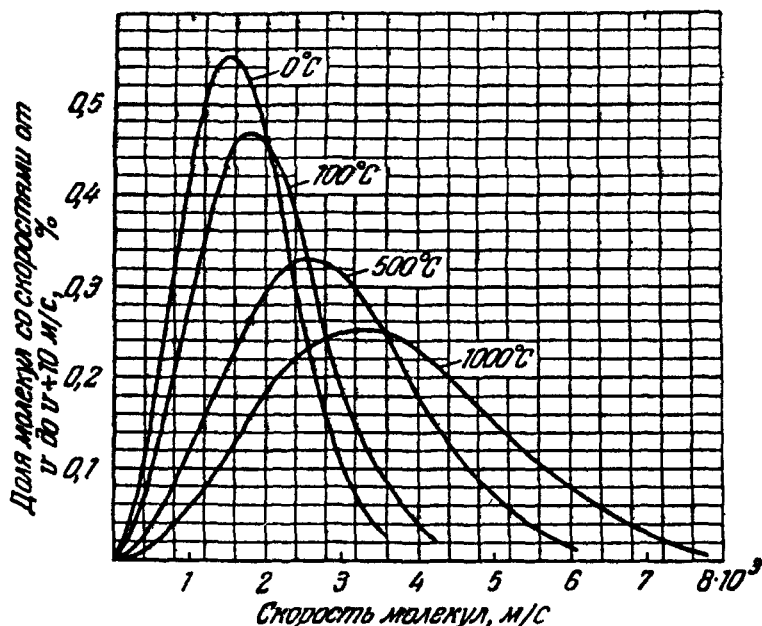


Рис. 2.15

Давление газа

$$p = n_0 m v_{\text{кв}}^2 / 3 = n_0 k T \quad (2.28)$$

$n_0$  — число молекул в объеме  $1 \text{ м}^3$  (концентрация молекул);  $m$  — масса одной молекулы,  $k$  — постоянная Больцмана.

Основное уравнение

$$pV = 2E_{\text{к}} / 3 = M v_{\text{кв}}^2 / 3, \quad (2.29)$$

$$pV = \frac{2}{3} E_{\text{к}}$$

$E_{\text{к}}$  — кинетическая энергия молекул в объеме  $V$ ,  $M$  — масса газа,  $v_{\text{кв}}$  — средняя квадратичная скорость.



Средняя кинетическая энергия молекулы

$$E_k = 3kT/2, \quad (2.30)$$

$k$  — постоянная Больцмана.

Кинетическая энергия моля газа

$$E_k = 3RT/2, \quad (2.31)$$

$R$  — молярная газовая постоянная.

## 8. Теплопроводность и диффузия

Тепловой поток

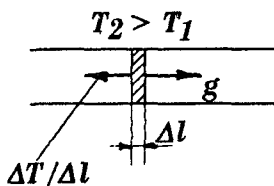
Величина, равная теплоте, которая передается за 1 с через поверхность.

Тепловой поток

$$g = \Delta Q / \Delta t,$$

$\Delta Q$  — теплота, которая передается через поверхность за время  $\Delta t$ .

Теплопроводность



Тепловой поток, обусловленный обменом энергии между частицами (молекулами, атомами, электронами, ионами), которые имеют различные энергии; при этом процессе передается энергия от участков среды с более высокой температурой к участкам среды с меньшей температурой (рис. 2.16).

Рис. 2.16

Градиент температур

Векторная величина, модуль которой равен

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

$\Delta l \rightarrow 0$

$\Delta T = T_1 - T_2$  — разность температур между точками, расстояние между которыми по направлению наибольшего изменения температуры равно  $\Delta l$ . Этот вектор направлен в сторону увеличения температуры (рис. 2.16).

## Закон Фурье

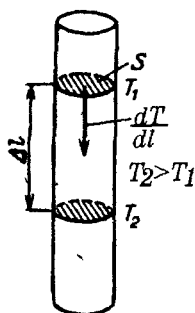


Рис. 2.17

## Теплопроводность идеального газа

При теплопроводности передается через поверхность площадью  $S$  за время  $\Delta t$ :

теплота

$$\Delta Q = -\lambda S(dT/dl)\Delta t, \quad (2.32)$$

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности (теплопроводность), равный тепловому потоку через сечение площадью  $1 \text{ м}^2$  при градиенте температуры  $1$  кельвин на метр.

Предполагается, что сечение расположено перпендикулярно градиенту температуры. Минус указывает, что теплота передается в направлении, противоположном градиенту температуры.

$$\lambda = \rho c_v l v_{\text{ср}} / 3, \quad (2.33)$$

$\rho$  — плотность,  $v_{\text{ср}}$  — средняя скорость молекул,  $l$  — средняя длина свободного пробега,  $c_v$  — удельная теплоемкость при постоянном объеме.

## Диффузия

Перенос вещества молекулярным движением в среде, различные элементарные объемы кото-

рой имеют различную плотность (или концентрацию частиц).

### Градиент плотности

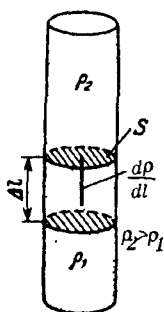


Рис. 2.18

Векторная величина, модуль которой равен

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

$\Delta \rho = \rho_1 - \rho_2$  — разность плотностей в элементарных объемах, расстояние между которыми по направлению наибольшего изменения плотности равно  $\Delta l$  (рис. 2.18). Градиент плотности направлен в сторону увеличения плотности.

### Коэффициент диффузии

Масса  $\Delta M$  вещества, которое перемещается при диффузии через плоскость площадью  $S$  за время  $\Delta t$ , рассчитывается по формуле (закон Фика)

$$\Delta M = -DS\Delta t dp/dl, \quad (2.34)$$

$dp/dl$  — градиент плотности,  $D$  — коэффициент диффузии — величина, равная массе диффундирующего вещества через плоскость площадью  $1 \text{ м}^2$  за время  $1 \text{ с}$  при градиенте плотности  $1 \text{ кг/м}^4$ ; предполагается, что плоскость расположена перпендикулярно градиенту плотности.

Минус указывает, что вещество при диффузии перемещается в сторону, противоположную градиенту плотности.

### Коэффициент диффузии в идеальном газе

$$D = v_{\text{ср}} l / 3, \quad (2.35)$$

$v_{cp}$  — средняя скорость молекул,  $l$  — средняя длина свободного пробега.

Вязкость идеального газа

$$\eta = \rho v_{cp} l / 3 \quad (2.36)$$

(о вязкости см. гл. I, п. 20).

## 9. Свойства жидкостей

Поверхностное натяжение

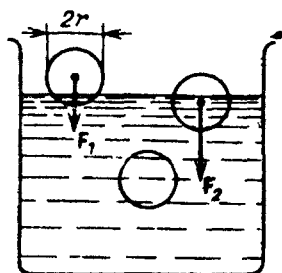


Рис. 2.19

Силы, действующие на молекулы, расположенные вблизи свободной поверхности, направлены внутрь жидкости.

На рис. 2.19  $r$  — радиус молекулярного взаимодействия, равный расстоянию, на котором действуют молекулярные силы. Эти силы обуславливают особое состояние тонкого слоя жидкости вблизи ее свободной поверхности; они являются причиной возникновения поверхностного натяжения. Силы поверхностного натяжения направлены вдоль поверхностного слоя.

*Сила поверхностного натяжения*

$$F_{\pi} = \alpha l, \quad (2.37)$$

$l$  — длина участка контура, ограничивающего свободную поверхность (см. рис. 2.20),  $\alpha$  — *поверхностное натяжение*, равное силе, приложенной перпендикулярно к единичному элементу длины контура.

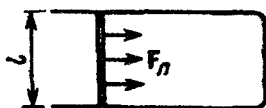


Рис. 2.20

Капиллярные явления

Вследствие различия между молекулярными силами в жидкостях

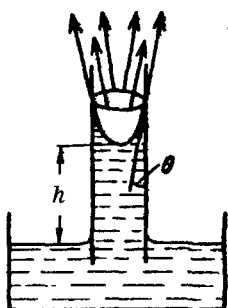


Рис. 2.21

и твердых телах свободная поверхность жидкости у стенок сосуда искривляется (см. рис. 2.21).

Угол смачивания  $\theta$  определяется как угол между касательной к свободной поверхности жидкости и поверхностью тела в жидкости.

В жидкостях, для которых  $\theta < \pi/2$ , уровень поднимается на высоту  $h$  по сравнению со свободной поверхностью этой же жидкости; если  $\theta > \pi/2$ , то уровень жидкости опускается. Высота уровня в капиллярных трубках с круглым сечением и малого диаметра

$$h = \frac{2 \alpha \cos \theta}{r \rho g}, \quad (2.38)$$

$r$  — радиус капилляра,  $\rho$  — плотность жидкости,  $g$  — ускорение свободного падения.

### Избыточное давление

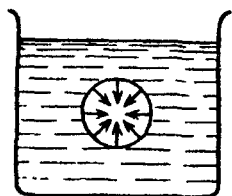


Рис. 2.22

Под искривленной поверхностью свободной поверхности жидкость подвержена дополнительному давлению (избыточное давление); оно рассчитывается по формуле

$$p_n = 2 \alpha / r, \quad (2.39)$$

$r$  — радиус кривизны сферической поверхности мениска.

Для сферического пузырька газа в жидкости (рис. 2.22)

$$p_n = 2 \alpha / r, \quad (2.40)$$

для сферического мыльного пузырька в воздухе

$$p_n = 4 \alpha / r. \quad (2.41)$$

## 10. Кристаллические и аморфные тела

Твердые тела разделяются на два вида— аморфные и кристаллические. *Аморфные тела* сохраняют свою форму (например, стекло, смолы, пластмассы), но по другим свойствам они подобны жидкостям с очень большой вязкостью, которая уменьшается с увеличением температуры; поэтому при увеличении температуры аморфные тела постепенно размягчаются и становятся обычными жидкостями.

### Кристаллические структуры (кристаллы)

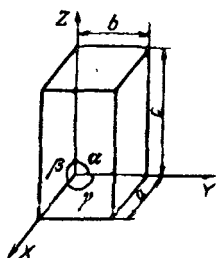


Рис. 2.23

*Кристалл* — однородное анизотропное тело, в котором частицы (ионы, атомы, молекулы) расположены в пространстве правильно построенными цепочками, плоскими сетками и трехмерными решетками; эти частицы совершают колебания относительно положения равновесия.

У кристаллических тел переход в жидкое состояние происходит скачком при определенной температуре плавления.

Кристаллическую решетку кристалла можно получить переносом *элементарной ячейки* в трех направлениях. Геометрическая форма элементарной ячейки определяется тремя ребрами  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и тремя углами между ними  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  (см. рис. 2.23); имеется 14 типов таких решеток (рис. 2.24). Вещества, состоящие из множества хаотически ориентированных малых кристаллов, называются *поликристаллическими*.

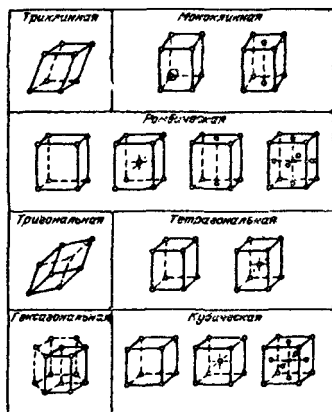


Рис. 2.24

## 11. Жидкие кристаллы

### Что такое жидкие кристаллы

Ряд органических веществ переходят из жидкого состояния в твердое кристаллическое не сразу, а через ряд промежуточных состояний (фаз), которым присущи некоторые свойства как жидкостей, так и кристаллов.

Такие состояния называются *жидкими кристаллами* (или *мезофазами*).

### Лиотропные и термотропные жидкие кристаллы

*Лиотропные жидкие кристаллы* образуются в коллоидных растворах (например, водных растворах многих полипептидов; такие жидкие кристаллы имеют ряд разновидностей).

*Термотропные жидкие кристаллы* образуются при плавлении органических кристаллов с удлиненными молекулами.

### Нематики, смектики и холестерики



Рис. 2.25

Термотропные жидкие кристаллы делятся на три категории: нематические (нематики — НЖК), смектические (смектики — СЖК), холестерические (холестерики — ХЖК). Схема расположения молекул в НЖК представлена на рис. 2.25, длинные оси молекул в среднем параллельны, в результате чего образуется выделенное направление, называемое директором  $n$ ;

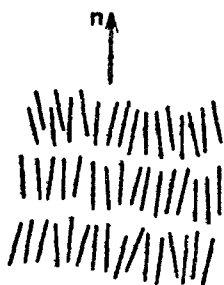


Рис. 2.26

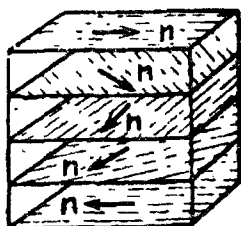


Рис. 2.27

центры молекул расположены хаотически, как в жидкостях.

Схема расположения молекул в СЖК представлена на рис. 2.26; длинные оси молекул упорядочены как в нематических ЖК, но центры молекул в среднем расположены на плоскостях, находящихся друг от друга на одинаковых расстояниях, т. е. они имеют слоистую структуру; СЖК имеют несколько разновидностей.

Холестерическая фаза жидких кристаллов (ХЖК) является искаженной формой нематиков; в этой фазе молекулы имеют преимущественную ориентацию по направлению директора, но направление последнего изменяется при переходе от одного слоя к другому регулярным образом, что может быть представлено винтообразной структурой с шагом около 200–300 нм (рис. 2.27).

В обычных условиях кристалл представляет собой как бы поликристалл, состоящий из зерен жидких кристаллов, у которых директора ориентированы хаотически. В магнитных и электрических полях можно получить жидкий “монокристалл”.

### Примеры НЖК и СЖК

Типы соединений	Температура переходов, °С
<i>Нематики</i>	
<i>n</i> -азоксианизол (ППА)	KN-118, NI-135,5
<i>n</i> -метоксибензилиден- <i>n</i> -бутиланилин (МББА)	KN-22, NI-47
<i>n</i> -гексилокси- <i>o</i> -гидрокси- <i>n</i> -бутилазобензол	KN-8, NI-82.



Смектики	
<i>n, n'</i> -диновилазобензол	K-38, S <sub>B</sub> -41, SA-541
<i>n, n'</i> -дигептилгептилоксиа- зобензол ГОАБ)	K-74,5, S <sub>C</sub> -95,5, N-1241,
холестерил-миристет	K-71, S <sub>A</sub> -81

Примечание. KN— переход из кристалла в нематик; NI— переход из нематика в изотропную жидкость; K— температура кристаллизации; S— температура перехода в смектическое состояние (индексы указывают модификации A, B, C); N— переход в нематик.

## 12. Полимеры

### Полимерные цепи

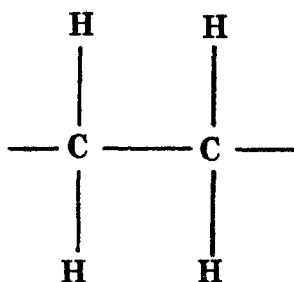


Рис. 2.28

Полимерами называются вещества, молекулы которых состоят из большого числа атомов (или групп атомов), образующих длинные цепи— *полимерные цепи*. Полимерные цепи называются *макромолекулами*. Исходное вещество, из которого образуются полимерные цепи, называется *мономером*. Например, из мономера— этилена образуется полимер— полиэтилен. Число звеньев в полимерной цепи называется *степенью полимеризации*. Степень полимеризации может изменяться в пределах от нескольких единиц до 10 000 и больше; относительные молекулярные массы полимеров имеют значения  $10^4 \dots 10^6$ . Звено цепи полиэтилена приведено на рис. 2.28.

### Степень кристалличности

Полимеры состоят из кристаллических и аморфных областей; отношение объема кристаллических об-

ластей к объему всего образца называется *степенью кристалличности*. Степень кристалличности зависит от способа получения полимера. Например, в полиэтилене высокой плотности ( $\rho = 0,919...0,973 \text{ г/см}^3$ ) степень кристалличности изменяется в пределах 60...90%, в полиэтилене низкой плотности ( $\rho = 0,913...0,934 \text{ г/см}^3$ ) степень кристалличности составляет 40...60%.

## Температура плавления

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

## Аморфные полимеры



Аморфные полимеры с линейными цепочками молекул могут находиться в трех состояниях: стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем.

В стеклообразном состоянии совершаются колебания атомов, образующих полимерную цепь.

В высокоэластическом состоянии происходят (наряду с колебаниями атомов) крутильные колебания отдельных звеньев, вследствие чего полимерная цепь может

Рис. 2.29

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

### Закон Гука

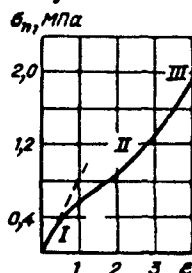


Рис. 2.30

Выполняется только при малых деформациях (I участок, рис. 2.30), на II участке малым изменениям напряжения соответствуют большие деформации, модуль Юнга, например, для каучука равен приблизительно  $2 \cdot 10^5$  Па, т.е. того же порядка, что и у газов. На III участке резко увеличивается напряжение при незначительных деформациях.

## 13. Плазма

### Что такое плазма

Газ, атомы и молекулы которого в значительной мере ионизированы, называется плазмой. Вещество при температурах  $10^4$  К и

выше является плазмой. Однако не всякий ионизированный газ является плазмой; ионизированный газ называется плазмой, если величина  $\delta = kT / (4\pi l q^2)$  значительно меньше размеров сосуда, в котором находится газ ( $n$  — концентрация заряженных частиц в плазме,  $q_i$  — заряд одного иона,  $T$  — температура,  $k$  — постоянная Больцмана).

### Диффузия ионов

Определяется так же, как и диффузия молекул идеальных газов; коэффициент диффузии ионов в плазме

$$D_i = v_i l_i / 3, \quad (2.42)$$

$v_i$  и  $l_i$  — средняя скорость и средняя длина свободного пробега ионов.

### Теплопроводность

Главную роль в переносе теплоты в плазме играют электроны; теплопроводность, обусловленная электронами,

$$\lambda_e = 1,24 \cdot 10^{-11} T^{5/2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}. \quad (2.43)$$

Например, при  $T \approx 10^5$  К теплопроводность водородной плазмы больше теплопроводности серебра при комнатной температуре.

### Тепловое давление плазмы

$$p = (n_i + n_e) k T, \quad (2.44)$$

$n_i$  — концентрация ионов,

$n_e$  — концентрация электронов.

## ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

В электродинамике изучаются различные виды электромагнитного взаимодействия: взаимодействие заряженных тел (неподвижных и движущихся относительно системы отсчета), проводников с электрическими токами (частный случай взаимодействия движущихся заряженных частиц), магнитов между собою, а также взаимодействие между магнитами и проводниками с электрическими токами. Все виды электромагнитного взаимодействия осуществляются посредством электромагнитного поля.

### 1. Электрическое поле неподвижных зарядов (электростатика)

Электрические заряды

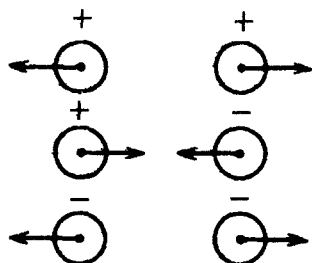


Рис. 3.1

Это источники электромагнитного поля.

Различают два рода электрических зарядов — *положительные* и *отрицательные*. Положительными называются заряды, возникающие на стекле, натертом кожей; отрицательными — заряды, возникающие на янтаре, натертом мехом. Тела, заряженные одноименными зарядами, отталкиваются; тела, имеющие разноименные заряды, притягиваются друг к другу.

Материальные носители зарядов

Носителями зарядов в различных средах могут быть электроны, оторванные от атомов (например, в металлах), ионы — части молекул или атомов, имею-

щие положительные и отрицательные заряды (например, в электролитах и газах), и другие частицы.

### Закон сохранения зарядов

$$\sum_i Q_i = \text{const.}$$

$$\sum_i Q_i = \text{const}$$

Алгебраическая сумма зарядов в изолированной системе отсчета не зависит от движения носителей зарядов, а также от выбора системы отсчета. Например, при нагревании заряженного электрическим зарядом тела его заряд не изменяется; в химических и ядерных реакциях общий заряд частиц до реакции и после остается прежним.

### Элементарный заряд

$$e \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

$$e \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

По модулю любой заряд кратен заряду электрона (или протона). Заряд электрона — отрицательный, заряд протона — положительный; по модулю заряды этих частиц равны  $e$ .

### Точечные заряды

*Точечными зарядами* называются заряженные тела, размерами которых можно пренебречь по сравнению с расстоянием до точки, в которой определяется действие данного заряда.

### Закон Кулона

Законом Кулона определяется взаимодействие точечных заря-

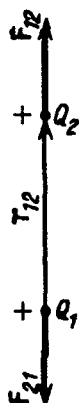


Рис. 3.2

$$|\mathbf{F}| = \frac{Q_1 Q_2}{4 \pi \epsilon \epsilon_0 r^2}$$

дов, которые неподвижны в инерциальной системе отсчета. Опытным путем установлено, что силы кулоновского взаимодействия.

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

$$F_{12} = \frac{Q_1 Q_2}{\epsilon r_{12}^2} r_0 \text{ (СГС),} \quad (3.1)$$

$F_{12}$  — сила, действующая на заряд  $Q_2$ , находящийся в поле заряда  $Q_1$ ,  $r_{12}$  — вектор, проведенный от заряда  $Q_1$  к заряду  $Q_2$  (рис. 3.2),  $r_0$  — единичный вектор  $r_{12}$ ,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,

$$\epsilon_0 = 1 / (36 \pi \cdot 10^9) \text{ Ф/М} =$$

$$= 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/М (СИ);}$$

в системе СГС  $\epsilon_0 = 1$  (величина безразмерная);  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которой расположены заряды (см. (3.13)). Сила  $F_{21}$ , действующая на заряд  $Q_1$ , находящийся в поле заряда  $Q_2$ , равна по модулю силе  $F_{12}$ , но векторы  $F_{12}$  и  $F_{21}$  всегда имеют противоположные направления; линия их действия проходит через заряды (см. рис. 3.2).

### Электрический диполь

Два разноименных точечных заряда, равных по модулю.

Свойства диполя определяются *электрическим моментом*

$$p_i = Ql, \quad (3.2)$$

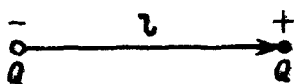


Рис. 3.3

### Напряженность электрического поля

$Q$  — заряд,  $l$  — вектор, проведенный от отрицательного к положительному заряду; модуль  $l$  равен расстоянию между зарядами  $Q$ .

Величина, равная силе, действующей в данной точке поля на точечный положительный заряд 1 Кл.

Напряженность электрического поля

$$E = F/Q, \quad (3.3)$$

$F$  — сила, действующая на положительный заряд  $Q$ .

Направление вектора напряженности электрического поля  $E$  совпадает с направлением силы  $F$ , действующей на тело, имеющее положительный заряд.

### Линии напряженности электрического поля

Это такие линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением векторов напряженности  $E$ .

### Потенциал электрического поля

Величина, равная работе сил электрического поля при перемещении точечного положительного заряда 1 Кл из данной точки в бесконечность, или работе, совершаемой внешними силами при перемещении того же самого заряда из бесконечности в данную точку поля.



$$\varphi = A_{\infty}/Q$$

Потенциал

$$\varphi = A_{\infty}/Q, \quad (3.4)$$

$A_{\infty}$  — работа сил электрического поля по перемещению положительного заряда  $Q$  из данной точки поля в бесконечность.

Потенциал определяется с точностью до постоянной. В физике обычно принимают, что потенциал в бесконечно удаленной точке равен нулю.

Потенциал — потенциальная энергия взаимодействия электрического поля с единичным положительным зарядом.

**Разность потенциалов между точками**

Величина, равная работе, которую совершают силы электрического поля при перемещении точечного положительного заряда 1 Кл из одной точки в другую. Разность потенциалов

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{Q}, \quad (3.4a)$$

$A_{12}$  — работа сил электрического поля по перемещению заряда  $Q$  из точки 1 в точку 2.

**Объемная плотность энергии электрического поля**

Величина, равная

$$\lim_{\Delta V \rightarrow 0} (\Delta W / \Delta V) = dW / dV = w,$$

$\Delta W$  — энергия электрического поля, заключенная в элементарном объеме  $\Delta V$ ;

$$w = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}$$

$$w = \epsilon_0 \epsilon E^2 / 2, \quad (3.5)$$

$E$  — напряженность электрического поля.

### Эквипотенциальная поверхность

Поверхность, во всех точках которой имеется одинаковый потенциал, называется *эквипотенциальной поверхностью* (или *поверхностью равного потенциала*).

### Напряженность и градиент потенциала

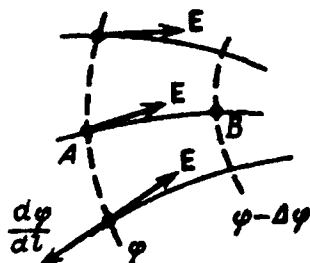


Рис. 3.4

Линии напряженности перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям. Если между двумя близко расположенными точками  $A$  и  $B$  разность потенциалов равна  $\Delta\phi$ , а расстояние между ними по линии напряженности равно  $\Delta l$ , то

$$\lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta\phi}{\Delta l} = d\phi/dl = -E. \quad (3.6)$$

Величина  $\Delta\phi/\Delta l$  (точнее,  $d\phi/dl$ ) является модулем вектора, который называется *градиентом потенциала*; этот вектор направлен в сторону увеличения потенциала.

### Емкость конденсаторов

Проводники, между которыми имеется электрическое поле, все линии напряженности которого начинаются на одном проводнике и заканчиваются на другом, называются *конденсаторами*, а

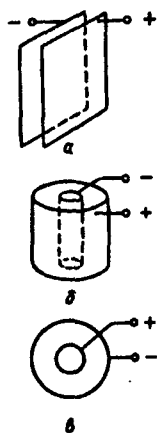


Рис. 3.5

Единицы:

сами проводники — обкладками конденсатора.

*Емкость конденсатора* — величина, равная заряду на одной из обкладок конденсатора, при разности потенциалов 1 В между его обкладками; емкость

$$C = Q / (\varphi_1 - \varphi_2), \quad (3.7)$$

$Q$  — заряд на одной из обкладок конденсатора при разности потенциалов  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  между ними. Конденсаторы различают по форме проводящих поверхностей: плоские, цилиндрические и сферические (рис. 3.5).

заряд — кулон, Кл;  
напряженность электрического поля — вольт на метр, В/м;  
потенциал, разности потенциалов, ЭДС — вольт, В;  
емкость — фарад, Ф;  
объемная плотность энергии — джоуль на кубический метр, Дж/м<sup>3</sup>.

**Электрическое смещение**

Векторная величина, равная произведению

$$\epsilon_0 \epsilon E = D \quad (3.8)$$

**Электрическое поле в диэлектрике**

Источниками поля в диэлектрике являются внешние заряды и поляризационные заряды. Напряженность электрического поля в диэлектрике равна векторной сумме напряженности

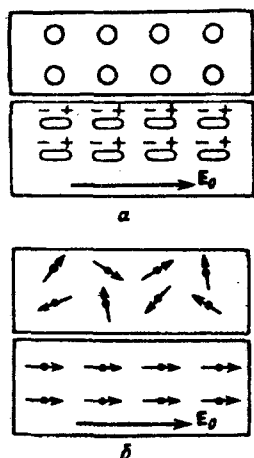


Рис. 3.6

Поляризованность  
(вектор поляризации)

Диэлектрическая  
восприимчивость

внешнего поля  $E_0$  и напряженности поля поляризационных зарядов  $E'$ :

$$E = E_0 + E'. \quad (3.9)$$

Поляризационные заряды на поверхности диэлектрика образуются вследствие или смещения носителей зарядов в молекулах (в неполярных молекулах), или в результате ориентации дипольных моментов полярных молекул внешним электрическим полем (см. рис. 3.6). Это явление называется *поляризацией диэлектрика*. На рис. 3.6 приводится схема образования дипольных моментов неполярных молекул и ориентации дипольных моментов полярных молекул внешним электрическим полем.

Величина, равная векторной сумме электрических моментов диполей в единичном объеме диэлектрика. Вектор поляризации

$$P = \frac{\sum p_i}{V} = n \langle p \rangle, \quad (3.10)$$

$p_i$  — электрический дипольный момент одной молекулы,  $n$  — концентрация молекул,  $\langle p \rangle$  — средний дипольный момент одной молекулы,  $V$  — объем диэлектрика.

В изотропном диэлектрике вектор поляризации

$$P = \kappa \epsilon_0 E. \quad (3.11)$$

Безразмерная величина  $\kappa$  называется *диэлектрической восприимчивостью*.

Плотность поляризационных зарядов на поверхности диэлектрика в вакууме

$$\sigma_n = P_n, \quad (3.12)$$

$P_n$  — проекция вектора  $\mathbf{P}$  на внешнюю нормаль к поверхности диэлектрика.

Диэлектрическая проницаемость

В изотропной среде электрическое смещение

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \epsilon \epsilon_0 \mathbf{E}, \quad (3.13)$$

$\epsilon = 1 + \kappa$  — *относительная диэлектрическая проницаемость*.

Связь между различными характеристиками электрического поля в диэлектрике

В пространстве, полностью заполненном изотропным диэлектриком,

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 / \epsilon, \quad (3.14)$$

$$\mathbf{E}' = -\mathbf{P} / \epsilon_0, \quad (3.15)$$

$$\varphi = \varphi_0 / \epsilon, \quad (3.16)$$

$\mathbf{E}$  — напряженность поля в диэлектрике;  $\mathbf{E}_0$  — напряженность внешнего поля при отсутствии диэлектрика;  $\mathbf{E}'$  — напряженность поля поляризационных зарядов,  $\mathbf{P}$  — поляризованность (вектор поляризации);  $\varphi$  — потенциал поля в диэлектрике,  $\varphi_0$  — потенциал поля при отсутствии диэлектрика.

Проводники в электрическом поле

На поверхности проводника, находящегося в электрическом

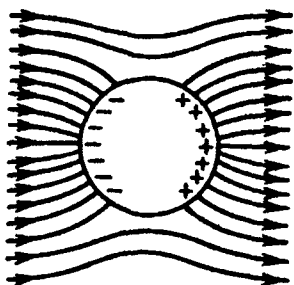


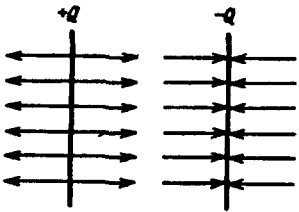

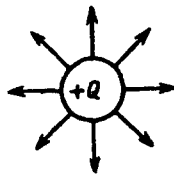
Рис. 3.7

поле, наводятся (индуцируются) заряды; эти заряды (положительные и отрицательные) распределяются по поверхности таким образом, что напряженность поля внутри проводника будет равна нулю, а поверхность проводника является эквипотенциальной (см. ниже). На рис. 3.7 показано изменение однородного электрического поля проводящим шаром.

Внутри шара напряженность равна нулю; у поверхности модуль вектора напряженности электрического поля  $E = \sigma$  ( $\sigma$  — поверхностная плотность зарядов); вектор  $E$  перпендикулярен поверхности шара.

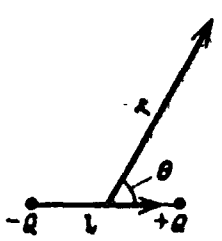
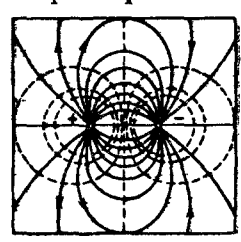
## 2. Напряженность электрического поля

Тело (заряженное)	Точка в пространстве	Напряженность, линии напряженности
Материальная точка с зарядом $Q$	На расстоянии $r$	$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} \quad (3.17)$ <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <math>+q</math>  </div> <div style="text-align: center;"> <math>-q</math>  </div> </div>

Тело (заряженное)	Точка в пространстве	Напряженность, линии напряженности
Плоскость, поверхностная плотность заряда $\sigma$	С любой стороны	$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon} \quad (3.18)$ 
Две параллельные плоскости; с зарядами $+Q$ и $-Q$ ; поверхностная плотность зарядов $\sigma$ .	Между плоскостями Вне плоскостей	$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0\epsilon} \quad (3.19)$ $E = 0$ 
Сфера (шар) радиусом $R$ с зарядом $Q$	Вне сферы на расстоянии $r$ от ее центра ( $r \geq R$ ) Внутри сферы ( $r < R$ )	$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} \quad (3.20)$ $E = 0$ 


Тело (заряженное)	Точка в пространстве	Напряженность, линии напряженности
Проводник; поверхность заряда $\sigma$	Вблизи поверхности	$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}$
Равномерно заряженный, длинный цилиндр (полый). Линейная плотность заряда $\tau$	Вне цилиндра на расстоянии $r$ от оси Внутри цилиндра	$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon r} \quad (3.21)$ $E = 0$ 
Сплошной стержень, заряженный равномерно по объему. $\tau$ — заряд на единичной длине стержня ( $R$ — радиус поперечного сечения)	Вне стержня на расстоянии $r$ от оси ( $r \geq R$ ) Внутри стержня ( $r < R$ )	$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon r} \quad (3.22)$ $E = \frac{\tau r}{2\pi\epsilon_0 R^2} \quad (3.23)$

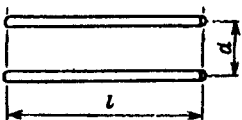
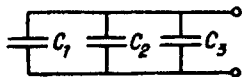


Тело (заряженное)	Точка в пространстве	Напряженность, линии напряженности
<p>Электрический диполь с моментом <math>P=ql</math></p> 	<p>На расстоянии <math>r \gg l</math></p>	$E = \frac{\sqrt{1 + 3\cos^2\theta}}{4\pi\epsilon_0 r^3} P \quad (3.24)$ <p><math>\theta</math> — угол между векторами <math>r</math> и <math>r</math></p> 

Примечание. Поверхностная плотность заряда  $\sigma = Q/S$  ( $Q$  — заряд, распределенный на поверхности площадью  $S$ ); линейная плотность заряда  $\tau = Q/l$  ( $Q$  — заряд на боковой поверхности цилиндра, длина которого равна  $l$ ).

### 3. Электроемкость конденсаторов и проводников

Конденсаторы или проводники	Электроемкость
Плоский конденсатор	$C = \epsilon_0 \epsilon S / d \quad (3.25)$ <p><math>S</math> — площадь одной пластины; <math>d</math> — расстояние между ними</p>
<p>Цилиндрический конденсатор; коаксиальный кабель</p> 	$C_n = 2\pi\epsilon_0 \epsilon l / (\ln(b/a)), \quad (3.26)$ <p><math>b</math> — радиус внешнего цилиндра, <math>a</math> — радиус внутреннего цилиндра, <math>l</math> — длина</p>

Конденсаторы или проводники	Емкость
Сферический конденсатор	$C_{\text{сф}} = 4\pi\epsilon_0\epsilon/(1/a - 1/b) \quad (3.27)$ <p><math>a, b</math> — радиусы внутренней и внешней сферы</p>
Двухпроводная линия 	$C_l = \pi\epsilon_0\epsilon l / (\ln d/a) \quad (3.28)$ <p><math>l</math> — длина линии, <math>d</math> — расстояние между осями параллельных проводников, <math>r</math> — их радиус</p>
Проводник, параллельный плоскости Земли	$C_l = 2\pi\epsilon_0 l / (\ln \frac{2h}{R}),$ <p><math>h</math> — высота над поверхностью, <math>R</math> — радиус сечения, <math>h \gg R</math>, <math>l</math> — длина проводника.</p>
Параллельное соединение конденсаторов 	$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (3.29)$ <p><math>C_1, C_2, \dots, C_n</math> — емкости конденсаторов</p>
Последовательное соединение конденсаторов 	$\frac{1}{C_{\text{пс}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (3.30)$

## 4. Постоянный электрический ток

Электрический ток

Упорядоченное движение носителей зарядов.

**Сила постоянного  
электрического тока  
(сила тока)**

Величина, равная заряду, который переносится через площадь сечения проводника за время 1 с. Сила постоянного тока

$$I = Q/t, \quad (3.31)$$

$Q$  — заряд, переносимый за время  $t$ .

Сила переменного электрического тока

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt}, \quad (3.32)$$

$\Delta Q$  — заряд, который переносится за время  $\Delta t$ . Когда говорят о направлении тока, то имеют в виду направление вектора плотности тока.

**Плотность тока**

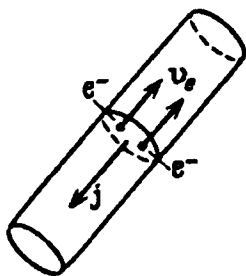


Рис. 3.8

Векторная величина, модуль которой равен отношению силы тока к площади сечения, перпендикулярного к скорости упорядоченного движения носителей заряда:

$$j = I/S. \quad (3.33)$$

Направление вектора  $j$  совпадает с направлением вектора скорости упорядоченного движения носителей положительных зарядов.

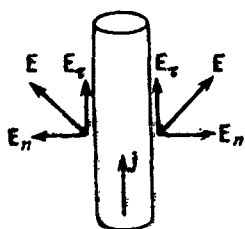
Плотность тока

$$j = nq_+ \langle v \rangle, \quad (3.34)$$

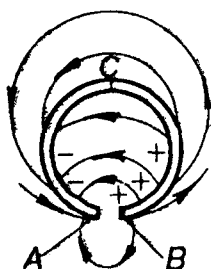
$q_+$  — заряд одного из носителей,  $n$  — их концентрация, (количество носителей заряда в единичном объеме),  $\langle v \rangle$  — средняя скорость упорядоченного движения. При упорядоченном движении носителей отрицательных зарядов (например, электронов в металлах) вектор плотности тока  $j$  и вектор средней скорости  $v_0$  имеют противоположные направления (рис. 3.8).

Вообще, даже при наличии постоянного тока, плотность не одинакова в различных точках поперечного сечения проводника. В этом случае плотность тока  $j=dI/dS$ . (3.35)

### Электрическое поле проводника с током



а



б

На поверхности проводника, по которому течет постоянный ток, образуются избыточные заряды. Поверхностная плотность этих зарядов на различных участках поверхности проводника неодинакова.

Вне проводника с током вблизи его поверхности вектор напряженности электрического поля имеет нормальную  $E_n$  и тангенциальную  $E_t$  составляющие; внутри проводника нормальная составляющая  $E_n=0$ , а тангенциальная составляющая имеет то же самое значение  $E_t$ , что и вне проводника (рис. 3.9а).

На рис. 3.9б показаны линии напряженности электрического поля вокруг кольцевого проводника с постоянным током. В точке А находится отрицательный полюс источника тока, в точке В — положительный полюс.

Поверхностная плотность избыточных зарядов у полюсов источника наибольшая, в точке С (на середине окружности) она равна нулю; на участке АС заряды отрицательные, на участке ВС — положительные.

Рис. 3.9

### Сторонние силы

Силы, которые перемещают внутри источника тока носители поло-

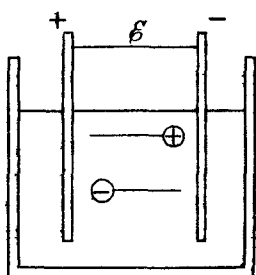


Рис. 3.10

жительных и отрицательных зарядов на соответствующие полюсы (рис. 3.10); заряды, образующиеся на полюсах источника тока, в свою очередь, обеспечивают соответствующее распределение избыточных зарядов по всей поверхности проводника, который подключен к полюсам источника.

Природа сторонних сил может быть различной: вихревое электрическое поле в генераторах, межатомное взаимодействие на границах соприкосновения разнородных сред (в гальванических элементах и аккумуляторах) и т.п.

### Электродвижущая сила (ЭДС)

Величина, равная работе сторонних сил по перемещению такого количества носителей зарядов, которые переносят положительный заряд 1 Кл.

