

СПРАВОЧНИК В КАРМАНЕ

ФОРМУЛЫ по ФИЗИКЕ



ДЛЯ ШКОЛЬНИКОВ СТАРШИХ КЛАССОВ,
АБИТУРИЕНТОВ, СТУДЕНТОВ

СПРАВОЧНИК В КАРМАНЕ

ФОРМУЛЫ ПО ФИЗИКЕ



ЭКСМО

УДК 373.167.1:53

ББК 22.3я721

К 49

В оформлении обложки использовано фото:
Gualtiero Boffi / Shutterstock.com
Используется по лицензии от Shutterstock.com

Клименко Е. С.

**К 49 Формулы по физике / Е. С. Клименко. – М. :
Эксмо, 2012. – 128 с. – (Справочник в кармане).**

ISBN 978-5-699-58451-2

Справочник станет незаменимым помощником старшим школьникам, студентам младших курсов вузов при подготовке к самостоятельным и контрольным работам, тестам, экзаменам, ЕГЭ. Быстро освежить в памяти полученные знания, систематизировать материал, вспомнить самые важные формулы – такие задачи призван решить сборник. Материалы, вошедшие в справочник, одновременно доступны, удобны для использования, снабжены наглядными схемами и чертежами.

В справочник включены все разделы физики, изучаемые в старшей школе и вузах.

УДК 373.167.1:53

ББК 22.3я721

Никакая часть настоящего издания ни в каких целях не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, если на это нет письменного разрешения издательства «Эксмо».

© Клименко Е. С., 2012

© ООО «Аудиономикс», 2012

© Оформление. ООО «Издательство
«Эксмо», 2012

ISBN 978-5-699-58451-2

Оглавление

МЕХАНИКА	9
Основы кинематики	9
Основные определения	9
Прямолинейное равномерное движение	11
Прямолинейное равнопеременное движение	11
Свободное падение тела под углом к горизонту	11
Равномерное движение материальной точки по окружности	13
Преобразования Галилея. Относительность движения	15
Основы динамики	16
Законы Ньютона	16
Основные силы в механике	17
Закон Гука	19
Движение искусственных спутников	21
Законы сохранения	22
Импульс тела	22
Закон сохранения импульса	22
Механическая работа. Мощность	23
Закон сохранения и превращения механической энергии	25
Элементы статики	27
Золотое правило механики	28
Гидростатика. Закон Паскаля	29
Движение жидкостей и газов	30

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ	33
ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	33
КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ.....	36
МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ.....	37
ЗВУК	39
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА.....	40
ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ (МКТ)	40
Основные положения МКТ.....	40
Основное уравнение МКТ газов. Уравнение	
состояния идеального газа.....	41
Уравнение Менделеева — Клапейрона. Изопроцессы	
в газах	42
ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ	44
Внутренняя энергия	44
Количество теплоты.....	45
Работа газа в термодинамике.....	46
Первое начало термодинамики	46
Применение первого закона термодинамики	
к изопроцессам.....	47
Второе начало термодинамики. Тепловые	
двигатели.....	47
Свойства жидкостей, газов и твердых тел	49
Уравнение теплового баланса	50
Влажность воздуха.....	50
Свойства поверхностного слоя жидкости	51
Смачивание. Краевой угол смачивания.....	52

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА.....	54
ЭЛЕКТРОСТАТИКА.....	54
Основные определения. Закон сохранения электрического заряда	54
Закон Кулона	55
Электрическое поле. Напряженность электрического поля.....	55
Линии напряженности электрического поля.....	56
Работа сил электростатического поля	57
Потенциал и разность потенциалов однородного поля.....	58
Эквипотенциальные поверхности	58
Проводники в электрическом поле	59
Диэлектрики в электрическом поле	59
Емкость уединенного проводника и сферы.....	59
Конденсаторы	60
Постоянный электрический ток.....	62
Условия существования электрического тока.....	62
Сила и плотность тока.....	62
Закон Ома для участка цепи	63
Последовательное и параллельное соединения проводников в электрической цепи.....	64
РАБОТА И МОЩНОСТЬ ТОКА	65
Основные определения. Закон Джоуля — Ленца	65
Электродвижущая сила источника электрической энергии.....	66
Закон Ома для полной цепи	66

Работа и мощность тока в замкнутой цепи.....	67
Правила Кирхгофа.....	67
Соединение источников тока в батарею.....	68
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ.....	69
Электрический ток в металлах.....	69
Электрический ток в электролитах	69
Электрический ток в газах.....	71
Электрический ток в полупроводниках.....	71
Электрический ток в вакууме.....	72
МАГНИТОСТАТИКА	73
Магнитное взаимодействие.	
Вектор магнитной индукции и сила Ампера	73
Графическое изображение магнитного поля.....	74
Закон Био — Савара — Лапласа	75
Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в магнитном поле	77
Магнитное поле в веществе.....	77
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ.....	78
Явление электромагнитной индукции.	
Магнитный поток	78
Закон электромагнитной индукции	79
Самоиндукция. Индуктивность. Энергия магнитного поля.....	80
Взаимная индукция. Трансформатор	81
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ	82
Электромагнитные колебания в колебательном контуре.....	82
Переменный ток	83
Электромагнитные волны	84

ОПТИКА	86
Волновая оптика	86
Определение понятия	86
Дисперсия света	86
Интерференция света	87
Дифракция света	88
Поляризация света	90
ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА	91
Основные понятия. Законы геометрической оптики	91
Изображение в плоском зеркале	94
Тонкая линза	95
Построение изображения в линзе	97
 ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	 102
 КВАНТОВАЯ ФИЗИКА	 104
СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ	104
ФОТОЭФФЕКТ	105
 АТОМНАЯ ФИЗИКА	 108
ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ	108
ТЕОРИЯ АТОМА	109
БОРОВСКАЯ ТЕОРИЯ ВОДОРОДОПОДОБНОГО АТОМА	111

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА	112
АТОМНОЕ ЯДРО	112
ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ НУКЛОНОВ В ЯДРЕ	113
ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ	113
РАДИОАКТИВНОСТЬ	114
ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ	114
ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ	116
ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ	116
ТИПЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ	116
КВАРКИ	117
ПРИЛОЖЕНИЕ	119
ПРИСТАВКИ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕСЯТИЧНЫХ КРАТНЫХ И ДОЛЬНЫХ ЕДИНИЦ	119
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ	119
ЭЛЕМЕНТЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	121

Механика

Основы кинематики

Основные определения

Вектор — величина, которая характеризуется направлением в пространстве.

Скалярная величина — величина, которая не имеет направления в пространстве и характеризуется только числовым значением (например масса, мощность, температура).

Система отсчета — тело отсчета, система координат, связанная с ним, и система отсчета времени.

Тело отсчета — тело, относительно которого определяется положение других (движущихся) тел.

Система координат — величины, которые определяют положение точки на плоскости и в пространстве.

Пройденный путь — длина участка траектории материальной точки, пройденного ею за определенное время.

Траектория — линия, вдоль которой движется тело (рис. 1).

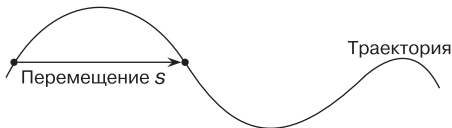


Рис. 1. Траектория материальной точки

Перемещение — вектор, соединяющий начальное и конечное положение тела. В физике чаще всего обозначается латинской буквой s .

Механическое движение — изменение положения тела относительно других тел, то есть изменение его координат с течением времени.

Материальная точка — объект, размерами которого можно пренебречь, поскольку они крайне малы. Положение материальной точки в пространстве относительно тела отсчета задается радиус-вектором: $\vec{r} = x|\vec{i}| + y|\vec{j}| + z|\vec{k}|$. Модуль радиус-вектора: $r = |\vec{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. Вектор средней скорости $\vec{v}_{\text{ср.}}$ за интервал времени Δt : $\vec{v}_{\text{ср.}} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$.

Мгновенная скорость — предел отношения вектора перемещения к промежутку времени, за который это перемещение произошло, при стремлении длительности промежутка времени к нулю:

$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$. Проекция вектора мгновенной скорости на оси координат:

$v_x = \frac{dx}{dt}$, $v_y = \frac{dy}{dt}$, $v_z = \frac{dz}{dt}$ (рис. 2). Абсолютное значение скорости:

$v = |\vec{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$. Единица измерения в СИ — 1 м/с.

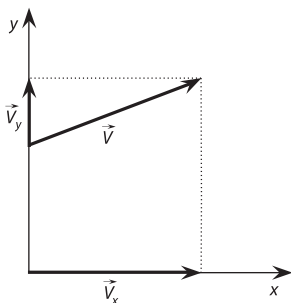


Рис. 2. Проекция скорости в декартовой системе координат

Ускорение — величина, которая характеризует изменение скорости. Равна отношению изменения скорости к промежутку времени, в течение которого это изменение произошло:

$a = \frac{v - v_0}{t}$. Ускорение — первая производная скорости по времени и вторая производная от координаты по времени.

Проекция вектора ускорения на оси координат: $a_x = \frac{dv_x}{dt}$, $a_y = \frac{dv_y}{dt}$,

$a_z = \frac{dv_z}{dt}$. Абсолютное значение ускорения:

$a = \left| \vec{a} \right| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$. Единица измерения в СИ — 1 м/с^2 .

Прямолинейное равномерное движение

Равномерное прямолинейное движение — движение, при котором тело за равные промежутки времени проходит равные расстояния. В этом случае путь равен перемещению: $\vec{s} = s = vt$.

Прямолинейное равнопеременное движение

Равнопеременное прямолинейное движение — движение тела с ускорением. Существует два вида равнопеременного движения: *равноускоренное* и *равнозамедленное*. Разница состоит лишь в направлении вектора ускорения, поэтому равнозамедленное движение отображается в формулах со знаком «минус».

Скорость рассчитывается по формуле: $v = v_0 \pm at$. Перемещение с учетом времени: $s = v_0 t \pm \frac{at^2}{2}$; перемещение без учета времени:

$$s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}.$$

Свободное падение тела под углом к горизонту

Свободное падение — падение тела при отсутствии сопротивления среды (впервые исследовано Г. Галилеем).

Ускорение свободного падения — ускорение, которое приобретают все тела вблизи поверхности Земли независимо от их массы при свободном падении. Вектор ускорения свободного падения $\vec{g}$ всегда направлен вниз. При свободном падении все тела вблизи поверхности Земли движутся равноускоренно. Траектория падения тела под углом к горизонту показана на рисунке 3.

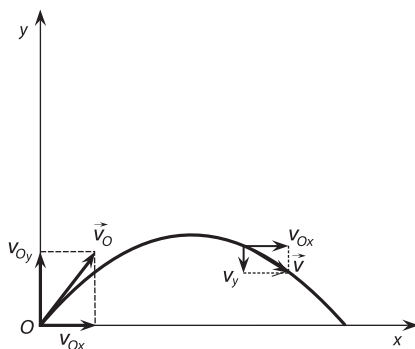


Рис. 3. Траектория падения тела

Вектор скорости и вектор перемещения материальной точки с учетом и без учета времени: $v = v_0 \pm gt$, $s = v_0 t \pm \frac{gt^2}{2}$, $s = \frac{v^2 - v_0^2}{2g}$.

Движение тела, брошенного под углом к горизонту — одновременное движение по горизонтальной и вертикальной осям (Ox и Oy) в системе координат.

Проекция вектора начальной скорости на оси координат: $v_{0x} = v_0 \cos \alpha$, $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$. Уравнения движения в проекции на оси x и y : $x = v_0 t \cos \alpha$, $y = v_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}$, $v_x = v_0 \cos \alpha$, $v_y = v_0 \sin \alpha - gt$.

Время подъема тела на максимальную высоту: $t_{\text{под.}} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$.

Максимальная высота подъема тела: $h_{\text{max}} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$.

Время движения тела: $t_{\text{дв.}} = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$.

Максимальная дальность полета тела: $s_{\text{max}} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$.

Максимальная дальность полета тела — при его падении под углом 45° . Максимальная высота подъема тела — при его падении под углом 90° .

Равномерное движение материальной точки по окружности

Криволинейное движение — движение тела по кривой траектории, которое можно представить в виде движения по дугам окружностей различных радиусов R . Если движение материальной точки происходит в плоскости, то вектор ускорения $\vec{a}$ можно разложить на две составляющие: $\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$, где $\vec{a}_n$ — нормальное (центростремительное) ускорение равномерно движущегося по окружности тела; $\vec{a}_\tau$ — тангенциальное ускорение, характеризующее быстроту изменения модуля вектора скорости материальной точки.

Вектор центростремительного ускорения $\vec{a}_n$ всегда направлен к центру кривизны траектории (рис. 4), а тангенциального $\vec{a}_\tau$ — по касательной к траектории.

Связь полного ускорения с тангенциальным и нормальным ускорениями: $a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$, $a_n = \frac{v^2}{R}$, $a_\tau = \frac{dv}{dt}$.

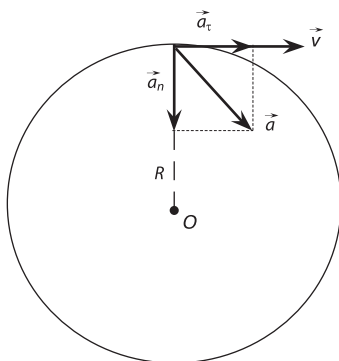


Рис. 4. Направление вектора ускорения

Положение точки A на окружности определяется углом φ между осью Ox и радиус-вектором $\vec{R}$, проведенным из центра к движущейся точке (рис. 5).

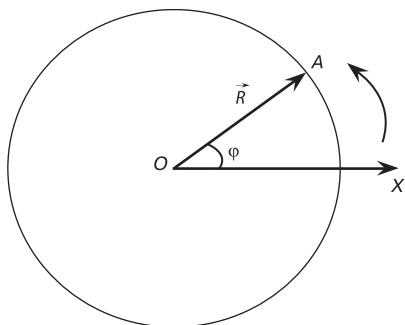


Рис. 5. Положение точки на окружности

Угловая скорость — отношение угла поворота $\Delta\varphi$ радиус-вектора к промежутку времени Δt : $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$. Единица измерения в СИ — 1 рад/с.

Движение тела по окружности характеризуется периодом и частотой обращения.

Период обращения — время одного полного оборота: $T = \frac{t}{N}$.

Единица измерения в СИ — 1 с.

Частота обращения — величина, равная количеству оборотов в секунду: $n = \frac{N}{t} = \frac{1}{T}$.

Полному обороту по окружности соответствует угол $\Delta\varphi = 2\pi$:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n.$$

Соотношение, связывающее угловую и линейную скорости: $\omega = \frac{v}{R}$.

Угловое ускорение: $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$.

Связь нормального (центростремительного) ускорения с угловой скоростью: $a_n = \omega^2 R$.

Преобразования Галилея. Относительность движения

Поскольку механическое движение носит относительный характер, в разных системах отсчета координаты и скорость тела будут определяться на основании преобразований Галилея.

Закон сложения перемещений: $\vec{s} = \vec{s}_0 + \vec{s}'$, где $\vec{s}$ — перемещение тела относительно неподвижной системы координат, $\vec{s}_0$ —

перемещение подвижной системы координат относительно неподвижной, $\vec{s}'$ — перемещение тела относительно подвижной системы координат.

Закон сложения скоростей. Скорость тела в неподвижной системе отсчета равна векторной сумме скорости тела в подвижной системе отсчета и скорости подвижной системы отсчета относительно неподвижной: $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}'$, где $\vec{v}$ — скорость тела относительно неподвижной системы координат, $\vec{v}_0$ — скорость подвижной системы координат относительно неподвижной, $\vec{v}'$ — скорость тела относительно подвижной системы координат.

Основы динамики

Законы Ньютона

Инерция — явление сохранения скорости тела (если на него не действуют другие тела или действие других тел скомпенсировано).

Первый закон Ньютона (закон инерции). Существуют такие системы отсчета, относительно которых поступательно движущееся тело сохраняет свою скорость постоянной, если на него не действуют другие тела (или действие других тел компенсируется). Подобные системы отсчета называются *инерциальными*.

Масса — мера инертности тела. Единица измерения в СИ — 1 кг.

Плотность — физическая величина, равная отношению массы тела m к его объему V : $\rho = \frac{m}{V}$. Единица измерения в СИ — 1 кг/м³.

Сила — векторная физическая величина, мера интенсивности воздействия на тело других тел и полей. Сила — причина возникновения ускорения у тела.

Второй закон Ньютона. Сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на сообщаемое этой силой ускорение:
 $\vec{F} = m\vec{a}$. Единица измерения в СИ — 1 Н (ньютон): $1 \text{ Н} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$.

Равнодействующая сила — сила, равная геометрической сумме всех приложенных к телу (точке) сил: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots$.

Третий закон Ньютона. Тела действуют друг на друга с силами, равными по модулю и противоположными по направлению:
 $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ (рис. 6).