ЭДС

$$\mathcal{E} = A_c / Q, \quad (3.36)$$

$A_c$  — работа сторонних сил по перемещению положительных зарядов  $Q$ .

ЭДС равна разности потенциалов между клеммами разомкнутого источника (рис. 3.10).

### Закон Ома

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{r}$$

На участке цепи, где нет источников тока, сила тока в проводнике пропорциональна разности потенциалов между его концами (рис. 3.11, а):

$$I = (\varphi_1 - \varphi_2) / r. \quad (3.37)$$

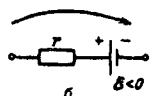
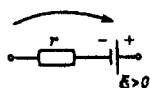


Рис. 3.11

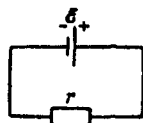


Рис. 3.12

Закон Ома  
в дифференциальной  
форме

$$\mathbf{j} = \gamma (\mathbf{E} + \mathbf{E}_{\text{ст}})$$

Напряжение

На участке цепи с источником тока сила тока (рис. 3.11, б)

$$I_{\varepsilon} = (\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon) / r, \quad (3.38)$$

$(\varphi_1 - \varphi_2)$  — разность потенциалов между концами участка,  $\varepsilon$  — ЭДС источника тока,  $r$  — величина, которая называется электрическим сопротивлением проводника (см. ниже).

При расчетах значение ЭДС принимается положительным, если произвольно выбранное направление обхода совпадает с переходом от отрицательного полюса к положительному.

В замкнутой цепи  $\varphi_1 = \varphi_2$  (рис. 3.12),

$$I = \varepsilon / r,$$

$r$  — сопротивление всей цепи, включая внутреннее сопротивление источника тока.

$$\mathbf{j} = \gamma (\mathbf{E} + \mathbf{E}_{\text{ст}}), \quad (3.39)$$

$\mathbf{j}$  — плотность тока,  $\gamma$  — удельная электропроводность (см. ниже),  $\mathbf{E}$  — напряженность электрического поля,  $\mathbf{E}_{\text{ст}}$  — напряженность поля сторонних сил.

Величина, равная работе электрических и сторонних сил по перемещению на данном участке носителей заряда, которыми переносится положительный заряд 1 Кл,  $U = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon = Ir$ . (3.40)

## Падение напряжения

Произведение  $I r$  называется *падением напряжения*. Если на участке нет источников тока, то напряжение равно разности потенциалов между концами этого участка:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2.$$

## Электрическое сопротивление проводника



Рис. 3.13

Величина, равная разности потенциалов между концами проводника при силе тока 1 А, проходящего по этому проводнику:

$$r = U/I, \quad (3.41)$$

$\varphi_1 - \varphi_2 = U$  — разность потенциалов,  $I$  — сила тока. Сопротивление однородного проводника постоянного сечения:

$$r = \rho l/S, \quad (3.42)$$

$\rho$  — удельное сопротивление, равное сопротивлению проводника в форме куба с ребрами длиной 1 м;  $l$  — длина,  $S$  — площадь нормального поперечного сечения.

## Удельная проводимость

Величина, обратная удельному сопротивлению, называется *удельной проводимостью*:

$$\gamma = 1/\rho.$$

## Зависимость сопротивления от температуры

Приблизительно удельное сопротивление проводника линейно зависит от температуры:

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T), \quad (3.43)$$

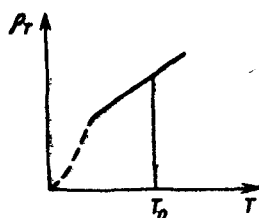


Рис. 3.14

### Сверхпроводимость

$\rho_T$  — сопротивление при температуре  $T$ ,  $\rho_0$  — сопротивление при  $T_0=273,15$  К,  $\Delta T=T-T_0$ ,  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления

$$\alpha = (\rho_T - \rho_0) / (\rho_0 \Delta T).$$

При низких температурах у некоторых металлов и металлокерамических соединений сопротивление падает до нуля. Это явление называется сверхпроводимостью.

### Соединение резисторов

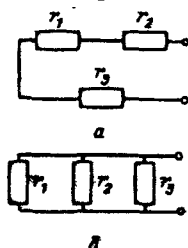


Рис. 3.15

### Работа постоянного тока

При последовательном соединении резисторов 1, 2, ...,  $n$  сопротивлениями  $r_1, r_2, \dots, r_n$  общее сопротивление

$$r_{\text{вос}} = r_1 + r_2 + \dots + r_n. \quad (3.44)$$

При параллельном соединении резисторов

$$1/r_{\text{пар}} = 1/r_1 + 1/r_2 + \dots + 1/r_n \quad (3.45)$$

$$A = IU_t = I^2 r t = U^2 t / r, \quad (3.46)$$

$I$  — сила тока в цепи,  $U$  — напряжение на участке цепи,  $r$  — сопротивление,  $t$  — время.

### Мощность постоянного тока

Работа тока за время 1 с:

$$P = IU. \quad (3.47)$$

### Правила Кирхгофа

Используются при расчете токов и напряжений в разветвленных цепях. Точка, в которой соедине-



Узел токов  
в точке А

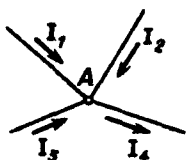


Рис. 3.16

Направление  
обхода

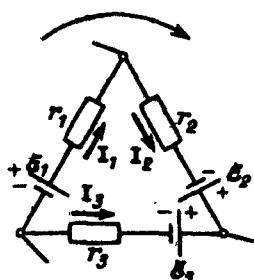


Рис. 3.17

### Соединение источников тока

но не менее трех проводников, называется *узлом*. *Первое правило*: алгебраическая сумма сил токов на участках цепи, сходящихся в любой точке разветвления, равна нулю. Например, на рис. 3.16  $I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0$ .

Токи, входящие в узел, считаются положительными, токи, выходящие из узла, — отрицательными. *Второе правило*: для любого замкнутого контура, выделенного из разветвленной цепи, алгебраическая сумма произведений 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 источника к положительному).

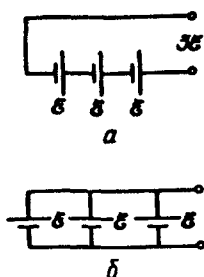
Например (см. рис. 3.17):

$$I_1 r_1 + I_2 r_2 - I_3 r_3 = \epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_3.$$

При последовательном соединении  $n$  одинаковых источников тока (рис. 3.18а).

$$I(nr_1 + r) = n\epsilon_1, \quad (3.48)$$

$n$  — число источников,  $r_1$  — внутреннее сопротивление одного источника,  $r$  — внешнее сопротивление цепи,  $\epsilon_1$  — ЭДС одного ис-

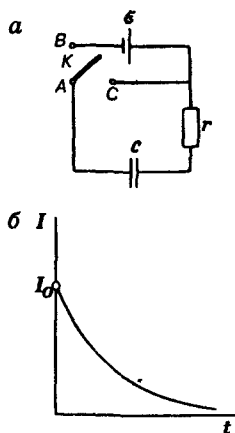


точника. При параллельном соединении  $n$  одинаковых источников тока (рис. 3.18б)

$$I(r + r_i/n) = \epsilon_i \quad (3.49)$$

Рис. 3.18

Зарядка и разрядка конденсатора



При зарядке конденсатора емкостью  $C$  через резистор сопротивлением  $r$  сила тока

$$I = I_0 e^{-t/(rC)}, \quad (3.50)$$

$I_0 = \epsilon/r$  — сила тока в момент времени  $t=0$  (в начале зарядки),  $\epsilon$  — ЭДС источника тока (рис. 3.19, б).

При разрядке конденсатора (рис. 3.19, а, ключ  $K$  замыкает точки  $A$  и  $C$ ) через резистор напряжение

$$U = U_0 e^{-t/(rC)}, \quad (3.51)$$

$U_0$  — напряжение на конденсаторе в момент времени  $t=0$  (в начале разрядки);  $U_0 = \epsilon$ .

Рис. 3.19

Единицы:

электрический ток — ампер, А;  
плотность тока — ампер на квадратный метр, А/м<sup>2</sup>;  
электродвижущая сила, напряжение, разность потенциалов — вольт, В;  
сопротивление — ом, Ом;  
удельное сопротивление — ом-метр, Ом·м;  
удельная проводимость — сименс на метр, См/м.

## 5. Электрический ток в электролитах

### Электролиты

*Электролитами* (или проводниками второго рода) называются растворы кислот, щелочей и солей в воде или других растворителях, а также расплавленные соли. В электролитах носителями зарядов являются ионы, которые представляют собой части молекул, имеющие положительные и отрицательные заряды.

### Плотность тока

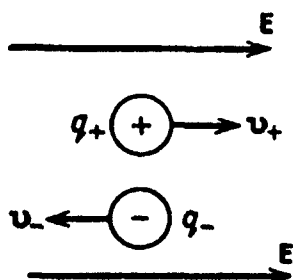


Рис. 3.20

Определяется упорядоченным движением ионов в электрическом поле, которое образуется между электродами, погруженными в электролит и подключенными к источнику тока. Плотность тока в электролите  $j = n_+ q_+ \langle v_+ \rangle + n_- q_- \langle v_- \rangle$ , (3.52)  $n_+$ ,  $\langle v_+ \rangle$  — концентрация и средняя скорость упорядоченного движения ионов, несущих положительный заряд;  $n_-$ ,  $\langle v_- \rangle$  — концентрация и средняя скорость ионов, имеющих отрицательный заряд.

### Подвижность ионов

Величина, равная средней скорости упорядоченного движения ионов в электрическом поле напряженностью 1 вольт на метр. Подвижности положительных и отрицательных ионов  $u_+ = \langle v_+ \rangle / E$ ,  $u_- = \langle v_- \rangle / E$ , (3.53)

$\langle v_+ \rangle$ ,  $\langle v_- \rangle$  — скорости упорядоченного движения ионов в поле напряженности  $E$ .

## Электролиз. Законы Фарадея

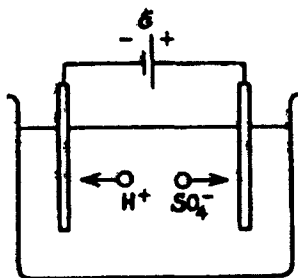


Рис. 3.21

$$F = 96\,485 \text{ кулон/моль}$$

Когда через электролит протекает постоянный ток, на электродах выделяются вещества. Это явление называется *электролизом*.

Масса вещества, выделившегося на электроде при электролизе, прямо пропорциональна заряду, проходящему через электролит (*первый закон Фарадея*).

$$m = kQ. \quad (3.54)$$

Коэффициент пропорциональности  $k$ , равный отношению массы вещества, выделившегося на электроде, к заряду, который был перенесен через электролит ионами, называется *электрохимическим эквивалентом данного вещества*. Электрохимический эквивалент вещества пропорционален его *химическому эквиваленту* (*второй закон Фарадея*);

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{\mu}{n}. \quad (3.55)$$

$F = 96\,485$  кулон на моль

## Химический эквивалент

Внесистемная единица массы, равная отношению молярной массы  $\mu$  данного вещества к его валентности  $n$ ;  $F$  называется *постоянной Фарадея*.

## Гальванические элементы и аккумуляторы

При погружении в электролит двух электродов между ними ус-

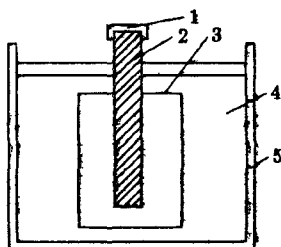


Рис. 3.22

тавливается разность потенциалов. Это явление используется в гальванических элементах, которые являются источниками тока. Принципиальная конструкция одного из видов гальванических элементов приведена на рис. 3.22: 1 — медный колпачок, 2 — угольный стержень (положительный полюс), 3 — деполяризатор, 4 — электролит, 5 — цинковый электрод (отрицательный полюс).

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 *зарядом аккумулятора*; заряд аккумулятора выражается в кулонах.

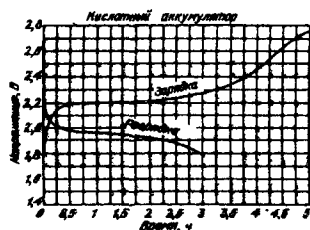


Рис. 3.23

На рис. 3.23 приводятся кривые зарядки (током  $Q/4A$ ) и разрядки (током  $Q/3A$ ) одной банки кислотного аккумулятора ( $Q=Q'/8600$ ,  $Q'$  — заряд одной банки, в кулонах).

### Топливные элементы

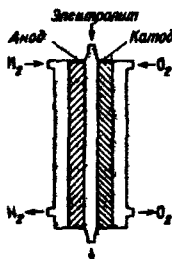


Рис. 3.24

В топливных элементах (рис. 3.24) используются химические реакции окисления и восстановления. В качестве восстановителя чаще всего используется водород, окислителя — кислород или воздух. В таких элементах непрерывно подается топливо, а также отводятся продукты реакции.

## 6. Электропроводность газов и плазмы

### Ионизация газов

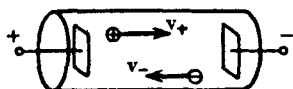


Рис. 3.25

Газы становятся проводниками электрического тока при наличии в них ионов и свободных электронов, т. е. газ должен быть ионизирован (рис. 3.25).

Энергия, необходимая для отрыва электрона от атома, называется *работой ионизации*.

Электроны обычно присоединяются к нейтральным атомам, образуя отрицательные ионы.

Плотность тока

$$j = n_+ v_+ q_+ + n_- v_- q_- \quad (3.56)$$

$n_+$ ,  $n_-$  — концентрации положительных и отрицательных ионов,  $v_+$ ,  $v_-$  — средние скорости их упорядоченного движения.

### Вольтамперная характеристика. Проводимость газов

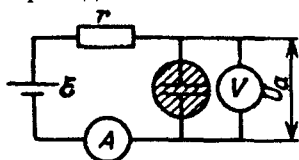


Рис. 3.26

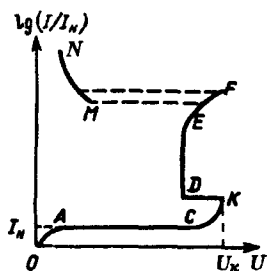


Рис. 3.27

Схема для снятия вольтамперной характеристики проводимости газов приведена на рис. 3.26; вольтамперная характеристика приводится на рис. 3.27.

На участке *ОА* ток обусловлен ионизацией газа ионизаторами различного рода (например, рентгеновскими лучами или радиоактивным излучением и др.).

На участке *АС* устанавливается ток насыщения  $I_n$ . На участке *СК* ионизация происходит за счет соударений электронов с атомами. Участки *ОАВСД* относятся к *несамостоятельному разряду* — *несамостоятельная проводимость*.

При напряжении  $U_D$  происходит пробой, напряжение на электродах скачкообразно уменьшается (точка  $D$ ). Этот вид проводимости называется *самостоятельным* (или *тлеющим разрядом*). При увеличении напряжения источника напряжение остается постоянным до точки  $E$ , но сила тока увеличивается. Участок  $DE$  соответствует области нормального тлеющего разряда. На участке  $EF$  происходит увеличение тока при увеличении напряжения (в этом случае увеличение напряжения источника не полностью компенсируется падением напряжения на резисторе сопротивлением  $r$ ); этот участок соответствует аномальному тлеющему разряду. В точке  $F$  происходит скачкообразный переход в стадию *дугового разряда*  $MN$ .

Работа выхода

Необходимая для выхода электрона из металла энергия.

Термоэлектронная эмиссия

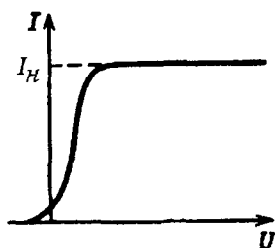


Рис. 3.28

Выход электронов из металла под действием теплового движения. Типичная вольтамперная характеристика тока термоэлектронной эмиссии приведена на рис. 3.28. Наибольшее значение тока термоэлектронной эмиссии называется *током насыщения*, плотность которого можно рассчитать по формуле

$$j_n = BT^2 e^{-A/(kT)}, \quad (3.57)$$

$B$  — постоянная,  $A$  — работа выхода,  $T$  — температура.

По теоретическим расчетам для чистых металлов  $B=1,2 \cdot 10^6 \text{ А/(м}^2\text{.К}^2\text{)}$ , однако на опыте получаются различные значения.

### Электропроводность плазмы

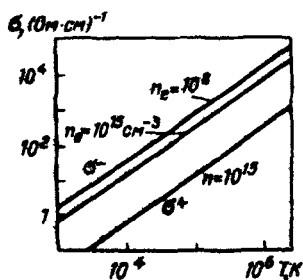


Рис. 3.29

Электропроводность плазмы в основном определяется подвижностью электронов (о плазме см. гл. II, п. 13).

Плотность тока электронной проводимости

$$j_e = en_e v_e, \quad (3.58)$$

$n_e$  — концентрация электронов,  $v_e$  — скорость упорядоченного движения электронов.

Ионная проводимость плазмы значительно меньше электронной проводимости.

Удельная электронная проводимость

$$\sigma_e = e^2 n_e D_e / (kT), \quad (3.59)$$

$D_e$  — коэффициент диффузии электронов (см. гл. II);  $\sigma_e$  слабо зависит от концентрации (рис. 3.29). При температурах выше  $10^7 \text{ К}$  проводимость водородной плазмы больше проводимости серебра при температуре около  $20^\circ\text{С}$ .

## 7. Электропроводность полупроводников

### Полупроводники

Вещества, у которых удельное сопротивление  $\rho$  при комнатных температурах находится в пределах  $10^{-4} \dots 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . В отличие от металлов, удельное сопротивление у полупроводников умень-



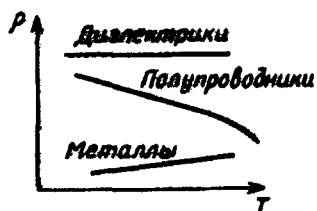


Рис. 3.30

### Зоны энергетических уровней

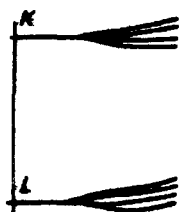


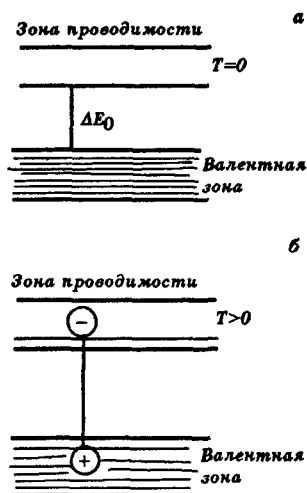
Рис. 3.31

шается с повышением температуры (рис. 3.30).

При взаимодействии атомов энергетические уровни электронов незначительно изменяются по сравнению с энергетическими уровнями электронов не взаимодействующих атомов; вследствие взаимодействия  $N$  атомов образуется  $N$  близко расположенных энергетических уровней (рис. 3.31).

Совокупность расщепленных энергетических уровней образует зону разрешенных значений энергии. Зоны отделяются друг от друга интервалами неразрешенных значений энергии; такие интервалы энергии называются *запрещенными зонами*.

При 0 К валентные электроны занимают низшие энергетические уровни. Все разрешенные уровни в этой зоне являются занятыми. Эта зона является *заполненной*, или *валентной зоной*. Во второй зоне дозволенных уровней энергии при 0 К нет ни одного электрона; эта зона называется *зоной проводимости*. Энергия  $\Delta E_0$  (рис. 3.32), необходимая для перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости, называется *шириной запрещенной зоны*. У



а металлов зона проводимости и валентная зона перекрываются; у диэлектриков  $\Delta E_0 > 2\text{эВ}$ .

Электروпроводность обусловлена наличием электронов в зоне проводимости; если нет электронов в зоне проводимости, нет и электропроводности.

б Тепловое движение, а также различные внешние воздействия (например, свет, электрическое поле) обуславливают переход части электронов из валентной зоны в зону проводимости, вследствие чего полупроводник приобретает свойства электропроводности.

Рис. 3.32

Электронная и дырочная проводимость

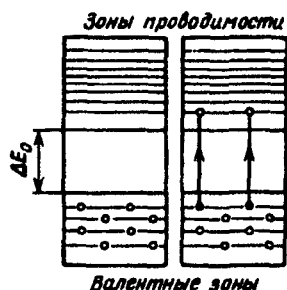


Рис. 3.33

После перехода электрона в зону проводимости в валентной зоне остаются вакантные уровни. При наличии внешнего электрического поля будут перемещаться электроны в обеих зонах. Проводимость, обусловленная перемещением электронов в зоне проводимости, называется *электронной проводимостью*; проводимость, обусловленная движением электронов в валентной зоне, называется *дырочной проводимостью*. Перемещение электрона в заполненной зоне можно рассматривать как перемещение положительного заряда в направлении, противоположном движению электрона. Такой положительный заряд условно называет-

ся дыркой. Проводимость, обусловленная движением одинакового количества электронов и дырок, которые образуются в результате перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости, называется *собственной*.

Полупроводник с электронной проводимостью называется *полупроводником n-типа*; полупроводник с дырочной проводимостью называется *полупроводником p-типа*.

### Примесная проводимость



Рис. 3.34

При практическом применении полупроводников наибольшее значение имеет *примесная проводимость*, которая определяется примесями других веществ. Примеси бывают двух видов — донорные и акцепторные. *Донорные примеси* создают дополнительные разрешенные уровни энергии вблизи верхней границы запрещенной зоны; атомы таких примесей отдают электроны в зону проводимости и, таким образом, обеспечивают примесную электронную проводимость. *Акцепторные примеси* создают дополнительные уровни вблизи нижней границы запрещенной зоны; атомы акцепторных примесей принимают на свои уровни электроны из валентной зоны и тем самым обеспечивают примесную дырочную проводимость (рис. 3.34).

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. Во всех полупроводниках всегда имеются электроны и дырки, но вклад их в электропроводность может быть неодинаковым за счет различных концентраций или подвижностей.

## 8. Взаимодействие движущихся заряженных частиц. Магнитное поле

### Магнитные силы

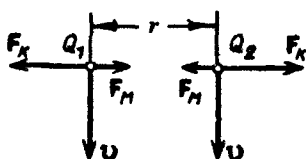


Рис. 3.35а

Силы, действующие между двумя движущимися точечными зарядами, отличаются от сил, действующих между этими же зарядами, если они неподвижны в инерциальной системе отсчета.

Например (рис. 3.35а), если два отрицательных заряда  $Q_1$  и  $Q_2$  движутся параллельно друг другу с одинаковыми скоростями  $v$ , то сила, действующая между ними

$$F_v = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} (1 - \beta^2) = F_K (1 - \beta^2),$$

$\beta = v/c$ ,  $c$  — скорость света в вакууме,  $F_K$  — кулоновская сила. Сила  $F_v$  меньше кулоновской силы на величину

$$F_M = F_K \beta^2.$$

Дополнительная сила  $F_M$  в рассмотренном частном случае называется *магнитной силой*.

Магнитные силы зависят от скоростей зарядов; скорости могут быть различными как по моду-

так и по направлению. Если скорость хотя бы одного заряда равна нулю, тогда магнитные силы в этой системе отсчета тоже равны нулю.

В общем случае сила  $F''_{12}$ , действующая на движущийся заряд  $Q_2$ , находящийся в электрическом поле движущегося заряда  $Q_1$ , и сила  $F'_{21}$ , действующая на движущийся заряд  $Q_1$ , находящийся в электрическом поле движущегося заряда  $Q_2$ , не равны по модулю; направления этих сил не совпадают с линией, проходящей через заряды.

Магнитные силы зависят от системы отсчета.

### Магнитное поле

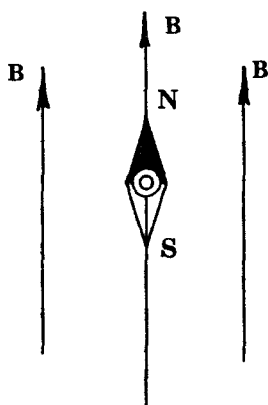


Рис. 3.35, б

### Сила Лоренца

Свойства магнитных сил описываются магнитным полем.

Магнитное поле является добавочным электрическим полем, источником которого являются движущиеся заряды.

Посредством магнитного поля осуществляется взаимодействие проводников с токами, проводников с токами и магнитами, а также взаимодействие между магнитами.

Одной из характеристик магнитного поля является магнитная индукция (см. ниже).

Направление вектора магнитной индукции можно определить с помощью магнитной стрелки: если стрелка размещается в магнитном поле, то ее северный полюс указывает направление вектора  $B$  (рис. 3.35, б).

Это магнитная сила, действующая на движущийся заряд в магнитном

поле, источником которого являются другие движущиеся заряды.

Сила Лоренца (рис. 3.36)

$$F_L = Q[vB], \quad (3.65)$$

$$F = QvB \sin \alpha,$$

$Q$  — заряд частицы,  $v$  — ее скорость,  $B$  — магнитная индукция,  $\alpha$  — угол между векторами  $v$  и  $B$ . Если  $v \perp B$ , то сила Лоренца имеет максимальное значение:

$$F_{\text{ЛМ}} = QvB; \quad (3.66)$$

если  $v \parallel B$ , то сила Лоренца равна нулю.

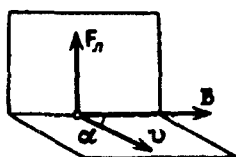


Рис. 3.36

### Закон Ампера

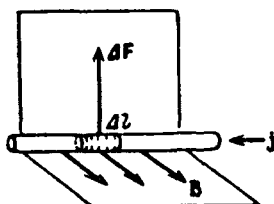


Рис. 3.37

Действующая на проводник с током в магнитном поле сила равна векторной сумме сил Лоренца, действующих на движущиеся носители зарядов внутри проводника (т.е. электроны); такая сила называется *силой Ампера*. Действующая на элементарный отрезок  $\Delta l$  тонкого проводника сила Ампера (рис. 3.37)  $\Delta F = I[\Delta l B]$ ,  $\Delta F = I \Delta l B \sin \alpha$ , (3.67)

$I$  — сила тока,  $B$  — магнитная индукция,  $\alpha$  — угол между векторами  $\Delta l$  и  $B$ ; направление вектора  $\Delta l$  совпадает с направлением вектора плотности тока  $j$ ; векторная величина  $I \Delta l$  называется элементом тока. Для определения направления силы Ампера используется правило левой руки: необходимо ладонь левой руки расположить так, чтобы линии индукции магнитного поля входили в нее, а вытянутые пальцы указывали направление тока; тогда отставлен-

Контур с током  
в магнитном поле.  
Магнитный момент

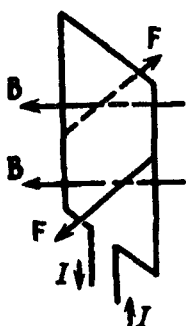


Рис. 3.38

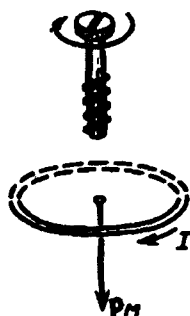


Рис. 3.39

Магнитная индукция  
(определения)

ный большой палец указывает направление силы Ампера. Если  $\Delta \perp B$ , то сила Ампера имеет максимальное значение:

$$\Delta F_m = I B \Delta l. \quad (3.68)$$

На плоский контур тока малых размеров (рис. 3.38), помещенный в магнитное поле, действует механический момент сил  $M$  (см. гл. I)

$$M = IS[nB],$$

$$M = ISB \sin \alpha, \quad (3.69)$$

$I$  — сила тока,  $S$  — площадь контура,  $B$  — магнитная индукция,  $\alpha$  — угол между нормалью к плоскости контура и вектором  $B$ ,  $n$  — единичный вектор нормали. Векторная величина

$$p_m = ISn \quad (3.70)$$

называется *магнитным моментом контура*; модуль магнитного момента  $p_m = IS$ . Направление магнитного момента определяется по правилу правого винта: если винт вращать по направлению тока в контуре, то поступательное перемещение будет совпадать с направлением  $p_m$  и единичным вектором нормали  $n$  (рис. 3.39). Если  $n \perp B$ , то момент сил имеет максимальное значение

$$M_m = ISB. \quad (3.71)$$

Различные варианты определения магнитной индукции приводятся ниже.

а) Вектор, модуль которого равен максимальной силе, действующей

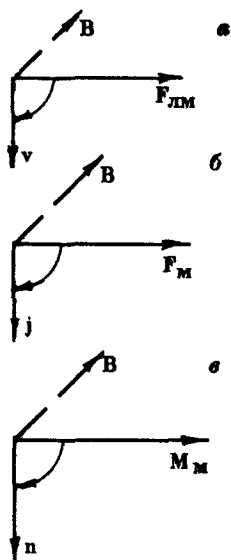


Рис. 3.40

щей на движущийся со скоростью 1 м/с точечный положительный заряд 1 Кл:  $B = F_{\text{ЛМ}} / (Qv)$ .

Направление  $B$  определяется векторным произведением  $[F_{\text{ЛМ}}v]$  или по правилу левой руки (рис. 3.40, а).

б) Вектор, модуль которого равен максимальной силе, действующей на единичный элемент тока:  $B = F_M / (I\Delta l)$ .

Направление  $B$  определяется векторным произведением  $[F_M j]$  или по правилу левой руки (рис. 3.40, б).

в) Вектор, модуль которого равен максимальному механическому моменту, действующему на плоский контур тока с единичным магнитным моментом:  $B = M_M / (IS)$ .

Направление  $B$  определяется векторным произведением  $[M_M n]$ ; направление  $n$  определяется по правилу правого винта (см. введение и рис. 3.39). Векторы, изображенные на рис. 3.40 штриховыми линиями, направлены за плоскость чертежа.

### Закон Био-Савара-Лапласа



Рис. 3.41

Линейный элемент тока является источником магнитного поля, магнитная индукция которого во внешнем пространстве

$$\Delta B = \frac{\mu_0 I [\Delta l r]}{4\pi r^3} \quad (3.72)$$

Напряженность  
магнитного поля

Векторная величина

$$H = B / \mu_0 \quad (3.73)$$



называется *напряженностью магнитного поля* в вакууме. Напряженность магнитного поля в среде

$$H_c = \frac{B}{\mu_0 \mu}, \quad (3.73a)$$

$\mu$  — относительная магнитная проницаемость среды (см. п. 12 гл. III).

Взаимодействие двух параллельных проводников с токами

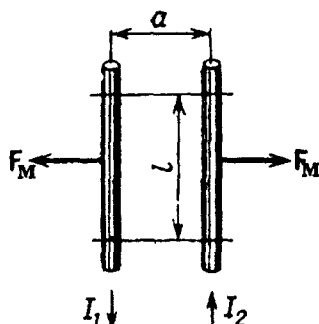


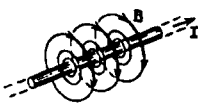

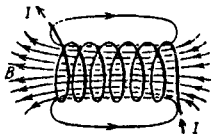
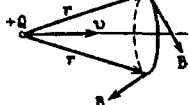
Рис. 3.42

Обусловлено магнитными силами, которые действуют между движущимися носителями зарядов в проводниках; кулоновское взаимодействие в этом случае равно нулю, так как проводники электрически нейтральны (взаимодействие между носителями зарядов на поверхности проводника не учитывается). Два длинных прямолинейных и параллельных проводника притягиваются друг к другу, если токи имеют одинаковое направление; если токи имеют противоположные направления, то проводники отталкиваются. Модуль магнитной силы (рис. 3.42):

$$F = \frac{\mu \mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a}, \quad (3.74)$$

$a$  — расстояние между параллельными проводами,  $I_1$  и  $I_2$  — силы тока в них,  $l$  — их длина,  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  генри на метр;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость среды (см. п. 12 гл. III).

## 9. Магнитные поля токов различной конфигурации

Проводники с током	Линии магнитной индукции $B$	Магнитная индукция
Прямой длинный провод с круглым сечением радиуса $R$		$B_{\text{вн}} = \mu_0 I / (2\pi r) \quad (r \geq R);$ $B_{\text{вн}} = \mu_0 \mu I r / (2\pi R^2) \quad (r < R); \quad (3.75)$ <p><math>r</math> — расстояние по нормали от оси проводника</p>
Виток с радиусом окружности $R$		$B_0 = \mu_0 I / (2R) \quad (3.76)$ <p><math>B_0</math> — индукция в центре витка <math>O</math>.</p>
Прямой соленоид длиной $l$ с радиусом витков $R$ ( $l \gg R$ ) в точках на оси		$B_s = \mu_0 N I / l, \quad (3.77)$ <p><math>N</math> — количество витков</p>
Движущаяся заряженная частица		$B_q = \mu_0 q [v \times r] / (4\pi r^3) \quad (3.78)$ <p><math>q</math> — заряд частицы, <math>v</math> — ее скорость (<math>v \ll c</math>)</p>

## 10. Электромагнитная индукция

Переменное магнитное поле является источником вихревого электрического поля, которое в проводящем контуре возбуждает электрический ток (индукционный ток). Это явление, открытое Фарадеем, называется *электромагнитной индукцией*.

Магнитный поток

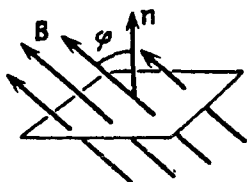


Рис. 3.43

Величина, равная произведению магнитной индукции  $B$ , площади  $S$  поверхности, ограниченной контуром, и косинуса угла между вектором  $B$  и нормально  $n$  к поверхности (рис. 3.43):

$$\Phi = BS \cos \varphi. \quad (3.79)$$

В качестве контура можно рассматривать любую воображаемую замкнутую линию, которая ограничивает часть поверхности. Если контур заменить проводником (например, тонкой проволочкой), то такой контур будет называться *проводящим*.

Работа сил Ампера  
в проводящем контуре

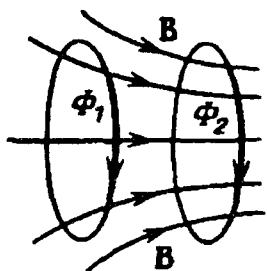


Рис. 3.44

При перемещении во внешнем магнитном поле контура, в котором поддерживается сила тока постоянной, силами Ампера производится работа

$$A = I(\Phi_2 - \Phi_1); \quad (3.80)$$

$\Phi_1$  — магнитный поток сквозь контур тока в начале перемещения,  $\Phi_2$  — магнитный поток в конце перемещения (рис. 3.44).

## Энергия магнитного поля

В пространстве, окружающем проводник с током  $I$ , распределена энергия

$$W_m = LI^2/2, \quad (3.81)$$

$L$  — индуктивность проводника (см. ниже).

## Объемная плотность энергии магнитного поля

$$w = \frac{B^2}{2\mu_0\mu}$$

Величина, равная

$$\lim_{\Delta V \rightarrow 0} (\Delta W_m / \Delta V) = dW_m / dV = w,$$

$\Delta W_m$  — энергия магнитного поля в элементарном объеме  $\Delta V$ .

Объемная плотность энергии (энергия в единичном объеме)

$$w = B^2 / (2\mu_0\mu), \quad (3.82)$$

$B$  — индукция магнитного поля.

## Вихревое электрическое поле и индукционный ток

В замкнутом контуре, ограничивающем площадку, через которую проходит переменный магнитный поток, возбуждается (индуцируется) электрическое поле с замкнутыми линиями напряженности (вихревое электрическое поле). Если контур будет проводящим, то в нем образуется электрический ток, который называется *индукционным током*.

## Электродвижущая сила (ЭДС) индукции

Характеристикой наведенного (индуцированного) поля является электродвижущая сила индукции, равная работе, которую совершают силы вихревого электри-

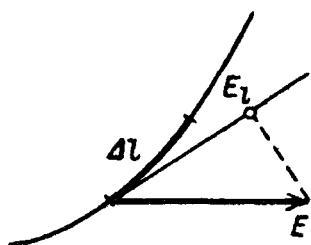


Рис. 3.45

### Циркуляция вектора напряженности

ческого поля по перемещению вдоль контура носителей, суммарный положительный заряд которых равен 1 Кл. Из определения ЭДС индукции следует

$$\mathcal{E} = \sum E_l \Delta l_i, \quad (3.83)$$

$E_l \Delta l_i$  — элементарная работа сил вихревого электрического поля на элементарном участке контура  $\Delta l_i$ ,  $E_l$  — проекция вектора напряженности  $E$  на касательную к контуру в данной точке (рис. 3.45).

Точнее ЭДС индукции определяется соотношением

$$\oint_L E_l dl = \mathcal{E}. \quad (3.84)$$

$L$

Этот интеграл называется циркуляцией вектора  $E$  по контуру  $L$ .

### Правило Ленца

Индукционный ток имеет такое направление, что создаваемый им магнитный поток препятствует изменению магнитного потока, возбуждающего индукционный ток; иначе, индукционный ток направлен так, чтобы “противодействовать” причине его возникновения.

### Закон Фарадея

$$\mathcal{E} = - d\Phi / dt$$

Опытами установлено, что ЭДС индукции равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:

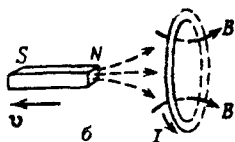
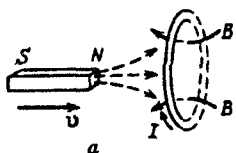


Рис. 3.46

$$\mathcal{E} = -\Delta\Phi/\Delta t \quad (3.85)$$

или

$$\mathcal{E} = -d\Phi/dt.$$

Знаки  $\mathcal{E}$  и  $d\Phi/dt$  противоположны. Поскольку магнитный поток определяется произведением трех величин:  $B$ ,  $S$  и  $\cos\varphi$ , то и изменение магнитного потока зависит от этих же величин.

На рис. 3.46 указаны направления индукционных токов в замкнутом проводнике при приближении к нему северного полюса магнита (рис. 3.46а) и при удалении (рис. 3.46б) от него.

### Самоиндукция

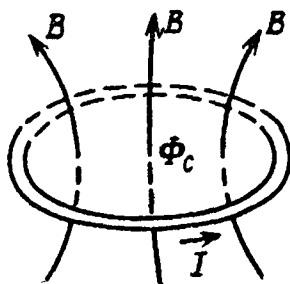


Рис. 3.47

При изменении тока в проводнике возникает индуцированное (наведенное) поле, которое возбуждается магнитным потоком этого тока (рис. 3.47). Такое явление называется самоиндукцией. ЭДС самоиндукции контура

$$\mathcal{E}_c = -d\Phi_c/dt, \quad (3.86)$$

$\Phi_c$  — магнитный поток, создаваемый током проводящего контура через поверхность, ограниченную этим контуром; такой поток называется *магнитным потоком самоиндукции контура*.

### Индуктивность контура

Величина, равная магнитному потоку самоиндукции через поверхность, ограниченную проводящим контуром с током 1 ампер.

$$L = \Phi_c/I, \quad (3.87)$$

$\Phi_c$  — магнитный поток контура тока,  $I$  — сила тока.

Если относительная магнитная проницаемость постоянна и контур не деформируется, то индуктивность  $L$  не зависит от тока; тогда ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_c = -L dI/dt$ , (3.88)  
 $dI/dt$  — изменение тока в контуре.

Ток при замыкании и размыкании цепи

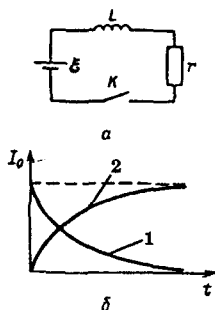


Рис. 3.48

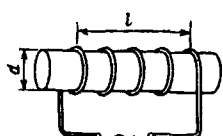
При размыкании цепи с последовательно включенными резистором (сопротивлением  $r$ ) и катушкой (индуктивностью  $L$ ) сила тока  $I = I_0 e^{-rt/L}$ , (3.89)

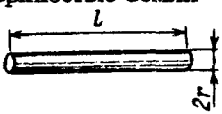
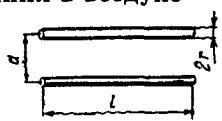
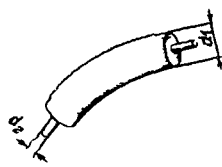
$I_0$  — сила тока в момент размыкания. При замыкании цепи сила тока  $I = I_0(1 - e^{-rt/L})$ , (3.90)

$I_0$  — предельное значение силы тока (при  $t \rightarrow \infty$ ).

На рис. 3.48 кривая 1 соответствует току при размыкании цепи, кривая 2 — току при замыкании цепи.

## 11. Индуктивности различных проводников

Форма проводника	Индуктивность										
Соленоид с сердечником	$L = k\mu_0\mu N^2 S/l,$ (3.91) $N$ — количество витков, $l$ — длина соленоида, $k$ — коэффициент, зависящий от отношения $l/d$ ( $d$ — диаметр катушки); $\mu$ — относительная магнитная проницаемость сердечника										
	<table><tr><td><math>l/d</math></td><td>0,1</td><td>0,5</td><td>5</td><td>10</td></tr><tr><td><math>k</math></td><td>0,2</td><td>0,5</td><td>0,6</td><td>1,0</td></tr></table>	$l/d$	0,1	0,5	5	10	$k$	0,2	0,5	0,6	1,0
$l/d$	0,1	0,5	5	10							
$k$	0,2	0,5	0,6	1,0							

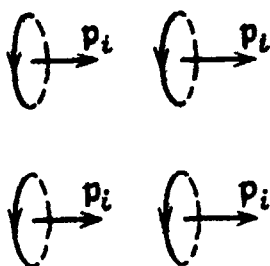
Форма проводника	Индуктивность
Одиночный прямой провод круглого сечения и небольшой длины из неферромагнитного материала ( $l/r < 10$ )	$L_{\text{пр}} = \mu_0 l \left( \ln \frac{2l}{r} - \frac{3}{4} \right) / (2\pi), \quad (3.92)$ <p><math>l</math> — длина провода, <math>r</math> — радиус сечения</p>
Длинный провод круглого сечения, расположенный на высоте $h$ горизонтально над поверхностью Земли 	$L_{\text{г}} = \mu_0 l \left( \ln \frac{2h}{r} - 1 \right) / (2\pi)$ <p>если <math>h \gg l</math>; <span style="float: right;">(3.92a)</span></p> $L_{\text{г}} = \mu_0 l \ln \frac{2h}{r} / (2\pi),$ <p>если <math>h &lt; l</math>, <span style="float: right;">(3.92б)</span></p> <p><math>l</math> — длина провода.</p>
Двухпроводная линия в воздухе 	$L_{\text{лин}} = \mu_0 l \left( \ln \frac{d}{r} + \frac{1}{4} \right) / \pi, \quad (3.93)$ <p><math>d</math> — расстояние между осями проводов, <math>r</math> — радиус провода, <math>l</math> — длина линии.</p>
Коаксиальный кабель 	$L_{\text{кк}} = \mu \mu_0 l \left( \ln \frac{d_1}{d_2} + \frac{1}{4} \right) / (2\pi), \quad (3.94)$ <p><math>d_1</math> — диаметр внешней проводящей оболочки, <math>d_2</math> — диаметр проводника, <math>l</math> — длина кабеля, <math>\mu</math> — относительная магнитная проницаемость среды между проводником и оболочкой.</p>

## 12. Намагничивание вещества

По магнитным свойствам все вещества разделяются на три вида: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.



## Намагниченность



Векторная величина, равная векторной сумме магнитных моментов в единичном объеме вещества.

Намагниченность

$$J = (\sum_i p_i) / (\Delta V) = n \langle p_m \rangle, \quad (3.95)$$

$n$  — концентрация молекул,  $\langle p_m \rangle$  — средний магнитный момент одной молекулы.

В изотропной среде намагниченность

$$J = \kappa H, \quad (3.96)$$

$\kappa$  — магнитная восприимчивость.

## Индукция магнитного поля в веществе

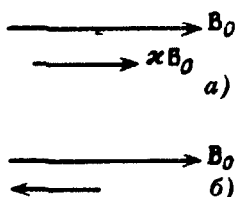


Рис. 3.50

Состоит из двух компонент

$$B_c = B_0 + \kappa B_0, \quad (3.97)$$

$B_0$  — индукция внешнего поля в вакууме;  $\kappa B_0$  — индукция собственного магнитного поля вещества  $B_c = (1 + \kappa) B_0 = \mu B_0$ , (3.98)

$\mu = 1 + \kappa$  — относительная магнитная проницаемость среды.

## Диамагнетики и парамагнетики

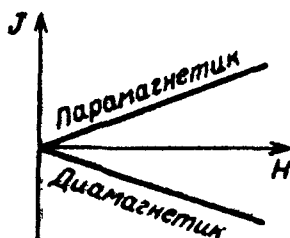


Рис. 3.51

В диамагнетиках (инертные газы, золото, цинк, серебро, медь, вода и т.д.) вектор магнитной индукции собственного магнитного поля направлен противоположно вектору магнитной индукции внешнего поля, относительная магнитная проницаемость  $\mu \leq 1$ ,  $\kappa < 0$  (рис. 3.50б). В парамагнетиках (азот, воздух, алюминий, платина и др.) вектор индукции

собственного магнитного поля имеет одинаковое направление с вектором магнитной индукции намагничивающего поля, относительная магнитная проницаемость  $\mu \geq 1$ ,  $\kappa > 0$  (рис. 3.50а). Зависимость  $J$  от  $H$  (кривая намагничивания) для парамагнетиков и диамагнетиков является линейной (рис. 3.51).

Магнитная восприимчивость диамагнетиков (и некоторых парамагнетиков, например, в щелочных металлах) не зависит от температуры. Магнитная восприимчивость парамагнетиков (за немногими исключениями) изменяется обратно пропорционально температуре  $T$ .

## Ферромагнетики

В ферромагнетиках (железо, никель, кобальт, некоторые сплавы) магнитная проницаемость  $\mu \gg 1$ ; она в значительной мере зависит от напряженности магнитного поля  $H$ . Зависимость  $B$  или  $J$  от  $H$  (при условии, что ферромагнетик в начальном состоянии был размагничен), называется основной кривой намагничивания (или начальной кривой намагничивания).

## Кривые намагничивания

На рис. 3.52 показаны основные кривые намагничивания на диаграмме  $J-H$  и  $B-H$ . Намагниченность  $J$  увеличивается с увеличением напряженности магнитного поля  $H$ , но уже при небольших значениях  $H=H_s$  достигается насыщение, т.е. при дальнейшем увеличении  $H > H_s$  намагничен-

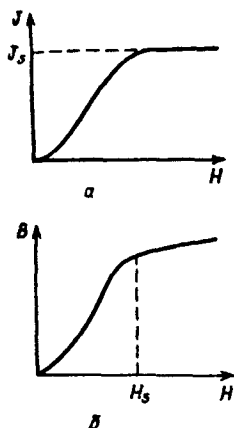


Рис. 3.52

Кривая гистерезиса

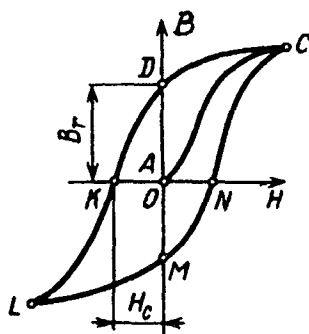


Рис. 3.53

ность имеет постоянное значение  $J_s$ , однако при этом магнитная индукция продолжает увеличиваться по линейному закону:  $B = \mu_0 H + \mu_0 J_s$ . Магнитная проницаемость 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.

Магнитная индукция, сохраняющаяся в ферромагнетике после того, как напряженность внешнего поля становится равной нулю, называется остаточной магнитной индукцией  $B_r$ . На рис. 3.53 остаточная индукция  $B_r$  равна отрезку  $AD$ . Чтобы размагнитить ферромагнетик, необходимо изменить на противоположное направление  $H$ . Изменение магнитной индукции в этом случае определяется кривой  $KL$ . Напряженность магнитного поля  $H_c$  (отрезок  $AK$  на рис. 3.53), при которой магнитная индукция равна нулю, называется *коэрцитивной напряженностью* (или *коэрцитивной силой*).

Зависимость  $B$  (или  $J$ ) при изменении напряженности магнитного поля от значения  $+H$  до  $-H$  выражается замкнутой кривой  $CDKLMNC$ . Такая кривая называется кривой гистерезиса (рис. 3.53).

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.

## 13. Уравнения Максвелла

Ток смещения

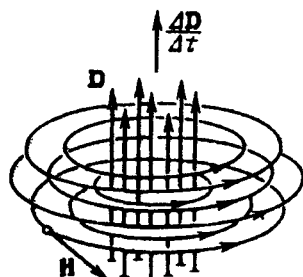


Рис. 3.54

Переменное электрическое поле (например, между обкладками конденсатора) возбуждает переменное магнитное поле; это магнитное поле эквивалентно магнитному полю, которое возбуждается переменным током проводимости, плотность которого

$$j = \Delta D / \Delta t = \epsilon_0 \Delta E / \Delta t + \Delta P / \Delta t, \quad (3.99)$$

$D$  — электрическое смещение,  $P$  — поляризованность (см. 3.10). Этот ток называется *током смещения*. Плотность тока смещения состоит из двух частей: плотности истинного тока смещения  $\epsilon_0 \Delta E / \Delta t$  и плотности тока поляризации  $\Delta P / \Delta t$ .

Плотность полного тока равна сумме плотностей токов проводимости и смещения:

$$j = j_{\text{пр}} + j_{\text{см}} \quad (3.100)$$

Первое уравнение

Является обобщением закона электромагнитной индукции:

$$\oint E_l dl = - \partial \Phi / \partial t \quad (3.101)$$

$L$

(см. гл. III п. 10).

$$\oint_L E_l dl = - \partial \Phi / \partial t$$

Качественно это уравнение можно интерпретировать следующим образом: переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.

Второе уравнение

Является обобщением закона Био—Савара—Лапласа (см. гл. III, п. 8) и гипотезы о токе смещения:

$$\oint H_l dl = I_{\text{пр}} + I_{\text{см}}, \quad (3.102)$$

$L$

$H_l$  — проекции вектора  $\mathbf{H}$  на касательную к контуру  $L$  в данной точке,  $dl$  — элемент контура,  $I_{\text{пр}}$ ,  $I_{\text{см}}$  — силы токов проводимости и смещения, которые охватываются контуром  $L$ .

Второе уравнение качественно можно интерпретировать следующим образом: магнитное поле порождается как токами проводимости, так и токами смещения, т.е. переменным электрическим полем.

Третье уравнение

$$\oint_S D_n dS = Q$$

Является обобщением закона Кулона — поток вектора  $\mathbf{D}$  через замкнутую поверхность  $S$ , охватывающую электрический заряд  $Q$ , равен этому заряду (теорема Гаусса — Остроградского):

$$\oint_S D_n dS = Q, \quad (3.103)$$

$S$

$D_n$  — проекция вектора  $\mathbf{D}$  на нормаль к элементу поверхности  $dS$ .

Четвертое уравнение

$$\oint_S B_n dS = 0$$

Является следствием того экспериментального факта, что линии магнитной индукции всегда замкнуты, следовательно, поток вектора  $\mathbf{B}$  через любую замкнутую поверхность равен нулю:

$$\oint_S B_n dS = 0, \quad (3.104)$$

$B_n$  — проекция вектора  $\mathbf{B}$  на направление нормали к элементу поверхности  $dS$ .

Материальные уравнения  
изотропной среды

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}, \\ \mathbf{B} &= \mu_0 \mu \mathbf{H}, \\ \mathbf{j} &= \gamma \mathbf{E}. \end{aligned} \quad (3.105)$$

Последнее уравнение является обобщением закона Ома для токов проводимости;  $\mathbf{j}$  — плотность тока,  $\gamma$  — удельная проводимость.

## 14. Переменный электрический ток

Мгновенное значение

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta Q / \Delta t) = dQ / dt = i, \quad (3.106)$$

$\Delta Q$  — заряд, проходящий за промежуток времени  $\Delta t$ .

Сила переменного  
синусоидального тока  
и переменное напряжение

$$i = I_0 \sin(\omega t + \varphi_1), \quad (3.107)$$

$$u = U_0 \sin(\omega t + \varphi_2), \quad (3.108)$$

$I_0, U_0$  — амплитудные значения  
тока и напряжения,  $\varphi_1, \varphi_2$  —  
начальные фазы.

Действующее или  
эффективное значение  
силы тока

Значение постоянного тока, ко-  
торый на том же самом резисторе  
развивает такую мощность, что и  
переменный ток.

Для гармонических токов дейст-  
вующие значения тока и напря-  
жения

$$I = I_0 / \sqrt{2}, \quad U = U_0 / \sqrt{2},$$

$I_0, U_0$  — амплитуды тока и на-  
пряжения.

Средняя мощность  
переменного  
гармонического тока

$$P = UI \cos \varphi = \frac{1}{2} U_0 I_0 \cos \varphi, \quad (3.109)$$

$\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1)$  — разность фаз,  $\cos$   
 $\varphi$  — коэффициент мощности.

Фазовые диаграммы

Гармонические переменные токи  
и напряжения представляются  
фазовыми диаграммами; на этих  
диаграммах изображаются ам-  
плитуды  $I_0$  и  $U_0$  ориентирован-  
ными отрезками (аналогично изо-  
бражению векторов, хотя  $I_0$  и  $U_0$   
не являются векторными вели-  
чинами!); длины отрезков соот-

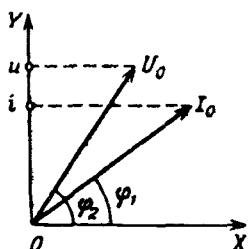


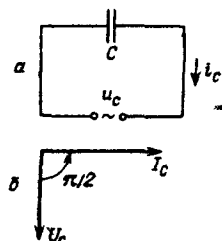
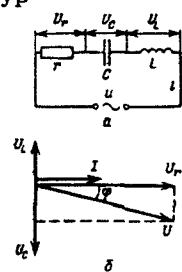
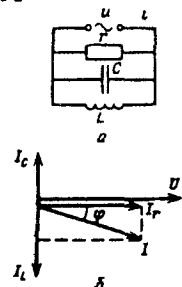
Рис. 3.55

ветствуют амплитудам, углы с осью  $OX$  равны начальным фазам  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  (см. рис. 3.55). Предполагается, что ориентированные отрезки вращаются против часовой стрелки с угловой скоростью  $\omega$ , которая равна угловой частоте изменения переменного тока. Мгновенные значения  $i$  и  $u$  будут равны проекциям  $I_0$  и  $U_0$  на координатную ось.

## 15. Основные формулы расчета цепей переменного тока

Схема цепи и фазовая диаграмма	Сопротивление	Графики тока и напряжения, разность фаз между $i$ и $u$
<p><i>a</i></p> <p><i>b</i></p>	$r = U_r / I_r \quad (3.110)$ <p>— активное сопротивление</p>	$\varphi = 0$
<p><i>a</i></p> <p><i>b</i></p>	$r_L = \frac{U_L}{I_L} = \omega L \quad (3.111)$ <p>— индуктивное сопротивление</p>	$\varphi = -\pi/2$



<p>Схема цепи и фазовая диаграмма</p>	<p>Сопротивление</p>	<p>Графики тока и напряжения, разность фаз между <math>i</math> и <math>u</math></p>
	$r_c = \frac{U_c}{I_c} = \frac{1}{\omega C} \quad (3.112)$ <p>— емкостное сопротивление</p>	<p><math>\varphi = +\pi/2</math></p> 
<p>Последовательный контур</p> 	$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{r^2 + (r_L - r_c)^2} \quad (3.113)$ <p>В резонансе <math>r_L = r_c</math>; <math>Z</math> имеет минимальное значение</p>	<p><math>\tan \varphi = (r_L - r_c)/r</math>;  <math>\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 &gt; 0</math>, если <math>r_L &gt; r_c</math>;  <math>\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 &lt; 0</math>, если <math>r_L &lt; r_c</math>.          Фазовая диаграмма на рисунке относится ко второму случаю.          При резонансе <math>\varphi = 0</math>.</p>
<p>Параллельный контур</p> 	$\frac{1}{Z^2} = \frac{I^2}{U^2} = \frac{1}{r^2} + \left(\frac{1}{r_L} - \frac{1}{r_c}\right)^2 \quad (3.114)$ <p>В резонансе <math>r_L = r_c</math>; <math>Z</math> имеет максимальное значение.</p>	<p><math>\tan \varphi = r \left(\frac{1}{r_L} - \frac{1}{r_c}\right)</math>.          При резонансе <math>\varphi = 0</math></p>

Примечание. Амплитудные значения переменных напряжений и токов обозначены соответственно:  $u_r-U_r$ ,  $i_r-I_r$ ,  $u_L-U_L$ ,  $i_L-I_L$ ,  $u_c-U_c$ ,  $i_c-I_c$ ,  $u-U$ ,  $i-I$ .

## 16. Электрические колебания и электромагнитные волны

### Электрические колебания

#### Колебательный контур

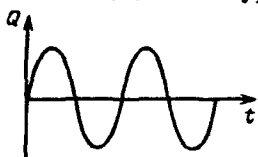


Рис. 3.56

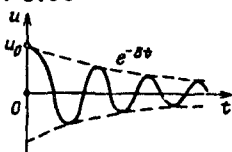


Рис. 3.57

Ограниченные изменения электрических величин (заряда, силы тока, напряжения), повторяющиеся полностью или частично, относительно какого-либо среднего значения. Переменный электрический ток является одним из видов электрических колебаний.

Замкнутая электрическая цепь, состоящая из катушки индуктивностью  $L$  и конденсатора емкостью  $C$ .

Угловая частота колебаний

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC} \quad (3.115)$$

(без затуханий, см. рис. 3.56);

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad (3.116)$$

(затухающие колебания, см. рис. 3.57);

$$\delta = r/(2L).$$

$$\text{Период колебаний } T = 2\pi\sqrt{LC}$$

### Электромагнитные поле и волны

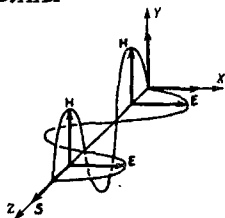


Рис. 3.58

Совокупность переменных электрических и магнитных полей, которые неразрывно связаны друг с другом, называется *электромагнитным полем*. Электромагнитная волна — это распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле. Векторы напряженнос-

тей электрического и магнитного полей ( $E$  и  $H$ ) в электромагнитной волне, распространяющейся в неограниченном пространстве, перпендикулярны друг другу, а направление распространения перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы  $E$  и  $H$  (рис. 3.58).

### Уравнение плоской гармонической волны

$$E = E_0 \cos(\omega t - kz),$$

$$H = H_0 \cos(\omega t - kz),$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{— волновое число, } \lambda \text{ —}$$

длина волны,  $\omega$  — угловая частота, волна распространяется вдоль положительного направления оси  $OZ$ ,  $E_0$  и  $H_0$  — амплитуды  $E$  и  $H$ .

### Скорость электромагнитных волн в вакууме

$2,997925 \cdot 10^8 \text{ м/с}$

$$c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Скорость  $c$  не зависит от длины волны. Скорость электромагнитных волн в других средах меньше скорости в вакууме

$$c_1 = c/n, \quad (3.117)$$

$n$  — показатель преломления среды (см. гл. IV).

### Вектор Пойнтинга



Рис. 3.59

Модуль  $|S|$  этого вектора равен энергии, переносимой электромагнитными волнами за время 1 с через плоскость площадью  $1 \text{ м}^2$ , расположенную перпендикулярно направлению распространения

$$\mathbf{S}=[\mathbf{E}\mathbf{H}]$$

$$\mathbf{S}=[\mathbf{E}\mathbf{H}]. \quad (3.118)$$

Направление вектора  $\mathbf{S}$  совпадает с направлением распространения волны в изотропной среде (рис. 3.59).

### Излучение электромагнитных волн

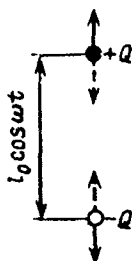


Рис. 3.60

Заряженные частицы, движущиеся с ускорением, излучают электромагнитные волны.

Средний поток электромагнитных волн, излучаемых диполем, электрический момент  $p$  которого изменяется по гармоническому закону  $Q_0 l_0 \cos \omega t$  (вследствие изменения зарядов  $Q$  или изменения расстояния  $l$  между ними) (рис. 3.60):

$$\Phi_{\text{ср}} = Q_0^2 l_0^2 \omega^4 / (12\pi \epsilon_0 c^3), \quad (3.119)$$

$Q_0 l_0 = p_0$  — амплитуда колебаний  $p$ ,  
 $Q_0$  — амплитуда колебаний  $Q$ ,  
 $l_0$  — амплитуда колебаний  $l$ ,  
 $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  
 $\omega$  — угловая частота,  $c$  — скорость света в вакууме.

### Антенны

Излучателем электромагнитных волн являются проводники с переменными токами. Наиболее эффективно излучение происходит тогда, когда размеры излучателя сравнимы с длиной волны излучения. Проводники, эффективно излучающие (или принимающие) электромагнитные волны, называются *антеннами*. Линейным элементом тока  $i\Delta l$ , в котором сила тока изменяется по гармоническому закону

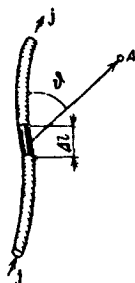


Рис. 3.61

$i = I_0 \cos \omega t$ , излучаются электромагнитные волны, в которых напряженности электрического и магнитного полей равны соответственно:

$$E = \frac{1}{2c\lambda r \epsilon_0} I_0 \Delta l \sin \vartheta \cos(\omega t - kr),$$

$$H = \frac{1}{2\lambda r} I_0 \Delta l \sin \vartheta \cos(\omega t - kr),$$

(3.120)

$\vartheta$  — угол между прямой, соединяющей линейный элемент тока с точкой наблюдения и направлением вектора плотности тока  $\mathbf{j}$ ,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $\lambda$  — длина волны,  $r$  — расстояние между элементом тока и точкой A, в которой определяются напряженности, причем  $r \gg \lambda$ ,  $\Delta l \ll r$  (рис. 3.61),  $c$  — скорость света.

# ОПТИКА

Оптическое излучение (свет) — электромагнитное излучение с длинами волн от 1 нм до 1 см. Излучение с длинами волн от 400 нм до 800 нм называется видимым.

## 1. Фотометрические величины

Энергетические величины	Световые величины
<p><i>Энергетический поток</i> — энергия, переносимая волнами за время 1 с</p> <p><math>\Phi_e = \Delta W / \Delta t.</math> (4.1) Единица — ватт, Вт</p>	<p><i>Световой поток</i> — энергетический поток, который оценивается по зрительному воздействию на глаз человека:</p> <p><math>\Delta \Phi = I \Delta \Omega,</math> (4.1a) <math>I</math> — сила света (см. (4.3a)), <math>\Delta \Omega</math> — телесный угол. Единица — люмен, лм. 1 люмен равен световому потоку монохроматического излучения с длиной волны 555 нм, энергетический поток которого равен 1/683 ватта.</p>
<p><i>Энергетическая освещенность</i> — отношение энергетического потока <math>\Delta \Phi</math>, к площади <math>\Delta S</math> облучаемой им поверхности:</p> <p><math>E = \Delta \Phi_e / \Delta S.</math> (4.2) Единица — ватт на квадратный метр, Вт/м<sup>2</sup></p>	<p><i>Освещенность</i> — отношение светового потока <math>\Delta \Phi</math> к площади <math>\Delta S</math> облучаемой им поверхности:</p> <p><math>E = \Delta \Phi / \Delta S.</math> (4.2a) Единица — люкс, лк</p>

Энергетические величины	Световые величины
<p><i>Энергетическая сила света</i> — отношение энергетического потока <math>\Delta\Phi_0</math> к телесному углу <math>\Delta\Omega</math>, в котором распределено это излучение:</p> $I_0 = \Delta\Phi_0 / \Delta\Omega. \quad (4.3)$ <p>Единица — ватт на стерadian, Вт/ср</p>	<p><i>Сила света</i> — отношение светового потока <math>\Delta\Phi</math> к телесному углу <math>\Delta\Omega</math>:</p> $I = \Delta\Phi / \Delta\Omega. \quad (4.3a)$ <p>Единица — кандела, кд (одна из основных единиц СИ)</p>
<p><i>Энергетическая светимость</i> — отношение энергетического потока <math>\Delta\Phi_0</math> к площади излучающей поверхности источника <math>\Delta S_{\text{и}}</math>:</p> $R_0 = \Delta\Phi_0 / \Delta S_{\text{и}}. \quad (4.4)$	<p><i>Светимость</i> — отношение светового потока <math>\Delta\Phi</math> к площади излучающей поверхности <math>\Delta S_{\text{и}}</math>:</p> $R = \Delta\Phi / \Delta S_{\text{и}}. \quad (4.4a)$
<p><i>Энергетическая яркость</i> — отношение энергетической силы света <math>\Delta I_0</math> к проекции излучающей поверхности источника <math>\Delta S_{\text{и}} \cos\varphi</math> на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения:</p> $B_0 = \Delta I_0 / (\Delta S_{\text{и}} \cos\varphi), \quad (4.5)$	<p><i>Яркость</i> — отношение силы света <math>\Delta I</math> к площади проекции излучающей поверхности источника <math>\Delta S_{\text{и}} \cos\varphi</math> на плоскость, перпендикулярную направлению, по которому определяется яркость:</p> $B = \Delta I / (\Delta S_{\text{и}} \cos\varphi). \quad (4.5a)$
<p><math>\varphi</math> — угол между нормалью к излучающей поверхности <math>\Delta S_{\text{и}}</math> и направлением, по которому определяется яркость.</p>	

Примечание. Освещенность, создаваемая точечным источником, рассчитывается по формуле  $E_r = I \cos\varphi / r^2$  ( $I$  — сила света,  $r$  — расстояние от источника до поверхности,  $\varphi'$  — угол между нормалью к облучаемой поверхности и направлением распространения волн).

## 2. Геометрическая оптика

### Луч (световой луч)

Геометрическая линия, вдоль которой распространяется энергия электромагнитных волн.

### Гомоцентрический пучок

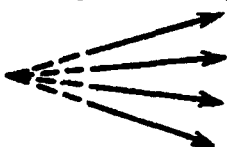


Рис. 4.1

Прямолинейные лучи (или их продолжение), пересекающиеся в одной точке; параллельные лучи относятся к гомоцентрическому пучку, центр которого находится в бесконечности.

### Параксиальные лучи

Лучи, составляющие малый угол с осью; параллельные лучи являются параксиальными, если проходят на малом расстоянии от оси.

### Условия применимости геометрической оптики

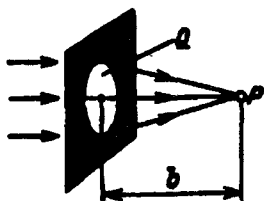


Рис. 4.2

Площадь волнового фронта  $Q$ , который ограничивается входным отверстием линзы, отверстием или другим препятствием, должна быть значительно больше произведения  $b\lambda$  ( $b$  — расстояние от линзы до точки наблюдения  $P$ ,  $\lambda$  — длина волны), т.е.  $Q \gg b\lambda$  (рис. 4.2).

### Закон отражения

Угол падения (отражения) — угол между нормалью в точке падения луча и направлением падающего (отраженного) луча.



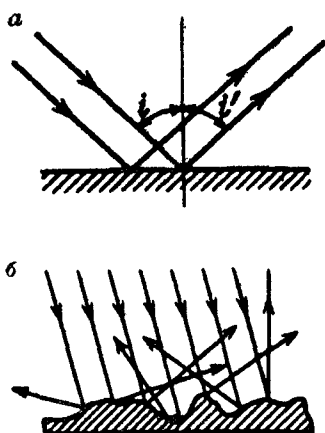


Рис. 4.3

$$i = i'$$

#### Закон преломления

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n$$

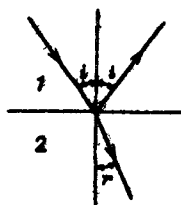


Рис. 4.4

При падении луча на границу раздела двух изотропных сред угол отражения  $i'$  равен углу падения  $i$ ; падающий и отраженный лучи и перпендикуляр к поверхности в точке падения лежат в одной плоскости (рис. 4.3а). В зависимости от свойств границы раздела различают два вида отражения света. Если поверхность раздела имеет неровности, размеры которых значительно меньше длины волны света, то происходит правильное (или зеркальное) отражение. В этом случае падающие параллельные лучи света после отражения остаются параллельными. Если неровности расположены на отражающей поверхности хаотично и имеют размеры, сравнимые с длиной волны, то происходит диффузное отражение (рис. 4.3б). При условии  $h \cos i \ll \lambda$  ( $h$  — размеры неровностей,  $i$  — угол падения лучей) будет зеркальное отражение.

Угол преломления — угол между перпендикуляром в точке падения и преломленным лучом. Отношение синуса угла падения  $i$  к синусу угла преломления  $r$  есть величина постоянная для данной длины волны и границы раздела сред; падающий и преломленный лучи и перпендикуляр к поверхности в точке падения лежат в одной плоскости (рис. 4.4). Величина  $n$  называется *относительным показателем*

преломления второй среды относительно первой:

$$n=c_1/c_2=\sin i/\sin r \quad (4.6)$$

( $c_1, c_2$  — скорости света в средах 1 и 2);  $n$  зависит от длины волны.

Оптически более плотная среда

Среда, в которой скорость света меньше, чем в другой среде, называется оптически более плотной.

Коэффициент отражения

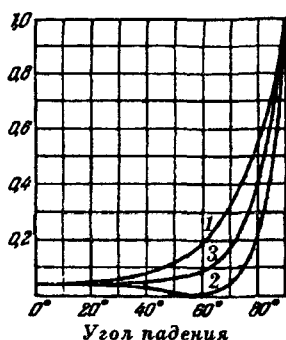


Рис. 4.5

Отношение амплитуды вектора  $E_0$  в отраженной волне к амплитуде  $E_{\parallel}$  падающей волны называется коэффициентом отражения (по амплитуде). Коэффициент отражения зависит от поляризации.

В однородной слабо поглощающей среде коэффициенты отражения

$$R_{\perp} = -\sin(i-r)/\sin(i+r),$$

$$R_{\parallel} = \operatorname{tg}(i-r)/\operatorname{tg}(i+r); \quad (4.7)$$

$R_{\perp}$  — коэффициент отражения волн, плоскость поляризации которых перпендикулярна плоскости падения (см. стр. 191);

$R_{\parallel}$  — коэффициент отражения волн, плоскость поляризации которых параллельна плоскости падения;  $i$  — угол падения;  $r$  — угол преломления.

Если значения  $R_{\perp}$  и  $R_{\parallel}$  отрицательны, то фазы колебаний векторов  $E$  в отраженной волне изменяются на  $\pi$ .

При отражении неполяризованных волн коэффициент отражения по энергии

$$R_0 = (R_{\perp}^2 + R_{\parallel}^2)/2, \quad (4.7a)$$

$R_0$  — отношение интенсивностей отраженной и падающей волн.

На рис. 4.5 приводятся зависимости коэффициента отражения видимого света от стекла ( $n=1,52$ ):  $R_{\perp}$  — кривая 1,  $R_{\parallel}$  — кривая 2,  $R_0$  — кривая 3.

Из формул Френеля следует, что при отражении от оптически более плотной среды линейно поляризованных волн, у которых векторы  $E_{\perp}$  перпендикулярны плоскости падения, фазы колебаний падающей и отраженной волн отличаются на  $\pi$  (фаза колебаний  $H$  не изменяется).

При отражении линейно поляризованных волн, у которых векторы  $E_{\parallel}$  параллельны плоскости падения, возможны два случая: а) если угол падения меньше угла Брюстера ( $\text{tg } i_B = n_2/n_1$ ), то фазы колебаний падающей и отраженной волн отличаются на  $\pi$ ; б) если угол падения больше угла Брюстера, то фазы колебаний падающих и отраженных волн одинаковы.

#### Полное отражение

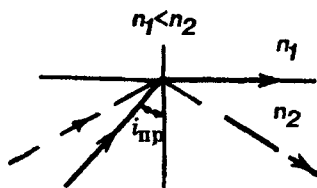


Рис. 4.6

При переходе из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную, луч света может полностью отражаться. Это явление называется полным отражением. Угол падения  $i_{пр}$ , начиная с которого электромагнитное излучение полностью от-

ражается от границы раздела, называется предельным углом полного отражения, который определяется из соотношения  $\sin i_{\text{пр}} = 1/n$  ( $n = c_1/c_2$ ,  $c_2$  — скорость света в оптически более плотной среде, рис. 4.6).

#### Ход лучей через призму

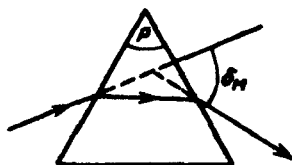


Рис. 4.7

Продолжения входящего и выходящего лучей образуют угол отклонения  $\delta$ .

Показатель преломления  $n$  стекла, из которого сделана призма, можно рассчитать по формуле (рис. 4.7):

$$n = \sin(\delta_M/2 + P/2) / \sin(P/2), \quad (4.8)$$

$\delta_M$  — наименьший угол отклонения,  $P$  — преломляющий угол призмы.

#### Линза

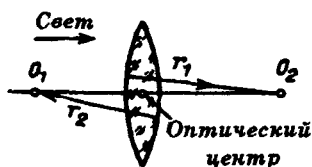


Рис. 4.8

Прозрачное тело, ограниченное с противоположных сторон криволинейными поверхностями (рис. 4.8); в частном случае одна из поверхностей может быть плоской. Линза называется тонкой, если ее толщина значительно меньше радиусов кривизны ее сферических поверхностей.

#### Главная оптическая ось

Прямая, проходящая через центры радиусов кривизны  $Q_1$ ,  $Q_2$  поверхностей; при наличии плоской поверхности оптическая ось проходит перпендикулярно этой поверхности.

Точка тонкой линзы, через которую лучи проходят без изменения направления

Фокусы, фокальные плоскости

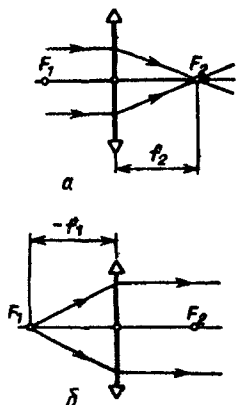


Рис. 4.9

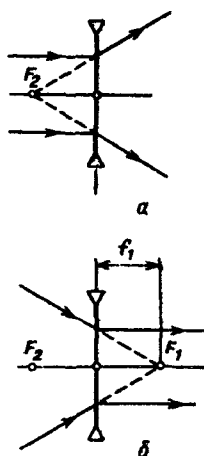


Рис. 4.10

Линза называется собирающей, если она преобразует параллельный пучок лучей в сходящийся; в противном случае линза называется рассеивающей. Точка  $F_2$  на главной оптической оси, в которой пересекаются параксиальные лучи, параллельные главной оптической оси собирающей линзы, называется задним фокусом (рис. 4.9). В рассеивающей линзе параксиальный пучок лучей, параллельный главной оптической оси, преобразуется в расходящийся пучок; продолжения этих лучей пересекаются в точке, лежащей на главной оптической оси; эта точка  $F_2$  называется задним фокусом рассеивающей линзы (рис. 4.10).

Расстояние от оптического центра тонкой линзы до фокуса называется фокусным расстоянием.

Плоскости, проходящие через фокусы перпендикулярно оптической оси, называются фокальными плоскостями.

У линзы имеется два фокуса (рис. 4.9, 4.10): передний фокус  $F_1$  и задний фокус  $F_2$ . Если среды по обе стороны линзы одинаковы, то модули фокусных расстояний равны.

Формула тонкой линзы  
(для параксиальных лучей)

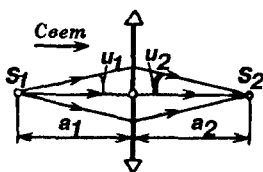


Рис. 4.11

Если точечный источник света поместить на главной оптической оси на расстоянии  $a_1$  от линзы, то на расстоянии  $a_2$  получится его изображение (рис. 4.11). Величины  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $f$  связаны соотношением

$$-\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

(4.9)

$f$  — второе фокусное расстояние,  $r_1$ ,  $r_2$  — радиусы кривизны поверхностей,  $n$  — относительный показатель преломления стекла.

Правило знаков

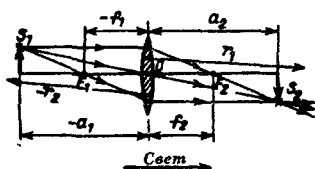


Рис. 4.12

При расчетах значения  $a_1$  и  $a_2$  подставляются со знаком плюс, если направления их отсчета от оптического центра линзы совпадают с направлением распространения света; значения  $r_1$  и  $r_2$  также подставляются со знаком плюс, если их направления отсчета от вершин сферических поверхностей совпадают с направлением распространения света; в противном случае значения  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  подставляются со знаком минус. Радиус кривизны  $r_1$  относится к той поверхности линзы, которая первой пересекается лучом; значения  $f$  собирающей линзы подставляются со знаком плюс, рассеивающей — со знаком минус (рис. 4.12).

## Оптическая сила сферической границы

Оптическая сила сферической границы раздела двух сред  

$$\Phi = (n_2 - n_1)/r, \quad (4.10)$$

$n_1$  — показатель преломления той среды, которую луч проходит первой,  $n_2$  — показатель преломления второй среды,  $r$  — радиус кривизны.

## Оптическая сила линзы в воздухе

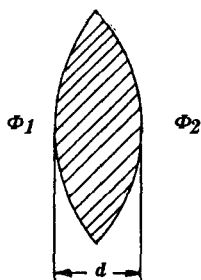


Рис. 4.13

$$\Phi_{\text{л}} = \Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2/n, \quad (4.11)$$

$\Phi_1, \Phi_2$  — оптические силы сферических поверхностей линзы,  $d$  — ее толщина,  $n$  — показатель преломления стекла. Оптическая сила собирающей линзы положительна, рассеивающей — отрицательна.

Единица оптической силы — диоптрия (дптр), 1 дптр — это оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м.

## Оптическая сила тонкой линзы

$$\Phi_{\text{тл}} = \Phi_1 + \Phi_2. \quad (4.12)$$

Оптическая сила двух тонких линз равна сумме их оптических сил, при условии, что  $d \ll |f|$ ,  $d$  — расстояние между оптическими центрами линз,  $|f|$  — модуль наименьшего фокусного расстояния одной из линз.

## 3. Оптические приборы

### Глаз

Глаз рассматривается как оптическая система. На рис. 4.14 представлен горизонтальный разрез

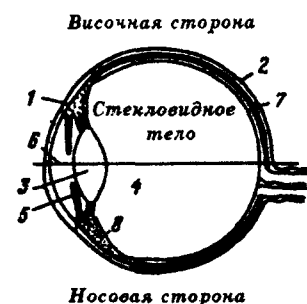


Рис. 4.14

глазного яблока. Впереди находится прозрачная оболочка — роговица 1, образующая почти сферическую поверхность. По краям роговица переходит в склеру 2 (белок глаза), которая покрывает остальную поверхность глазного яблока. Пространство между хрусталиком 3 и роговицей заполнено средой, состоящей из 99% воды, остальное — соли, белки. За хрусталиком находится стекловидное тело 4, состоящее в основном из воды. Форма глазного яблока почти сферическая с радиусом кривизны около 12 мм. Имеется радужная оболочка 5 с отверстием 6 (зрачком); диаметр зрачка изменяется от 2 до 8 мм. На противоположной стороне от зрачка расположена сетчатка 7, где находятся светочувствительные рецепторы — палочки и колбочки (около  $1,2 \cdot 10^8$  палочек,  $7 \cdot 10^6$  колбочек). Колбочки реагируют на дневное зрение, палочки обеспечивают сумеречное зрение. Можно считать, что оптический центр расположен вблизи роговицы, фокусные расстояния  $f_1=17$  мм,  $f_2=23$  мм. Оптическая сила глаза равна приблизительно 58 дптр. Кривизна поверхности хрусталика может изменяться мышцами 8 глаза, вследствие чего изменяется и оптическая сила: в молодом возрасте изменения могут осуществляться в пределах 10 дптр, в старческом возрасте около 2 дптр.