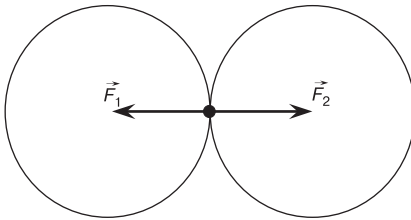


Рис. 6. Третий закон Ньютона

Основные силы в механике

Закон всемирного тяготения. Все тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними: $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$,
 где m_1 и m_2 — массы тел, r — расстояние между центрами тяжести тел,

$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$ — гравитационная постоянная.

Гравитационная постоянная G численно равна силе взаимодействия двух материальных точек массой 1 кг каждая, которые находятся на расстоянии 1 м друг от друга.

Сила тяжести — сила, с которой Земля притягивает тела, находящиеся вблизи ее поверхности: $\vec{F} = m\vec{g}$, где $\vec{g}$ — вектор ускорения свободного падения, направленный всегда к центру Земли. Вблизи поверхности Земли $|\vec{g}| = 9,8 \text{ м/с}^2 \approx 10 \text{ м/с}^2$. Существуют силы, которые возникают в твердых телах при изменении их структуры.

Деформация — изменение формы или объема тела под воздействием каких-либо причин. Основные виды деформации (рис. 7): *растяжение* (увеличение длины тела под действием сил, растягивающих его в одном направлении), *сжатие* (уменьшение длины тела под действием сил, сжимающих его в одном направлении), *сдвиг* (сдвиг параллельных слоев тела относительно друг друга под действием сил, параллельных этим слоям).

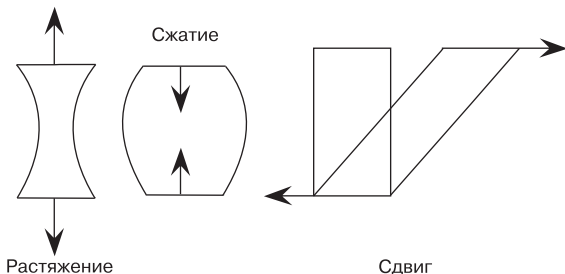


Рис. 7. Виды деформации

Абсолютная деформация — величина, характеризующая изменение какого-либо размера тела под воздействием силы.

Относительная деформация — величина, показывающая, какую часть от первоначального размера тела составляет абсолютная деформация.

Механическое напряжение — величина, характеризующая действие внутренних сил в деформированном твердом теле:

$\sigma = \frac{F}{S}$, где F — растягивающая (сжимающая) сила, S — площадь сечения.

Закон Гука

Относительное удлинение стержня $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ (где $\Delta l = |l - l_0|$ —

абсолютное удлинение, l_0 и l — длина стержня до и после деформации) прямо пропорционально механическому напряжению: $s = E\varepsilon$, где E — модуль Юнга. Модуль Юнга измеряется нормальным напряжением, которое должно возникнуть в материале при относительной деформации, равной 1, то есть при увеличении длины образца вдвое. Значение модуля Юнга различно для каждого материала. Единица измерения механического напряжения и модуля Юнга в СИ — 1 Па (паскаль).

Жесткость стержня: $k = \frac{SE}{l_0}$.

Модуль силы упругости: $F = k\Delta l$.

Закон Гука: $F_x = -kx$ (минус возникает вследствие третьего закона Ньютона), где F_x — проекция силы упругости, возникающей в пружине при удлинении $x = l - l_0$.

Сила натяжения возникает, когда какое-либо тело закреплено или подвешено на нити. Нить (подвес) растягивается под действием

силы тяжести груза и действует на тело с силой $\vec{T}$ (рис. 8). Сила натяжения всегда направлена вдоль подвеса вверх и противодействует силе тяжести.

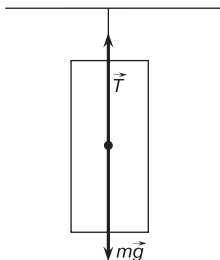


Рис. 8. Сила натяжения нити

Сила реакции опоры $\vec{N}$ возникает в случае, когда какое-либо тело действует на горизонтальную опору. Опора как бы пытается компенсировать ту силу, с которой на нее действует тело, силой $\vec{N}$, направленной перпендикулярно поверхности опоры (рис. 9).

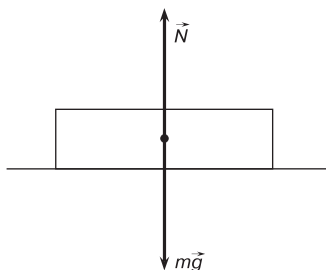


Рис. 9. Сила реакции опоры

Вес тела — сила, с которой тело вследствие притяжения Земли действует на опору или подвес. Вес тела на горизонтальной поверхности при отсутствии ускорения равен силе тяжести. Вес тела, движущегося с ускорением $\vec{a}$: $\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a})$.

Перегрузка — увеличение веса тела, вызванное ускоренным движением опоры или подвеса.

Невесомость — состояние тела, при котором вес тела равен нулю.

Сила трения — сила, возникающая между поверхностями соприкасающихся тел при их взаимодействии. Силы трения возникают парами, приложены к различным телам и направлены в противоположные стороны. Сила трения максимальна и не превышает $F_{\text{тр. max}} = \mu N$, где μ — коэффициент трения (безразмерная физическая величина, значение которой различно для каждого материала). Если коэффициент трения $\mu = 0$, то поверхность называют гладкой.

Движение искусственных спутников

Первая космическая скорость — скорость, с которой происходит движение тела по круговой орбите радиусом $r = R + h$:

$$v = \sqrt{G \frac{M}{r}} = \sqrt{G \frac{M}{R + h}}. \text{ Первая космическая скорость для тела}$$

вблизи поверхности Земли рассчитывается по формуле:

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M}{R}} = \sqrt{gR} \quad (v_1 \approx 7,9 \text{ км/с}).$$

Вторая космическая скорость — минимальная скорость, которую нужно сообщить телу, находящемуся вблизи поверхности Земли для того, чтобы оно удалилось от Земли и стало искусственным спутником Солнца ($v_2 = 11,2 \text{ км/с}$).

Третья космическая скорость — минимальная скорость, которую нужно сообщить телу, находящемуся вблизи поверхности Земли

для того, чтобы оно смогло покинуть пределы Солнечной системы. Значение третьей космической скорости будет минимально: $v_3 = 16,7$ км/с (если запускать тело по орбите в сторону движения Земли) или $v_3 = 72,8$ км/с (если запускать тело по орбите в сторону, противоположную движению Земли). Период обращения спутника, движущегося по орбите радиусом $r = R + h$:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi(R+h)^{\frac{3}{2}}}{(GM)^{\frac{1}{2}}}.$$

Законы сохранения

Импульс тела

Импульс тела — физическая величина, равная произведению массы тела на скорость его движения: $\vec{p} = m\vec{v}$. Единица измерения в СИ — 1 кг · м/с.

Закон изменения импульса. Приращение импульса тела равно импульсу равнодействующих внешних сил, действующих на тело: $\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t$.

Импульс силы — произведение силы на время ее действия.

Импульс силы — векторная величина, направление которой совпадает с направлением вектора силы. Изменение импульса тела равно импульсу силы. Единица измерения в СИ — 1 Н · с.

Закон сохранения импульса

Замкнутая система — система тел, в которой тела взаимодействуют только между собой, не испытывая воздействия со стороны других тел.

Закону сохранения импульса соответствует свой инвариант — *однородность времени (теорема Нётер)*. Суммарный импульс

замкнутой системы тел в процессе взаимодействия не изменяется (сохраняется): $\vec{p} = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i = \text{const.}$

Все тела в природе взаимодействуют друг с другом. Столкновение тел — пример такого взаимодействия. При упругом столкновении происходит взаимодействие без изменения внутреннего состояния, при неупругом — с изменением. Столкновение шаров можно записать через кинетические энергии:

$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}$, где $\vec{u}_1$ и $\vec{u}_2$ — скорости шаров после упругого удара.

Закон сохранения импульса при упругом ударе двух шаров массами m_1 и m_2 , движущихся вдоль одной прямой со скоростями $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$: $m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2$.

Закон сохранения импульса при абсолютно неупругом ударе: $m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{u}$. После абсолютно неупругого удара тела движутся вместе как единое целое, после частично неупругого — в разные стороны.

Механическая работа. Мощность

Механическая работа — физическая величина, равная произведению величины проекции вектора силы на направление движения и величины пройденного пути на косинус угла между ними: $A = F s \cos \alpha = F_s s$, где $F_s = F \cos \alpha$ — проекция силы $\vec{F}$ на направление перемещения $\vec{s}$. Единица измерения в СИ — 1 Дж (джоуль): 1 Дж = 1 Н · м. За единицу работы принимают работу, совершаемую силой в 1 Н на участке пути 1 м (рис. 10).