Изменение оптической силы глаза позволяет получать на сетчатке изображения предметов, расположенных на различных расстояниях от глаза.

### Угол зрения

Угол, образованный лучами, которые проходят через крайние точки предмета (или его изображения) и оптический центр глаза.

### Видимое увеличение

Видимое увеличение оптического прибора

$$\Gamma = \operatorname{tg} \varphi_2 / \operatorname{tg} \varphi_1, \quad (4.13)$$

$\varphi_2$  — угол зрения при наблюдении предмета через прибор,  $\varphi_1$  — угол зрения при наблюдении предмета невооруженным глазом, который должен быть расположен на расстоянии: а) 25 см от глаза, если видимое увеличение определяется для лупы или микроскопа; б) при расчете видимого увеличения зрительных труб угол зрения определяется для расстояния, на котором находится предмет от оптического прибора.

### Линейное увеличение

Отношение поперечного размера изображения к поперечному размеру предмета.

Это увеличение иначе называется поперечным.

### Угловое увеличение

Отношение тангенса угла  $u_2$  в пространстве изображений к тан-

генсу  $u_1$  в пространстве предметов (рис. 4.11).

## Объектив и окуляр

В оптическом приборе линза, обращенная к предмету (объекту), называется *объективом*, линза, обращенная к глазу, называется *окуляр*. В большинстве случаев объективы и окуляры приборов состоят из нескольких линз; этим частично устраняются погрешности в изображениях.

### Лупа

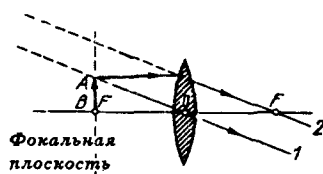


Рис. 4.15

Ход лучей показан на рис. 4.15.

Видимое увеличение лупы

$$\Gamma_{\text{л}} = 250/f, \quad (4.14)$$

$f$  — фокусное расстояние лупы (мм); при длительном наблюдении предмет  $AB$  размещается в фокальной плоскости.

### Микроскоп

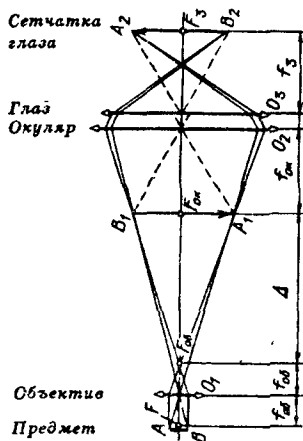


Рис. 4.16

Ход лучей показан на рис. 4.16; предмет  $AB$  расположен вблизи фокальной плоскости объектива. Видимое увеличение микроскопа

$$\Gamma_{\text{м}} = 250\Delta/(f_{\text{об}}f_{\text{ок}}), \quad (4.15)$$

$f_{\text{об}}$ ,  $f_{\text{ок}}$  — фокусные расстояния объектива и окуляра (мм);  $f_{\text{з}}$  — фокусное расстояние глаза;  $\Delta$  — оптический интервал микроскопа, расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра (мм) (рис. 4.16).

## Зрительная труба

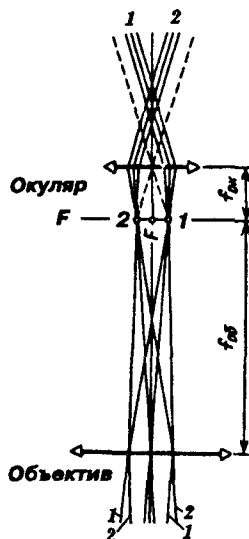


Рис. 4.17

Ход лучей в зрительной трубе, установленной на бесконечность, показан на рис. 4.17.

Лучи 111 выходят из бесконечно удаленной точки предмета, расположенной слева от оптической оси, лучи 222 выходят из точки, расположенной справа от оптической оси. Видимое увеличение зрительной трубы

$$\Gamma_{\text{тр}} = f_{\text{об}} / f_{\text{ок}}, \quad (4.16)$$

$f_{\text{об}}$ ,  $f_{\text{ок}}$  — фокусные расстояния объектива и окуляра.

В фокальной плоскости  $F$  получается изображение предмета (точки 1 и 2).

## 4. Волновая оптика

### Интерференция

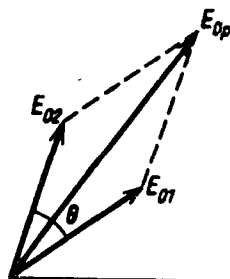


Рис. 4.18

Сложение двух (или нескольких) волн с одинаковыми периодами, в результате которого в одних точках пространства происходит увеличение, а в других — уменьшение амплитуды результирующей волны.

При взаимодействии двух волн

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega t - k_1 z_1 + \varphi_1),$$

$$E_2 = E_{02} \cos(\omega t - k_2 z_2 + \varphi_2),$$

имеющих одинаковые направления векторов  $E$ , результирующая

щую амплитуду  $E_{0p}$  можно рассчитать по фазовой диаграмме (см. гл. III, п. 14), представленной на рис. 4.18:

$$E_{0p}^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \theta, \quad (4.17)$$

$E_{01}$ ,  $E_{02}$  — амплитуды волн, разность фаз

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_2 z_2 - n_1 z_1) + \varphi_2 - \varphi_1, \quad (4.18)$$

$\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  — начальные фазы,  $z_1$ ,  $z_2$  — расстояния, которые проходят волны в средах с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ ,  $2\pi n_1/\lambda = k_1$ ,  $2\pi n_2/\lambda = k_2$ ,  $\lambda$  — длина волны в вакууме.

### Оптическая длина пути

Произведение длины пути  $z$ , пройденного волной, и показателя преломления среды  $n$ , т.е.  $zn$ .

### Разность хода волн

Разность оптических длин путей:  
 $\Delta = n_2 z_2 - n_1 z_1. \quad (4.19)$

### Интенсивность

Величина, равная среднему значению модуля вектора Пойнтинга (см. гл. III, п. 16).

Интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды  $E_0$  (или  $H_0$ ):  
 $I \sim E_0^2 \sim H_0^2.$

### Некогерентные волны

Волны, у которых разность фаз изменяется хаотически; в этом случае среднее значение

$$\langle \cos \theta \rangle = 0, \\ E_{0p}^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2,$$

результатирующая интенсивность  $I_p = I_1 + I_2$ , т.е. интенсивности  $I_1$  и  $I_2$  суммируются, а интерференция отсутствует.

### Когерентные волны

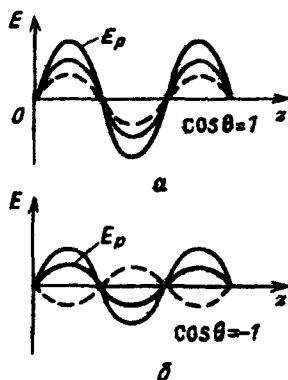


Рис. 4.19

Волны, у которых разность фаз в данной точке не изменяется во времени (или меняется незначительно). Интерференция наблюдается в тех случаях, когда волны являются когерентными. При наличии постоянной разности фаз рассмотрим два предельных случая, соответствующие максимумам и минимумам интенсивности (рис. 4.19).

а) Когда  $\cos \theta = +1$ ,

$$I_p = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}.$$

В этом случае интенсивность увеличивается.

б) Если  $\cos \theta = -1$ , то интенсивность уменьшается:

$$I'_p = I_1 + I_2 - \sqrt{I_1 I_2}.$$

### Условия когерентности

В реальных условиях интерференция наблюдается при наличии двух условий:

$$l \ll \frac{\lambda}{2 n \sin u}, \quad \Delta \lambda \ll \frac{\lambda}{m}; \quad (4.20)$$

$l$  — линейные размеры источника,  $\lambda$  — длина волны,  $2u$  — угол между крайними лучами, выходящими из одной точки источника,  $\Delta \lambda$  — интервал длин волн немонахроматического излучения,

$m = \delta / \lambda$  — порядок интерференции,  $\delta$  — разность хода волн.

Получение когерентных волн при освещении плоскопараллельной пластинки

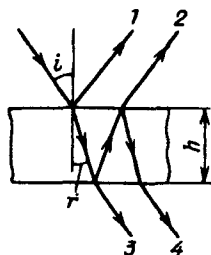


Рис. 4.20

При освещении плоскопараллельной пластинки (рис. 4.20) происходит интерференция волн 1, 2 (в отраженном свете), а также волн 3, 4 (в проходящем свете).

В этом случае разность хода волн 1 и 2, а также волн 3 и 4

$$\Delta = 2hn \cos r.$$

Разность фаз у отраженных волн 1 и 2 (для векторов  $\mathbf{E}$ )

$$\theta_{12} = 4\pi nh \cos r / \lambda + \pi; \quad (4.21)$$

разность фаз у проходящих волн 3 и 4 (а также для векторов  $\mathbf{E}$ )

$$\theta_{34} = 4\pi nh \cos r / \lambda + 2\pi; \quad (4.22)$$

$h$  — толщина пластинки,  $r$  — угол преломления,  $n$  — показатель преломления материала, из которого изготовлена пластинка,  $\lambda$  — длина волны в вакууме.

Изменения начальных фаз векторов  $\mathbf{E}$  при отражении от оптически более плотных сред учтено в (4.21) и (4.22) введением  $\pi$  и  $2\pi$ .

## Дифракция

Изменение направления распространения электромагнитных волн, когда они проходят вблизи краев экранов, отверстий или других неоднородностей; при

этом искажается их волновой фронт.

### Дифракция на щели

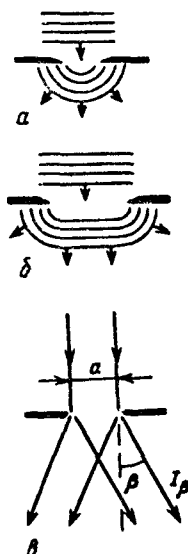


Рис. 4.21

Искажение фронта плоской волны при дифракции на узкой (а) и широкой (б) щели показано на рис. 4.21. При дифракции плоских волн, падающих нормально на узкую длинную щель, интенсивность  $I_\beta$  волн, распространяющихся под углом дифракции  $\beta$ , определяется следующим соотношением:

$$I_\beta = I_0 \left( \frac{\sin \left( \frac{1}{2} k a \sin \beta \right)}{\frac{1}{2} k a \sin \beta} \right)^2, \quad (4.23)$$

$k=2\pi/\lambda$ ,  $a$  — ширина щели,  $I_0$  — интенсивность волн, которые распространяются в первоначальном направлении после прохождения через щель.

### Главные минимумы

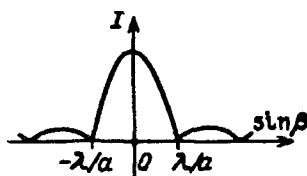


Рис. 4.22

Направления, в которых интенсивность дифрагированных волн на щели равна нулю (рис. 4.22). При нормальном падении волн главные минимумы определяются соотношением

$$a \sin \beta_{\text{мин}} = m \lambda \quad (m=\pm 1, \pm 2, \dots). \quad (4.24)$$

### Дифракционная решетка

Представляет собой в идеальном случае большое количество узких параллельных щелей, имеющих одинаковую ширину  $a$



Рис. 4.23

### Главные максимумы

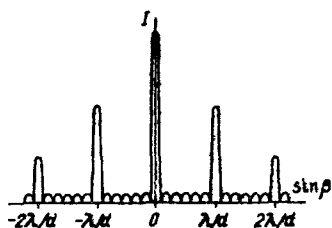


Рис. 4.24

и одинаковые промежутки между ними  $b$  (рис. 4.23). Расстояние  $d=a+b$  называется *постоянной* (или *периодом*) решетки.

Направления, в которых наблюдается максимальная интенсивность дифрагированных волн (рис. 4.24).

При нормальном падении волн на дифракционную решетку главные максимумы определяются соотношением

$$d \sin \beta_{\text{макс}} = m\lambda$$

$$(m=0, \pm 1, \pm 2, \dots), \quad (4.25)$$

$d$  — период решетки.

### Дополнительные минимумы

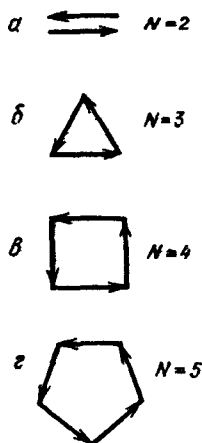


Рис. 4.25

Направления, в которых дифрагированные волны, проходящие через все щели решетки, гасят друг друга. При нормальном падении волн на решетку дополнительные минимумы определяются соотношением

$$d \sin \beta_{\text{дм}} = m'/N\lambda, \quad (4.26)$$

$N$  — число щелей в решетке,  $m'=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, N-1, N+1, \dots$ . Значения  $m'$ , кратные  $N$ , исключаются из ряда целых чисел.

На рис. 4.25 приведены фазовые диаграммы, соответствующие дополнительным минимумам для двух, трех, четырех и пяти щелей.



## Линейный предел разрешения

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 *линейным пределом разрешения* оптического прибора. Для микроскопа линейный предел разрешения

$$l_p \geq \lambda / (2n \sin u), \quad (4.27)$$

$u$  — апертурный угол (половина угла между крайними лучами, падающими от точки предмета на объектив и достигающими глаза наблюдателя или экрана),  $n$  — показатель преломления среды.

## Дисперсия

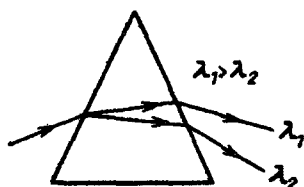


Рис. 4.26

Зависимость скорости света (или показателя преломления) в среде от длины волны (частоты). Вследствие дисперсии после преломления параллельного пучка белого света стеклянной призмой волны различной длины распространяются по различным направлениям: волны с меньшей длиной отклоняются к основанию призмы на больший угол по сравнению с волнами, имеющими большую длину (рис. 4.26).

## Поляризация света

Плоскостью поляризации (рис. 4.27) называется плоскость, в которой лежат векторы  $E$  и  $S$  ( $S$  —

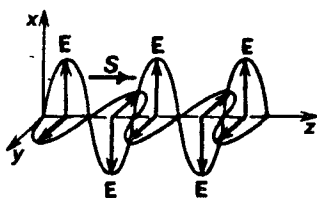


Рис. 4.27

### Поляризация при отражении

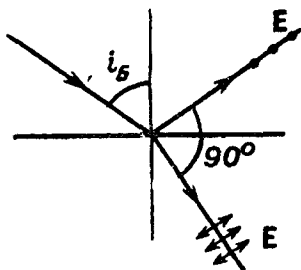


Рис. 4.28

вектор Пойнтинга, см. гл. III, п. 16). Если плоскость поляризации волны не изменяет своего положения в пространстве, то такая волна называется линейно поляризованной.

Свет, в котором положение плоскости поляризации изменяется хаотически, называется естественным.

Естественный свет при отражении от поверхности диэлектриков частично поляризуется. Отраженный свет становится полностью поляризованным при угле падения, определяемом соотношением

$$\operatorname{tg} i_B = n \quad (4.28)$$

( $n$  — относительный показатель преломления второй среды), при этом плоскость поляризации перпендикулярна плоскости падения (рис. 4.28). Угол  $i_B$  называется *углом Брюстера*. Проходящий через диэлектрик свет частично поляризован, при этом преимущественные направления векторов  $E$  параллельны плоскости падения.

Устройства, которые преобразуют естественный свет в поляризованный, называются *поляризаторами*. При отражении от металлов свет не поляризуется.

### Двойное лучепреломление

В некоторых монокристаллах (например, кварц, исландский шпат, слюда, гипс) естественный свет

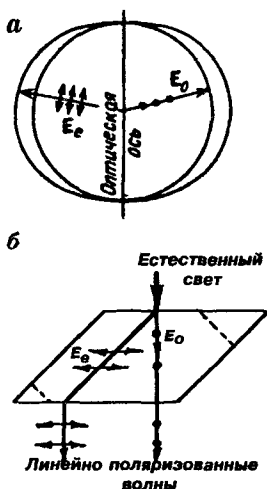


Рис. 4.29

разделяется на две линейно поляризованные в различных плоскостях волны, которые распространяются с различными скоростями. Это явление называется *двойным лучепреломлением*.

На рис. 4.29б естественный свет в кристалле исландского шпата разделяется на две линейно поляризованных волны. Штриховыми линиями указаны оптические оси. В одноосных кристаллах (типа кварца) имеется одно направление, в котором не наблюдается двойного лучепреломления. Это направление называется оптической осью. Волна, в которой вектор  $E_0$  перпендикулярен оптической оси кристалла, называется *обыкновенной*; ее скорость по различным направлениям в кристалле одинакова. Вторая волна, у которой направление вектора  $E_e$  составляют различные углы с оптической осью (в зависимости от угла падения и положения плоскости падения), называется *необыкновенной*. Скорость необыкновенной волны в кристалле зависит от направления; она может быть или больше скорости обыкновенной волны (как в исландском шпате), или меньше (как в кварце). В направлении оптической оси скорости обыкновенной и необыкновенной волн равны (рис. 4.29а).

#### Искусственное двойное лучепреломление

Наблюдается в изотропных средах при воздействии на них ме-

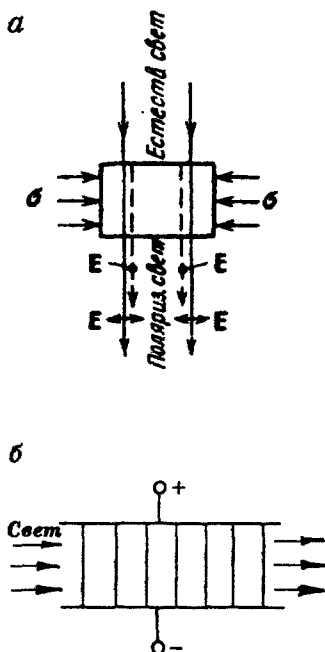


Рис. 4.30

#### Оптически активные вещества

ханических напряжений (фотоупругость), электрического поля (электрическое двойное лучепреломление), магнитного поля (магнитное двойное лучепреломление).

При одностороннем сжатии или растяжении изотропного тела в направлении оси  $OZ$  его оптические свойства становятся аналогичными свойствам оптического одноосного монокристалла, оптическая ось которого направлена параллельно оси  $OZ$  (рис. 4.30). В электрических и магнитных полях изотропная среда приобретает свойства одноосного кристалла с оптической осью, совпадающей с направлением векторов  $E$  или  $H$ .

Разность показателей преломления для волн обыкновенной и необыкновенной пропорциональна: при фотоупругости — механическому напряжению  $\sigma$  ;

при электрическом двойном лучепреломлении —  $E^2$  ( $E$  — напряженность электрического поля);

при магнитном двойном лучепреломлении —  $B^2$  ( $B$  — магнитная индукция).

При распространении света через некоторые вещества (кварц, раствор сахара в воде и др.) линейно поляризованного света происходит изменение положения плоскости поляризации. Это явление

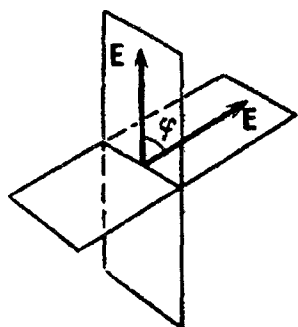


Рис. 4.31

называется *вращением плоскости поляризации*, а вещества, в которых наблюдается это явление, называются *оптически активными*. Угол вращения плоскости поляризации чистыми веществами (рис. 4.31):

$$\varphi = \alpha l, \quad (4.29)$$

$l$  — толщина слоя,  $\alpha$  — постоянная вращения, равная углу поворота плоскости поляризации слоем толщиной 1 м.

Угол вращения плоскости поляризации растворами

$$\varphi_p = [\alpha] l C, \quad (4.30)$$

$C$  — объемная концентрация,  $[\alpha]$  — удельная постоянная вращения, равная углу поворота плоскости поляризации слоем раствора толщиной 1 м с объемной концентрацией 1 кг/м<sup>3</sup>.

#### Давление света

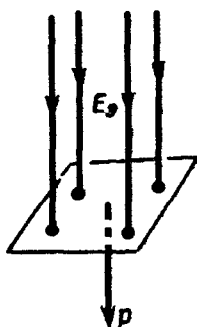


Рис. 4.32

Давление электромагнитных волн на плоскость, расположенную перпендикулярно направлению их распространения (рис. 4.32):

$$p = E_0(1 + \rho)/c, \quad (4.31)$$

$E_0$  — энергетическая освещенность;  $c$  — скорость света в вакууме,  $\rho$  — коэффициент отражения (отношение потока энергии отраженных волн к потоку энергии падающих волн).

Давление излучения Солнца на земную поверхность в яркий солнечный день равно приблизительно 4 мкПа.

## 5. Квантовая оптика

Энергия любого вида электромагнитного излучения, в том числе и светового, состоит из дискретных порций, которые называются квантами излучения или фотонами. Свойства света, обусловленные его квантовой природой, называются квантовыми (или корпускулярными).

### Характеристики фотона

$\epsilon = h\nu$  — энергия фотона монохроматического электромагнитного излучения частотой  $\nu$ ;  $h$  — постоянная Планка, равная  $6,625 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;

$m_\Phi = h\nu/c^2$  — релятивистская масса фотона;

$p_\Phi = h\nu/c$  — импульс;

$M_\Phi = h/2\pi$  — момент импульса.

### Фотоэффект

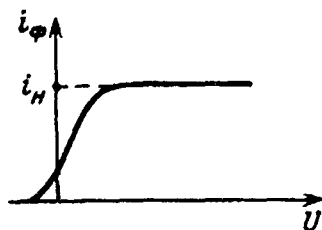


Рис. 4.33

Электрические явления при освещении светом вещества:

— выход электронов из вещества (*внешний фотоэффект*);

— перемещение электронов и дырок через границу соприкосновения полупроводников *n*- и *p*-типа проводимости (*вентильный фотоэффект*);

— изменение электропроводности (*фотопроводимость*).

Вольт-амперная характеристика внешнего фотоэффекта приведена на рис. 4.33.

### Законы внешнего фотоэффекта

1. Закон Столетова: фототок насыщения  $i_n$  прямо пропорционален энергетическому потоку  $\Phi$ ,

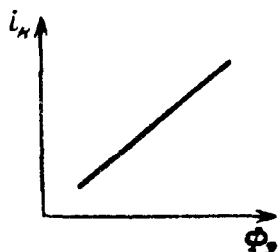


Рис. 4.34

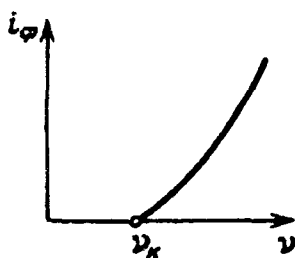


Рис. 4.35

при его неизменном спектральном составе (рис. 4.34).

2. Наибольшая скорость  $v_m$  фотоэлектронов не зависит от энергетической силы света;  $v_m$  зависит от частоты электромагнитных волн.

3. Энергетический баланс определяется уравнением Эйнштейна (основное уравнение фотоэффекта):  

$$h\nu = A + m_e v_m^2 / 2, \quad (4.32)$$

$A$  — работа выхода,  $m_e$  — масса электрона,  $v_m$  — максимальная скорость электронов.

4. Существует красная граница фотоэффекта — наименьшая частота  $\nu_K$ , ниже которой фотоэффект не происходит (рис. 4.35);  $\nu_K = A/h$ .

5. Фотоэффект безынерционен.

## Спектр

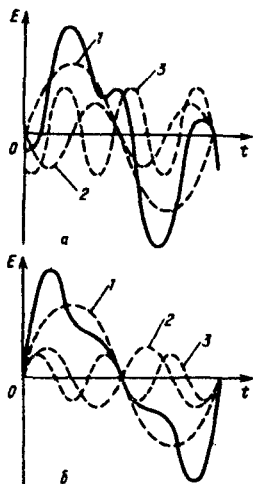


Рис. 4.36

Любое негармоническое колебание можно представить как результат сложения (суперпозицию) гармонических колебаний (кратко их называют гармониками) с различными амплитудами и частотами. Совокупность амплитуд и частот гармоник, из которых состоит сложное колебание (или волна), называется спектром амплитуд и частот или, кратко, *спектром*. Спектром (в узком смысле слова) иногда называют цветные полосы, получающиеся на экране в результате разделения параллельного пучка немонахроматического света призмой (или другим прибором) по направлениям, соответствующим различным длинам волн. На рис.

4.36 показан спектр негармонического колебания (сплошная линия), состоящий из трех первых гармоник (1-й, 2-й, 3-й — штриховые линии) с различными начальными фазами.

## Спектр испускания

Совокупность частот (или длин волн) гармоник, из которых состоит излучение.

## Сплошной спектр

Совокупность частот (или длин волн), непрерывно переходящих друг в друга. Например, излучение нагретых твердых тел и жидкостей имеет сплошной спектр.

## Линейчатый спектр

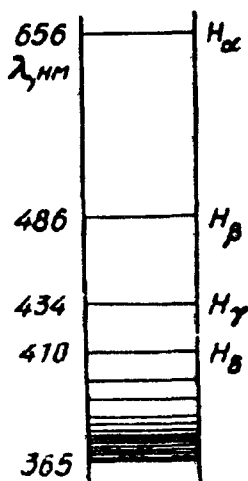


Рис. 4.37

Спектр, в котором поток излучения сосредоточен в узких пределах вблизи лишь некоторых длин волн, с интервалом не более 10 нм, а для иных длин волн поток равен нулю. Например, излучение невзаимодействующих атомов имеет линейчатый спектр; линейчатый спектр, полученный с помощью спектроскопа в диапазоне длин волн 400–800 нм, представляется на экране (или на сетчатке глаза) тонкими цветными полосками. Количество линий и соответствующие им длины волн зависят от строения атомов.

На рис. 4.37 приводится линейчатый спектр водорода для видимого излучения; слева указаны



длины волн, справа — обозначение линий спектра.

### **Полосатые спектры**

Состоят из большого числа близко расположенных друг к другу линий, которые составляют отдельные широкие полосы (100 нм и больше). Полосатый спектр определяется строением молекул.

### **Спектр поглощения**

Совокупность частот гармоник, которые поглощаются средой.

### **Спектральная линия поглощения**

Спектр поглощения, занимающий узкий интервал, ширина которого меньше средней частоты интервала.

### **Закон Кирхгофа–Бунзена**

Атомы поглощают гармоники таких частот, которые они излучают, будучи источниками света. Это явление называется обращением спектральных линий.

### **Линии Фраунгофера**

Спектральные линии поглощения, наблюдаемые в спектре излучения Солнца, называются *линиями Фраунгофера*; они образуются вследствие поглощения атмосферой Солнца некоторых участков спектра излучения.

### **Тепловое излучение**

Электромагнитное излучение, которое возбуждается тепловым движением атомов и молекул.

Спектральная плотность  
энергетической светимости  
(испускательная способность)

Отношение энергетической светимости  $\Delta R_\lambda$ , которая соответствует малому интервалу волн  $\Delta\lambda$  (или частот  $\Delta\nu$ ), к ширине этого интервала:

$$E_{\lambda T} = \Delta R_\lambda / \Delta\lambda, \quad E_{\nu T} = \Delta R_\nu / \Delta\nu.$$

Единицы: Вт/(м<sup>2</sup>·нм); Дж/м<sup>2</sup>

Поглощательная способность

Отношение поглощенного потока излучения  $\Delta\Phi'_\lambda$ , которому соответствует малый интервал волн  $\Delta\lambda$ , к падающему на это тело потоку  $\Delta\Phi_\lambda$  с тем же самым интервалом длин волн  $\Delta\lambda$  (или частот  $\Delta\nu$ ):

$$A_\lambda = \Delta\Phi'_\lambda / \Delta\Phi_\lambda,$$

$A_\lambda$  — величина безразмерная, изменяющаяся от 0 до 1.

Черное тело

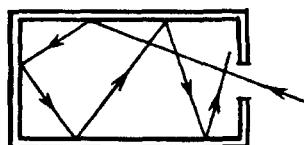


Рис. 4.38

Тело, которое поглощает полностью падающее на него излучение независимо от направления, длины волны и поляризации, называется *черным телом* (или *полным излучателем*). Моделью такого тела может служить малое отверстие в стенке полого ящика (рис. 4.38). Для черного тела  $A_\lambda = 1$ .

Закон Кирхгофа

$$\frac{E_{\lambda T}}{A_{\lambda T}} = \varepsilon_{\lambda T}$$

$$\frac{E_{\lambda T}}{A_{\lambda T}} = \varepsilon_{\lambda T}. \quad (4.33)$$

Отношение спектральной плотности энергетической светимости (излучательной способности) теп-

лового излучения данной длины волны и температуры к поглощательной способности этого же тела для той же длины волны и температуры является величиной одинаковой для всех тел, в том числе и для черного тела; для последнего это отношение равно его излучательной способности  $\epsilon_{\lambda T}$ , которая является универсальной функцией длины волны (или частоты) и температуры. Значения  $\epsilon_{\lambda T}$  рассчитываются по формуле Планка (см. ниже).

#### Закон Стефана-Больцмана

$$R_s = \sigma T^4$$

$$R_s = \sigma T^4. \quad (4.34)$$

Энергетическая светимость черного тела пропорциональна четвертой степени температуры  $T$ .  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) — постоянная Стефана-Больцмана.

#### Закон смещения Вина

$$\lambda_M T = b$$

$$\lambda_M T = b. \quad (4.35)$$

Длина волны  $\lambda_M$ , которой соответствует максимальная спектральная плотность энергетической светимости черного тела, обратно пропорциональна температуре  $T$ .

$b = 0,2829$  см·К — постоянная Вина.

#### Формула Планка

$$\epsilon_{\lambda T} = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{hc/(k\lambda T)} - 1}$$

Формулой Планка определяется зависимость излучательной способности черного тела от длины волны (или частоты) и температуры.

$$\epsilon_{\lambda T} = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{hc/(k\lambda T)} - 1}, \quad (4.36)$$

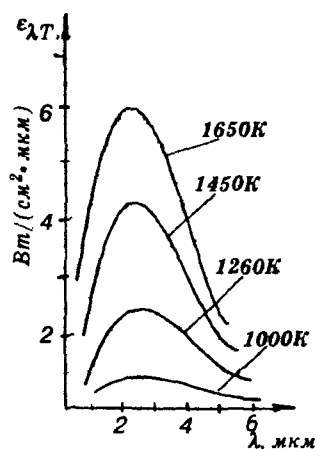


Рис. 4.39

Постоянная Планка

$$h \approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$\epsilon_{\lambda T}$  — излучательная способность черного тела,  $c$  — скорость света в вакууме,  $h$  — постоянная Планка,  $k$  — постоянная Больцмана,  $\lambda$  — длина волны.

На рис. 4.39 показаны зависимости  $\epsilon_{\lambda T}$  от длины волны  $\lambda$  при различных температурах.

При указанных на рисунке температурах максимумы излучательной способности находятся в инфракрасном диапазоне излучения.

## СТРОЕНИЕ АТОМА И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

### 1. Единицы, используемые в атомной и ядерной физике

Физическая величина	Название единицы	Обозначение	Определение	Значение, ед. СИ
Масса	Атомная единица массы	а.е.м.	1/12 часть массы ядра изотопа углерода — 12	$1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Энергия	Электрон-вольт	эВ	$A=QU$ ( $Q=e$ , $U=1$ В)	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж
Заряд	Элементарный заряд	$e$	Заряд электрона	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Момент импульса	—	$\hbar$	$h/2\pi = \hbar$	$1,055 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Магнитный момент электрона	Магнетон Бора	$\mu_B$	$eh/(4\pi m_e)$ , $m_e$ — масса электрона	$9,274 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл
Магнитный момент ядра	Ядерный магнетон	$\mu_N$	$eh/(4\pi m_p)$ , $m_p$ — масса протона	$5,051 \cdot 10^{-27}$ Дж/Тл

### 2. Волновые свойства частиц

Волны де Бройля

Электромагнитное излучение имеет как волновые, так и корпускулярные свойства. Движущиеся час-

тицы также имеют и корпускулярные, и волновые свойства. Экспериментально была подтверждена гипотеза, что движущиеся частицы имеют волновые свойства, при этом длина волны  $\lambda_d = h/p$ , (5.1)

$h$  — постоянная Планка,  $p$  — импульс частицы.

Эти волны получили название волн де Бройля, а соответствующая им длина волны называется длиной волны де Бройля.

$$\lambda_d = h/p$$

**Корпускулярные и волновые характеристики**

$$\nu = E/h, \omega = E/\hbar, \lambda_d = h/p, \quad (5.1a)$$

$\nu$  — частота,  $E$  — энергия,  $\omega$  — угловая частота,  $\lambda_d$  — длина волны де Бройля,  $p$  — импульс частицы.  $\hbar = h/2\pi$ .

**Уравнение плоской волны де Бройля**

$$\psi = A \cos \left[ \frac{2\pi}{h} (Et - pz) \right]$$

### 3. Строение атома

**Модель Резерфорда–Бора–Зоммерфельда**

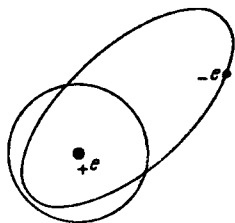


Рис. 5.1

В центре атома находится положительно заряженное ядро, вокруг которого по определенным круговым и эллиптическим орбитам вращаются электроны; при перемещении по таким орбитам (они называются стационарными) электроны не излучают электромагнитные волны, что

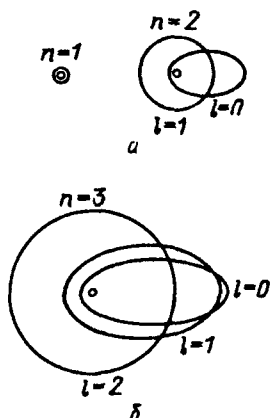


Рис. 5.2

противоречит законам электродинамики; каждой стационарной орбите соответствует определенное значение энергии атома (первый постулат Бора). Ядро находится в одном из фокусов эллиптической орбиты (или в центре круговой орбиты). Основная масса атома сосредоточена в ядре. Стационарные круговые орбиты атома водорода определяются соотношением

$$m_e v_n r_n = n h / (2\pi), \quad (5.2)$$

$m_e$  — масса электрона,  $v_n$  — его линейная скорость на стационарной орбите,  $r_n$  — радиус стационарной орбиты,  $h$  — постоянная Планка,  $n=1, 2, 3, \dots$

Атом излучает или поглощает квант энергии при переходе из одного стационарного состояния в другое (*второй постулат Бора*):

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m, \quad (5.3)$$

при этом электрон переходит с одной стационарной орбиты на другую.

### Модель многоэлектронного атома

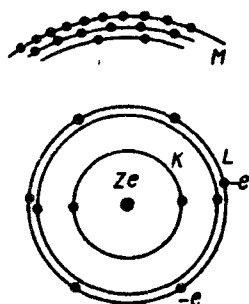


Рис. 5.3

В центре атома находится положительно заряженное ядро, окруженное электронами, которые распределяются по оболочкам и подоболочкам (см. ниже). Заряд ядра (в элементарных зарядах  $e$ ) равен порядковому номеру элемента (атомному номеру)  $Z$  в периодической системе Д.И. Менделеева;  $Z$  называется также *зарядовым числом*; количество электронов в нейтральном атоме равно  $Z$ .

Основная масса атома сосредоточена в ядре. Ядро самого легкого

атома водорода состоит из одного протона. Масса протона  $m_p=1,67 \cdot 10^{-27}$  кг, масса электрона  $m_e=9,11 \cdot 10^{-31}$  кг,  $m_p=1836m_e$ .

## Ионы

Атомы, у которых количество электронов не равно  $Z$ , называются *ионами*. У положительного иона электронов меньше, а у отрицательного иона больше по сравнению с количеством электронов в нейтральном атоме.

## Энергия ионизации

Энергия, которая потребуется для отрыва электрона от ядра атома (без сообщения ему кинетической энергии).

## Квантовые числа электронов

Энергетические уровни атома определяются квантовыми числами электронов.

### 1) Главное квантовое число $n=1, 2, \dots$

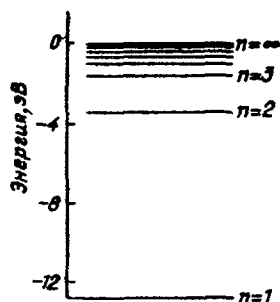


Рис. 5.4

Определяет в основном дискретные энергетические уровни. Например, для атомов водорода энергетические уровни рассчитываются по формуле

$$E_n = -m_e e^4 / (8 \epsilon_0^2 n^2 h^2), \quad (5.4)$$

$m_e$  — масса электрона,  $e$  — его заряд,  $n=1, 2, 3, \dots$  — главное квантовое число,  $h$  — постоянная Планка. Энергетические уровни атома водорода приведены на рис. 5.4.



2) Орбитальное квантовое  
число  $l=0, 1, \dots, n-1$

Этим квантовым числом определяется орбитальный момент импульса электрона:

$$M_l = \hbar \sqrt{l(l+1)}. \quad (5.5)$$

3) Магнитное квантовое  
число  $m_l = -l, \dots, 0, \dots, +l$

Определяет проекцию орбитального момента на выделенное (например, магнитным полем) направление:

$$M_{ls} = m_l \hbar. \quad (5.6)$$

Спиновое квантовое число  
 $s=1/2$

Определяет собственный момент импульса (спин) электрона

$$M_s = \hbar \sqrt{s(s+1)} \quad (5.7)$$

и его проекцию

$$M_{sz} = \pm 1/2 \hbar. \quad (5.8)$$

## Принцип Паули

Электронны, входящие в состав одного и того же атома, отличаются друг от друга хотя бы одним квантовым числом.

Электронные оболочки и  
подоболочки

Электронны в атоме с одинаковым главным квантовым числом  $n$ , но различными значениями других квантовых чисел образуют оболочку. Электронны в атоме с одинаковыми квантовыми числами  $n$  и  $l$ , но различными значениями  $m_l$  образуют подоболочку. Оболочки обозначаются большими латинскими буквами  $K, L, M, N, \dots$ ; подоболочки обозначаются

цифрой и малой латинской буквой, как указано в таблице.

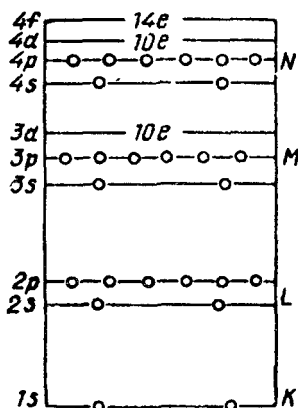


Рис. 5.5

Квантовое число $n$	1	2	3	4
Оболочка	K	L	M	N
Подоболочки	1s	2s, 2p	3s, 3p, 3d	4s, 4p, 4d, 4f

На рис. 5.5 указано максимальное количество электронов в подоболочках.

Буквы  $s, p, d, f, \dots$  соответствуют состояниям с квантовыми числами  $l=0, 1, 2, 3, 4, \dots$ . Порядок заполнения элементов в периодической системе элементов Д.И. Менделеева приводится в таблице 52 (см. Справочные таблицы).

### Излучательные переходы

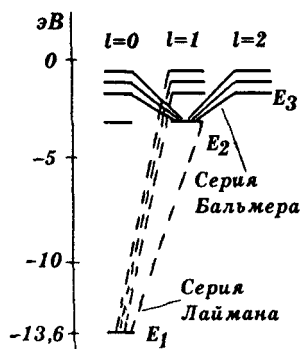


Рис. 5.6

При переходах электронов с одних энергетических уровней на другие изменяются их квантовые числа. Как показывает теория и опыт, переход электрона возможен на такие уровни, когда изменение  $\Delta m_l = 0, \pm 1$ , изменение  $\Delta l = \pm 1$ , при этом происходит либо излучение, либо поглощение фотона.