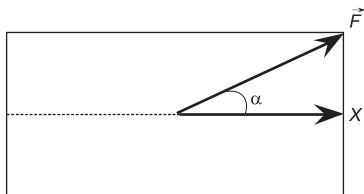


Рис. 10. Проекция силы на направление движения

Если направление силы совпадает с направлением движения тела, то сила совершает *положительную работу*. Если движение тела происходит в направлении, противоположном направлению приложенной силы, то сила совершает *отрицательную работу* (например, сила трения скольжения). Если направление силы перпендикулярно направлению движения, то сила не совершает работу ($A = 0$).

Мощность — физическая величина, численно равная отношению работы, совершаемой за некоторый промежуток времени,

к этому промежутку времени: $N = \frac{A}{t}$. За единицу мощности

принимают такую мощность, при которой за 1 с совершается работа в 1 Дж. Единица измерения в СИ — 1 Вт (ватт). Мощность двигателя при равномерном движении: $N = Fv$.

Консервативная сила — сила, работа которой не зависит от формы траектории (зависит лишь от начальной и конечной точки приложения сил). Работа консервативной силы по замкнутой траектории всегда равна нулю. К консервативным силам относятся силы тяжести и упругости, гравитационная сила.

Неконсервативная сила — сила, работа которой зависит от пути перехода тела из начального положения в конечное.

Работа неконсервативной силы на замкнутом пути не равна нулю. К неконсервативным силам относятся силы трения и сопротивления.

Закон сохранения и превращения механической энергии

В процессе движения состояния материальной точки (координата, скорость) от момента к моменту непрерывно изменяются, точка переходит из одного состояния в другое.

Механическая энергия — величина, характеризующая механическое состояние тела; способность тела совершать механическую работу. Единица измерения в СИ — 1 джоуль:

$$1 \text{ Дж} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2}.$$

Полная механическая энергия — сумма кинетической и потенциальной энергии тела: $E = E_k + E_n$.

Кинетическая энергия — энергия, которой обладают движущиеся тела: $E_k = \frac{mv^2}{2}$. Зависит от скорости тела; ее изменение равно работе, совершенной силой, действующей на тело:

$$A_{1, 2} = \Delta E_k = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \text{ Кинетическую энергию можно выразить}$$

$$\text{через импульс частицы } \vec{p} = m\vec{v}: E_k = \frac{p^2}{2m}.$$

Потенциальная энергия — энергия, которая зависит от взаимодействия тел или от взаимного расположения частей тела. Потенциальная энергия в поле силы тяжести: $E_n = mgh$, где m — масса тела, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, h — высота тела над поверхностью Земли (рис. 11).

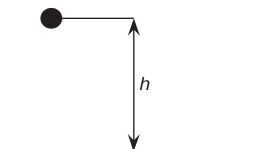


Рис. 11. Потенциальная энергия тела

Потенциальная энергия деформированной пружины: $E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$,

где k — жесткость пружины, x — деформация пружины (рис. 12).

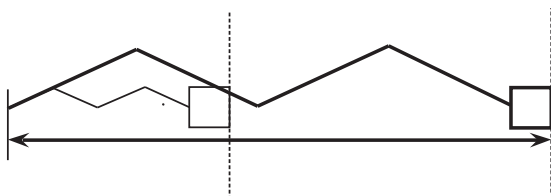


Рис. 12. Деформация пружины

Потенциальная энергия в поле тяготения: $E_{\text{п}} = G \frac{mM}{r}$, где m — масса тела, M — масса Земли, r — расстояние от тела до центра Земли, G — гравитационная постоянная (рис. 13).

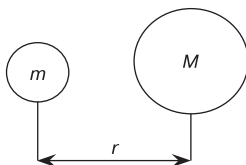


Рис. 13. Потенциальная энергия тяготения

Закон сохранения полной механической энергии. Сумма кинетической и потенциальной энергии тел, составляющих замкнутую систему и взаимодействующих друг с другом силами всемирного тяготения и силами упругости, остается постоянной.

Энергия тела никогда не исчезает и не появляется вновь, она лишь превращается из одного вида в другой.

Элементы статики

Твердое тело — смоделированное понятие классической механики, обозначающее совокупность материальных точек, расстояния между которыми сохраняются в процессе любых движений, совершаемых этим телом.

Равновесие — такое состояние тела, при котором оно находится в покое, движется равномерно прямолинейно или равномерно вращается вокруг какой-либо неподвижной оси. Условие равновесия тела непосредственно вытекает из первого закона Ньютона: результирующая всех сил, действующих на тело, должна быть равна нулю ($\sum_i \vec{F}_i = 0$). Еще одно условие равновесия твердого тела: при равновесии твердого тела сумма моментов всех внешних сил, действующих на него относительно любой оси, равна нулю ($\sum_i \vec{M}_i = 0$).

Момент силы относительно оси — физическая величина, равная произведению силы на плечо (наискратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы): $M_i = F_i l_i$.

Простой механизм — приспособление, служащее для облегчения труда человека (рычаг, блок подвижный и неподвижный, ворот, клин, наклонная плоскость).

Рычаг — твердое тело, способное вращаться вокруг неподвижной опоры. Используется для получения большего усилия на коротком плече с помощью меньшего усилия на длинном плече (или для получения большего перемещения на длинном плече с помощью меньшего перемещения на коротком плече).

Золотое правило механики

Можно выиграть в силе или в расстоянии, получить выигрыш в работе невозможно. В большинстве случаев простые механизмы применяют для того, чтобы получить выигрыш в силе.

Условие равновесия рычага (блока): $\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$ (рис. 14).

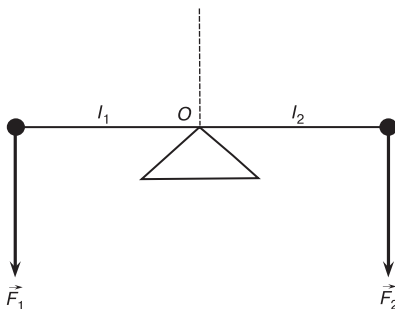


Рис. 14. Условие равновесия простого механизма

Неподвижный блок выигрыша в силе не дает, изменяя лишь направление действия силы. Подвижный блок дает выигрыш в силе в два раза, однако при этом длина веревки в два раза превышает высоту, на которую нужно поднять груз.

Золотое правило механики. Полезная работа — работа, при выполнении которой используются механизмы или машина для облегчения труда.

Коэффициент полезного действия механизма (КПД) — характеристика эффективности системы (устройства, механизма) в отношении преобразования или передачи энергии: $\eta = \frac{A_n}{A_z} \cdot 100 \%$ или $\eta = \frac{N_n}{N_z} \cdot 100 \%$, где A_n — полезная работа (совершенная), A_z — затраченная работа, N_n — полезная мощность, N_z — затраченная мощность.

Гидростатика. Закон Паскаля

Барометр — прибор для измерения атмосферного давления. Впервые атмосферное давление измерил Э. Торричелли.

Нормальное атмосферное давление — давление, равное давлению столба ртути высотой 760 мм при температуре 0 °C: $p_0 = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101\,300 \text{ Па} \cdot 10^5 \text{ Па}$. В среднем через каждые 12 м атмосферное давление уменьшается на 1 мм рт. ст. ($\approx 133,3 \text{ Па}$).

Давление — скалярная физическая величина, равная отношению силы F , действующей перпендикулярно поверхности, к площади S этой поверхности: $p = \frac{F}{S}$. Единица измерения в СИ — 1 Па (паскаль): $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. На практике применяют другую единицу измерения давления — 1 мм рт. ст. ($\approx 133,3 \text{ Па}$).

Закон Паскаля. Давление, приложенное к жидкости (газу), передается во все точки (направления) внутри жидкости (газа) без изменения.

Гидростатическое давление — давление столба жидкости плотностью ρ на определенной глубине h : $p = \rho gh$. Давление жидкости на глубине h : $p = p_{\text{атм.}} + \rho gh$.

Закон Архимеда. На тело, погруженное в жидкость (газ), действует сила, направленная вертикально вверх и равная весу жидкости (газа), вытесненной телом: $F_A = \rho g V$, где ρ — плотность жидкости (газа), V — объем погруженной части тела.

Условие плавания тел. Если сила тяжести компенсируется архимедовой силой, то тело будет плавать в жидкости (газе): $\vec{F}_A + m\vec{g} = 0$.

Архимедова сила всегда направлена вертикально вверх.