При переходах электронов между внешними оболочками образуется инфракрасное, видимое и ультрафиолетовое излучение. Если из внутренней оболочки атома удалить электрон, то на эту оболочку будут самопроизвольно переходить электроны из других оболочек с большими значениями  $n$ .

При таких переходах образуется коротковолновое электромагнитное излучение с линейчатым спектром (*характеристическое рентгеновское излучение*).

Схема наиболее вероятных излучательных переходов в изолированном атоме водорода приведена на рис. 5.6. При таких переходах  $l$  изменяется на 1.  $E_1, E_2, E_3$  — энергетические уровни, соответствующие главным квантовым числам 1, 2, 3. При переходах электронов с высших уровней на уровень  $E_2$  излучается серия линий Бальмера. Переходы, указанные штриховыми линиями, относятся к серии Лаймана.

Магнитный момент электрона изолированного атома водорода имеет произвольную ориентацию.

## 4. Атомное ядро

### Нуклоны

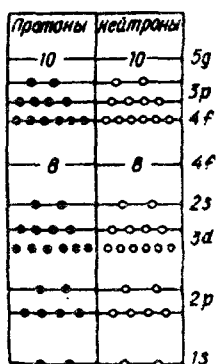


Рис. 5.7

Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов, которые можно рассматривать как два различных состояния одной частицы — *нуклона*. Поэтому часто говорят, что ядро состоит из нуклонов, одна часть которых находится в протонном состоянии, другая — в нейтронном. Количество протонов равно порядковому номеру  $Z$  элемента в периодической системе; заряд ядра  $Q_A = Ze$ . Количество нуклонов в ядре называется *массовым числом*  $A$ . Количество

нейтронов  $N$  в ядре равно разности  $A-Z$ . Нуклоны в ядре образуют оболочки, которые обозначаются так же, как и электронные оболочки. На рис. 5.7 указано распределение протонов и нейтронов по ядерным оболочкам.

## Символ ядра

${}_Z^AY$  — ядро  $Y$  с зарядовым числом  $Z$  и массовым числом  $A$ .

## Изотопы и изобары

Ядра с одинаковым количеством протонов и различным количеством нейтронов называются *изотопами*. Ядра с одинаковым количеством нуклонов, но различным количеством протонов называются *изобарами*.

## Размер ядра и концентрация нуклонов

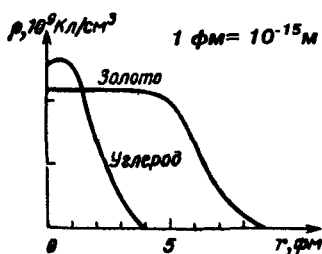


Рис. 5.8

Размер ядра зависит от количества нуклонов, входящих в его состав; в нем отчетливо выделяются внутренняя область и поверхностный слой. Концентрация нуклонов во внутренней области приблизительно постоянна и для всех ядер с  $A > 10$  равна  $1,68 \cdot 10^{14}$  нуклон/ $\text{м}^3$ . В поверхностном слое, толщина которого почти одинакова для всех ядер и составляет  $(1,5 \dots 2) \cdot 10^{-15}$  м, концентрация нуклонов уменьшается до нуля. От концентрации нуклонов зависит плотность электрического заряда. Радиусом ядра принято считать расстояние от центра до слоя, в котором плотность заряда

равна половине его максимального значения. Радиус ядра  $R$  увеличивается с ростом числа нуклонов; его приближенное значение рассчитывается по формуле  $R=R_0A^{1/3}$ , (5.9)  $R_0=1,2...1,3 \cdot 10^{-15}$  м,  $A$  — массовое число.

На рис. 5.8 представлена зависимость плотности электрического заряда в ядре золота и углерода. Единица длины 1 ферми= $10^{-15}$  м.

## Ядерные силы

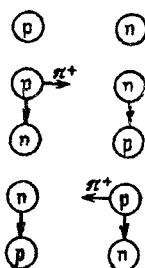


Рис. 5.9

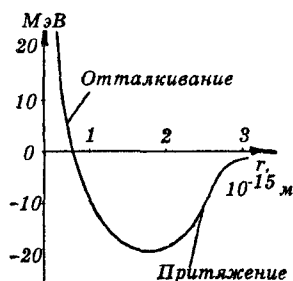


Рис. 5.10

## Дефект масс

Нуклоны внутри ядра связаны ядерными силами (см. фундаментальные взаимодействия), обусловленными обменом  $\pi$ -мезонами. На рис. 5.9 показана схема обмена мезонами между протоном и нейтроном.

Ядерные силы проявляются только на малых расстояниях, сравнимых с межнауклонными расстояниями в ядре (порядка  $10^{-15}$  м). Они не зависят от электрического заряда нуклонов (*принцип зарядовой независимости*) и обладают свойством насыщения.

На рис. 5.10 приведена диаграмма потенциальной энергии ядерного взаимодействия между двумя протонами с параллельными спинами.

Масса ядра  $M$  всегда меньше суммы масс покоя нуклонов, из которых состоит ядро. Разность между суммой масс покоя нуклонов и массой ядра называется *дефектом масс*:

$$\Delta M = Zm_p + (A-Z)m_n - M. \quad (5.10)$$

Дефектом масс определяется энергия связи нуклона, равная работе, которую необходимо совершить для удаления нуклона из ядра (без сообщения ему кинетической энергии).

### Энергия связи

$$\Delta E = \Delta Mc^2$$

Энергией связи ядра называется величина, равная работе, которую необходимо совершить для расщепления ядра на невзаимодействующие между собой нуклоны, при этом их кинетическая энергия должна быть равной нулю.

Энергия связи ядра

$$\Delta E = \Delta Mc^2. \quad (5.11)$$

Энергия связи ядра приблизительно пропорциональна числу нуклонов в ядре.

### Удельная энергия связи ядра

$$E_{уд} = \Delta E / A, \quad (5.12)$$

$A$  — массовое число,  $\Delta E$  — энергия связи ядра. Зависимость  $E_{уд}$  от  $A$  представлена на рис. 5.11.

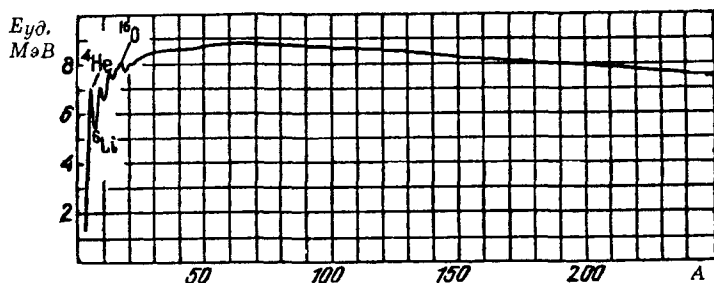
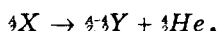


Рис. 5.11

## 5. Радиоактивные процессы

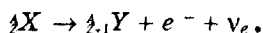
Тяжелые ядра в основном состоянии часто оказываются неустойчивыми и самопроизвольно распадаются, в результате чего образуются новые (дочерние) ядра и другие микрочастицы. Это свойство ядер называется *радиоактивностью*, а такие ядра называются *радиоактивными*.

$\alpha$ -распад



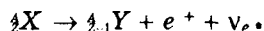
Из радиоактивных ядер выбрасываются альфа-частицы (ядра гелия  ${}_2^4\text{He}$ ). Порядковый номер  $Z$  дочернего ядра уменьшается на 2, массовое число  $A$  уменьшается на 4.

$\beta$ -распад



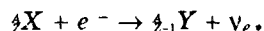
Происходит излучение электронов и электронных антинейтрино, у дочернего ядра  $Z$  увеличивается на 1,  $A$  остается прежним.

$\beta^+$ -распад



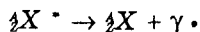
Излучаются позитрон и электронное нейтрино, у дочернего ядра  $Z$  уменьшается на 1,  $A$  остается прежним.

$K$ -захват



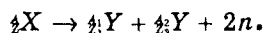
С электронной оболочки  $K$  захватывается ядром электрон, при этом один из протонов ядра превращается в нейтрон,  $Z$  дочернего ядра уменьшается на 1, излучается электронное нейтрино и характеристическое рентгеновское излучение.

## Гамма-излучение



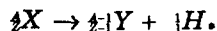
Возбужденное ядро  $X^*$  переходит в основное состояние, при этом излучается коротковолновое электромагнитное излучение с длиной волны  $10^{-3} \dots 10^{-4}$  нм.

## Спонтанное деление ядер



Самопроизвольное деление ядер на две части, при этом излучается два - три нейтрона. Ядра урана и плутония делятся на два осколка с различными массами; по мере увеличения  $A$  массы образующихся при делении ядер становятся одинаковыми (например, у фермия-256).

## Протонная радиоактивность



Выбрасываются из ядра протоны — ядра легкого изотопа водорода;  $Z$  нового ядра уменьшается на 1,  $A$  также уменьшается на 1.

## Законы радиоактивности

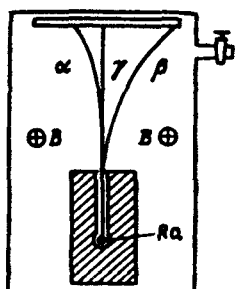


Рис. 5.12

1. Радиоактивный распад не зависит от внешних условий (температуры, давления, химических взаимодействий и т.п.).

2.  $\alpha$ - и  $\gamma$ -частицы имеют дискретный энергетический спектр, энергии  $\beta$ -частиц изменяются в пределах от 0 до некоторого максимального значения. На рис. 5.12 приведена установка для разделения  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -частиц поперечным магнитным полем.



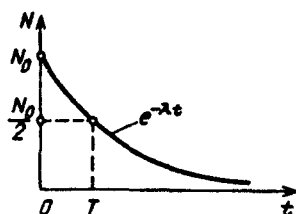


Рис. 5.13

3. Изменение количества радиоактивных ядер рассчитывается по формуле

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 2^{-t/T}, \quad (5.13)$$

$N_0$  — количество ядер в момент времени  $t=0$ ,  $N$  — количество ядер в момент времени  $t$ ,  $T$  — период полураспада — время, в течение которого распадается половина ядер ( $N_0/2$ );  $\lambda$  — вероятность распада одного ядра за время 1 с (постоянная распада);  $\lambda = \ln 2 / T$ . (5.14)

На рис. 5.13 приведена кривая радиоактивного распада.

4. В результате радиоактивного распада образуются новые ядра с другими порядковыми номерами  $Z$  (за исключением  $\gamma$ -излучения).

## 6. Ядерные реакции

Сильное взаимодействие атомного ядра с элементарными частицами или другими ядрами, в результате которого происходит возбуждение или преобразование ядер, называется ядерной реакцией. Для того чтобы проходила ядерная реакция, необходимо сближение ядра и частицы на расстояния порядка  $10^{-15}$  м, при которых проявляется сильное взаимодействие. С этой целью атомное ядро, как мишень, облучается потоком частиц с большой кинетической энергией.

Эффективное сечение ядерной реакции

$$\sigma = \frac{\Delta N}{N_0 n \Delta Z}, \quad (5.15)$$

$\Delta N$  — число частиц, вступивших в ядерную реакцию;  $N_0$  — плотность потока в параллельном пучке частиц, облучающих мишень (количество частиц, прохо-

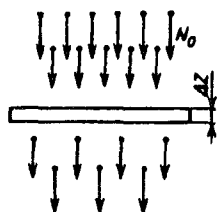


Рис. 5.14

## Энергия реакции

## Энергетический порог реакции

## Законы сохранения

## Получение нейтронов

## Получение позитронов

дующих за время 1 с через плоскость площадью 1 м<sup>2</sup>);  $\Delta Z$  — толщина мишени (достаточно малая),  $n$  — количество ядер мишени в объеме 1 м<sup>3</sup>.

Единицы — квадратный метр, м<sup>2</sup>; также применяется внесистемная единица 1 барн =  $10^{-28}$  м<sup>2</sup>.

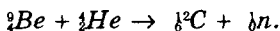
Освобождаемая при каждом акте ядерного взаимодействия энергия.

Минимальная энергия облучающих мишень частиц, которая необходима для ядерного взаимодействия.

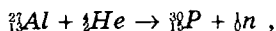
При ядерных реакциях выполняются законы сохранения:

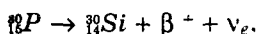
- 1) заряда;
- 2) массы — энергии;
- 3) импульса;
- 4) момента импульса.

Кроме указанных законов сохранения должен выполняться закон сохранения барионных и лептонных чисел (см. п. 10 гл. V), а также другие специфические законы сохранения.

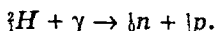


Обозначение:  ${}^9_4\text{Be}$  ( $\alpha$ ,  $n$ )  ${}^{12}_6\text{C}$

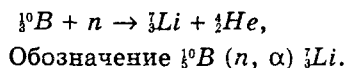




Ядерный фотоэффект



Детектор нейтронов



Реакция аннигиляции

электрона — позитрона:  $\beta^{-} + \beta^{+} \rightarrow 2\gamma$ ; протона — антипротона:  
 $\text{p} + \bar{\text{p}} \rightarrow \pi^{+} + \pi^{-} + \pi^{+} + \pi^{-} + \pi^0.$

Термоядерная реакция

Синтез легких ядер при высоких (порядка  $10^7$ – $10^8$  К) температурах:  
 ${}^2_1\text{d} + {}^3_1\text{t} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}.$   
 Энергетический эффект составляет 17,8 МэВ.

Деление тяжелых ядер

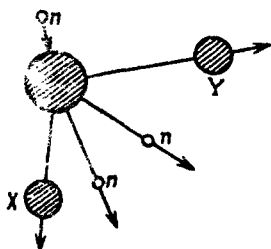
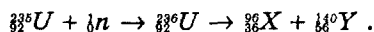


Рис. 5.15



Образующиеся осколки ядер, обозначенные условно X и Y, выбрасывают один-два нейтрона; небольшое количество нейтронов образуется при делении ядра. Энергетический эффект составляет около 0,8 МэВ.

На рис. 5.15 схематически показан процесс деления.

Электронный захват

Из оболочки K (реже из оболочек L, M) захватывается один электрон; внутри ядра происходит реакция

$$p + \beta^- \rightarrow n + \nu.$$

## Гамма-распад

Ядро возбуждается бомбардировкой частицами и фотонами; при переходе в основное состояние излучается гамма-квант



## 7. Взаимодействие ядерных излучений с веществом

При движении частиц в веществе происходит поглощение их энергии за счет взаимодействия с электронными оболочками и ядрами атомов, при этом происходит рассеяние частиц, а также ионизация или возбуждение атомов вещества.

### Торможение легких частиц

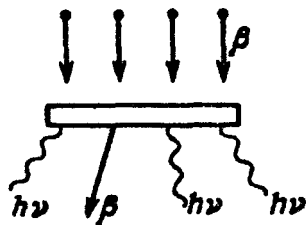


Рис. 5.16

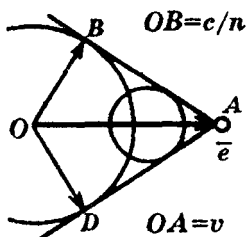


Рис. 5.17

При взаимодействии электронов и позитронов с ядрами происходит их торможение, сопровождаемое электромагнитным излучением, которое называется *тормозным*; оно имеет сплошной спектр. При торможении быстрых электронов образуется *рентгеновское излучение*. Общие потери энергии за счет излучения при торможении частиц называются *радиационными*. Если энергия частицы достаточна для выбивания электронов из внутренних слоев оболочки атома, то возникает характеристическое рентгеновское излучение с линейчатым спектром. При движении электронов в веществе со скоростями, превышающими фазовую скорость света в нем (т.е.

когда  $v > c/n$ ,  $n$  — показатель преломления вещества), возникает *излучение Вавилова — Черенкова*. Часть этого излучения находится в диапазоне видимого излучения и имеет сплошной спектр, но основная доля его приходится на ультрафиолетовое излучение. На рис. 5.17 указаны волновые поверхности  $AB$  и  $AD$  излучения Вавилова — Черенкова.

#### Ослабление потока электронов

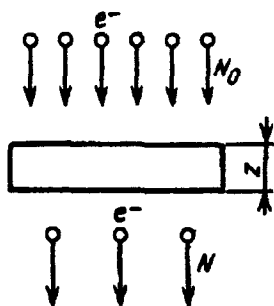


Рис. 5.18

Параллельный пучок электронов, имеющих одинаковую энергию, в результате взаимодействия с веществом превращается в расходящийся поток электронов, которые имеют различные энергии. Часть электронов поглощается веществом. Ослабление потока электронов рассчитывается по формуле

$$N = N_0 e^{-\mu Z} = N_0 e^{-\mu' \rho Z}, \quad (5.16)$$

$N_0$  — поток входящих электронов,  $N$  — поток выходящих электронов,  $Z$  — толщина слоя,  $\mu$  — линейный коэффициент ослабления, равный  $1/Z_0$  ( $Z_0$  — расстояние, на котором поток ослабляется в  $e$  раз),  $\mu' = \mu/\rho$  — массовый коэффициент ослабления ( $\rho$  — плотность вещества мишени);  $\mu'$  имеет приблизительно одинаковые значения во всех веществах.

#### Торможение нуклидов и нейтронов

Главную роль в торможении играют ионизационные потери, ко-

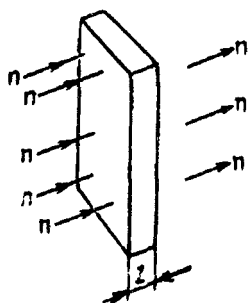


Рис. 5.19

### Длина среднего пробега

торые зависят от заряда и скорости частиц.

Параллельный пучок нуклидов или нейтронов, проходя через вещество, практически не рассеивается. Некоторая часть электронов, выбитых частицами из оболочек атомов, имеет энергию, достаточную для ионизации (вторичная ионизация). Вторичная ионизация, как правило, превышает первичную.

Среднее расстояние, которое проходит нуклид в веществе.

Длина среднего пробега  $\alpha$ -частиц (в метрах) в воздухе при нормальных условиях рассчитывается по формуле:

$$R_B = 3,18 \cdot 10^{-3} E^{3/2},$$

$E$  — энергия в пределах от 4 до 7 МэВ.

### Поглощение $\gamma$ -излучения

Ослабление потока  $\gamma$ -излучения рассчитывается по формуле

$$I = I_0 e^{-\mu Z} = I_0 e^{-\mu' \rho Z}, \quad (5.17)$$

$I$  — поток на выходе из мишени,

$I_0$  — поток на входе в мишень,  $\mu$  — линейный коэффициент ослабления,  $\mu' = \mu/\rho$  — массовый коэффициент ослабления (см. выше).

$$\mu = \sigma + \tau + \kappa,$$

$\sigma$ ,  $\tau$ ,  $\kappa$  — линейные коэффициенты ослабления, учитывающие рассеяние, поглощение энергии при фотоэффекте, а также при образовании электронов и позитронов.

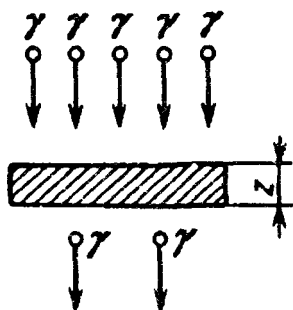


Рис. 5.20

## 8. Единицы радиоактивности и ионизирующих излучений

**Активность радиоактивного источника**

Величина, равная количеству распавшихся ядер за время 1 с.  
Активность источника

$$A = \Delta N / \Delta t, \quad (5.18)$$

$\Delta N$  — количество распавшихся ядер за время  $\Delta t$ .

Единица: беккерель, Бк.

Беккерель равен активности источника, в котором за время 1 с происходит 1 распад.

**Поглощенная доза излучения**

Энергия, поглощаемая массой 1 кг данного вещества.

Единица: грэй, Гр.

1 грэй равен такой поглощенной дозе излучения, при которой вещество массой 1 кг поглощает энергию 1 джоуль.

**Мощность поглощенной дозы**

Поглощенная доза излучения за время 1 с.

Единица: грэй в секунду, Гр/с.

**Коэффициент качества**

При одинаковых поглощенных дозах различные виды излучения производят различные биологические воздействия на живые организмы. Коэффициент, показывающий, во сколько

раз радиационная опасность данного излучения больше по сравнению с рентгеновским излучением при одинаковых поглощенных дозах, называется *коэффициентом качества излучения*.

Вид излучения	$Q$
Рентгеновское и гамма-излучение	1
Электроны, позитроны, бета-излучение	1
Протоны с энергией меньше 10 МэВ	10
Нейтроны с энергией меньше 20 кэВ	3
Нейтроны с энергией 0,1–10 МэВ	10
Альфа-излучение (с энергией меньше 10 МэВ)	20
Тяжелые ядра	20

Эквивалентная доля излучения

$$H=DQ, \quad (5.19)$$

$Q$  — коэффициент качества,  $D$  — поглощенная доза излучения.

Единица: зиверт, Зв.

1 зиверт — поглощенная доза излучения при коэффициенте качества излучения  $Q=1$ .

Используется внесистемная единица: 1 бэр=0,01 зиверт.

## 9. Фундаментальные взаимодействия

Изучаемые в физике взаимодействия можно свести к четырем фундаментальным взаимодействиям: сильному, электромагнитному, слабому, гравитационному.



## Сильное взаимодействие

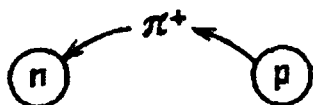


Рис. 5.21

К сильному взаимодействию относятся ядерные силы, которые при не слишком высоких температурах обеспечивают прочные связи между нуклонами; эти связи вызваны обменом  $\pi$ -мезонами — частицами с массой покоя около 300 МэВ (п. 10 гл. V). Истинно сильным взаимодействием является взаимодействие между кварками посредством обмена глюонами (см. таблицу ниже).

## Электромагнитное взаимодействие

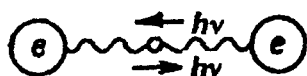


Рис. 5.22

Взаимодействие заряженных частиц посредством электромагнитного поля; оно обусловлено обменом фотонами.

## Слабое взаимодействие

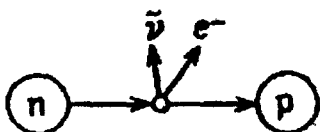


Рис. 5.23

Оно свойственно всем частицам и обусловлено обменом промежуточными бозонами; примером является  $\beta$ -распад.

## Гравитационное взаимодействие



Рис. 5.24

Примером является гравитационное взаимодействие между телами (см. гл. I п. 16); оно объясняется обменом гравитонами. Основные характеристики фундаментальных взаимодействий приводятся в таблице.

Основные характеристики взаимодействия	Сильного	Электромагнитного	Слабого	Гравитационного
Радиус взаимодействий, м	$10^{-15}$	$\infty$	$10^{-17}$	$\infty$
Интенсивность	1	1/137	$10^{-14}$	$10^{-39}$
Частицы, обуславливающие взаимодействие	Глюоны, $\pi$ -мезоны	Фотоны	Бозоны (промежуточные)	Гравитоны (?)
Массы покоя частиц, $mc^2$	глюона — 0 $\pi$ -мезона ~ 300 МэВ	0	100 ГэВ	0
Спин частиц	$\hbar$	$\hbar$	$\hbar$	$2\hbar$
Время жизни, с (характерное время)	$10^{-23}$	$10^{-20}$	$10^{-10}$	Неизвестно

## 10. Элементарные частицы и их классификация

Элементарные в точном смысле этого слова — это первичные, неразложимые частицы, из которых построены все вещества. В настоящее время этот термин применяется для обозначения большой группы микрочастиц, которые не являются атомами или их ядрами. Исключение представляет протон, который является и элементарной частицей, и ядром легкого изотопа водорода.

### Частицы и античастицы

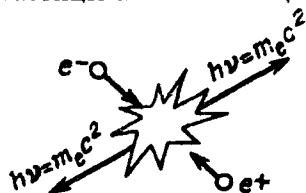


Рис. 5.25

Большинство элементарных частиц существует в двух разновидностях. Одну из них, чаще всего встречающуюся в окружающем нас мире, называют *частицей*, вторую — ее *античастицей*. Основной отличительной особенностью пары частица — античастица является реакция аннигиляции (исчезновения) — части-

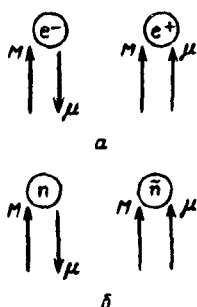


Рис. 5.26

цы, имеющие массы покоя, превращаются в частицы, у которых массы покоя равны нулю.

Частица и ее античастица имеют одинаковые массы, спины, времена жизни и равные по модулю электрические заряды; однако направления спиновых и магнитных моментов, знаки электрических зарядов, а также барионных и лептонных чисел противоположны.

На рис. 5.26 указаны ориентации механических  $M$  и магнитных моментов  $\mu$  в частицах и античастицах.

## Бозоны и фермионы

Собственный момент импульса частицы (спин) может быть целым или полуцелым (в единицах  $\hbar$ ). Частицы, которые имеют спины, равные 0,  $\hbar$ ,  $2\hbar$  и т.д., называются *бозонами*; частицы с полуцелым спином называются *фермионами*.

Адроны: нуклоны, барионы, гипероны,  $\pi$ -мезоны

По видам взаимодействий, в которых участвуют частицы, их подразделяют на четыре класса. К настоящему времени экспериментально подтверждено существование только трех классов. К первому классу частиц, получивших название адронов, относятся частицы, участвующие во всех видах фундаментальных взаимодействий. В этот класс объединяются барионы и мезоны. Барионы имеют полуцелые

спины, а мезоны — целочисленные спины. Принадлежность к барионам отмечается присвоением барионного “заряда” (числа), равного  $+1$  для частицы и  $-1$  для античастицы. Для мезонов барионный заряд равен нулю.

К барионам относятся нуклоны и более тяжелые частицы, распадающиеся на нуклоны. Тяжелые барионы, массы которых больше массы нуклона, называются гиперонами.

**Лептоны:** электроны, позитроны,  $\mu$ -мезоны, нейтрино

Во второй класс объединяются частицы, не участвующие в сильных взаимодействиях, но способные к трем остальным; они называются лептонами. Принадлежность к этому классу частиц отмечается присвоением каждому члену лептонного “заряда” (числа) — для частиц  $+1$ , для античастиц  $-1$ .

**Фотоны**

К третьему классу частиц, участвующих в электромагнитных и гравитационных взаимодействиях, относятся фотоны.

**Гравитоны**

Существование гравитонов экспериментально не подтверждено.

## 11. Основные характеристики элементарных частиц

$Q$  — заряд,  $m_0$  — масса покоя,  $J$  — спин,  $B$  — барионное число,  $S$  — странность,  $\tau$  — среднее время жизни.

Частица, символ	$Q, e$	$m_0,$ МэВ	$J, \hbar$	$B$	$S$	Среднее время жизни, $\tau, c$	Типичные продукты распада
<b>Гипероны:</b>							
кси-минус-гиперон, $\Xi^-$	-1	1319	1/2	+1	-2	$2 \cdot 10^{-10}$	$\pi^- + \Lambda$
кси-нуль-гиперон, $\Xi^0$	0	1311	1/2	+1	-2	$2 \cdot 10^{-10}$	$\pi^0 + \Lambda$
сигма-минус-гиперон, $\Sigma^-$	-1	1196	1/2	+1	-1	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$\pi^- + p$
сигма-нуль-гиперон, $\Sigma^0$	0	1192	1/2	+1	-1	$10^{-20}$	$\nu + \Lambda$
сигма-плюс-гиперон, $\Sigma^+$	+1	1190	1/2	+1	-1	$0,8 \cdot 10^{-10}$	$\pi^+ + p$ $\pi^0 + p$
лямбда-гиперон, $\Lambda$	0	1115	1/2	+1	-1	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$\pi^- + p$
<b>Нуклоны:</b>							
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	
<b>Мезоны:</b>							
ка-нуль-мезон, $K^0$	0	498	0	0	+1	$1 \cdot 10^{-10}$ или $6 \cdot 10^{-8}$	$\pi^+ + \pi^-$ $\pi^0 + \pi^0$ $\pi^+ + \mu^- + \nu$
ка-плюс-мезон, $K^+$	+1	494	0	0	+1	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu$ $\pi^+ + \pi^0$

Частица, символ	$Q, e$	$m_0, \text{МэВ}$	$J, \hbar$	$B$	$S$	Среднее время жизни, $\tau, \text{с}$	Типичные продукты распада
пи-плюс-мезон, $\pi^+$	+1	140	0	0	0	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu$
пи-нуль-мезон, $\pi^0$	0	135	0	0	0	$8 \cdot 10^{-17}$	$\gamma + \gamma$
Фотон	0	0	1	0	0	Стабилен	
Лептоны: мю-минус-мезон, $\mu^-$	-1	106	1/2	0	—	$2,26 \cdot 10^{-6}$	$e^- + \nu + \nu$
электрон, $e^-$	-1	0,511	1/2	0	—	Стабилен	
нейтрино, $\nu$	0	0	1/2	0	—	$\gg$	

## 12. Кварки и структура адронов

Свойства адронов и их превращения можно объяснить, если допустить, что они состоят из более “элементарных” частиц, которые называются *кварками*.

К настоящему времени известны шесть сортов (“ароматов”) кварков ( $u, d, s, c, b, t$ ), каждый из которых существует в трех “цветовых” разновидностях (“желтый”, “синий”, “красный”). Кварки имеют полупцелый спин. Свойства, которыми наделены кварки, необычны. Допускается возможность существования дробного электрического заряда и барионного числа.

Характеристики	Кварки					
	$u$	$d$	$s$	$c$	$b$	$t$
Электрический заряд, $e$	2/3	-1/3	-1/3	2/3	-1/3	2/3
Барионное число, $B$	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
Спин, $\hbar$	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2

### Структура барионов (предполагаемая)

Барион состоит из трех кварков, следовательно, барионное число  $B=1$ . Электрический заряд барионов определяется суммарным электрическим зарядом входящих в его состав кварков. Барионное число мезонов  $B=0$ , поэтому они образуются из пары кварк — антикварк.

### Структура нуклонов (предполагаемая)

Нуклоны	Состав	Электрические заряды кварков, $e$	Ориентация спинов
Протон	$u u d$	$2/3, 2/3, -1/3$	$\uparrow \downarrow \uparrow$
Нейтрон	$u d d$	$2/3, -1/3, -1/3$	$\uparrow \downarrow \downarrow$

## СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

Таблица 1. Кинематические параметры планет

Период обращения вокруг Солнца  $T_c$ ,  
 период обращения вокруг оси  $T_0$ ,  
 орбитальная скорость  $v_0$ ,  
 скорость освобождения  $v$

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

Таблица 2. Первая и вторая космические скорости на различных высотах  $H$

$H$ , 10 <sup>3</sup> км	$v_1$ , км/с	$v_2$ , км/с	$H$ , 10 <sup>3</sup> км	$v_1$ , км/с	$v_2$ , км/с	$H$ , 10 <sup>3</sup> км	$v_1$ , км/с	$v_2$ , км/с
0	7,9	11,19	5	5,92	8,37	30	3,31	4,68
0,5	7,62	10,77	10	4,93	6,98	40	2,94	4,15
1	7,35	10,40	20	3,89	5,50	50	2,66	3,76
2	6,90	9,76						



**Таблица 3. Периоды обращения  $T$  спутников Земли**  
 $H$  — средняя высота обращения

$H$ , км	$T$ , ч	$H$ , км	$T$ , ч	$H$ , км	$T$ , ч
0	1,41	1000	1,75	5000	3,35
250	1,49	1500	1,93	10000	5,78
500	1,58	1690	2,00	35800*	23,935
750	1,68	2000	2,12		

\* Высота, на которой орбитальная угловая скорость спутника равна угловой скорости точек поверхности Земли; в этом случае спутник находится над одной и той же точкой земной поверхности.

**Таблица 4. Динамические характеристики планет Солнечной системы**

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

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

**Таблица 5. Напряженность земного поля тяготения  
(ускорение свободного падения) на уровне моря**

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

**Таблица 6. Плотности, модули упругости и  
коэффициенты Пуассона**

$\rho$  — плотность,  $E$  — модуль Юнга,  
 $G$  — модуль сдвига,  $\nu$  — коэффициент Пуассона

Материал	$\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$	$E, 10^9 \text{ Па}$	$G, 10^9 \text{ Па}$	$\nu$
Алюминий	2,7	63–70	25–26	0,32–0,36
Бетон	2,2	15–40	7–17	0,1–0,15
Висмут	9,8	32	12	0,33
Гранит, мрамор	2,8	35–50	14–44	0,1–0,15
Дюралюминий	2,79	70	26	0,34
Инвар	8,7	135	55	0,25
Каучук (натур.)	0,9	0,008	0,003	0,46
Кварц (нить)	2,65	73	31	0,17
Константан		160	61	0,33
Латунь	8,6	89–97	34–36	0,32–0,42
Медь	8,7–8,9	82–127	45	0,35
Никель	8,9	204	79	0,28
Плексиглас	1,18	5,25	1,48	0,35
Резина	1,2	$(1,5-5) \cdot 10^3$	$(5-15) \cdot 10^4$	0,46–0,49
Свинец	11,3	16	5,7	0,44
Серебро	10,5	82,7	30	0,37
Сталь	7,7–7,9	195–205	80	0,25–0,30
Стекло	2,2–2,5	49–78	17,5–29	0,2–0,3
Титан	4,5	116	44	0,32
Чугун	7,8	100–150	44	0,23–0,27

**Т а б л и ц а 7. Плотность воды и ртути  
при различных температурах**

$t, ^\circ\text{C}$	$10^3 \rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$10^3 \rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$10^3 \rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$10^3 \rho, \text{кг/м}^3$
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		
3	0,99999	20	0,99823	100	0,95838		
4	1,00000	30	0,99567	150	0,9173		
5	0,99999	40	0,99224	200	0,8690		
б) Плотность ртути (при нормальном давлении)							
0	13,5951	25	13,5335	50	13,4723	75	13,4116
5	13,5827	30	13,5212	55	13,4601	80	13,3995
10	13,5704	35	13,5090	60	13,4480	90	13,3753
15	13,5580	40	13,4967	65	13,4358	100	13,3514
20	13,5457	45	13,4845	70	13,4237	300	12,875

\* Критическая температура.

**Таблица 8. Плотность газов при 0 °С  
и нормальном давлении**

Газ	$\rho, \text{кг/м}^3$	Газ	$\rho, \text{кг/м}^3$
Азот	1,251	Неон	0,900
Аммиак	0,771	Озон	2,139
Аргон	1,783	Окись углерода	1,25

**Т а б л и ц а 9. Коэффициенты трения**

Соприкасающиеся поверхности	Трение покоя $f_0$	Трение скольжения, $f$		
		сухое	со смазкой	с водяной смазкой
Сталь — сталь	0,15	0,1	0,01	—
Металл — дерево	0,5–0,6	0,4–0,5	0,03–0,08	0,25
Дерево — дерево	0,6–0,7	0,3	0,1	—
Кожа — чугун	0,5–0,6	0,2–0,3	0,12	0,28
Кожа — дерево	0,4–0,5	0,2–0,3	—	—
Сталь — лед	—	—	—	0,014
Шина автомобиля — асфальт	0,55	0,3	0,15	—

Коэффициенты трения качения  $f_k$  (см):

металлического диска по металлу	0,001–0,002
колеса со стальным бандажем	0,005
по стальному рельсу	
шины автомобиля по асфальту	0,02
(скорость 80 км/ч)	

Коэффициенты сцепления шины автомобиля  $\psi$ :

на сухом асфальте	0,7–0,8
на мокром асфальте	0,1–0,2
на сухом бетоне	0,9–1,0
на мокром бетоне	0,8–0,9
на сухой грунтовой дороге	0,4–0,5
на мокрой грунтовой дороге	0,3–0,4

**Т а б л и ц а 10. Коэффициенты отражения звуковых волн полированными поверхностями металлов при нормальном падении, %**

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

Примечание. Коэффициенты отражения при переходе из одной среды в другую и обратно будут иметь одинаковые значения.

**Т а б л и ц а 11. Коэффициент поглощения звука в воздухе  $\alpha$ ,  $10^{-2} \text{ м}^{-1}$  при  $20^\circ \text{C}$**

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
10	2,53	3,28	2,20	1,47	1,08

**Таблица 12 Свойства Земли на разных глубинах  
и скорость сейсмических волн**

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

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

**Таблица 13. Скорость звука в газах  
при нормальном давлении**

Газ	$t$ , °C	$v$ , м/с	$\alpha$ , м/(с • К)	Газ	$t$ , °C	$v$ , м/с	$\alpha$ , м/(с • К)
Азот	0	334	0,6	Гелий	0	965	0,8
Аммиак	0	415	—	Кислород	0	316	0,56
Водород	0	1284	2,2	Углекис-	0	259	0,4
Водяной	134	494	—	лый газ			
пар				Неон	0	435	0,8
Воздух	0	331	0,59				

Примечание. Скорость звука в газах при постоянном давлении увеличивается с повышением температуры. Для расчета скорости при других температурах приведен температурный коэффициент скорости  $\alpha$ .

**Таблица 14 Скорость звука в твердых  
изотропных материалах при 20 °С**

Материал	$v_0$ , м/с	$v_1$ , м/с	$v_2$ , м/с	Материал	$v_0$ , м/с	$v_1$ , м/с	$v_2$ , м/с
Алюминий	5080	6260	3080	Полисти- рол	—	2350	—
Гипс	—	4970	2370	Пробка	500	—	—
Железо	5170	5850	3230	Резина	46	1040	27
Каучук	—	1479	—	Свинец	2640	3600	1590
Латунь	3490	4430	2123	Сталь угле- родистая	5050	6100	3300
Лед	3280	3980	1990	Стекло	5370	5570	3515
Медь	3710	4700	2260	кварцевое	—	—	—
Мрамор	—	6150	3260	Стекло	3490- 5300	3760- 5660	2220- 3420
Никель	4785	5630	3969	Фарфор	4884	5340	3120
Олово	2730	3320	1670	Эбонит	1570	2405	—
Песчаник	—	3700- 4900	—				
Плексиглас	—	2670	—				

Примечание.  $v_0$  — скорость звука в стержнях,  $v_1$  — скорость продольных волн,  $v_2$  — скорость поперечных волн.

**Таблица 15. Удельные теплоемкости  $c_p$ ,  
теплоты плавления  $\lambda$ , теплоты парообразования  $r$ ,  
температуры плавления  $t_{пл}$  и кипения  $t_{кп}$**

Вещество	$c_p$ , кДж/(кг · К)	$t_{пл}$ , °С	$\lambda$ , кДж/кг	$t_{кп}$ , °С	$r$ , кДж/кг
Алюминий	0,88	658,3	322-394	2300	9220
Ацетон	2,18	-94,3	96	56,2	524
Бензол	1,705	5,5	127	80,2	396
Висмут	0,13	271	50	1560	855
Глицерин	2,4	—	176	290	825
Германий	0,31	958	478	2700	—
Железо	0,45	1530	293	3050	6300
Золото	0,13	1064,4	66,6	2800	1575
Калий	0,763	64	60,8	760	2080

Вещество	$c_p$ , кДж/(кг • К)	$t_{пл}$ , °С	$\lambda$ , кДж/кг	$t_{пл}; t_{кп}$ , °С	$r$ , кДж/кг
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	9,8	113	883	4220
Нафталин	1,3	80,3	151	218	316
Никель	0,46	1452	243–306	3000	7210
Олово	0,23	231,9	59	2270	3020
Ртуть	0,138	–38,9	11,73	356,7	285
Свинец	0,13	327,3	22,5	1750	880
Серебро	0,235	961,9	88	2184	2350
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
Чугун	0,50	1100–1200	96–138	—	—

Таблица 16. Температурный коэффициент длины  $\alpha$  твердых изотропных тел при температуре около 20 °С

Вещество	$\alpha$ , $10^{-4} \text{ К}^{-1}$	Вещество	$\alpha$ , $10^{-4} \text{ К}^{-1}$
Алмаз	0,91	Инвар	0,9
Алюминий	22,9	(36,1% никеля)	
Бронза	17,5	Иридий	6,5
Винипласт	70	Кварц	0,5
Висмут	13,4	(плавленный)	
Вольфрам	4,3	Кирпичная	5,5
Гранит	8,3	кладка	
Дерево (вдоль волокон)	2–6	Константан	17,0
Дерево (поперек волокон)	50–60	Латунь	18,9
Дюралюминий	22,6	Лед (от –10° до 0° С)	50,7
Железо кованое	11,9	Магний	25,1
Железо литое	10,2	Медь	16,7
Золото	14,5	Нейзильбер	18,4
		Никель	13,4
		Олово	21,4



Вещество	$\alpha, 10^{-4} \text{ K}^{-1}$	Вещество	$\alpha, 10^{-4} \text{ K}^{-1}$
Платина	8,9	Стекло обычное	8,5
Платино-иридиевый	8,7	Стекло пирекс	3,0
Свинец	28,3	Углерод (графит)	7,9
Сталь	9,6–16,0	Фарфор	3,0
нержавеющая		Цинк	30,0
Сталь	11,1–12,6	Цемент и бетон	12,0
углеродистая		Чугун	10–12
		Эбонит	70

Таблица 17. Относительное изменение объема при плавлении

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

Таблица 18. Удельная теплоемкость газов при нормальном давлении  $c_p$ , кДж/(кг · К),  $\gamma = c_p/c_v$

Температура, °C	Кислород		Воздух	
	$c_p$	$\gamma$	$c_p$	$\gamma$
0	0,9149	1,397	1,006	1,400
100	0,934	1,385	1,010	1,397
200	0,964	1,37	1,027	1,390
300	0,9948	1,353	1,048	1,378
600	1,069	1,321	1,115	1,345

Темпе- ратура, °C	Углекислый газ		Водяной пар		Этиловый спирт	
	$C_p$	$\gamma$	$C_p$	$\gamma$	$C_p$	$\gamma$
0	0,8148	1,301	—	—	1,341	1,16
100	0,9136	1,260	1,103	1,28	1,689	1,12
200	0,9926	1,235	1,978	1,30	2,011	1,10
300	1,057	1,217	2,015	1,29	2,321	1,08
600	1,192	1,188	2,208	1,26	3,168	1,06

Таблица 19 Температурный коэффициент объема  $\beta$  жидкостей. Температура 18 °C

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

Таблица 20 Критические параметры

Вещество	$t_k, ^\circ C$	$p_k, \text{МПа}$	$10^3 \cdot \rho_k, \text{кг/м}^3$
Азот	-146,1	3,39	0,311
Ацетон	235	4,76	0,268
Бензол	288,6	4,83	0,304
Вода	374,15	22,11	0,315
Водород	-239,9	1,3	0,031
Гелий	-267,9	0,2	0,069
Кислород	-118,8	5,03	0,430
Кислота уксусная	321,6	5,79	0,351

Вещество	$t_k, ^\circ\text{C}$	$p_k, \text{МПа}$	$10^3 \cdot \rho_k, \text{кг/м}^3$
Метан	-82,5	4,64	0,162
Нафталин	468,2	3,97	—
Спирт метиловый	240	7,97	0,272
Спирт пропиловый	263,7	5,07	0,273
Спирт этиловый	243,1	6,38	0,276
Толуол	320,6	4,21	0,292
Углекислый газ	31,1	7,39	0,460

**Таблица 21. Теплопроводность газов  
при нормальном давлении**

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

**Таблица 22. Температурные коэффициенты  
давления газов**

Газ	Азот	Аммиак	Водо- род	Воздух	Гелий	Кисло- род	Угле- кислый газ
$10^{-3} \text{ К}^{-1}$	3,674	3,802	3,662	3,674	3,660	3,674	3,726

Таблица 23. Коэффициенты диффузии газов в воздухе при 0 °С и нормальном давлении

Газ	$D, 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$	Газ	$D, 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$
Аммиак	0,2	Метан	0,2
Ацетилен	0,19	Метиловый спирт	0,13
Бензин	0,079	Сероуглерод	0,09
авиационный		Углекислый газ	0,14
Водород	0,64	Этиловый спирт	0,10
Водяной пар	0,21		

Таблица 24. Газокинетические диаметры молекул

Вещество	Диаметр, нм	Вещество	Диаметр, нм
Азот	0,37	Метан	0,444
Аргон	0,36	Неон	0,354
Водород	0,27	Окись углерода	0,370
Гелий	0,215	Ртуть	0,30
Кислород	0,356	Углекислый газ	0,454
Криптон	0,314	Хлор	0,544
Ксенон	0,40		

Таблица 25. Постоянные Ван-дер-Ваальса

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

**Таблица 26. Вязкость газов при 0 °С**

Вещество	$\eta, 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$	Вещество	$\eta, 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$
Азот	1,67	Кислород	1,92
Аммиак	0,98	Метан	1,04
Водород	0,84	Окись азота	1,72
Воздух	1,72	Окись углерода	1,67
Гелий	1,89	Углекислый газ	1,40
Закись азота	1,38	Хлор	1,29

**Таблица 27. Вязкость газов при различных давлениях  $\eta$ , мкПа · с**

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

**Таблица 28. Вязкость воды при различных температурах**

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

Таблица 29. Вязкость жидкостей при 18 °С

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

Таблица 30. Поверхностное натяжение жидкостей при 20 °С

Вещество	$\alpha, \text{ мН/м}$	Вещество	$\alpha, \text{ мН/м}$
Азотная кислота	59,4	Нефть	26
Анилин	42,9	Нитробензол	43,9
Ацетон	23,7	Серная кислота	57,4
Вода	73,0		

Таблица 31. Удельная теплота сгорания топлива

Топливо	$W_b, \text{ МДж/кг}$	$W_n, \text{ МДж/кг}$
Твердое		
Антрацит (марки "А")	32-34	19-27
Бурые угли	25,0-29,0	10,0-17,0
Горючие сланцы	27,0-33,0	6,3-8,4
Древесный уголь (сухой)	30,0	-
Дрова	19,0	10,0
Каменные угли	31,0-32,0	21,0-24,0
длиннопламенные		
Торф	22,0-25,0	8,4-11,0

Топливо	$W_v$ , МДж/кг	$W_n$ , МДж/кг
<i>Жидкое (20 °С, 101325 Па)</i>		
Бензин высшего качества	—	44,1
Дизельное топливо	—	42,7
Керосин	—	43,0
Мазут	—	39,0–41,0
Этиловый спирт	—	27,2
<i>Газообразное (0 °С, 1013 гПа)</i>		
Ацетилен	50,0 (58,2)	48,2 (56,0)
Бутан	49,6 (132,0)	46,1 (123,0)
Водород	142,0 (12,8)	120,0 (10,8)
Коксовый газ (очищенный)	—	34,8 (16,4)
Природный газ	—	42,0–47 (33–36)
Пропан	50,4 (101)	46,6 (94)
Условное топливо	29,35	—

Примечание. Теплота сгорания, определяемая без учета потерь на испарение воды, содержащейся в топливе, называется высшей теплотой  $W_v$ , с учетом их — низшей теплотой  $W_n$ . На практике теплота сгорания газообразного топлива рассчитывается на один кубический метр (при нормальном давлении и температуре 0 °С); значения в МДж/м<sup>3</sup> указаны в скобках.

Таблица 32. Электроизолирующие материалы

$\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость,

$E$  — пробивная напряженность,  $\rho'$  — плотность,

$\rho$  — удельное сопротивление

Материал	$\epsilon$	$E$ , МВ/м	$\rho'$ , 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>	$\rho$ , Ом·м
Асбест	—	2	2,3–2,6	2 · 10 <sup>3</sup>
Бакелит	4–4,6	10–40	1,2	—
Битум	2,6–3,3	6–15	1,2	—
Гетинакс	5–6,5	10–30	1,3	—
Канифоль	3,5	—	1,1	5 · 10 <sup>14</sup>

Материал	$\epsilon$	$E$ , МВ/м	$\rho'$ , $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	$\rho$ Ом·м
Мрамор	8-10	6-10	2,7	$1 \cdot 10^8$
Парафин	2,2-2,3	20-30	0,4-0,9	$3 \cdot 10^{11}$
Плексиглас	3,0-3,6	18,5	1,2	—
Полистирол	2,2-2,8	25-50	1,05-1,65	$5 \cdot 10^{13}$ — $5 \cdot 10^{15}$
Полихлорвинил	3,1-3,5	50	1,38	—
Радиофарфор	6,0	15-20	2,5-2,6	—
Резина мягкая	2,6-3	15-25	1,7-2,0	$4 \cdot 10^{11}$
Слюда	4,5-8	50-200	2,8-3,2	$10^{11}$ — $10^{16}$
Стекло	4-10	20-30	2,2-4,0	$10^9$ — $10^{12}$
Текстолит	7	2-8	1,3-1,4	—
Фарфор электро- технический	6,5	20	2,4	$3 \cdot 10^{12}$
Шифер	6-7	5-14	2,6-2,9	$10^6$
Эбонит	4-4,5	25	1,3	$10^{16}$
Янтарь	2,7-2,9	20-30	1,06-1,11	$10^{11}$

Таблица 33. Диэлектрическая проницаемость жидкостей

Вещество	Температура, °С						
	0	10	20	25	30	40	50
Ацетон	23,3	22,5	21,4	20,9	20,5	19,5	18,7
Бензол	—	2,30	2,29	2,27	2,26	2,25	2,22
Глицерин	—	—	56,2	—	—	—	—
Керосин	—	—	2,0	—	—	—	—
Четырех- хлористый 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
Этиловый эфир	4,80	4,58	4,38	4,27	4,15	—	—

Примечание. Примеси в небольших количествах мало влияют на значение диэлектрической проницаемости.



Примечание. Примеси в небольших количествах мало влияют на значение диэлектрической проницаемости.

Таблица 34. Диэлектрическая проницаемость газов при 18 °С и нормальном давлении

Вещество	$(\epsilon-1), 10^{-5}$	Вещество	$(\epsilon-1), 10^{-5}$
Азот	61	Кислород	55
Водород	26	Пары воды	180
Воздух	59	Углекислый газ	97
Гелий	7		

Примечание. Диэлектрическая проницаемость газов уменьшается с повышением температуры и возрастает с увеличением давления.

Таблица 35. Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления металлов при 20 °С

Металл	$10^8 \rho, \text{Ом} \cdot \text{м}$	$10^{-3} \alpha, \text{К}^{-1}$	Металл	$10^8 \rho, \text{Ом} \cdot \text{м}$	$10^{-3} \alpha, \text{К}^{-1}$
Алюминий	2,8	4,9	Никель	10,0	5,0
Бронза фосфористая	8,0	4,0	Олово	11,5	4,2
Вольфрам	5,5	4,5	Свинец	22,1	4,1
Железо	9,8	6,2	Ртуть	95,8	0,9
Латунь	2,5-6,0	2-7	Серебро	1,6	3,6
Медь	1,75	3,9	Тантал	15,5	3,1
Молибден	5,7	3,3	Хром	2,7	—
			Цинк	5,9	3,5

Примечание. Указанные в таблице значения являются средними; их величина для различных образцов зависит от степени чистоты, термообработки и т.д.

**Таблица 36. Сплавы с высоким активным  
сопротивлением при 20 °С**

Сплав (состав в %)	$\rho, 10^{-6}$ Ом • м	$\kappa, 10^{-3}$ К <sup>-1</sup>	t, °С
Константан (58,8 Cu, 40 Ni, 1,2 Mn)	0,44–0,52	0,01	500
Манганин (85 Cu, 12 Mn, 3 Ni)	0,42–0,48	0,03	100
Нейзильбер (65 Cu, 20 Zn, 15 Ni)	0,28–0,35	0,04	150
Никелин (54 Cu, 20 Zn, 26 Ni)	0,39–0,45	0,02	1000
Нихром (67,5 Ni, 15 Cr, 16 Fe, 1,5 Mn)	1,0–1,1	0,2	1000
Реотан (84 Cu, 12 Mn, 4 Zn)	0,45–0,52	0,4	150
Фехраль (80 Fe, 14 Cr, 6 Al)	1,1–1,3	0,1	900

**Таблица 37. Удельное сопротивление электролитов  
различных концентраций при 18 °С**

Растворенное вещество	C, %	$\rho', 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	$\rho, 10^{-2}$ Ом • м	$\kappa, \text{К}^{-1}$
Азотная кислота	10	1,05	2,1	0,0145
	20	1,12	1,5	0,0137
	30	1,18	1,3	0,0139
	40	1,25	1,4	0,0150
Едкий натр	5	1,05	5,1	0,0201
	10	1,11	3,2	0,0217
	20	1,22	3,0	0,0299
	40	1,43	8,3	0,0648
Медный купорос	5	1,062	52,9	0,0216
	10	1,107	31,5	0,0218
	17,5	1,206	23,8	0,0236
Нашатырь	5	1,011	10,9	0,0198
	10	1,029	5,6	0,0186
	20	1,057	3,8	0,0161
Поваренная соль	5	1,034	14,9	0,0217
	10	1,071	8,3	0,0214
	20	1,148	5,1	0,0716
Серная кислота	5	1,032	4,8	0,0121
	20	1,14	1,5	0,0145
	30	1,22	1,4	0,0162
	40	1,30	1,5	0,0178

Растворенное вещество	C, %	$\rho', 10^3 \text{ кг/м}^3$	$\rho, 10^{-2}$ Ом·м	$\kappa, \text{ К}^{-1}$
Соляная кислота	5	1,023	2,5	0,0158
	20	1,1	1,3	0,0154
	40	1,2	1,9	—

Таблица 38. Свойства полупроводников

$t_{пл}$  — температура плавления,  $E_0$  — ширина запрещенной зоны,  
 $u_n, u_p$  — подвижности электронов и дырок

Вещество	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	$E_0, \text{эВ}$	$10^{-4} \frac{u_n}{\text{м}^2/(\text{В с})}$	$10^{-4} \frac{u_p}{\text{м}^2/(\text{В с})}$
Бор (В)	2030	1,16	1	50
Алмаз (С)	4030	5,4	1800	1400
Фосфор (черный) (Р)	44	0,33	220	350
Мышьяк (серый) (As)	817	1,2	65	65
Олово ( $\alpha$ -Sn)	232	0,08	2500	2400
Сурьма (Sb)	630	0,13	—	—
Селен (серый) (Se)	217	2,8	—	20
Теллур (Te)	450	0,32	1700	1200
Иод (I)	114	1,3	25	—
Кремний (Si)	1414	1,15	1900	500
Германий (Ge)	958	0,75	3900	1900
Селенид свинца (PbSe)	1065	0,5	1400	1400
Сульфид свинца (PbS)	1114	1,2	650	800
Бромистое серебро (AgBr)	430	2,0	240	$10^5 (1,7 \text{ К})$
Сульфид кадмия (CdS)	1750	2,5	350	15–50
Закись меди ( $\text{Cu}_2\text{O}$ )	1232	1,5–2,2	—	100
Рубин ( $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	2050	2,5	—	—
Окись цинка (цинкит)	1975	3,4	200	—

Примечание. Подвижности указаны для комнатной температуры при напряженностях, меньших 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*.

Таблица 39. Гальванические элементы и аккумуляторы

Источник тока (шифр электрохимической системы)	Электрохимическая система	ЭДС, В (рабочее напряжение)	Примеры
<i>Гальванические элементы</i>			
Элементы Лекланше (МЦ)	Цинк (с диоксидом марганца); водный раствор хлорида аммония и хлорида цинка	1,5 (1,2)	Элементы: "Уран-М" (736), "Юпитер-М" (343), "Орион-М" (373); Батареи: "Планета" (3336), "Крона"
Угльно-цинковые элементы (МЦ)	Цинк, графит (с диоксидом марганца); водный раствор хлорида цинка	1,5 (1,2)	—
Алкалические элементы (А)	Цинк — уголь (с диоксидом марганца); водный раствор гидроокиси калия	1,5 (1,25)	Батареи: "Корунд", "Рубин". Элементы: "Сапфир"-316 ВЦ, А332
Элементы с воздушной деполяризацией (ВД)	Цинк — политетрафторэтилен с активированным углем, гидрат окиси калия, воздух	1,4 (1,2)	Батареи: "Крона ВЦ", "Сапфир ВЦ", "Люкс"
Ртутно-цинковые элементы (РЦ)	Цинк-оксид ртути-гидрат оксида натрия	1,35 (1,25)	Элементы: РЦ-53, РЦ-55 и др. Батареи: 3 РЦ-53 и др.

Источник тока (шифр электрохимической системы)	Электрохимическая система	ЭДС, В (рабочее напряжение)	Примеры
Серебряно-цинковые элементы (СЦ)	Цинк—одновалентное серебро-гидрат оксида калия или натрия	1,6 (1,5)	Элементы СЦ-21, СЦ-30 и др.
Литиевые элементы с органическим электролитом (Л)	Литий—хромат серебра; или литий—диоксид марганца.	3,1 (3)	Элемент CR1/3N
	Литий—окись меди; или литий—соединения свинца с висмутом	1,6 (1,5)	Батареи: PX20L, V28PXL
Аккумуляторы			
Кислотно-свинцовые	Губчатый свинец—диоксид свинца $PbO_2$ —27–28%-процентный водный раствор $H_2SO_4$ .	2,0–1,9	6 СТ-68, 3 МТМ-14
Щелочные серебряно-цинковые	Окись цинка—серебро—раствор КОН	1,5	СЦС-25, СЦС-100 и др.
Щелочные железо-никелевые (или кадмиево-никелевые)	Порошкообразное железо—гидроксид никеля—20%-ный раствор КОН	1,4–1,1	4НКН-45, 4ЖН-45 и др.

**Таблица 40 Магнитные свойства  
магнитно-мягких материалов**

Марка материала, состав % (по массе)	$B_s$ , $10^2$ Тл	$\theta$ , °С	$\rho$ , $10^{-6}$ Ом·м	$\mu_n$ $10^3$	$H_c$ , А/м
80 Нм — су- пермаллой (80 Ni, 5 Mo, 15 Fe)	8	400	0,55	100 (1000)	0,4
79 НМ — мо- либденовый пермаллой (79 Ni, 4 Mo, 17 Fe)	8	450	0,5	40 (200)	1,6
50 Н (50Ni, 50 Fe)	15	500	0,45	5 (100)	8,0
40 НКМП — перминвар (40 Ni, 25 Co, 4 Mo, 31 Fe)	14	600	0,63	2 (~2)	—
49 КФ-ВИ — пермендюр (49 Co, 2 V, 49 Fe)	23,5	980	0,4	1 (50)	40
10 СЮ — аль- сифер (5,4 Al; 9,6 Si; 0,005- 0,08 Ge; ~85 Fe)	—	500	0,7	15-20 (50-70)	0,4-3,2
Железо армко (100 Fe)	21,5	768	0,12	0,5 (10)	63,7
Железо карбо- нильное (96,8 Fe; 1,2 O <sub>2</sub> )	0,8-1,1	768	—	10-20	8-40
Ni-Zn феррит, (Ni, Zn) O·FeO <sub>n</sub>	2-3	150- 500	$10^9$	50-500	39,8- 119,4
Mn-Zn феррит, (Mn, Zn) O·FeO <sub>n</sub>	3,5-4	170	$10^5$	1000 (2500)	47,8

Примечание.  $B_s$  — индукция насыщения,  $\theta$  — температура Кюри,  $\rho$  — удельное сопротивление,  $\mu_n$  — начальная магнитная проницаемость (в скобках указаны максимальные значения),  $H_c$  — коэрцитивная сила.

**Таблица 41. Основные свойства  
магнитно-твердых материалов**

Эти материалы имеют высокую коэрцитивную силу, они применяются для изготовления постоянных магнитов. Важной характеристикой их является наибольшее значение величины  $BH$ , которая пропорциональна максимальной энергии магнитного поля, окружающего ферромагнетик

Марка материала, состав в % (по массе)	$B_s$ , Тл	$H_c$ , кА/м	$BH$ , кДж/м <sup>3</sup>
У-13 (1,3С; 98,7Fe)	0,8	4,8	1,8
Е-7 В6 (0,7С; 0,4Cr; 5,7W; 0,4Si; 92,8Fe)	1,04	5,4	2,9
Е Х 9 К15М (1С; 9Cr; 1,5Мо; 88,5Fe)	0,82	12,7	4,4
12 КМВ-комол (12Со; 6Мо; 12W; 70Fe)	1,05	19,9	8,8
ЮНД4-ални (25Ni; 12Al; 4Cu; 59Fe)	0,61	39,8	7,2
ЮНДК24-магнито (14Ni; 8Al; 24Со; 3Cu; 51Fe)	1,23	47,8	31,8
ЮНДК 35 Т5ВА-тиконал (14Ni; 8Al; 35Со; 3Cu; 5Ti; Nb<1)	1,0	119,4	79,6
ПлК76-платинакс (76Pt; 24Со)	0,79	318,4	95,5
52КФ13-викаллой (52Со; 13V; 35Fe)	0,6	39,8	—
2 ФК-кобальт-феррит (СоО Fe <sub>2</sub> О <sub>3</sub> )	0,3	143,3	15,9
1 БИ-барий-феррит (BaO 6Fe <sub>2</sub> О <sub>3</sub> ), изотропный	0,2	135,3	8,0
3 Ба-барий-феррит (BaO 6Fe <sub>2</sub> О <sub>3</sub> ), анизотропный	0,37	159,2	23,8
Со <sub>2</sub> Sm, анизотропный	0,94	270,6	191,0

Примечание.  $B_s$  — остаточная индукция,  $H_c$  — коэрцитивная сила.

Таблица 42. Индукция и потери на гистерезис в ферромагнетиках и ферритах

Материалы	H, А/м						Потери, Дж/м <sup>3</sup>
	8	40	160	800	4000	40 000	
Железо электролитическое	0,004	0,05	1,1	1,5	1,7	2,1	250
Железо отожженное	0,01	0,075	1,4	1,6	1,72	2,1	60
Железо кремнистое листовое (4,3%)	0,02	0,45	1,0	1,35	1,53	1,95	69
Железо кобальтовое (35% Co)	—	—	0,4	1,5	2,1	2,4	350
Чугун отожженный	—	—	0,06	0,5	0,85	1,4	1000
Сталь мягкая (0,1 % C)	0,003	0,03	0,6	1,4	1,7	2,1	500
“—” листовая	0,004	0,04	0,9	1,45	1,65	2,1	250
Феррит Mn-Zn	0,008	0,05	0,23	0,36	—	—	—
“—” Ni-Zn	0,0005	0,008	0,01	0,15	0,24	—	—
“—” Mg-Mn	—	0,01	0,2	0,23	—	—	—
“—” 30% Ni-Fe	—	—	—	0,25	0,31	—	—
“—” 70% Ni-Cu	—	—	—	0,05	0,1	—	—

Примечания.

1. Значения B (Тл) следует рассматривать как ориентировочные.

2. В последней графе указаны потери за один цикл перемагничивания в объеме вещества 1 м<sup>3</sup> для петли гистерезиса с максимальным значением индукции 0,1 Тл.



Таблица 43. Шкала электромагнитных излучений

Частота, Гц	Длина волны, м	Название диапазона	Основные источники возбуждения
$10^{-3}$ $10^3$	$3 \cdot 10^{11}$ $3 \cdot 10^5$	Низкочастотные (сверхдлинные) волны	Генераторы специальных конструкций; промышленные частоты 50–60 Гц; генераторы звуковых частот до 20 кГц
$10^3$ $10^{12}$	$3 \cdot 10^6$ $3 \cdot 10^{-4}$	Радиоволны	Генераторы радиочастот до 300 МГц; генераторы сверхвысоких частот (СВЧ)
$10^{12}$ $4 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{-4}$ $8 \cdot 10^{-7}$	Инфракрасное излучение	
$4 \cdot 10^{14}$ $8 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^{-7}$ $4 \cdot 10^{-7}$	Видимое излучение (с длинами волн от 800 до 400 нм)	Излучение молекул и атомов при тепловых и электрических воздействиях
$8 \cdot 10^{14}$ $3 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{-7}$ $10^{-9}$	Ультрафиолетовое излучение; мягкое рентгеновское излучение	Излучение атомов при облучении вещества электронами с энергиями до 15 кэВ
$3 \cdot 10^{17}$ $3 \cdot 10^{20}$	$10^{-9}$ $10^{-12}$	Рентгеновское излучение, гамма-излучение	Атомные процессы, которые возбуждаются электронами с энергиями от 20 кэВ до нескольких сотен МэВ
$3 \cdot 10^{20}$ $10^{23}$	$10^{-12}$ $3 \cdot 10^{-15}$	Гамма-излучение	Ядерные процессы, радиоактивные распады

Примечание. Между соседними диапазонами нет четкой границы раздела.

**Таблица 44. Световая отдача, КПД, яркость  
источников света**

Источник света	$\Phi/P$ , лм/Вт	КПД, %	T, К	Яркость, кд/м <sup>2</sup>
Лампа:				
50 Вт (пустотная)	10	1,6	2460	$1,5-2,0 \cdot 10^7$
50 Вт (газонаполн.)	10	1,6	2685	$5 \cdot 10^6$
500 Вт (газонаполн.)	17,5	2,8	2900	$10^7$
2000 Вт (газонаполн.)	21	3,5	3020	$1,5 \cdot 10^7$
люминесцентная	40-60	6,4	—	$5-7 \cdot 10^3$
Поверхность Солнца	—	—	6000	$10^9$
Вольтова дуга (в кратере)	25	4	4000	$1,5 \cdot 10^8$
Искра при разряде в газе	—	—	—	$10^{11}-10^{12}$
Экраны телевизион- ных кинескопов	—	—	—	100-200
Ночное безлунное небо	—	—	—	10

Примечание. Световая отдача — отношение светового потока  $\Phi$  к мощности тока  $P$ , потребляемой источником света;  $\text{КПД} = \Phi / (683P)$ .

**Таблица 45. Освещенность**

Освещение	Освещенность, лк
Солнечными лучами в полдень (средние широты)	100 000
При киносъемке в студии	10 000
На открытом месте в пасмурный день	1000
В светлой комнате (вблизи окна)	100
На рабочем столе для тонких работ	100-200
Необходимое для чтения	30-50
На экране кинотеатра	85-120
От полной Луны	0,2
От ночного неба в безлунную ночь	0,0003

**Таблица 46 Поглощение солнечной радиации  
поверхностью Земли**

Поверхность	Альbedo
Водная поверхность	0,03–0,04
Влажные свежевспаханные черноземы	0,05
Поверхность с растительным покровом	0,13–0,25
Бесснежная подстилающая поверхность суши	0,15–0,17
Поверхность пустыни	0,25–0,30
Поверхность ледников	0,5
Снежный покров	0,5–0,6
Наземные и плавучие морские и озерные льды	0,5–0,6
Сплошной паковый лед со снегом	0,8
Земля как планета (среднее значение)	0,34
Безоблачные участки атмосферы Земли (среднее значение)	0,09
Облака	0,01–0,8

**Примечания.**

1) *Альbedo* — отношение потока энергии отраженной радиации к потоку излучения, падающего на данную поверхность. Указанные в таблице значения альbedo соответствуют нормальному падению солнечной радиации на облучаемую поверхность.

2) Среднее альbedo по северному полушарию 0,08–0,14, по южному 0,06–0,08.

Таблица 47. Отражение света металлами

Название группы волн	Длина волны, нм	Алюминий	Медь	Сталь	Серебро	Никель	Хром	Цинк	Кремний
Ультра-фиолетовые	188	—	—	22	22	—	33	17	64
	200	—	—	27	25	—	36	22	73
	251	80	25	38	34	38	—	39	75
	305	—	25	44	9	44	37	48	73
	357	84	27	50	75	49	41	51	60
Световые	500	88	44	56	91	61	55	55	34
	600	89	72	57	93	65	—	58	32
	700	87	83	58	95	69	56	61	—
Инфракрасные	900	85	89	61	97	70	—	62	—
	1000	93	90	63	97	72	57	69	—
	5000	94	98	90	99	94	81	97	—
	10000	97	98	94	99	—	93	—	—

Примечание. Значения коэффициентов отражения при нормальном падении света даны в процентах; отражающие поверхности металлов полированы.

Таблица 48. Дисперсия показателя преломления

Излучение	Длина волны, нм	Стекло		Кварц		Плавленый кварц	Вода при 20 °C	Сильвин при 18 °C
		легкий крон	тяжелый крон	Обыкновенная волна	Необыкновенная волна			
Инфракрасное	22300	—	—	—	—	—	—	1,3712
	9429	—	—	—	—	—	—	1,4587
	4200	—	—	1,4569	—	—	—	1,4720
	2172	1,4946	1,6153	1,5180	1,5261	—	—	1,4750
Видимое	1256	1,5042	1,6268	1,5316	1,5402	—	1,3210	1,477
	670,8	1,5140	1,6434	1,5415	1,5505	1,4561	1,3308	1,4866
	643,8	1,5149	1,6453	1,5423	1,5514	1,4568	1,3314	1,4877
	589,3	1,5170	1,6499	1,5443	1,5534	1,4585	1,3330	1,4904
	486,4	1,5230	1,6637	1,5497	1,5590	1,4632	1,3371	1,4983
	404,7	1,5318	1,6852	1,5572	1,5567	1,4697	1,3428	1,5097
Ультрафиолетовое	303,4	1,5552	—	1,5770	1,5872	1,4869	1,3581	1,5440
	214,4	—	—	1,6305	1,6428	1,5339	1,4032	1,5518
	185,2	—	—	1,6759	1,6901	1,5743	—	1,8270
$\alpha, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$		-1	3	-5	-6	-3	-80	-40

## Примечания.

1. Показатели преломления даны относительно воздуха.
2. Температурный коэффициент  $\alpha$  — изменение показателя преломления при повышении температуры на 1 К. Минус указывает, что при увеличении температуры показатель преломления уменьшается.

**Таблица 49. Удельная постоянная вращения  
(при температуре 20 °С,  $\lambda=589,3$  нм)**

Вещество	Растворитель	$[\alpha]$
Сахар тростниковый	Вода	0,665
виноградный	Вода	0,525
фруктовый	Вода	-0,919
Глюкоза	Вода	0,525
Виннокаменная кислота	Вода	0,148
Скипидар	Чистый	-0,37
Камфара	Спирт этиловый	0,409
Хинин	Спирт этиловый	-1,69
Никотин	Вода	-0,79

Примечание. Минус указывает на то, что вращение происходит против часовой стрелки, если смотреть на вещество против хода лучей.  $[\alpha]$  — угловые градусы · м<sup>3</sup>/(кг · м). Удельная постоянная вращения зависит от длины волны и температуры.

**Таблица 50 Спектры излучения металлов**

Алюминий (дуга)	Медь (дуга в вакууме)	Ртуть (ртутная лампа)	Натрий (в пламени)	Кадмий (дуга)	Цинк (дуга в вакууме)
308,3	324,8	312,6	<u>588,997</u>	326,1	303,6
309,3	327,4	313,1	<u>589,593</u>	340,4	307,2
394,4	402,3	365,0		346,6	334,5
<u>396,2</u>	406,3	404,68		361,1	468,0
466,3	<u>510,55</u>	<u>435,83</u>		398,2	472,2
505,7	<u>515,33</u>	491,64		441,3	481,1
569,6	<u>521,82</u>	495,97		467,8	<u>491,2</u>
572,3	570,0	<u>546,07</u>		<u>497,99</u>	492,5
	<u>578,21</u>	<u>576,96</u>		<u>508,58</u>	<u>610,3</u>
	<u>578,22</u>	<u>579,07</u>		533,8	536,2
		615,20		537,9	
		623,20		<u>643,85</u>	

Примечание. Наиболее яркие линии подчеркнуты.

**Таблица 51 Спектры излучения газов  $\lambda$ , нм**

Азот	Аргон	Водород (в газовом разряде)	Гелий	Кислород
575,4	394,90	410,17	<u>388,86</u>	520,0
580,3	<u>404,44</u>	434,04	<u>402,62</u>	530,0
585,3	<u>415,86</u>	434,05	412,08	(полоса)
590,4	416,42	<u>486,128</u>	501,57	555,0
595,7	418,19	486,136	<u>587,56</u>	564,0
601,2	419,00	<u>656,271</u>	<u>667,81</u>	(полоса)
606,8	<u>419,10</u>	656,285	<u>706,52</u>	
632,1	<u>420,07</u>			
639,3	425,12			
646,7	<u>425,94</u>			
654,3	<u>426,63</u>			
662,2	<u>427,22</u>			
670,3	<u>430,01</u>			
678,7	<u>433,36</u>			
	433,54			

Примечания.

1. Длины волн измерены в воздухе при 15 °С и нормальном давлении (101325 Па).
2. Длины волн наиболее ярких линий подчеркнуты.

**Таблица 52. Распределение электронов  
во внешних оболочках**

Элемент	Внешние оболочки	Элемент	Внешние оболочки
Водород	1s <sup>1</sup>	Сера	3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup>
Гелий	1s <sup>2</sup>	Хлор	3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup>
Литий	2s <sup>1</sup>	Аргон	3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup>
Бериллий	2s <sup>2</sup>	Калий	4s <sup>1</sup>
Бор	2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup>	Кальций	4s <sup>2</sup>
Углерод	2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup>	Скандий	3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup>
Азот	2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup>	Титан	3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup>
Кислород	2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup>	Ванадий	3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup>
Фтор	2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup>	Хром	5d <sup>4</sup> 4s <sup>1</sup>
Неон	2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup>	Марганец	5d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup>
Натрий	3s <sup>1</sup>	Железо	3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup>
Магний	3s <sup>2</sup>	Кобальт	3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup>
Алюминий	3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup>	Никель	3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup>
Кремний	3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup>	Медь	3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>
Фосфор	3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup>	Цинк	3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup>

Элемент	Внешние оболочки	Элемент	Внешние оболочки
Галлий	$4s^2 4p^1$	Тулий	$4f^{13} 6s^2$
Германий	$4s^2 4p^2$	Иттербий	$4f^{14} 6s^2$
Мышьяк	$4s^2 4p^3$	Лютеций	$4f^{14} 5d^1 6s^2$
Селен	$4s^2 4p^4$	Гафний	$5d^2 6s^2$
Бром	$4s^2 4p^5$	Тантал	$5d^3 6s^2$
Криптон	$4s^2 4p^6$	Вольфрам	$5d^4 6s^2$
Рубидий	$5s^1$	Рений	$5d^5 6s^2$
Стронций	$5s^2$	Осмий	$5d^6 6s^2$
Иттрий	$4d^1 5s^2$	Иридий	$5d^7 6s^1$
Цирконий	$4d^2 5s^2$	Платина	$5d^9 6s^1$
Ниобий	$4d^4 5s^1$	Золото	$5d^{10} 6s^1$
Молибден	$4d^5 5s^1$	Ртуть	$5d^{10} 6s^2$
Технеций	$4d^5 5s^2$	Таллий	$6s^2 6p^1$
Рутений	$4d^7 5s^1$	Свинец	$6s^2 6p^2$
Родий	$4d^8 5s^2$	Висмут	$6s^2 6p^3$
Палладий	$4d^{10} 5s^0$	Полоний	$6s^2 6p^4$
Серебро	$4d^{10} 5s^1$	Астат	$6s^2 6p^5$
Кадмий	$4d^{10} 5s^2$	Радон	$6s^2 6p^6$
Индий	$5s^2 5p^1$	Франций	$7s^1$
Олово	$5s^2 5p^2$	Радий	$7s^2$
Сурьма	$5s^2 5p^3$	Актиний	$6d^1 7s^2$
Теллур	$5s^2 5p^4$	Торий	$6d^2 7s^2$
Иод	$5s^2 5p^5$	Протактиний	$5f^2 6d^1 7s^2$
Ксенон	$5s^1 5p^6$	Уран	$5f^3 6d^1 7s^2$
Цезий	$6s^1$	Нептуний	$5f^4 6d^1 7s^2$
Барий	$6s^2$	Плутоний	$5f^6 7s^2$
Лантан	$5d^1 6s^2$	Америций	$5f^7 7s^2$
Церий	$4f^1 5d^1 6s^2$	Кюрий	$5f^7 6d^1 7s^2$
Празеодим	$4f^3 6s^2$	Берклий	$5f^9 6d^1 7s^2$
Неодим	$4f^4 6s^2$	Калифорний	$5f^{10} 7s^2$
Прометий	$4f^5 6s^2$	Эйнштейний	$5f^{11} 7s^2$
Самарий	$4f^6 6s^2$	Фермий	$5f^{12} 7s^2$
Европий	$4f^7 6s^2$	Менделевий	$5f^{13} 7s^2$
Гадолиний	$4f^7 5d^1 6s^2$	Нобелий	$5f^{14} 7s^2$
Тербий	$4f^9 6s^2$	Лоуренсий	$5f^{14} 6d^1 7s^2$
Диспрозий	$4f^{10} 6s^2$	Курчатовий	$6d^2 7s^2$
Гольмий	$4f^{11} 6s^2$	Нильсборий	$6d^3 7s^2$
Эрбий	$4f^{12} 6s^2$		



**Таблица 53. Массовые коэффициенты ослабления электронов в алюминии**

Энергия, эВ	$\mu/\rho$ , см <sup>2</sup> /г	Энергия, эВ	$\mu/\rho$ , см <sup>2</sup> /г
$9 \cdot 10^2$	$2,5 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^5$	130
$5,8 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^5$	29
$1,05 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^4$	$4,6 \cdot 10^5$	9,0
$4,66 \cdot 10^4$	740	$6,6 \cdot 10^5$	6,0

**Таблица 54. Средний массовый пробег протонов высокой энергии г/см<sup>2</sup>**

Энергия, МэВ	Бериллий	Углерод	Воздух	Алюминий	Медь	Свинец
50	2,722	2,488	2,557	2,928	3,599	5,275
75	5,655	5,160	5,293	6,021	7,321	10,52
100	9,481	8,623	8,835	10,01	12,01	17,17
500	144,4	131,3	133,3	148,9	174,9	237,6
1000	404,0	365,3	370,0	412,0	479,4	642,2
5000	2879	2584	2543	2587	3248	4185
10000	5889	5270	5081	5777	6512	8234

**Таблица 55. Относительная масса и активность некоторых изотопов**

Элемент	Число протонов	Число нейтронов	Относительная масса	Содержание %	Род активности	Период полураспада
H	1	0	1,007825	99,99	Стаб.	—
D	1	1	2,014102	0,015	Стаб.	—
T	1	2	3,016049	—	$\beta^-$	12,33 г
He	2	1	3,016029	0,00014	Стаб.	—
	2	2	4,002603	-100	Стаб.	—
Li	3	3	6,015123	7,5	Стаб.	—
	3	4	7,016005	92,5	Стаб.	—
Be	4	3	7,016930	—	$\gamma$	53,3 сут
	4	9	9,012183	100	Стаб.	—
B	5	5	10,012938	19,8	Стаб.	—
	5	6	11,009305	80,2	Стаб.	—
C	6	5	11,011433	—	$\beta^+$	20,4 мин
	6	6	12,000000	98,89	Стаб.	—
	6	7	13,003355	1,11	Стаб.	—
	6	8	14,003242	—	$\beta^-$	5730 лет
N	7	6	13,005739	—	$\beta^+$	9,96 мин
	7	7	14,003074	99,63	Стаб.	—
	7	8	15,000109	0,37	Стаб.	—