Движение жидкостей и газов

При кинематическом описании жидкости и газа поступают следующим образом: следят за определенной точкой пространства и фиксируют величину и направление скоростей различных частей жидкости, которые в разные моменты времени проходят через эту точку.

Линии тока — линии, касательные к которым во всех точках совпадают с направлениями скоростей жидкости в этих точках.

Уравнение неразрывности струи: $\rho_1 v_1 S_1 = \rho_2 v_2 S_2$, где ρ_1, ρ_2, v_1, v_2 — соответственно плотности и скорости жидкости в сечениях S_1 и S_2 .

Расход жидкости — количество жидкости, проходящей через сечение трубки тока за единицу времени: $Q = \rho v S$.

Ламинарное течение жидкости — плавное движение жидкости, при котором скорости частиц жидкости всюду направлены вдоль оси. Слои жидкости как бы движутся относительно друг друга, не смешиваясь.

Турбулентное течение жидкости — течение жидкости при больших скоростях движения, при котором траектории частиц образуют завихрения.

Стационарное течение жидкости — течение жидкости, при котором в каждой точке потока скорость жидкости постоянна во времени.

Идеальная жидкость — жидкость, при ламинарном течении которой можно пренебречь силами внутреннего трения, возникающими между слоями жидкости, движущимися с различными скоростями.

Уравнение Бернулли (уравнение трех энергий — кинетической, потенциальной и статистической): $\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const}$ (рис. 15).

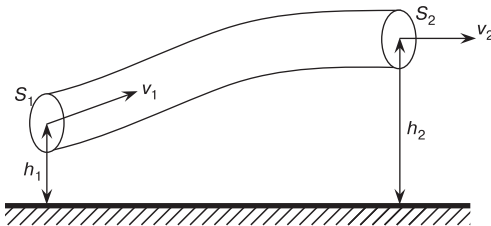


Рис. 15. Уравнение Бернулли

Формула Торричелли определяет скорость вытекания жидкости из отверстия малого сечения в нижней части широкого сосуда на глубине h : $v = \sqrt{2gh}$. Таким образом, скорость истечения идеальной жидкости из отверстия в сосуде такая же, как и при свободном падении тела с высоты h .

Уравнение Ньютона определяет силу трения между слоями жидкости: $F_{\text{тр.}} = \eta \frac{dv}{dx} S$, где η — динамическая вязкость, $\frac{dv}{dx}$ — градиент скорости, S — площадь взаимодействующих слоев. Единица измерения динамической вязкости — $1 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Формула Пуазёйля. При установившемся ламинарном движении вязкой несжимаемой жидкости сквозь цилиндрическую трубу круглого сечения секундный объемный расход прямо пропорционален перепаду давления на единицу длины трубы и четвертой степени радиуса и обратно пропорционален коэффициенту вязкости жидкости: $Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \cdot \frac{dp}{dl}$, где R — радиус трубки, по которой течет жидкость вязкостью η .

Колебания и волны

Основные определения

Механические колебания — движения, происходящие в двух взаимно противоположных направлениях, причем координаты тела периодически повторяются.

Свободные колебания — колебания, которые после возбуждения происходят без внешних воздействий и с течением времени затухают (рис. 16).

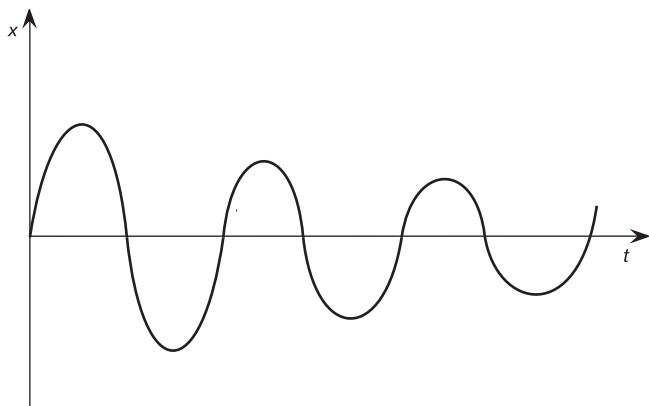


Рис. 16. Свободные колебания

Вынужденные колебания — колебания, совершаемые телом под действием внешней периодически изменяющейся силы. Период вынужденных колебаний равен периоду действующей силы. Вынужденные колебания — незатухающие.

Частота вынужденных колебаний равна частоте внешней периодической силы.

Резонанс — явление резкого возрастания амплитуды колебаний (рис. 17). Имеет место при совпадении собственной частоты колебательной системы с частотой действия внешней силы.

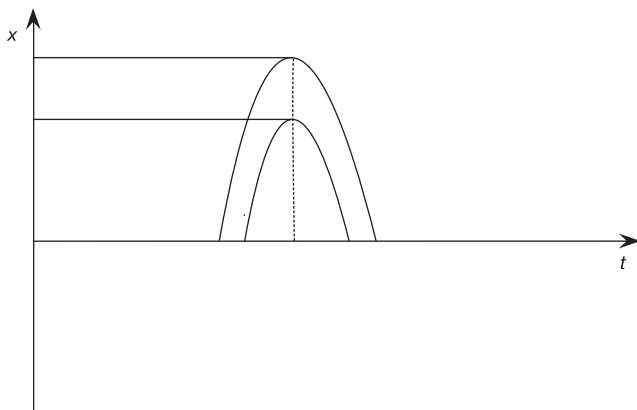


Рис. 17. Резонанс

Гармонические колебания — колебания, происходящие по закону синуса или косинуса: $x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$, $y = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, где A — амплитуда, ω_0 — циклическая частота, φ_0 — начальная фаза, $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$ — фаза колебаний.

Как и у любого движения, у колебаний есть свои характеристики.

Амплитуда колебаний — наибольшее отклонение тела от положения равновесия. Единица измерения амплитуды колебаний — 1 м (рис. 18).

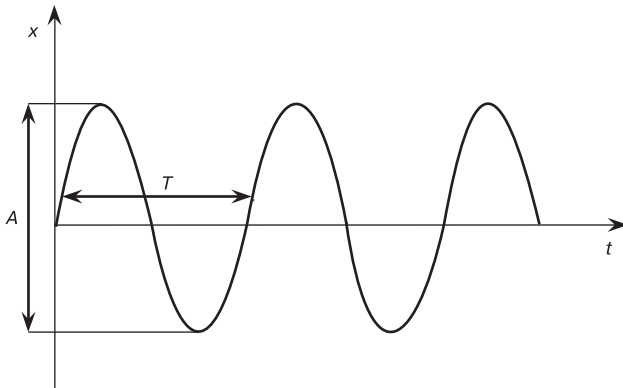


Рис. 18. Амплитуда колебаний

Период колебаний — время одного полного колебания. Единица измерения — 1 с. Если за время t система совершает N полных колебаний, то $T = \frac{t}{N}$.

Частота колебаний — число колебаний за одну секунду. Единица измерения в СИ — 1 с^{-1} (секунда в минус первой степени); иногда единицу частоты пишут в Гц (герц): $1 \text{ с}^{-1} = 1 \text{ Гц}$; $\nu = \frac{N}{t} = \frac{1}{T}$. Частота и период колебаний — взаимно обратные величины.

Циклическая частота — физическая величина, равная числу колебаний за 2π секунд: $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$.

Фаза — физическая величина, при заданной амплитуде и коэффициенте затухания определяющая состояние

колебательной системы в любой момент времени: $\varphi = \omega t + \varphi_0$, где φ_0 — начальная фаза. Единица измерения — 1 рад (радиан).

В системе механических колебаний сохраняется энергия:

☐ кинетическая: $E_k = \frac{1}{2}mA^2\omega_0^2\cos^2\omega_0t$;

☐ потенциальная: $E_p = \frac{1}{2}mA^2\omega_0^2\sin^2\omega_0t$;

☐ полная механическая: $E = \frac{1}{2}mA^2\omega_0^2$.

Колебательные системы

Пружинный маятник — простейшая колебательная система, состоящая из груза массой m , колеблющегося на пружине жесткостью k : $F_{\text{упр.}} = -kx$ (рис. 19). Период колебаний пружинного маятника: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$. Скороговорка для запоминания периода пружинного маятника: «Тарелка — Два Пирожка — МаКароны». Собственная частота пружинного маятника: $\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$.

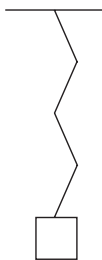


Рис. 19. Пружинный маятник

Математический маятник — простейшая колебательная система, состоящая из груза массой m , подвешенного на невесомой нерастяжимой нити длиной l (рис. 20). Период колебаний математического маятника: $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.