Элемент	Число протонов	Число нейтронов	Относительная масса	Содержание %	Радиоактивности	Период полураспада
O	8	7	15,003065	—	$\beta^+$	122 с
	8	8	15,994915	99,76	Стаб.	—
	8	10	17,999159	0,24	Стаб.	—
F	9	10	18,998403	100	Стаб.	—
	10	10	19,992439	90,51	Стаб.	—
Ne	10	12	21,991384	9,22	Стаб.	—
	11	11	21,994435	—	$\beta^+$	2602 года
Na	11	12	22,989770	100	Стаб.	—
	11	13	23,990964	—	$\beta^-, \gamma$	15,0 ч
	12	12	23,985045	78,99	Стаб.	—
Mg	13	14	26,981541	100	Стаб.	—
	14	14	27,976928	92,23	Стаб.	—
Si	14	17	30,975364	—	$\beta^-, \gamma$	2,62 ч
	15	16	30,973763	100	Стаб.	—
P	15	17	31,973908	—	$\beta^-$	14,28 сут
	16	16	31,972072	95,0	Стаб.	—
S	16	17	34,969033	—	$\beta^-$	87,4 сут
	17	18	34,968853	75,77	Стаб.	—
Cl	17	20	36,965903	24,23	Стаб.	—
	18	22	39,962383	99,60	Стаб.	—
Ar	19	20	38,963708	93,26	Стаб.	—
	19	21	39,964000	—	$\beta^-$	1,28 · 10 <sup>9</sup> лет
Ca	20	20	39,962591	96,94	Стаб.	—
Sc	21	24	44,955914	100	Стаб.	—
Ti	22	26	47,947947	73,7	Стаб.	—
V	23	28	50,943963	99,75	Стаб.	—
Cr	24	28	51,940510	83,79	Стаб.	—
Mn	25	30	54,938046	100	Стаб.	—
Fe	26	30	55,934939	91,8	Стаб.	—
Co	27	32	58,933198	100	Стаб.	—
	27	33	59,933820	—	$\beta^-, \gamma$	5,271 года
Ni	28	30	59,930789	26,1	Стаб.	—
Cu	29	34	62,929599	69,2	Стаб.	—
	29	36	64,927792	30,8	Стаб.	—
Zn	30	34	63,929145	48,6	Стаб.	—
	30	36	65,926035	27,9	Стаб.	—
Ga	31	38	68,925581	60,1	Стаб.	—
Ge	32	40	71,922080	27,4	Стаб.	—
	32	42	73,921179	36,5	Стаб.	—
As	33	42	74,921576	100	Стаб.	—
Se	34	46	78,916521	49,8	Стаб.	—
Br	35	44	78,918336	50,69	Стаб.	—
Kr	36	48	83,911506	57,0	Стаб.	—
Rb	37	48	84,911800	72,17	Стаб.	—
Sr	38	48	85,909373	9,8	Стаб.	—
	38	50	87,905625	82,6	Стаб.	—
	38	52	89,907746	—	$\beta^-$	28,8 года

Элемент	Число протонов	Число нейтронов	Относительная масса	Содержание %	Род активности	Период полураспада
Y	39	50	88,905856	100	Стаб.	—
Zr	40	50	89,904708	51,5	Стаб.	—
Nb	41	52	92,906378	100	Стаб.	—
Mo	42	56	97,905405	24,1	Стаб.	—
Tc	43	55	97,907210	—	$\beta^-$ , $\gamma$	$4,2 \cdot 10^6$ лет
Ru	44	58	101,904348	36,1	Стаб.	—
Rh	45	58	102,90550	100	Стаб.	—
Pd	46	60	105,690348	27,3	Стаб.	—
Ag	47	60	106,905095	51,83	Стаб.	—
	47	62	108,904754	48,17	Стаб.	—
Cd	48	66	113,903361	28,7	Стаб.	—
In	49	66	114,90388	95,7	$\beta^-$	$5,1 \cdot 10^{14}$ лет
Sn	50	70	119,902199	32,4	Стаб.	—
Sb	51	70	120,903824	53,7	Стаб.	—
Te	52	78	129,90623	34,5	$\beta^-$	$2 \cdot 10^{21}$ лет
I	53	74	126,904477	100	Стаб.	—
	53	78	130,906118	—	$\beta^-$ , $\gamma$	8,04 сут
Xe	54	78	131,90415	29,6	Стаб.	—
	54	82	135,90722	8,9	Стаб.	—
Cs	55	78	132,90543	100	Стаб.	—
Ba	56	81	136,90582	11,2	Стаб.	—
	56	82	137,90524	71,7	Стаб.	—
La	57	82	138,90636	99,91	Стаб.	—
Ce	58	82	139,90544	—	Стаб.	—
Pr	59	82	140,90766	100	Стаб.	—
Nd	60	82	141,90773	27,2	Стаб.	—
Pm	61	84	144,91275	—	$\alpha$ , $\gamma$	17,7 года
Sm	62	90	151,91974	26,6	Стаб.	—
Eu	63	90	152,92124	52,1	Стаб.	—
Gd	64	94	157,92411	24,8	Стаб.	—
Tb	65	94	158,92535	100	Стаб.	—
Dy	66	98	163,92918	28,1	Стаб.	—
Ho	67	98	164,93033	100	Стаб.	—
Er	68	98	165,93031	33,4	Стаб.	—
Tm	69	100	168,93423	100	Стаб.	—
Yb	70	104	173,93887	31,6	Стаб.	—
Lu	71	104	174,94079	97,36	Стаб.	—
Hf	72	108	179,94656	32,5	Стаб.	—
Ta	73	108	180,94801	99,99	Стаб.	—
W	74	110	183,95095	30,7	Стаб.	—
Re	75	112	186,95577	62,60	$\beta^-$	$4 \cdot 10^{10}$ лет
Os	76	115	190,96094	—	$\beta^-$ , $\gamma$	15,4 сут
	76	116	191,96149	41,0	Стаб.	—
Ir	77	114	190,96060	37,3	Стаб.	—
	77	116	192,96294	62,7	Стаб.	—
Pt	78	117	194,96479	33,8	Стаб.	—
Au	79	118	196,96656	100	Стаб.	—
Hg	80	122	201,97063	29,8	Стаб.	—

Элемент	Число протонов	Число нейтронов	Относительная масса	Содержание %	Род активности	Период полураспада
Tl	81	124	204,97441	70,5	Стаб.	—
Pb	82	124	205,97446	24,1	Стаб.	—
	82	125	206,97589	22,1	Стаб.	—
	82	126	207,97664	52,3	Стаб.	—
	82	128	209,98418	—	$\alpha, \beta^-, \gamma$	22,3 года
	82	129	210,98874	—	$\beta^-, \gamma$	36,1 мин
	82	130	211,99188	—	$\beta^-, \gamma$	10,64 часа
Bi	82	132	213,99980	—	$\beta^-, \gamma$	26,8 мин
	83	126	208,98039	100	Стаб.	—
Po	83	128	210,98726	—	$\alpha, \beta^-, \gamma$	2,15 мин
	84	126	209,98286	—	$\alpha, \gamma$	138,38 сут
	84	130	213,99519	—	$\alpha, \gamma$	$1,64 \cdot 10^4$ с
At	85	133	218,00870	—	$\alpha, \beta^-$	2 с
Rn	86	136	222,017574	—	$\alpha, \gamma$	3,8235 сут
Fr	87	136	223,019734	—	$\alpha, \beta^-, \gamma$	21,8 мин
Ra	88	138	226,025406	—	$\alpha, \gamma$	$1,60 \cdot 10^3$ лет
Ac	89	138	227,027751	—	$\alpha, \beta^-, \gamma$	21,773 г
Th	90	138	228,02873	—	$\alpha, \gamma$	1,9131 г
Pa	91	140	231,035881	—	$\alpha, \gamma$	$328 \cdot 10^4$ лет
U	92	140	232,03714	—	$\alpha, \gamma$	72 г
	92	141	233,039629	—	$\alpha, \gamma$	$1,592 \cdot 10^5$ лет
	92	143	235,043925	0,72	$\alpha, \gamma$	$7,038 \cdot 10^8$ лет
	92	144	236,045563	—	$\alpha, \gamma$	$2,342 \cdot 10^7$ лет
	92	146	238,050786	99,275	$\alpha, \gamma$	$4,468 \cdot 10^9$ лет
	92	147	239,054291	—	$\beta^-, \gamma$	23,5 мин
Np	93	146	239,052932	—	$\beta^-, \gamma$	2,35 сут
Pt	94	145	239,052158	—	$\alpha, \gamma$	$2,41 \cdot 10^4$ лет
Am	95	148	243,061374	—	$\alpha, \gamma$	$7,37 \cdot 10^3$ лет
Cm	96	149	245,065487	—	$\alpha, \gamma$	$8,5 \cdot 10^3$ лет
Bk	97	150	247,07003	—	$\alpha, \gamma$	$1,4 \cdot 10^3$ лет
Cf	98	151	249,074849	—	$\alpha, \gamma$	351 год
Es	99	155	254,08802	—	$\alpha, \beta^-, \gamma$	276 сут
Fm	100	153	253,08518	—	$\alpha, \gamma$	3,0 сут
Md	101	154	255,0911	—	$\alpha$	27 мин
No	102	153	255,0933	—	$\alpha$	3,1 мин
Lr	103	154	257,0998	—	$\alpha$	-35 с
Ku	104	157	261,1087	—	$\alpha$	1,1 мин
Ns	105	157	262,1138	—	$\alpha$	0,7 мин
	106	157	263,1184	—	$\alpha$	0,9 с

### Примечания.

1. Приведены массы нейтральных атомов в а.е.м.
2. Указано содержание (в процентах) в естественных условиях.

Таблица 56. Бета- и гамма-радиоактивные нуклиды

Элемент	Массовое число	Период полураспада	Энергия излучения МэВ	
			β-частицы	γ-излучение
Углерод	14	5730 лет	0,155	—
Натрий	24	15,0 ч	1,39	1,38; 2,76
Фосфор	32	14,3 сут	1,71	—
Сера	35	87,4 сут	0,167	—
Хлор	36	$3,1 \cdot 10^5$ г	0,714	—
Кальций	45	152 сут	0,254	—
Титан	51	5,8 мин	2,13	0,32; 0,61; 0,93
Хром	51	28 сут	—	0,32; 0,57
Железо	55	2,9 лет	—	0,21
“—”	59	45 сут	0,46; 0,27	1,1; 1,29
Кобальт	60	5,3 лет	0,3	1,17; 1,33
Селен	75	127 сут	—	0,2–0,4
Стронций	89	51 сут	1,46	—
Цирконий	95	65 сут	0,36; 0,40; 0,88;	0,23; 0,72; 0,75
Серебро	110	270 сут	0,087; 0,53;	0,1–2,5
“—”	111	7,5 сут	2,12; 2,86	—
Кадмий	109	43 сут	0,7; 0,8; 1,0	0,25; 0,34
“—”	115	470 сут	0,7; 1,61	0,5–1,3
Иод	131	8,4 сут	—	0,087
Цезий	137	27 лет	0,25; 0,34;	0,08–0,72
Вольфрам	185	73,2 сут	0,61; 0,82	—
Иридий	192	74,4 сут	0,51; 1,17	0,66
Золото	198	2,7 сут	0,37; 0,43	0,056; 0,57; 0,77
“—”	199	3,15 сут	0,10; 0,26;	0,2–0,9
Ртуть	205	5,6 мин	0,54; 0,67	—
			0,29; 0,96; 1,37	0,41–1,09
			0,29; 0,44; 0,47	0,05; 0,16; 0,21
			1,8	0,23

**Т а б л и ц а 57. Моменты импульсов и магнитные  
моменты нуклонов и нуклидов**

Z	Ядро	Массовое число	$I, \hbar$	Магнитный момент, $\mu_N$
0	n	1	1/2	-1,9125
1	p	1	1/2	2,7928
1	D	2	1	0,8565
2	He	3	1/2	-2,131
		4	0	0
3	Li	6	1	0,821
		7	3/2	3,2532
4	Be	9	3/2	-1,176
5	B	11	3/2	2,686
6	C	12	0	0
		13	1/2	0,701
7	N	14	1	0,403
		15	1/2	-0,280
8	O	16	0	0
17	Cl	35	5/2	1,368
29	Cu	63	3/2	2,2265
		65	3/2	2,3847
48	Cd	111,113	1/2	-0,65
		110,112	0	0
		114,116		
80	Hg	199	1/2	0,5
		201	3/2	-0,6
		198,200	0	0
		200,204	0	0
82	Pb	207	1/2	0,6
		204, 206, 208	0	0

**Примечание.** Знак “минус” указывает на то, что направления магнитного и механического моментов противоположны.

Таблица 58. Реакции синтеза и энергосодержание

№ п/п	Реакция	Энергия, МэВ	$\sigma_m$ , барн	Энергия частиц, МэВ
1	$p + p \rightarrow d + \beta^+ + \nu$	2,2	$10^{-23}$	—
2	$p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	5,5	$10^{-6}$	—
3	$p + t \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$	19,7	$10^{-6}$	—
4	$d + d \rightarrow t + p$	4,0	0,16	2
5	$d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$	3,3	0,09	1
6	$d + d \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$	24,0	—	—
7	$d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n$	17,6	5,0	0,13
8	$t + d \rightarrow {}^4\text{He} + n$	17,6	5,0	0,19
9	$t + t \rightarrow {}^4\text{He} + 2n$	11,3	0,10	1,0
10	$d + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$	18,4	0,71	0,47
11	${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$	12,8	—	—
12	$n + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + t$	4,8	2,6	0,26
13	$p + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{He}$	4,0	$10^{-4}$	0,3
14	$p + {}^7\text{Li} \rightarrow 2 {}^4\text{He} + \gamma$	17,3	$6 \cdot 10^{-3}$	0,44
15	$d + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Li} + p$	5,0	0,01	1,0
16	$d + {}^6\text{Li} \rightarrow 2 {}^4\text{He}$	22,4	0,026	0,6
17	$d + {}^7\text{Li} \rightarrow 2 {}^4\text{He} + n$	15,0	$10^{-3}$	0,2
18	$p + {}^9\text{Be} \rightarrow 2 {}^4\text{He} + d$	0,56	0,46	0,33
19	$p + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^6\text{Li} + {}^4\text{He}$	2,1	0,35	0,33
20	$p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3 {}^4\text{He}$	8,7	0,6	0,67
21	$p + {}^{15}\text{N} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$	5,0	0,69	1,2

Примечание. d — дейтрон (ядро дейтерия  ${}^2\text{H}$ ), t — тритон (ядро трития  ${}^3\text{H}$ ),  $\sigma_m$  — максимальное значение эффективного сечения. В последней графе указаны энергии бомбардирующих частиц, соответствующие максимальным значениям  $\sigma_m$ .

Таблица 59 Термоядерные реакции во Вселенной

Реакция	Энергия, МэВ	Среднее время реакции
<i>Водородный цикл</i>		
$p + p \rightarrow d + \beta^+ + \nu$	0,33 (0,51)	$1,4 \cdot 10^{10}$ лет
$\beta^+ + \beta^- \rightarrow 2\gamma$	2,04	—
$p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	10,98	5,7 с
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$	12,85	$10^6$ лет
<i>Углеродный цикл</i>		
$p + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma$	1,95	$1,3 \cdot 10^7$ лет
${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + \beta^+ + \gamma$	1,5 (0,7)	7 мин
$p + {}^{13}\text{C} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma$	7,54	$2,7 \cdot 10^6$ лет
$p + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$	7,35	$3,3 \cdot 10^8$ лет
${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + \beta^+ + \gamma$	1,73 (0,98)	82 с
$p + {}^{15}\text{N} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$	4,96	$1,1 \cdot 10^5$ лет

Примечание. В скобках указана энергия нейтрино. Времена реакций рассчитаны для условий в центре Солнца ( $T \sim 1,3 \cdot 10^7$  К, плотность водорода  $100 \text{ г/см}^3$ ).



Таблица 60. Дозовые пределы облучения

“Нормами радиационной безопасности НРБ-76/87” устанавливаются следующие категории облучаемых лиц: категория А — персонал, категория Б — ограниченная часть населения, категория В — население области, края, республики, страны. В порядке убывания чувствительности к облучению устанавливается три группы критических органов: I группа — все тело, гонады, красный костный мозг; II группа — мышцы, щитовидная железа, жировая ткань, печень, почки, селезенка, желудочно-кишечный тракт, легкие, хрусталик глаза; III группа — кожный покров, костная ткань, кисти, предплечья, голени и стопы.

Дозовые пределы внешнего и внутреннего облучения, Зв (зиверт) за год	Группы критических органов		
	I	II	III
Предельно допустимая доза для категории А, ПДД	0,05	0,15	0,3
Предел дозы для категории Б, ПД	0,005	0,015	0,03

Примечания.

1. Для категории А (за исключением женщин до 40 лет) распределение дозы излучения в течение года не регламентируется.

2. В любом случае доза, накопленная к 30 годам, не должна превышать 12 ПДД.

3. Для женщин до 40 лет доза облучения на область таза не должна превышать 0,01 Зв за любые 2 месяца.

4. Регламентация облучения категории В устанавливается Министерством здравоохранения.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## I. Расчет погрешностей

*Прямые и косвенные измерения.* Измерения называются *прямыми*, если значения величин определяются приборами непосредственно (например, измерение длины линейкой, определение времени секундомером, силы тока — амперметром).

Если значение измеряемой величины определяется посредством прямых измерений других величин, которые связаны с измеряемой величиной определенной зависимостью, то такие измерения называются *косвенными*. Примером косвенных измерений может служить определение сопротивления участка цепи путем измерения силы тока и напряжения, определение плотности по прямым измерениям массы и объема.

*Абсолютная и относительная погрешность.* Пусть проведено измерение (без систематических погрешностей) одной и той же величины  $x$  несколько раз и отдельные результаты измерений имеют значения  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . В качестве наилучшего значения выбирается среднее значение

$$x_{\text{ср}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

Разность  $|x_{\text{ср}} - x_i| = \Delta x_i$  называется *абсолютной погрешностью* единичного измерения.

Среднее значение абсолютной погрешности  $n$  единичных измерений

$$r_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i$$

называется *средней погрешностью* (средней абсолютной погрешностью). Отношение средней погрешности к среднему значению измеренной величины  $x_{\text{ср}}$  называется *относительной погрешностью*

$$\frac{r_n}{x_{\text{ср}}} = \left( \sum_i \Delta x_i \right) / \left( \sum_i x_i \right).$$

*Стандартное (среднеквадратичное) отклонение (СО).* Определяет среднюю погрешность единичных измерений при нормальном распределении; приближенно СО рассчитывается по формуле

$$S_n = \sqrt{\frac{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \dots + \Delta x_n^2}{n}}$$

При большом числе измерений  $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = \sigma$ ; строго говоря, величина  $\sigma$  и является стандартным отклонением, а  $\lim_{n \rightarrow \infty} r_n = \rho$  является средней погрешностью.

Средняя квадратичная погрешность, которая обусловлена заменой величины  $\sigma$  величиной  $S_n$ , может быть рассчитана по соотношению

$$\sigma_{sn} = \sigma / \sqrt{2(n-1)}.$$

Следует заметить, что при расчете стандартного отклонения иногда вместо  $n$  используется значение  $n-1$ .

*Стандартное отклонение среднего.* Средняя погрешность ряда единичных измерений имеет меньшее значение по сравнению с погрешностью единичного измерения; средняя погрешность результата  $n$  единичных измерений называется *стандартным отклонением среднего* (СОС)

$$\sigma_n = \sigma \sqrt{n},$$

где  $\sigma$  — стандартное отклонение.

Стандартное отклонение среднего указывается тогда, когда оценивается погрешность значений по результатам всех приведенных измерений; стандартное отклонение указывается при оценке погрешности метода измерений.

**Пример.** Результаты измерений сопротивления одного и того же резистора представлены в таблице. Рассчитаем значения  $R_{cp}$ ,  $\sigma$ ,  $\sigma_n$ :

№	$R_i$ , Ом	№	$R_i$ , Ом
1	175	6	174
2	175	7	176
3	173	8	172
4	175	9	175
5	178	10	174

$$R_{cp} = \frac{\sum R_i}{10} = 174,7 \text{ Ом};$$

стандартное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\sum \Delta R_i^2 / 10} = 1,5 \text{ Ом};$$

стандартное отклонение среднего

$$\sigma_{10} = 1,5 / \sqrt{10} = 0,5 \text{ Ом}.$$

Результат измерений записывается в следующей форме:  
 $R=174,7 \pm 0,5 \text{ Ом}$ .

*Учет систематических погрешностей.* Если систематическая погрешность определяется лишь по модулю, но неизвестен ее знак, то полная погрешность

$$\Delta_n = \sqrt{\sigma^2 + \sigma_c^2},$$

где  $\sigma$  — стандартное отклонение,  $\sigma_c$  — систематическая погрешность. Если известен знак систематической ошибки, то она суммируется со средним значением измеряемой величины.

*Расчет погрешностей в косвенных измерениях.* Если аргументы  $x_1, x_2, \dots, x_n$  функции  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  измерены с погрешностями  $\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_n$ , то стандартное отклонение функции

$$\Delta Z = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \delta x_n\right)^2}$$

при условии, что погрешности  $\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_n$  независимы и случайны.

Стандартное отклонение функции

$$\Delta Z \leq \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| \delta x_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| \delta x_2 + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \right| \delta x_n. (*)$$

Правая часть (\*) соответствует средней абсолютной погрешности функции. Абсолютные и относительные погрешности простейших функций приводятся в таблице.

Функция	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
$A+B$	$\Delta A + \Delta B$	$(\Delta A + \Delta B) /  A+B $
$A-B$	$\Delta A + \Delta B$	$(\Delta A + \Delta B) /  A-B $
$A \cdot B$	$A \Delta B + B \Delta A$	$\Delta A /  A  + \Delta B /  B $
$A/B$	$(A \Delta B + B \Delta A) / B^2$	$\Delta A /  A  + \Delta B /  B $
$A^n$	$n A^{n-1} \Delta A$	$n \Delta A /  A $
$n\sqrt{A}$	$A^{(1-n)/n} \Delta A / n$	$\Delta A / (n  A )$
$\sin A$	$ \cos A  \Delta A$	$ \operatorname{ctg} A  \Delta A$
$\cos A$	$ \sin A  \Delta A$	$ \operatorname{tg} A  \Delta A$

*Округление средних значений.* 1) Если первая отбрасываемая цифра больше пяти, то предшествующая цифра увеличивается на единицу; в противном случае последняя

цифра остается без изменения; 2) когда отбрасываемая цифра есть пять, а цифр младших разрядов нет, то сохраняется предшествующая цифра без изменений, если она четная, или увеличивается на единицу, если она нечетная.

*Округление погрешностей.*

1) Значение погрешностей округляется: а) до одной значащей цифры, если первая значащая цифра не равна единице; б) до двух значащих цифр, если первая цифра равна единице.

2) В среднем значении величины указываются все цифры до последнего разряда, указанного в записи погрешности.

Например, погрешность при измерении диаметра стержня составляет 0,02 мм; среднее значение  $d_{\text{ср}}=22,534$ , результат измерений записывается следующим образом:  $d=22,53 \pm 0,02$  мм. Неправильные записи:  $d=22,5 \pm 0,02$  или  $d=22,534 \pm 0,02$ .

**Пример.** Скорость звука определяется в воздухе по первой гармонике воздушного столба в трубе. Длина столба  $L=100 \pm 0,1$  см, частота  $\nu=165 \pm 1$  Гц.

Скорость звука  $v=2L\nu = 33000$  см/с=330 м/с.

Рассчитаем погрешность по формуле

$$\frac{\partial v}{\partial L} \delta L = 2\nu \delta L = 2 \cdot 165 \cdot 0,1; \quad \frac{\partial v}{\partial \nu} \delta \nu = 2L \delta \nu = 2 \cdot 100 \cdot 1;$$

$$\Delta v = \sqrt{(2\nu \delta L)^2 + (2L \delta \nu)^2} \approx 200 \text{ см/с.}$$

Ответ:  $v=330 \pm 2$  м/с.

## II. Множители для образования десятичных кратных и дольных единиц

Наименование	Множитель	Обозначение	
		русское	международное
экспа	$10^{18}$	Э	E
гета	$10^{15}$	П	P
тера	$10^{12}$	Т	T
гига	$10^9$	Г	G
мега	$10^6$	М	M
кило	$10^3$	к	k

Наименование	Множитель	Обозначение	
		русское	международное
гекто	$10^2$	г	h
дека	10	да	da
деци	$10^{-1}$	д	d
санти	$10^{-2}$	с	c
милли	$10^{-3}$	м	m
микро	$10^{-6}$	мк	$\mu$
нано	$10^{-9}$	н	n
пико	$10^{-12}$	п	p
фемто	$10^{-15}$	ф	f
атто	$10^{-18}$	а	a

### III. Некоторые внесистемные единицы в единицах СИ

#### *Единицы длины и площади*

1 ангстрем ( $\text{\AA}$ )= $10^{-10}$ м	1 дюйм= $2,54 \cdot 10^{-2}$ м
1 икс-единица (x)= $10^{-13}$ м	1 ферми= $10^{-15}$ м
1 астрономическая единица (а.е.)= $1,49 \cdot 10^{11}$ м	1 миля= $1,61 \cdot 10^3$ м
1 световой год (св. год)= $9,46 \cdot 10^{15}$ м	1 морская миля= $1,85 \cdot 10^3$ м
	1 гектар (га)= $10^4$ м <sup>2</sup>
	1 барн (б)= $10^{-28}$ м <sup>2</sup>

#### *Единицы массы*

1 тонна (т)=1000 кг	1 фунт=0,454 кг
1 центнер (ц)=100 кг	1 а.е.м.= $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
1 карат (кар)= $2 \cdot 10^{-4}$ кг	1 унция (тройская)=31,103 г

#### *Единицы силы*

1 дин= $10^{-5}$ Н	1 килограмм-сила (кгс)=9,81 Н
--------------------	-------------------------------

#### *Единицы работы и энергии*

1 эрг= $10^{-7}$ Дж	1 эВ= $1,60 \cdot 10^{-19}$ Дж
---------------------	--------------------------------

1 кгс·м=9,81 Дж                      1 ватт·час (Вт·ч)=3,6·10<sup>3</sup> Дж  
 1 калория (кал)=4,19 Дж

*Единицы мощности*

1 эрг/с=10<sup>-7</sup> Вт                      1 л.с.=736 Вт  
 1 килокалория в час (ккал/ч)=  
 =1,16 Вт

*Единицы давления*

1 дин/см<sup>2</sup>=0,1 Па                      1 атм=1,01·10<sup>5</sup> Па  
 1 кгс/м<sup>2</sup>=9,81 Па                      1 мм рт.ст.=133 Па  
 1 ат=1 кгс/см<sup>2</sup>=9,81·10<sup>4</sup> Па

*Единицы силы тока и электрического заряда*

1 ед.СГС<sub>I</sub>=(10/с) А=1/(3·10<sup>9</sup>) А    1 ед.СГСМ<sub>I</sub>=10 А  
 1 ед.СГС<sub>Q</sub>=(10/с) Кл=1/(3·10<sup>9</sup>) Кл    1 ед.СГСМ<sub>Q</sub>=10 Кл

*Единицы напряженности электрического тока*

1 ед.СГС<sub>E</sub>=с·10<sup>-6</sup> В/м=              1 В/см=100 В/м  
 =3·10<sup>4</sup> В/м

*Единицы электрической емкости*

1 ед.СГС<sub>C</sub>=(1/с)·10<sup>9</sup> Ф=(1/9)·10<sup>-11</sup> Ф

*Единицы электрического сопротивления и удельного сопротивления*

1 ед.СГС<sub>R</sub>=с<sup>2</sup>·10<sup>-9</sup> Ом=              1 Ом·мм<sup>2</sup>/м=10<sup>-6</sup> Ом·м  
 =9·10<sup>11</sup> Ом                              1 ед.СГС<sub>ρ</sub>=9·10<sup>9</sup> Ом·м  
 1 Ом·см=10<sup>-2</sup> Ом·м

*Единицы магнитной индукции и магнитного потока*

1 гаусс (Гс)=10<sup>-4</sup> Тл  
 1 Вб/см<sup>2</sup>=10<sup>4</sup> Тл  
 1 максвелл (Мкс)=10<sup>-8</sup> Вб

*Единицы напряженности магнитного поля*

1 эрстед (Э)=1/(4π)·10<sup>3</sup> А/м    1 А/см=100 А/м

*Единицы индуктивности*

1 ед. СГС<sub>L</sub>=10<sup>-9</sup> Гн

*Единицы яркости и освещенности*

1 кд/см<sup>2</sup>=10<sup>4</sup> кд/м<sup>2</sup>      1 фот=10<sup>4</sup> лк  
1 стильб (сб)=1,005·10<sup>4</sup> кд/м<sup>2</sup>

*Единицы активности нуклидов (ядер)*

1 кюри (Ки)=3,7·10<sup>10</sup> Бк    1 резерфорд (Рд)=10<sup>6</sup> Бк

*Единицы дозы и мощности поглощенной дозы излучения*

1 рад=10<sup>-2</sup> Гр      1 эрг/г=10<sup>-4</sup> Гр  
1 рад/с=10<sup>-2</sup> Гр/с      1 эрг/(с·г)=10<sup>-4</sup> Гр/с

*Единицы экспозиционной дозы излучения*

1 рентген (Р)=2,58·10<sup>-4</sup> Кл/кг

**IV. Универсальные физические константы (ГСССД 1-88)**

Скорость света в вакууме $c$	2,99792·10 <sup>8</sup> м/с
Гравитационная постоянная $\gamma$	6,672·10 <sup>-11</sup> Н·м <sup>2</sup> /кг <sup>2</sup>
Молярный объем идеального газа $V_\mu$ ( $T_0=273,15$ К, $p_0=1,01\cdot10^5$ Па)	22,4138 л/моль
Универсальная газовая постоянная $R$	8,314 Дж/(К·моль)
Постоянная Фарадея $F$	96485 Кл/моль
Постоянная Авогадро $N_A$	6,02204·10 <sup>23</sup> моль <sup>-1</sup>
Постоянная Больцмана $k$	1,38066·10 <sup>-23</sup> Дж/К
Масса покоя протона $m_p$	1,67265·10 <sup>-27</sup> кг
Масса покоя электрона $m_e$	9,10953·10 <sup>-31</sup> кг
Масса покоя нейтрона $m_n$	1,67495·10 <sup>-27</sup> кг
Отношение масс покоя протона и электрона $m_p/m_e$	1836,1515
Заряд электрона $e$	1,60219·10 <sup>-19</sup> Кл
Постоянная Вина $b$	0,0028978 м·К
Постоянная Планка $h$	6,6261·10 <sup>-34</sup> Дж·с
Постоянная Стефана-Больцмана $\sigma$	5,67032·10 <sup>-8</sup> Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )
Постоянная Ридберга $R_\infty$	1,09737318·10 <sup>7</sup> м <sup>-1</sup>
Магнетон Бора $\mu_B$	9,27408·10 <sup>-24</sup> Дж/Тл
Магнетон ядерный $\mu_N$	5,05082·10 <sup>-27</sup> Дж/Тл
Электрическая постоянная $\epsilon_0$	8,854188·10 <sup>-12</sup> Ф/м
Магнитная постоянная $\mu_0$	12,56637·10 <sup>-7</sup> Гн/м



Магнитный момент  
электрона  $\mu_e$   
Магнитный момент  
протона  $\mu_p$

$$9,28483 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$$

$$1,4106171 \cdot 10^{-26} \text{ Дж/Тл}$$

## V. Основные формулы и законы

### Механика

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

Путь  $\Delta l = l_2 - l_1$  (1.2)

Средняя скорость  $\mathbf{v}_{\text{ср}} = \Delta \mathbf{r} / \Delta t$  (1.3a)

Мгновенная скорость  $\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$  (1.3b)

Среднее ускорение  $\mathbf{a}_{\text{ср}} = \Delta \mathbf{v} / \Delta t$  (1.4a)

Мгновенное ускорение  
(ускорение)  $\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}$  (1.4b)

Проекции скорости на  
оси прямоугольной  
системы координат  $v_x = dx/dt, v_y = dy/dt,$   
 $v_z = dz/dt$  (1.5)

Проекции ускорения на  
оси прямоугольной  
системы координат  $a_x = dv_x/dt, a_y = dv_y/dt,$   
 $a_z = dv_z/dt$  (1.6)

Тангенциальное ускорение  $a_t = dv_t/dt$  (1.10)

Нормальное ускорение  $a_n = v_t^2 / \rho$  (1.11)

Модуль вектора скорости  $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$  (1.7)

Модуль вектора  
ускорения  $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} =$  (1.8)

$$= \sqrt{a_n^2 + a_t^2} \quad (1.12)$$

Уравнения скорости и  
пути равнопеременного  
движения  $v_t = v_0 \pm at$   
 $s = v_0 t \pm at^2/2$  (1.25)–(1.26)

Средняя угловая скорость  $\omega_{\text{ср}} = \Delta \varphi / \Delta t$  (1.14)

Мгновенная угловая ско-  
рость (угловая скорость)  $\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt}$  (1.15)

Угловое ускорение  $\beta = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt}$  (1.17)

Линейная скорость (движение материальной точки по окружности)	$v=R\omega$	(1.20)
Линейное ускорение	$a=\beta R$	(1.24)
Центростремительное ускорение	$a_{\text{ц}}=\omega^2 R=v^2/R$	(1.21)
Космические скорости (п.1, гл. I, с.36)	$v_1=\sqrt{Rg},$ $v_2=v_1\sqrt{2}=\sqrt{2Rg},$ $v_3=\sqrt{2\gamma M/R_c}$	
Основной закон движения (второй закон Ньютона) в инерциальной системе отсчета	$F=ma=dp/dt$	(1.32) — (1.33)
Основной закон движения в неинерциальной системе отсчета	$F+F_{\text{и}}+F_{\text{цб}}+F_{\text{к}}=ma',$ $F_{\text{к}}=-ma_0, F_{\text{цб}}=m\omega^2\rho,$ $F_{\text{и}}=2m[\mathbf{v}' \times \boldsymbol{\omega}]$	(1.59)
Момент силы относительно точки	$\mathbf{M}=[\mathbf{rF}]$	(1.36)
Момент импульса (количества движения) относительно точки	$\mathbf{L}=[\mathbf{rp}]$	(1.37)
Момент инерции материальной точки	$I=mr^2$	(1.38)
Основное уравнение динамики вращательного движения материальной точки	$\mathbf{M}=d\mathbf{L}/dt$	(1.39)
Основное уравнение вращательного движения твёрдого тела вокруг неподвижной оси	$I_{\beta} = M_z$	(1.40)
Закон всемирного тяготения	$F = \frac{\gamma m_1 m_2}{R^2}$	(1.74)
Сила тяготения	$F_{\tau} = \frac{\gamma m M_{\text{з}}}{R_{\text{з}}^2}$	(1.75)
Сила тяжести	$G=F_{\tau}+F_{\text{ц}}$	(1.76)
Вес тела (с. 52)	$P=G-ma$	(1.77)
Сила трения скольжения	$F_{\text{тр}}=fP$	(1.61)
Сила трения качения	$F_{\text{к}}=f_{\text{к}}P/R$	(1.62)
Элементарная работа силы	$\Delta A=F\Delta s \cos\varphi$	(1.64)

Работа переменной силы	$A = \int F \cos \varphi \, dz$	(1.66)
Кинетическая энергия (при малых скоростях)	$E_k = \frac{1}{2} m v^2$	(1.70)
Кинетическая энергия (при больших скоростях)	$E_v = -\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} - m_0 c^2$	(1.79)
Кинетическая энергия вращающегося тела	$E_\omega = \frac{1}{2} I \omega^2$	(1.80)
Потенциальная энергия тела в поле тяготения	$E_n = -\frac{\gamma m M_\pi}{R_3}$	(1.82)
Закон Гука	$\sigma_n = \varepsilon E,$	(1.97)
	$\tau = G \gamma$	(1.98)
Законы сохранения в замкнутой системе:		
— энергии	$E_k + U_n = \text{const}$	(1.85)
— импульса (количества движения)	$\Sigma p_i = \text{const}$	(1.86)
— момента импульса (момента количества движения)	$\Sigma L_i = \text{const}$	(1.87)
Уравнение Бернулли	$\frac{\rho v^2}{2} + \rho g h + p = \text{const}$	(1.103)
Внутреннее трение жидкостей	$F_{\text{вт}} = -\eta S \frac{\Delta v}{\Delta t}$	(1.105)
Гидродинамическая сила	$F_{\text{гд}} = C_x \rho v^2 S / 2$	(1.106)
Уравнение гармонических колебаний	$\xi = A_0 \cos(\omega t + \varphi)$	(1.111)
Период колебаний:		
— математического маятника	$T = 2\pi \sqrt{l/g}$	(1.113)
— маятника с упругой связью	$T = 2\pi \sqrt{m/k}$	(1.114)
— крутильного маятника	$T = 2\pi \sqrt{I/D}$	(1.117)
— физического маятника	$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mga}}$	(1.118)

Амплитуда $A$ резultiрующего смещения двух гармонических колебаний	$A_p = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}$ (1.121)
Длина волны	$\lambda = vT = v/f$ (1.122)
Уравнение плоской гармонической волны	$\xi = A \cos(\omega t - kr)$ (1.123)
— стоячих плоских гармонических волн	$u = 2A \cos(kz) \cos(\omega t)$ (1.131)

### *Термодинамика и молекулярная физика*

Средняя удельная теплоемкость	$c_{cy} = Q / m(T_2 - T_1)$	(2.36)
----------------------------------	-----------------------------	--------

Удельная теплоемкость	$c = \frac{1}{m} \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dt}$	(2.4)
-----------------------	---	-------

Молярная теплоемкость	$C = \mu c$	(2.5)
-----------------------	-------------	-------

Первый закон термодинамики	$\Delta Q + \Delta A = \delta U$	(2.8)
-------------------------------	----------------------------------	-------

Работа термодинамической системы	$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$	(2.1a)
-------------------------------------	-----------------------------	--------

Работа идеального газа:

— при изобарическом процессе	$A_p = \frac{m}{\mu} R \Delta T$	(2.19)
---------------------------------	----------------------------------	--------

— при изотермическом процессе	$A_T = \frac{m}{\mu} RT \ln(p_1/p_2)$	(2.21)
----------------------------------	---------------------------------------	--------

— при адиабатическом процессе	$A_Q = \frac{m}{\mu} C_V (T_1 - T_2)$	(2.22)
----------------------------------	---------------------------------------	--------

Уравнение состояния идеального газа	$pV = \frac{m}{\mu} RT$	(2.16)
--	-------------------------	--------

(уравнение Менделеева-  
Клапейрона)

Уравнение Ван-дер-Ваальса	$(p - \frac{v^2 a}{V^2})(V - vb) = vRT$ $v = m/\mu$	(2.23)
---------------------------	--	--------

$$\text{Уравнение теплопроводности} \quad \Delta Q = - \lambda S \Delta t \frac{\Delta T}{\Delta l} \quad (2.32)$$

$$\text{Уравнение диффузии} \quad \Delta M = - D S \Delta t \frac{\Delta \rho}{\Delta l} \quad (2.34)$$

$$\text{Средняя скорость молекул идеального газа} \quad v_{cp} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}} \quad (2.25)$$

$$\text{Средняя квадратичная скорость молекул идеального газа} \quad v_{ке} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \quad (2.26)$$

$$\text{Средняя длина свободного пробега идеального газа} \quad l = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 p} \quad (2.24)$$

$$\text{Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов} \quad pV = \frac{2}{3} E_k = \frac{1}{3} M v_{ке}^2 \quad (2.29)$$

$$\text{Теплопроводность идеального газа} \quad \lambda = \frac{1}{3} \rho v_{cp} l c_v \quad (2.33)$$

$$\text{Вязкость идеального газа} \quad \eta = \frac{1}{3} \rho v_{cp} l \quad (2.36)$$

$$\text{Коэффициент диффузии идеального газа} \quad D = \frac{1}{3} v_{cp} l \quad (2.35)$$

### Электродинамика (единицы СИ и СГС)

$$\text{Закон Кулона} \quad F_{12} = \frac{Q_1 Q_2 r_0}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r^2}, \quad (3.1)$$

$$F = \frac{Q_1 Q_2 r_0}{\epsilon r^2}$$

$$\text{Напряженность поля точечного заряда} \quad E = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r^2}, \quad E = \frac{Q}{\epsilon r^2} \quad (3.17)$$

$$\text{Напряженность поля} \quad E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}, \quad E = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon} \quad (3.19)$$

внутри плоского конденсатора

$$\text{Работа по перемещению заряда в электрическом поле} \quad A_{12} = Q(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (3.4a)$$

$$\text{Электрическая емкость} \quad C = Q/(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (3.7)$$

$$\text{Емкость плоского конденсатора} \quad C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad C = \frac{\epsilon S}{4\pi d} \quad (3.25)$$

Электрический момент диполя

$$P_l = Ql \quad (3.2)$$

$$\text{Поляризованность} \quad P = \kappa \epsilon_0 E, \quad P = \kappa E \quad (3.11)$$

$$\text{Электрическое смещение} \quad D = \epsilon_0 E + P, \quad D = E + 4\pi P \quad (3.8)$$

$$\text{Зависимость между } \epsilon \text{ и } \kappa \quad \epsilon = 1 + \kappa, \quad \epsilon = 1 + 4\pi\kappa \quad (3.13)$$

$$\text{Плотность энергии электрического поля} \quad w = \epsilon_0 \epsilon E^2 / 2, \quad w = \epsilon E^2 / (8\pi) \quad (3.5)$$

$$\text{Закон Ома для участка цепи без ЭДС} \quad I = (\varphi_1 - \varphi_2) / r \quad (3.37)$$

$$\text{Обобщенный закон Ома} \quad I = (\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}) / r \quad (3.38)$$

$$\text{Работа электрического тока} \quad A = IUt \quad (3.46)$$

$$\text{Электрическое сопротивление} \quad r = \rho l / S \quad (3.42)$$

$$\text{Взаимодействие параллельных проводников} \quad F = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 l}{2\pi a}, \quad (3.74)$$

$$F = \frac{1}{c^2} \frac{2\mu I_1 I_2 l}{a}$$

с токами

$$\text{Магнитный поток} \quad \Phi = BS \cos \varphi \quad (3.79)$$

$$\text{Зависимость между } \mu \text{ и } \kappa \quad \mu = 1 + \kappa, \quad \mu = 1 + 4\pi\kappa \quad (3.98)$$

$$\text{Закон Био—Савара—Лапласа} \quad \Delta B = \frac{\mu_0 \mu I \Delta l \sin \alpha}{4\pi r^2}, \quad (3.72)$$

$$\Delta B = \frac{I \Delta l \sin \alpha}{c^2 r^2}$$

$$\text{Магнитная индукция прямого тока} \quad B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi r}, \quad B = \frac{2\mu I}{cr} \quad (3.75)$$

$$\text{Закон Ампера} \quad \Delta F = I [\Delta B], \Delta F = \frac{I}{c} [\Delta B] \quad (3.67)$$

$$\text{Сила Лоренца} \quad F = Q [vB], F = \frac{1}{c} [vB] \quad (3.65)$$

$$\text{Закон электромагнитной индукции} \quad \mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad \mathcal{E} = - \frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.85)$$

$$\text{Индуктивность соленоида} \quad L = \frac{k\mu_0\mu N^2 S}{l}, \quad (3.91)$$

$$L = \frac{4\pi\mu N^2 S}{l}$$

$$\text{Плотность энергии} \quad w = \frac{B^2}{2\mu_0\mu}, \quad (3.82)$$

$$\text{магнитного поля} \quad w = \frac{\mu H^2}{8\pi}$$

$$\text{Вектор Пойнтинга} \quad S = [EH], S = \frac{c}{4\pi} [EH] \quad (3.118)$$

$$\text{Скорость электромагнитных волн в среде} \quad c_1 = 1/\sqrt{\mu_0\mu\epsilon_0\epsilon}, c_1 = c/\sqrt{\epsilon\mu} \quad (3.117)$$

*Оптика, атомная и ядерная физика*

$$\text{Закон отражения} \quad i = i' \quad (\text{см. с. 140})$$

$$\text{Закон преломления} \quad \sin i / \sin r = n = c_1 / c_2 \quad (4.6)$$

$$\text{Формулы Френеля} \quad R_{\perp} = -\sin(i-r) / \sin(i+r), \quad (4.7)$$

$$R_{\parallel} = \text{tg}(i-r) / \text{tg}(i+r)$$

$$\text{Формулы тонкой линзы} \quad -1/a_1 + 1/a_2 = 1/f \quad (4.9)$$

$$\text{Видимое увеличение:}$$

$$\text{— лупы} \quad \Gamma_L = 250/f \quad (4.14)$$

$$\text{— микроскопа} \quad \Gamma_M = \frac{250\Delta}{f_1 f_2} \quad (4.15)$$

$$\text{— зрительной трубы} \quad \Gamma_T = f_{об} / f_{ок} \quad (4.16)$$

$$\text{Результирующая амплитуда двух плоских гармонических волн} \quad E_{op} = \sqrt{E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2 E_{01} E_{02} \cos \theta} \quad (4.17)$$

Дифракция света на дифракционной решетке (при нормальном падении):

$$\text{— условие главных минимумов} \quad a \sin \beta_{\text{мин}} = m\lambda$$

$$(m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (4.24)$$

— условие главных максимумов	$d \sin \beta_{\text{макс}} = m\lambda$ ( $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ )	(4.25)
— условие дополнительных минимумов	$d \sin \beta_{\text{дм}} = m'\lambda / N$ ( $m'=1, 2, \dots, N-1, N+1, \dots$ ( $m'$ не кратно $N$ ))	(4.26)
Линейный предел разрешения	$l_p \geq \frac{\lambda}{2n \sin u}$	(4.27)
Давление электромагнитных волн	$p = \frac{E_z}{c} (1 + \rho)$	(4.31)
Основное уравнение фотоэффекта	$h\nu = A + \frac{1}{2} m_e v_m^2$	(4.32)
Законы теплового излучения:		
— закон Кирхгофа	$\frac{E_{\lambda T}}{A_{\lambda T}} = \epsilon_{\lambda T}$	(4.33)
— закон Стефана-Больцмана	$R_0 = \sigma T^4$	(4.34)
— закон смещения Вина	$\lambda_M = b/T$	(4.35)
— формула Планка	$\epsilon_{\lambda T} = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{hc/(k\lambda T)} - 1}$	(4.36)
Длина волны де Бройля	$\lambda = h/p$	(5.1)
Энергетические уровни водородоподобных атомов	$E_n = - \frac{m_e Z^2 e^4}{8\epsilon_0^2 n^2 h^2}$	(5.4)
Орбитальный момент импульса электрона	$M_l = \hbar \sqrt{l(l+1)}$	(5.5)
Собственный момент импульса (спин) электрона	$M_s = \hbar \sqrt{s(s+1)}$	(5.7)
Энергия связи ядра	$\Delta E = \Delta M c^2$	(5.11)
Радиоактивный распад ядер	$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 2^{-t/T}$	(5.13)
Эффективное сечение ядерной реакции	$\sigma = \Delta N / (N n_0 \Delta Z)$	(5.15)



# Приложение VI Периодическая система элементов Д. И. Менделеева

периоды	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	I (H)						водород 1 H 1,0079	гелий 2 He 4,00260
2	II 3 Li литий 6,941	4 Be бериллий 9,01218	5 B бор 10,81	6 C углерод 12,011	7 N азот 14,0067	8 O кислород 15,9994	9 F фтор 18,998403	10 Ne неон 20,179
3	III 11 Na натрий 22,98977	12 Mg магний 24,305	13 Al алюминий 26,98154	14 Si кремний 28,0855	15 P фосфор 30,97376	16 S сера 32,06	17 Cl хлор 35,453	18 Ar аргон 39,948
4	IV 19 K калий 39,0983	20 Ca кальций 40,08	21 Sc скандий 44,9559	22 Ti титан 47,90	23 V ванадий 50,9415	24 Cr хром 51,996	25 Mn марганец 54,9380	26 Fe железо 55,847
	V железо 29 Cu 63,546	цинк 30 Zn 65,38	галлий 31 Ga 69,72	германий 32 Ge 72,58	мышьяк 33 As 74,9216	селен 34 Se 78,96	бром 35 Br 79,904	криpton 36 Kr 83,80
5	VI 37 Rb рубидий 85,468	38 Sr стронций 87,62	39 Y иттрий 88,9059	40 Zr цирконий 91,22	41 Nb ниобий 92,9064	42 Mo молибден 95,94	43 Tc технеций 98,9062	44 Ru рутений 101,07
	VII серебро 47 Ag 107,868	кадмий 48 Cd 112,41	индий 49 In 114,82	олово 50 Sn 118,69	сурьма 51 Sb 121,75	теллур 52 Te 127,60	йод 53 I 126,9045	ксенон 54 Xe 131,30
6	VIII 55 Cs цезий 132,9054	56 Ba барий 137,33	57 La* лантан 138,9055	72 Hf гафний 178,49	73 Ta тантал 180,9479	74 W вольфрам 183,85	75 Re рений 186,207	76 Os осмий 190,22
	IX золото 79 Au 196,9665	80 Hg ртуть 200,59	галлий 81 Tl 204,37	82 Pb свинец 207,2	висмут 83 Bi 208,9804	74 W вольфрам 183,85	75 Re рений 186,207	76 Os осмий 190,22
7	X 87 Fr франций [223]	88 Ra радий 226,0254	89 Ac** актиний [227]	104 Ku [261]	105 (Ns) [261]	106 (EW) [261]	83 At астат [210]	84 Rn радон [222]
*ЛАНТАНОИДЫ								
58 Ce церий 140,12	59 Pr празмий 140,9077	60 Nd неодим 144,24	61 Pm прометий [145]	62 Sm самарий 150,4	63 Eu европий 151,96	64 Gd гадолиний 157,25	65 Tb тербий 158,9254	66 Dy диспрозий 162,50
**АКТИНОИДЫ								
90 Th торий 232,0381	91 Pa протактиний 231,0359	92 U уран 238,029	93 Np нептуний 237,0482	94 Pu плутоний [244]	95 Am америций [243]	96 Cm кюрий [247]	97 Bk берклий [247]	98 Cf калифорний [251]
							99 Es эйнштейний [254]	100 Fm фермий [257]
							101 Md мейтнерий [258]	102 (No) нобелий [259]
							103 (Lr) лоренсий [260]	104 (Uu) унунвений [261]
							105 (Nh) нихоний [262]	106 (Ds) дубний [263]
							107 (Bh) борий [264]	108 (Hs) хассий [265]
							109 (Mt) меттений [266]	110 (Dh) дубний [267]
							111 (Rg) роговий [268]	112 (Cn) ковневий [269]
							113 (Nh) нихоний [270]	114 (Fl) флеровий [271]
							115 (Mc) макгейвий [272]	116 (Lv) ливерморий [273]
							117 (Ts) теннессий [274]	118 (Og) оганесон [275]

## Предметный указатель

- Адиабата 97
- Адроны 225
- Аккумулятор 138
- Активность 221
- Амплитуда волны 60
  - колебаний 54
- Аннигиляция 217
- Антенна 170
- Античастица 224
  
- Барионы 225
- Беккерель 177
- Блок 56
- Бозоны 225
  
- Вектор единичный 11
  - Пойтинга 136
- Векторы 9
- Вес 52
- Взаимодействие зарядов 91, 117
  - фундаментальное 178
- Влажность 90
- Волна 75
  - гармоническая 75
  - линейно поляризованная 192
  - плоская 77
  - поперечная 77
  - продольная 77
  - сферическая 77
  - цилиндрическая 71
  - электромагнитная 168
- Волны когерентные 187
  - стоячие 81
- Восприимчивость диэлектри-  
ческая 122
  - магнитная 159
- Вращение плоскости поляриза-  
ции 195
- Вязкость 65, 106
  
- Газ идеальный 95
- Гармоники 73
- Гипероны 225
  
- Гистерезис магнитный 161
- Глюоны 224
- Гравитоны 226
- Градиент плотности 105
  - потенциала 120
  - скорости 65
  - температур 103
- Громкость звука 79
- Грэй 221
  
- Давление звуковое 80
  - критическое 76
  - парциальное 74
  - света 156
- Движение механическое 28
  - равномерное 33
  - равноускоренное 33
  - тела в поле тяготения 35, 36
- Дефект массы 211
- Деформация 59
  - поперечная 61
  - продольная 60
  - сдвиговая 60
  - упругая 59
- Диамagnetики 159
- Динамика (законы) 37
  - вращательного движения 41
- Диоптрия 181
- Диполь электрический 117
- Дисперсия 191
- Дифракционная решетка 189
- Дифракция 188
- Диффузия 104
- Длина волны 76
  - — де Бройля 204
  - свободного пробега 100
- Доза поглощенная 221
- Домкрат винтовой 57
- Дырка 145
  
- Единицы физических величин  
11—27

Жидкие кристаллы 109

Жидкость вязкая 64

— идеальная 64

Закон Ампера 148

— Архимеда 63

— Био—Савара—Лапласа 150

— Бойля—Мариотта 97

— всемирного тяготения 51

— Гей-Люссака 96

— Гука 61

— Дальтона 96

— Кирхгофа 200

— Кирхгофа—Бунзена 199

— Кулона 116

— Ома 131, 132

— Паскаля 63

— сохранения зарядов 116

— — импульса 55

— — момента импульса 55

— — энергии 54

— Стефана—Больцмана 201

— Столетова 196

— Шарля 95

Фурье 104

Заряды электрические 115

— элементарный 116

Звук 78

Зона валентная 143

— запрещенная 143

— проводимости 143

Излучение тепловое 199

Изобары 210

Изотопы 210

Импульс 40

Индуктивность 156, 157

Индукция магнитная 149

— электромагнитная 153

Инертность 38

Интенсивность 79

Интерференция 185

Инфразвук 78

Ионизация газов 140

Ионы 115, 137, 206

Испарение 93

Испускательная способность 200

Квантовые числа 206

Кварки 228

Кинематика 28

Кипение 93

Колебания вынужденные 72

— гармонические 69

— затухающие 72

— электрические 168

Количество движения 40

Конденсация 93

Контур колебательный 168

Коэффициент поглощения 80

— качества 222

— квазиупругой силы 70

— мощности 165

— ослабления линейный 219

— — массовый 219

— отражения звука 181

— пропускания 81

— Пуассона 61

Кривые намагничивания 160

— гистерезиса 161

Кристалл 108

Лептоны 226

Линза 178

— Линии магнитной индукции 152

— напряженности 118, 124

— Фраунгофера 199

Лучепреломление двойное 192

Магнетон Бора 203

— ядерный 203

Магнитострикция 162

Масса инертная 38

— гравитационная 39

— молярная 86

Массовое число 209

Маятник крутильный 71

— математический 71

— физический 71

Мезоны 225, 226

Модель атома 204

— идеального газа 100

- Модуль объемного сжатия 62
  - сдвига 62
  - Юнга 62
- Моль 15
- Момент диполя электрический 122
  - импульса 41, 42
  - инерции 42, 43
  - контура магнитный 118
  - силы 41
- Мощность 49
  - поглощенной дозы 221
- Намагниченность 159
- Напряжение 60
  - электрическое 132
- Напряженность коэрцитивная 161
  - поля магнитного 150
  - — тяготения 52
  - — электрического 118, 124
- Нейтрон 209, 227
- Нуклоны 209, 227
- Оболочки электронные 207
- Оптика геометрическая 174
- Оптическая сила 181
- Орбита стационарная 205
- Освещенность 172
- Отражение диффузное 175
  - полное 177
- Пар насыщенный 93
- Парамагнетики 159
- Параметры критические 94
  - термодинамические 83
- Перемещение 30
- Период колебаний 69
  - — контура 168
  - обращения
  - полураспада 215
- Плазма 113
- Плотность вещества 39
  - заряда поверхностная 127
  - тока электрического 129
  - энергии магнитного поля 154
  - — электрического поля 119
- Поверхность волновая 76
  - эквипотенциальная 120
- Поглощательная способность 200
- Погрешность измерений 272
- Подвижность ионов 137
- Показатель поглощения 80
- Поле гравитационное 51
  - магнитное 147, 152
  - потенциальное 50
  - электрическое 115
  - — вихревое 154
  - электромагнитное 168
- Полимеры 111
- Полиспаст 56
- Полупроводники 142
- Поляризация диэлектрика 122
  - света 191
- Порог болевого ощущения 79
  - слышимости 79
- Постоянная Авогадро 100
  - Больцмана 100
  - вращения 195
  - — удельная 195
  - гравитационная 52
  - Планка 202
- Потенциал электрического поля 118
- Поток звуковой энергии 78
  - магнитный 153
  - тепловой 103
- Правила Кирхгофа 134
- Правило правого винта 11
  - Ленца 155
- Предел прочности 62
  - разрушения 191
  - текучести 62
  - упругости 62
- Приборы оптические 181—183
- Примеси акцепторные 145
  - донорные 145
- Принцип Паули 207
- Проводимость дырочная 144
  - несамостоятельная 140
  - примесная 145
  - собственная 145

- электронная 144
- Проницаемость диэлектрическая 123
- магнитная 159
- Протон 206, 227
- Работа 47, 48, 84
  - выхода 141
  - ионизации 140
  - консервативных сил 50
  - сил Ампера 153
- Радиоактивность 213
- Распределение Максвелла 101
- Реакции ядерные 215
- Резонанс механический 72
  - электрического контура 167
- Рычаг 56
- Самоду́кция 156
- Свет естественный 192
  - поляризованный 192
- Светимость 173
- Сила 37
  - Ампера 148
  - гидродинамическая 66
  - гравитационная 51
  - инерции 45
  - квазиупругая 70
  - консервативная 50
  - Кориолиса 45
  - коэрцитивная 161
  - Лоренца 148
  - магнитная 146
  - света 172
  - тока электрического 129
  - трения 46
  - тяготения 52
  - тяжести 52
  - упругости 59
  - центробежная 45
- Силы сторонние 130
  - ядерные 211
  - Система единиц 12
  - отсчета 28
  - — инерциальная 39
  - — неинерциальная 44
- термодинамическая 83
- Скорость колебаний частиц 75
  - космическая 36
  - мгновенная 30
  - молекул 101
  - равномерного движения 33
- Скорость средняя 30
  - угловая 32
  - электромагнитных волн 169
- Смещение электрическое 121
- Сопротивление емкостное 167
  - индуктивное 166
  - электрическое 132, 138
  - — удельное 133
- Спектральная плотность энергетической светимости 200
- Спектры 197
  - испускания 198
  - линейчатые 198
  - поглощения 199
  - характеристические рентгеновские 209
- Спин 207
- Сублимация 93
- Тембр 78
- Температура 83, 84
  - критическая 98
  - Кюри 161
  - стеклования 113
  - текучести 113
- Температурный коэффициент длины 94
  - — объема 95
  - — сопротивления 134
- Теплоемкость 85
  - молярная 86
  - удельная 85
- Теплопроводность 103
- Теплота 84
  - парообразования 94
  - плавления 94
- Ток индукционный 154
  - насыщения 140, 141
  - переменный 165

- постоянный 129
- смещения 162
- эффективный 165
- Точка материальная 28
- Траектория 28
- Трение качения 47
  - покоя 46
  - скольжения 46
  - сухое 46
- Увеличение оптических приборов 184, 185
- Угол Брюстера 192
  - предельный 177
  - смачивания 107
- Ультразвук 78
- Уравнение адиабаты 97
  - Бернулли 64
  - Ван-дер-Ваальса 98
  - волны 76, 77, 169
  - Менделеева—Клапейрона 95
  - фотоэффекта 197
- Уравнения Максвелла 162—164
- Ускорение кориолисово 44
  - нормальное 31
  - полное 32
  - тангенциальное 23
  - угловое 32
  - центростремительное 44
- Фаза колебаний 69
  - — начальная 69
  - термодинамическая 92
- Фермионы 225
- Ферромагнетики 158, 160
- Фигуры Лиссажу 74, 75
- Физические константы универсальные 278
- Фокусы линзы 179
- Формула Планка 201
  - Пуазейля 67
  - Стокса 66
  - тонкой линзы 180
- Фотометрические величины 172
- Фотон 196
- Фотоэффект 196
- Центр инерции (масс) 58
  - тяжести 58
- Цикл Карно 88, 89
- Частицы элементарные 224
- Частота колебаний 69
  - угловая 69
- Черное тело 200
- Числа квантовые 206
- Число барионное 226
  - волновое 76, 169
  - массовое 209
- Эквивалент электрохимический 138
- Эквивалентная доза 222
- Электрический ток 128
- Электродвижущая сила 131
- Емкость 120, 127
- Электролиз 138
- Электролиты 137
- Электронвольт 203
- Электропроводность плазмы 140
  - полупроводников 142
- Элемент тока 148
- Элементы гальванические 138
- Эмиссия термоэлектронная 141
- Энергия 49
  - внутренней 87
  - ионизации 206
  - кинетическая 49, 53
  - потенциальная 50, 54
  - — деформированного стержня 41
  - связи ядра 212
- Энтропия 91
- Эффективное сечение ядерной реакции 215
- Ядро атома 209
- Яркость 173

**Н.И. Кошкин, Е.Н. Васильчикова**  
**К 76**      **Элементарная физика. Справочник/ — М.:**  
**АО “СТОЛЕТИЕ”, 1995 — 304 с. Илл.**

Справочник для изучающих физику. Приведены основные понятия, определения и законы физики. Логика и структура изложения позволяют оперативно находить четкие и краткие ответы или справочные данные по различным вопросам элементарной физики.

# Уважаемые господа!

Издательство “СТОЛЕТИЕ” выпускает  
в 1995 — начале 1996 г.

**Эрдниев П. “Обучение математике в начальных классах”. Книга для учителя.**

В течение почти двух десятилетий автор — академик РАО, заслуженный деятель науки России и Калмыкии, доктор педагогических наук, профессор, зав. кафедрой методики математики Калмыцкого госуниверситета — проводил исследования проблемы интенсификации процесса обучения математике. В данной книге освещается методическая система одновременного изучения взаимно обратных действий и понятий, совместное изучение раздробления и превращения именованных чисел, использование метода противопоставления, использование удобных приемов подачи учебной информации.

**Эрдниев П. “Математика 1 — 2 класс”. Книга для ученика и учителя.**

**Эрдниев П. “Математика 3 — 4 класс”. Книга для ученика и учителя.**

**Эрдниев П., Эрдниев Б. “Математика 5 — 6 класс”. Книга для ученика и учителя.**

Это альтернативные учебники математики, реализующие целостную методическую систему обучения укрупнением дидактических единиц (УДЕ). Признание школой технологии УДЕ проходило все этапы утверждения системы при постоянном обсуждении теории и практики учителями и учеными. Методическая система УДЕ



представляет самобытную, приоритетную и конкурентоспособную технологию обучения.

**Эрдниев П. “Математика 1 — 4 класс. Методика обучения” Книга для учителя.**

В книге освещается методическая система обучения сходных и противопоставления контрастных понятий и действий. В ней излагается методика одновременногоизучения действий сложения и вычитания, умножения и деления; все действия над именованными числами; решения прямых и обратных задач.

**Эрдниев П., Эрдниев Б. “Обучение математике в школе. Укрупнение дидактических единиц”. Книга для учителя.**

В книге изложена разработанная авторами система обучения математике, основанная на идее укрупнения дидактических единиц (УДЕ), выражающейся, в частности, в одновременном изучении взаимосвязанного математического материала.

**Пухначев Ю., Попов Ю. “Математика без формул”**

“В математических работах... главное — содержание, идеи, понятия, а затем для их выражения у математиков существует свой язык — это формулы” /С. Ковалевская/. Математические формулы — лишь удобный язык для изложения идей и методов математики. Сами же эти идеи можно описать, используя привычные и наглядные образы из окружающей жизни. Анекдоты и приметы, пословицы и детские считалки, картины великих художников и отрывки из классических произведений, факты истории и нашей повседневной жизни — вот иллюстрации к математическим понятиям. Книга предназначена для учащихся старших классов и студентов.

**Потапов М. и др. “Алгебра и анализ элементарных функций”**

Дополненное и доработанное издание справочника для поступающих в вузы, отражающее программу по алгебре за курс средней школы.

**Джежелей О. “Помогайка” Книга для взрослых и детей.**

Процесс овладения чтением сложен для ребенка, если он один на один с книгой, а еще и потому нелегко, что в 6 — 7 лет недостаточно развито умение слушать и слышать, адекватно реагировать на речь собеседника, да и запас слов не так уж велик, и набор речевых конструкций бедноват. Хочется читать, а не получается. Помучился, помучился и...

Поддержать ребенка в этот трудный для него период может каждый взрослый: учитель, родители, бабушка и дедушка, старшие брат и сестра.

Книжка “Помогайка” обращена к тем взрослым, что хотят помочь ребенку. В книжке предлагаются упражнения, которые дадут возможность взрослому в занимательной форме помочь ребенку в освоении навыка чтения. Пособие рассчитано как на индивидуальную, так и на групповую работу с детьми.

**Синицын В. “Путь к слову. Из записок учителя”. Пособие по развитию речи для учителей и учащихся начальных классов, для учителей русского языка.**

На примере своего опыта автор знакомит с нетрадиционными подходами к обучению родному языку младших школьников, предлагает множество оригинальных, не совсем привычных методов, форм, приемов работы со словом, предложением, текстом. Это пособие — скромная попытка В. Синицына, учителя-методиста русского языка и литературы Костинской средней школы Владимирской области, победителя Всесоюзных педагогических чтений 1991 года, и его желание помочь учителю начальной школы разобраться в

нелегких проблемах теории и практики родного языка, поделиться богатейшим практическим, методическим материалом.

**“История России. Люди, нравы, события: взгляды и оценки. 1613 — 1881гг.” /Коллектив авторов/**

Эта книга представляет собой попытку представить историю страны глазами современников событий и с точки зрения потомков. Авторами освещены события в синтетическом сочетании научных исследований профессиональных историков, документальных свидетельств и воспоминаний участников-очевидцев исторических событий, а также взглядов и оценок выдающихся деятелей литературы и искусства. Книга может быть использована как учителями, так и учениками школ, лицеев, гимназий для дополнительных занятий или непосредственно на уроках истории Отечества. Вопросы и задания по каждому разделу дают возможность использовать материал книги для контроля и самоконтроля за занятиями учеников.

Издательство рассматривает предложение на вторую книгу “История России. Люди, нравы, события: взгляды и оценки. 1882 — 1996 гг.” того же коллектива авторов.

**Чуприкова Н. Умственное развитие и обучение (Психологические основы развивающего обучения)**

Книга посвящена теоретико-психологическому обоснованию новых подходов к обучению, которые направлены на общее психическое развитие учащихся, на формирование у них системного мышления и которые отходят от традиционного принципа последовательности усвоения знаний “от частного к общему”, но опираются на принципы прямо противоположные — от общего к частному, от целого к частям, от абстрактного к конкретному.

В первой части книги раскрывается действие одного из наиболее общих законов развития — закона развития от общего к частному в умственном развитии детей, от

неразвитого нерасчлененного целого к внутренне дифференцированному целому с четко выделенными частями, уровнями и элементами.

Во второй части излагаются взгляды мыслителей и педагогов прошлого и настоящего, согласно которым в основу обучения должен быть положен естественный закон развития и познания от общего и всеобщего к частному и конкретному (Коменский, Гегель, Спенсер, Пиаже, Брунер, Давыдов, Занков). Рассматривается ряд конкретных методических разработок по применению данного принципа в обучении родному и иностранному языкам, математике, естествознанию, при формировании профессиональных сенсомоторных навыков.

Книга предназначена для психологов, дидактов, методистов и учителей.

**Баркан А. "Его Величество Ребенок. Какой он есть. Тайны и загадки".**

Книга написана детским врачом и психологом, доктором медицинских наук, профессором, зав. кафедрой пропедевтики детских болезней.

В книге рассматриваются актуальные проблемы, связанные с детьми дошкольного возраста. Автор в популярной и увлекательной форме рассказывает "о тайнах и загадках" малышей от 3-х до 6-ти лет. Что означает кризис "я-сам", почему дети бывают упрямыми, нервными, застенчивыми, агрессивными, гиперактивными и т. д. Кто такие дети-холерики, сангвиники, меланхолики и флегматики. Почему у малышей бывают вредные привычки, и кто в этом виноват. Как чувствует себя ребенок, когда в семье вдруг появляется еще один малыш. Действительно ли надо говорить ребенку о тайнах его рождения. Как надо правильно родителям вести себя с ребенком, воспитывать его.

Последняя глава книги посвящена диагностике семьи. В ней можно найти описание различных тестов, помогающих познать мир малыша.

Книга предназначена для родителей детей дошкольного возраста, воспитателей детских садов, педиатров, педагогов и психологов, а также студентов педиатрических

факультетов медицинских институтов и психологических отделений университетов и педвузов.

**Комарова Т. и коллектив авторов. “Эстетическое воспитание детей”**

Книга посвящена вопросам эстетического воспитания детей дошкольного и младшего школьного возраста и руководства развитием их художественно-творческих способностей в различных видах художественной деятельности. В ней раскрываются основополагающие компоненты, на которых строится эстетическое воспитание и развитие художественного творчества детей: принципы, задачи, содержание, педагогические условия и методы работы с детьми по их эстетическому воспитанию и развитию у них эстетического восприятия, эстетических чувств и оценок, эстетического отношения к искусству, к их художественной деятельности, к их творчеству, а также развитие таких психических процессов как воображение, образное мышление, формирование у детей творческих способностей. (В нашем издательстве вышла книга Т. Комаровой “Обучение детей технике рисования”)

**Попова А. “Грамматика немецкого языка” “Auch Grammatik kann Spaß machen”**

Автор книги “Auch Grammatik kann Spaß machen” (“И грамматика может быть интересной”) — опытейший преподаватель немецкого языка с большим стажем работы с детьми и взрослыми, составитель многих учебных пособий и книг для чтения на немецком языке.

Эта книга — настоящий учебник немецкой грамматики, ибо она построена по принципу нарастания трудности материала и частотности употребления в речи грамматических явлений. По книге могут вести занятия преподаватели или можно заниматься самостоятельно, не прибегая к дополнительному материалу. Книга может быть и грамматическим справочником.

Очень полезна книга для поступающих в высшие учебные заведения и для тех, кому по ряду причин необходимо в короткие сроки восстановить свои знания. Пронизанная юмором книга будет интересна и взрослым и детям, она намного облегчит им трудную задачу постижения грамматики немецкого языка.

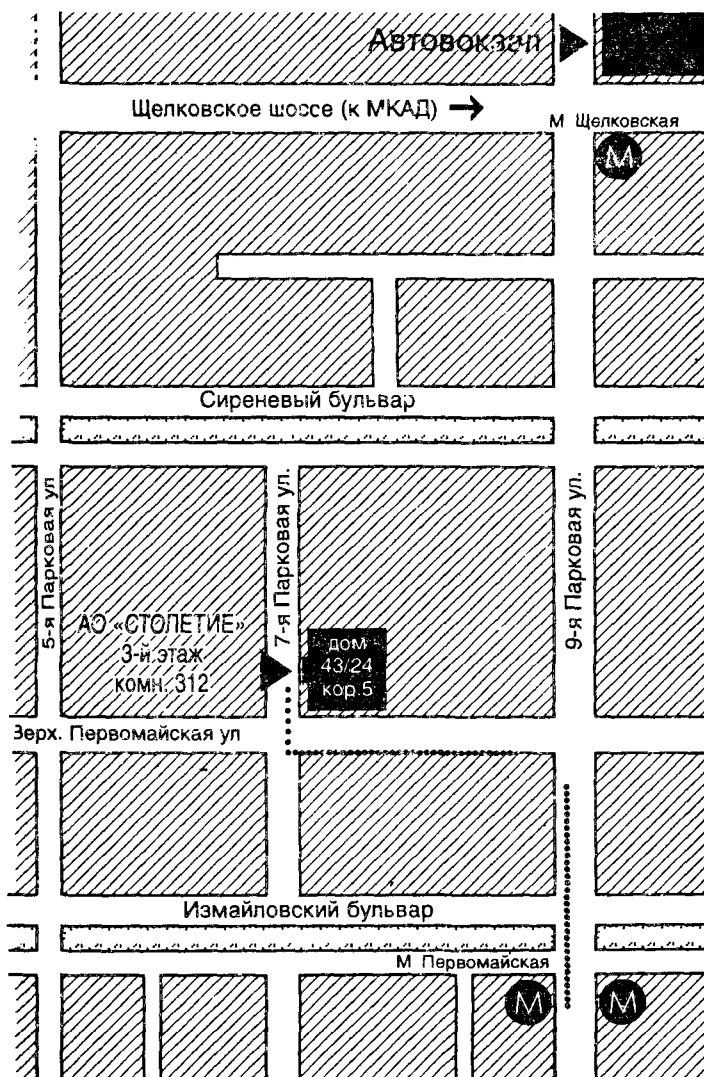
**Политова Н. “Развитие речи учащихся начальных классов на уроках русского языка” Книга для учителя.**

Основной материал пособия — методические рекомендации к занятиям по развитию речи учащихся начальных классов на уроках русского языка. Рекомендации ориентированы на понедельное планирование.

Наш адрес: 105264 Москва, ул. В.Первомайская, 43/24,  
кор. 5 (институт Гипрокино), ком. 312  
Тел.: 165 27 09, 165 27 18

# Транспортная схема

Наш адрес: ул. Верхняя Первомайская,  
д. 43/24, кор 5 (институт Гипрокино), комн 312  
Проезд на метро до ст. Первомайская  
Тел: 165-27-09, 165-27-18.



**Кошкин Николай Иванович  
Васильчикова Елена Николаевна**

## **ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ФИЗИКА**

**Справочник:      определения.  
                         физические величины  
                         законы.  
                         справочные таблицы**

Директор издательства *А. Новицкий*  
Ответственный редактор *Ю. Стальская*  
Компьютерная верстка — *Л. Моисеева*  
Корректоры *Л. Лазарева*  
                  *И. Мокина*

ISBN 5-7459-0056

ЛР №063236 от 04.01.94

Подписано в печать с оригинал-макета 02.02.96. Формат 84×108 1/32  
Бумага типографская Гарнитура Школьная Печать высокая  
Усл. печ. л. 15,12 Уч.-изд. л. 11,3 С 007 Заказ №607 Тираж 25 000 экз

АО "СТОЛЕТИЕ", 111141, Москва, Перовская, 39, к. 1

Владимирская книжная типография  
Комитета Российской Федерации по печати  
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7



КНИГОТОРГОВЫЙ АЛЬМАНАХ

# КНИГА РОССИИ

*Каждый номер журнала это:*

*300 и более книг с цветным изображением  
обложек, библиографическим описанием и  
краткой аннотацией*

*База данных участников системы  
альманаха в виде визитных карточек*

*Реклама издательских и  
книготорговых структур*

*Это мир книг у Вас в руках !*

**БЕЗ НАС - ПРИВЫЧНЕЕ,**

**( НАМИ - УДОБНЕЕ !!!**

105264, Москва

ул. Верхняя Первомайская, 43/24  
корпус 4, офис 27 (3 этаж)

телефон редакции: (095) 164-1811

диспетчера: (095) 133-1996



# **ВЛАДИМИРСКАЯ КНИЖНАЯ ТИПОГРАФИЯ**

**принимает заказы на изготовление книг**

Формат изданий 84x108/32, 84x108/16, 70x108/32.

Печать высокая с фотополимерных форм или литых стереотипов в одну краску на ротационных машинах.

Принимаются рукописи для горячего набора, оригинал-макеты, диапозитивы.

Переплет стандарта 7, шитье нитками, корешок круглый с капталом.

Печать на переплете фольгой или трафаретными красками.

Возможна печать форзацев в 4 краски способом офсетной печати.

Книги в мягкой обложке объемом от 128 до 576 страниц способом клеевого скрепления термоклеем.

Печать обложки офсетная.

Поставка материалов заказчика железнодорожным или автомобильным транспортом.

Суточный выпуск — по 40 тысяч экземпляров.

АДРЕС: 600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, дом 7.

Телетайп 718288 ДОН

Телефоны: /092-22/ 232-28.

Директор: РОДИОНОВ Вадим Николаевич.

Производственно-экономический отдел 235-39  
БОРИСОВА Елена Анатольевна.

# Периодическая система элементов Д. И. Менделеева

пери- оды	ряды	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII				
1	I	(H)						водород 1 H 1,0079	гелий 2 He 4,00260				
2	II	3 Li литий 6,941	4 Be бериллий 9,01218	бор 5 B 10,81	углерод 6 C 12,011	азот 7 N 14,0067	кислород 8 O 15,9994	фтор 9 F 18,998403	неон 10 Ne 20,179				
3	III	11 Na натрий 22,98977	12 Mg магний 24,305	алюминий 13 Al 26,98154	кремний 14 Si 28,0855	фосфор 15 P 30,97376	сера 16 S 32,06	хлор 17 Cl 35,453	аргон 18 Ar 39,948				
4	IV	19 K калий 39,0983	20 Ca кальций 40,08	21 Sc скандий 44,9559	22 Ti титан 47,90	23 V ванадий 50,9415	24 Cr хром 51,996	25 Mn марганец 54,9380	26 Fe железо 55,847	27 Co кобальт 58,9332	28 Ni никель 58,70		
	V	медь 29 Cu 63,546	цинк 30 Zn 65,38	галлий 31 Ga 69,72	германий 32 Ge 72,58	мышьяк 33 As 74,9216	селен 34 Se 78,96	бром 35 Br 79,904	криптон 36 Kr 83,80				
5	VI	37 Rb рубидий 85,468	38 Sr стронций 87,62	39 Y иттрий 88,9059	40 Zr цирконий 91,22	41 Nb ниобий 92,9064	42 Mo молибден 95,94	43 Tc технеций 98,9062	44 Ru рутений 101,07	45 Rh родий 102,9055	46 Pd палладий 106,4		
	VII	серебро 47 Ag 107,868	кадмий 48 Cd 112,41	индий 49 In 114,82	олово 50 Sn 118,69	сурьма 51 Sb 121,75	теллур 52 Te 127,60	йод 53 I 126,9045	ксенон 54 Xe 131,30				
6	VIII	55 Cs цезий 132,9054	56 Ba барий 137,33	57 La* лантан 138,9055	72 Hf гафний 178,49	73 Ta тантал 180,9479	74 W вольфрам 183,85	75 Re рений 186,207	76 Os осмий 190,22	77 Ir иридий 192,2	78 Pt платина 195,09		
	IX	золото 79 Au 196,9665	ртуть 80 Hg 200,59	таллий 81 Tl 204,37	свинец 82 Pb 207,2	висмут 83 Bi 208,9804	полоний 84 Po [209]	астат 85 At [210]	радон 86 Rn [222]				
7	X	87 Fr франций [223]	88 Ra радий 226,0254	89 Ac** актиний [227]	104 Ku [261] курчатовий	105 (Ns) [нильсборий]	106 (EW) экавольфрам	107 (ERe) экарений					
*ЛАНТАНОИДЫ													
58 Ce церий 140,12	59 Pr празеодим 140,9077	60 Nd неодим 144,24	61 Pm прометий [145]	62 Sm самарий 150,4	63 Eu европий 151,96	64 Gd гадолиний 157,25	65 Tb тербий 158,9254	66 Dy диспрозий 162,50	67 Ho гольмий 164,9304	68 Er эрбий 167,26	69 Tm тулий 168,9342	70 Yb иттербий 173,04	71 Lu лютеций 174,987
**АКТИНОИДЫ													
90 Th торий 232,0381	91 Pa протактиний 231,0359	92 U уран 238,029	93 Np нептуний 237,0482	94 Pu плутоний [244]	95 Am америций [243]	96 Cm кюрий [247]	97 Bk берилий [247]	98 Cf калифорний [251]	99 Es эйнштейний [254]	100 Fm фермий [257]	101 Md менделевий [258]	102 (No) (нобелий) [255]	103 (Lr) (люренсий) [256]