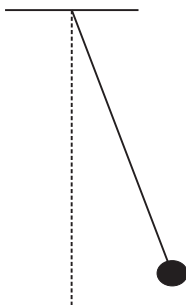


Рис. 20. Математический маятник

Скороговорка для запоминания периода математического маятника — «Тарелка — Два Пирожка — ЛоЖка». Собственная частота колебаний математического маятника: $\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}$. Собственная циклическая частота колебаний математического маятника: $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$.

Период математического маятника зависит лишь от длины подвеса и не зависит от массы груза.

Механические волны

Механическая волна — процесс распространения механических колебаний в упругой среде.

Поперечные волны — волны, в которых частицы среды совершают колебания в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны. Упругие поперечные волны могут наблюдаться лишь в твердых средах.

Продольные волны — волны, в которых частицы среды совершают колебания по направлению распространения волны. Продольные волны могут распространяться в твердых, жидких и газообразных телах.

Длина волны — физическая величина, определяемая расстоянием между двумя ближайшими точками волны, совершающими колебания в одинаковых фазах (рис. 21). Длина волны через период: $\lambda = vT$. Длина волны через частоту: $\lambda = \frac{v}{\nu}$.

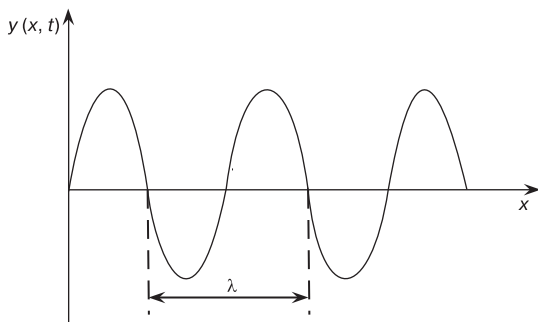


Рис. 21. Длина волны

Волновой вектор — вектор $\vec{k}$, модуль которого показывает, сколько раз длина волны укладывается на отрезке длиной 2π , а направление совпадает с направлением скорости волны.

Волновое число — численное значение волнового вектора: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Звук

Звуковые волны (звук) — механические волны с частотой колебаний от 16 до 20 000 Гц. Волны с частотами ниже 16 Гц — *инфразвуковые*, выше 20 000 Гц — *ультразвуковые*. Скорость звуковых волн тем больше, чем более плотной является среда, в которой они распространяются: она максимальна в твердых телах и минимальна в газах. Громкость звука определяется амплитудой колебаний звучащего тела. Высота тона определяется частотой колебаний.

Эхо — отраженная каким-либо препятствием звуковая волна, которая возвращается к источнику.

Молекулярная физика. Термодинамика

Основы молекулярно-кинетической теории (МКТ)

Основные положения МКТ

Основные положения МКТ строения вещества:

- ☐ все тела состоят из микрочастиц (атомов или молекул), причем масса тела равна сумме масс микрочастиц, из которых оно состоит;
- ☐ все атомы и молекулы в теле непрерывно и хаотично движутся, причем скорость этого движения связана с температурой тела, поэтому его называют тепловым движением;
- ☐ атомы и молекулы взаимодействуют между собой, причем характер взаимодействия электромагнитный.

Атомная единица массы (а. е. м.) — внесистемная единица массы

для измерения массы атомов: $1 \text{ а. е. м.} = \frac{1}{12}$ (масса атома углерода $^{12}_6\text{C}$) $= 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

Относительная атомная масса — число, показывающее, во сколько раз масса атома больше атомной единицы массы.

Относительная молярная масса — число, показывающее, во сколько раз масса молекулы больше атомной единицы массы.

Масса (в килограммах) любого атома или молекулы:

$$m_0 = 1,66 \cdot 10^{-27} M_r$$

Количество вещества — физическая величина, показывающая, во сколько раз число молекул в данном веществе больше, чем число атомов в 12 г углерода: $\nu = \frac{N}{N_A}$. Единица измерения — 1 моль.

Постоянная Авогадро — число молекул в 1 моль вещества:

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

Молярная масса — масса вещества, взятого в количестве 1 моль:

$M = m_0 N_A$. Единица измерения — 1 кг/моль. Ее значение для каждого элемента можно узнать в таблице Менделеева.

Масса m произвольного количества вещества ν и молярная масса M определяются по формуле: $m = \nu M$.

Объем V_0 , занимаемый одной молекулой (атомом): $V_0 = \frac{V}{N} = \frac{M}{\rho N_A}$.

Средняя кинетическая энергия молекулы тела: $\overline{E_k} = \frac{3kT}{2}$, где T —

температура тела, k — постоянная Больцмана.

Температура — мера средней кинетической энергии хаотического движения молекул в макротелах.

Среднеквадратичная скорость молекул: $v_{\text{кв.}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$,

где $R = kN_A = 8,31 \text{ Дж/моль}$, K — универсальная газовая постоянная. Скороговорка для запоминания формулы: «3 КоТа в Мешке».

Связь абсолютной температуры T в Кельвинах с температурой t в градусах Цельсия: $T = t + 273$.

Основное уравнение МКТ газов. Уравнение состояния идеального газа

Идеальный газ — газ, молекулы которого представляют собой абсолютно упругие шарики бесконечно малого объема, взаимодействие между которыми проявляется только при непосредственном столкновении их друг с другом или со стенками сосуда.

Основное уравнение МКТ газов: $p = \frac{1}{3}nm_0\overline{v^2}$. Можно получить иные записи основного уравнения МКТ: $p = \frac{2}{3}n\overline{E}$; $p = \frac{1}{3}\rho\overline{v^2}$; $p = nkT$.

Закон Дальтона: $p = nkT = \sum_{i=1}^r p_i$.

Парциальное давление — давление, которое оказывал бы каждый газ из смеси, если бы он один занимал весь данный объем.

Давление смеси газов равно сумме парциальных давлений всех газов, составляющих данную смесь.

Уравнение Менделеева — Клапейрона (уравнение состояния идеального газа): $pV = \frac{m}{M}RT = \nu RT$.

Один моль любого вещества при нормальных условиях (нормальное атмосферное давление $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па = 760 мм рт. ст.

и температура $t_0 = 0$ °С ($T_0 = 273,15$ К)) занимает один и тот же объем $V_M = 22,4 \cdot 10^{-3}$ м³, который называют *молярным объемом*.

Уравнение Менделеева — Клапейрона. Изопроцессы в газах

Изопроцессы — процессы, протекающие с данной массой газа при каком-либо неизменном термодинамическом параметре (p — давление, V — объем или T — температура). Каждый процесс характеризует определенный закон.

Изотермический процесс — процесс, протекающий при неизменной температуре.

Закон Бойля — Мариотта. При неизменной температуре произведение давления массы газа на объем, который она при этом занимает, остается величиной постоянной: $pV = \text{const}$.

График изотермического процесса изображают кривой, называемой *изотермой* (рис. 22).

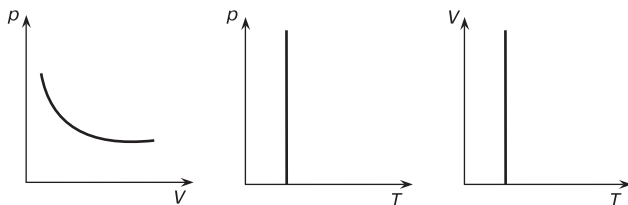


Рис. 22. Изотермический процесс

Изотерма в осях pT и VT всегда перпендикулярна оси T . В осях pV выше лежит та изотерма, у которой большая температура.

Изохорный процесс — процесс, протекающий при неизменном объеме.

Закон Шарля. При неизменном объеме давление массы газа прямо пропорционально его температуре: $\frac{p}{T} = \text{const}$. График изохорного процесса изображают кривой, называемой *изохорой* (рис. 23).

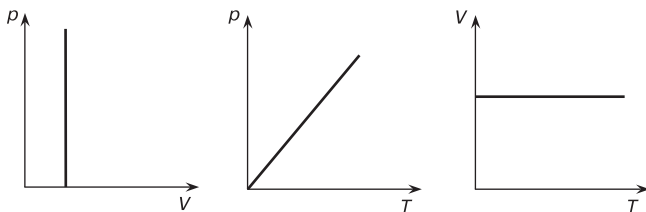


Рис. 23. Изохорный процесс

В диаграммах pV и VT изохора всегда перпендикулярна оси V .

Изобарный процесс — процесс, протекающий при неизменном давлении.

Закон Гей — Люссака. При неизменном давлении объем массы газа линейно зависит от температуры: $\frac{V}{T} = \text{const}$. График изобарного процесса изображают кривой, называемой *изобарой* (рис. 24).

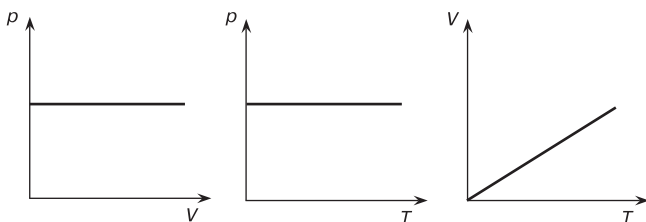


Рис. 24. Изобарный процесс

В осях pV и pT изобара всегда перпендикулярна оси p .

Обобщенный газовый закон. Если в газе при постоянном числе молей изменяются три параметра p , V и T , то из уравнения состояния следует: $\frac{pV}{T} = \text{const}$.

Основы термодинамики

Внутренняя энергия

Внутренняя энергия — энергия, которой наряду с механической обладает любое макроскопическое тело, зависящая от внутреннего состояния тела.

Внутренняя энергия складывается из следующих составляющих:

- ☐ кинетической энергии поступательного и вращательного движения молекул;
- ☐ потенциальной энергии взаимодействия молекул;
- ☐ энергии колебательного движения атомов в молекулах;
- ☐ энергии электронов в атомах и др.

Внутренняя энергия идеального газа включает лишь кинетическую энергию поступательного движения молекул:

$$U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} RT = \frac{i}{2} pV, \text{ где } i - \text{число степеней свободы}$$

($i = 3$ для одноатомного газа, $i = 5$ для газа жестких двухатомных молекул, $i = 6$ для газа многоатомных молекул).

Способы изменения внутренней энергии:

- ☐ теплопередача (изменение кинетической энергии молекул);
- ☐ совершение работы над телом (изменение потенциальной энергии молекул).

Количество теплоты

Работа и количество теплоты — меры изменения внутренней энергии системы.

Теплопередача — один из способов изменения внутренней энергии без совершения механической работы.

Количество теплоты — получаемая (или отдаваемая) в процессе теплообмена энергия. Причем $Q > 0$, если тело получает энергию, и $Q < 0$, если тело энергию отдает. Количество теплоты Q , необходимое для нагрева тела на определенную температуру, определяется по формулам: $Q = C\Delta T$, $Q = cm\Delta T$, $Q = C_M\nu\Delta T$, где C — теплоемкость тела,

численно равная количеству теплоты, которое необходимо для нагревания тела на 1 К (Дж/К); c — удельная теплоемкость, численно равная количеству теплоты, которое необходимо для нагревания 1 кг вещества на 1 К (Дж/кг · К); C_M — молярная теплоемкость, численно равная количеству теплоты, которое необходимо для нагревания 1 моль вещества на 1 К (Дж/моль · К).

Работа газа в термодинамике

Работа газа при постоянном давлении: $A' = p\Delta V$, где ΔV — изменение объема газа.

Работа внешней силы: $A' = -A' = -p\Delta V$.

Работа газа при изотермическом процессе: $A = \frac{m}{M}RT \ln \frac{V_2}{V_1}$, где m

и M — масса и молярная масса газа соответственно, V_1 и V_2 — начальный и конечный объем, T — температура газа. Работа газа при изобарном процессе: $A' = p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M}R\Delta T$. Работа газа в изохорном процессе равна нулю.

Первое начало термодинамики

Закон сохранения энергии тепловых процессов

и первое начало термодинамики. Изменение внутренней энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе, и не зависит от способа, которым осуществляется этот переход: $\Delta U = A + Q$ или $Q = \Delta U + A'$. Если к газу подвести некоторое количество теплоты, то оно пойдет на изменение внутренней энергии или на совершение газом работы над внешней силой.

Применение первого закона термодинамики к изопроцессам

Изотермический процесс. При $T = \text{const}$ внутренняя энергия не изменяется ($\Delta U = 0$), следовательно, $Q = A'$.

Изохорный процесс. При $V = \text{const}$ газ не совершает работу ($\Delta V = 0$), следовательно, $Q = \Delta U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} R \Delta T = c_v m \Delta T$. Удельная теплоемкость газа: $c_v = \frac{i}{2} \cdot \frac{R}{M}$.

Изобарный процесс. При изобарном нагревании количество теплоты, передаваемое газу, расходуется на изменение его внутренней энергии и на совершение им работы:

$$Q = \Delta U + A' = c_p m \Delta T. \text{ Удельная теплоемкость газа: } c_p = c_v + \frac{R}{M}.$$

Адиабатный процесс (протекает в теплоизолированной системе). При $Q = 0$: $\Delta U = -A'$. При расширении газа $A' > 0$ и $\Delta U < 0$, то есть газ охлаждается; при сжатии газа $A' < 0$ и $\Delta U > 0$, то есть газ нагревается.

Уравнение Пуассона — соотношение между давлением и объемом идеального газа при адиабатном процессе: $pV' = \text{const}$.

$$\text{Коэффициент Пуассона: } \gamma = \frac{c_p}{c_v}.$$

Циклический процесс (цикл) — термодинамический процесс с телом, в результате совершения которого тело, пройдя через множество состояний, возвращается в исходное.

Второе начало термодинамики. Тепловые двигатели

Второе начало термодинамики — физический принцип, накладывающий ограничение на направление процессов передачи тепла между телами. Он гласит, что невозможен самопроизвольный переход тепла от тела, менее нагретого, к телу, более нагретому.

Тепловой двигатель — двигатель, превращающий внутреннюю энергию в механическую работу. Рабочее тело за цикл получает от нагревателя при температуре T_1 количество теплоты Q_1 , совершает работу A и, передав холодильнику количество теплоты Q_2 , возвращается в исходное состояние. Коэффициент полезного действия η теплового двигателя: $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{A}{Q_1}$. Максимально возможным КПД обладает тепловой двигатель, работающий по циклу Карно.

КПД цикла Карно — идеальный термодинамический цикл, состоящий из двух изотерм и двух адиабат. Тепловая машина Карно обладает максимальным КПД из всех машин, у которых максимальная и минимальная температуры осуществляемого цикла совпадают соответственно с максимальной и минимальной температурами цикла Карно. Одно из важнейших свойств цикла Карно — *обратимость*: он может быть проведен как в прямом, так и в обратном направлении, при этом энтропия адиабатически изолированной (без теплообмена с окружающей средой) системы не меняется: $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$.

Идеальная тепловая машина — машина, работающая по циклу Карно (рис. 25).

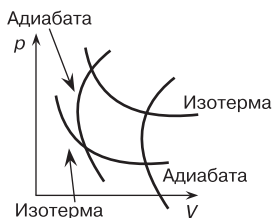


Рис. 25. Цикл Карно

Свойства жидкостей, газов и твердых тел

В природе все вещества могут существовать в трех агрегатных состояниях: *твердом, жидком и газообразном*. Каждое агрегатное состояние характеризуется определенной внутренней структурой вещества и определенными физическими свойствами.

Плавление — переход вещества из твердого состояния в жидкое. Для плавления твердого вещества массой m потребуется количество теплоты $Q = \lambda m$, где λ — удельная теплота плавления (значение для каждого вещества можно узнать в справочниках). Единица измерения удельной теплоты плавления — 1 Дж/кг.

Кристаллизация — переход вещества из жидкого состояния в твердое, при котором происходит выделение количества теплоты $Q = -\lambda m$.

Парообразование — переход вещества из жидкого состояния в газообразное. Происходит двумя путями: испарением и кипением. *Испарение* происходит со свободной поверхности жидкости, граничащей с газообразной средой или вакуумом. *Кипение* — переход жидкости в пар, который происходит в объеме всей жидкости при постоянной температуре. Количество теплоты при парообразовании $Q = rm$, где r — удельная теплота парообразования (значение для каждого вещества можно узнать в справочниках). Единица измерения удельной теплоты парообразования — 1 Дж/кг.

Конденсация — переход вещества из газообразного состояния в жидкое. Количество теплоты при конденсации $Q = -rm$.

При **сгорании топлива** количество теплоты $Q = qm$, где q — удельная теплота сгорания топлива, m — масса сгоревшего топлива.

Уравнение теплового баланса

Теплообмен — физический процесс передачи тепловой энергии от более горячего тела к более холодному либо непосредственно (при контакте), либо через разделяющую (тела или среды) перегородку из какого-либо материала. Когда физические тела одной системы находятся при разной температуре, то происходит передача тепловой энергии, или теплопередача, от одного тела к другому до наступления термодинамического равновесия: $\sum_i Q_i + \sum_j Q_j = 0$, где $Q_i > 0$ — количество теплоты, полученное телами системы; $Q_j < 0$ — количество теплоты, отданное телами системы.

Термодинамическое равновесие — состояние системы, при котором остаются неизменными по времени макроскопические величины этой системы (температура, давление, объем, энтропия). Если система не теплоизолированная, то уравнение теплового баланса должно включать количество теплоты $Q > 0$, полученное системой, или $Q < 0$, отданное системой окружающим телам, не входящим в систему: $\sum_i Q_i + \sum_j Q_j = Q$.

Влажность воздуха

Насыщенный пар — пар, который находится в динамическом равновесии со своей жидкостью.

Ненасыщенный пар — пар, который находится над поверхностью жидкости, когда испарение преобладает над конденсацией, а также пар при отсутствии жидкости.

Влажность воздуха — величина, характеризующая содержание водяных паров в различных частях атмосферы Земли.

Точка росы — температура, при которой водяной пар становится насыщенным.

Критическая температура — температура, при которой исчезает разница между жидкостью и ее насыщенным паром.

Абсолютная влажность — количество паров воды, содержащихся в 1 м³ воздуха. Единица измерения — 1 кг/м³. Максимальное значение абсолютной влажности равно плотности насыщенного пара ρ_n при данной температуре: $\rho_n = \frac{p_n M}{RT}$.

Относительная влажность воздуха — отношение парциального давления водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению насыщенного водяного пара при той же температуре: $\varphi = \frac{p}{p_n} \cdot 100 \% = \frac{\rho}{\rho_n} \cdot 100 \% = \frac{m}{m_n} \cdot 100 \%$, где m — масса пара, содержащегося в воздухе, m_n — масса насыщенного пара при данной температуре.

Свойства поверхностного слоя жидкости

Поверхностная энергия — дополнительная потенциальная энергия молекул поверхностного слоя жидкости.

Коэффициент поверхностного натяжения жидкости σ (поверхностное натяжение) — величина, характеризующая зависимость работы молекулярных сил при изменении площади свободной поверхности жидкости от рода жидкости и внешних условий: $\sigma = \frac{A}{\Delta S} = \frac{\Delta E}{\Delta S}$. Единица измерения — 1 Дж/м² = 1 Н/м.

Сила поверхностного натяжения — сила, обусловленная взаимодействием молекул в жидкости, вызывающая сокращение

площади ее свободной поверхности и направленная по касательной к этой поверхности: $F_{\text{н}} = \sigma l$.

Смачивание. Краевой угол смачивания

Если молекулы жидкости притягиваются друг к другу слабее, чем к молекулам твердого вещества, то жидкость называют *смачивающей* это вещество (рис. 26). Если молекулы жидкости притягиваются друг к другу сильнее, чем к молекулам твердого вещества, то жидкость называют *несмачивающей* (рис. 27).

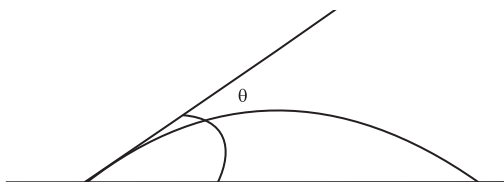


Рис. 26. Смачивающая жидкость



Рис. 27. Несмачивающая жидкость

Краевой угол — угол θ между касательными к поверхности твердого тела и к поверхности жидкости. Жидкость всегда находится внутри краевого угла. Для смачивающих жидкостей краевой угол острый, а для несмачивающих жидкостей — тупой.

Мениск — свободная поверхность жидкости, искривленная у краев узких трубок (капилляров) радиусом $R \leq 1$ мм. У смачивающей жидкости мениск вогнутый (рис. 28, *а*), а у несмачивающей — выпуклый (рис. 28, *б*).

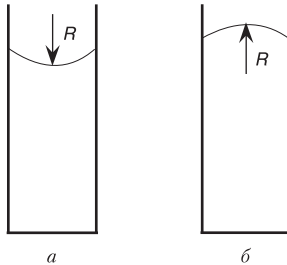


Рис. 28. Мениск

Лапласово давление — дополнительное давление, которое создает искривленная поверхность жидкости, стремящаяся выпрямиться под действием молекулярных сил. Это давление при смачивании (вогнутый мениск) направлено от жидкости, а при несмачивании (выпуклый мениск) — внутрь.

Формула лапласового давления: $p = \frac{2\sigma}{R}$. Благодаря лапласову

давлению жидкость в капиллярах при смачивании поднимается выше (см. рис. 28, *а*), а при несмачивании — опускается ниже (см. рис. 28, *б*) уровня воды в сосуде на величину h :

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R} = \frac{2\sigma}{\rho g r} \cos \theta.$$

Электродинамика

Электростатика

Основные определения. Закон сохранения электрического заряда

Электростатика — раздел физики, изучающий неподвижные электрические заряды.

Электрический заряд — связанное с телом свойство, позволяющее ему быть источником электрического поля и участвовать в электромагнитных взаимодействиях. Заряд — количественная характеристика. Единица измерения в СИ — 1 Кл (кулон). 1 Кл — электрический заряд, проходящий через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А за время 1 с (рис. 29).

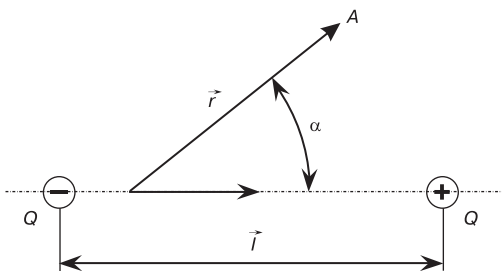


Рис. 29. Графическое обозначение зарядов

Элементарный заряд — минимальный неделимый заряд, которым обладают все заряженные элементарные частицы: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Заряды электрона и протона: $q_e = -e$, $q_p = +e$. Заряд любого заряженного тела кратен элементарному заряду: $q = \pm Ne$.

Закон сохранения электрического заряда. Электрический заряд при электризации не исчезает бесследно. Он лишь переходит от одного тела к другому; общий заряд в замкнутой системе тел остается величиной постоянной.

Закон Кулона

Взаимодействие зарядов описывается законом Кулона.

Закон Кулона. Два точечных неподвижных заряженных тела в вакууме взаимодействуют друг с другом с силой, прямо пропорциональной произведению модулей зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними, и направленной по прямой, соединяющие эти заряды: $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$,

где $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$.

Принцип суперпозиции. Сила $\vec{F}$, действующая на заряд q со стороны системы зарядов $q_1, q_2, \dots, q_N$, равна векторной сумме сил, действующих на заряд q со стороны каждого заряда системы в отдельности: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots$.

Электрическое поле.

Напряженность электрического поля

Электрическое поле неподвижных зарядов (электростатическое поле) не изменяется со временем и неразрывно связано с создающими его зарядами.

Напряженность — силовая векторная характеристика поля, равная отношению силы, с которой поле действует на точечный заряд q , к величине этого заряда: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$. Единица измерения — 1 Н/Кл. Направление вектора напряженности $\vec{E}$

совпадает с вектором силы, действующей на положительный заряд. Напряженность поля точечного заряда q : $\vec{E} = k \frac{q}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$.

Принцип суперпозиции электрических полей — результирующая напряженность поля в точке, равная векторной сумме полей:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$$

Линии напряженности электрического поля

Силовые линии — линии, в каждой точке которых касательная совпадает с направлением вектора напряженности поля.

Используются для графического изображения поля. Их принято проводить с такой густотой, чтобы число силовых линий, пронизывающих единицу площади нормальной к силовым линиям плоскости, было равно напряженности поля (рис. 30).

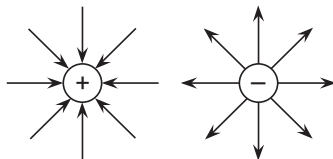


Рис. 30. Точечные заряды

Силовые линии обладают свойствами:

- ☐ непрерывности (начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных);
- ☐ непересекаемости (нигде не пересекаются, исключая точки, где есть заряды);
- ☐ пропорциональности (плотность силовых линий пропорциональна модулю напряженности поля (числу силовых

линий, пересекающих расположенную перпендикулярно этим линиям площадку единичной площади))).

Однородное электрическое поле характеризуется одинаковыми векторами напряженности по модулю и по направлению.

Работа сил электростатического поля

Работа сил электростатического поля не зависит от формы пути, определяется только началом и концом пути, следовательно, электростатическое поле носит потенциальный характер. Электростатические силы консервативны.

Работа сил электрического поля: $A = qE_x S_x = qE(x_2 - x_1)$ (рис. 31).

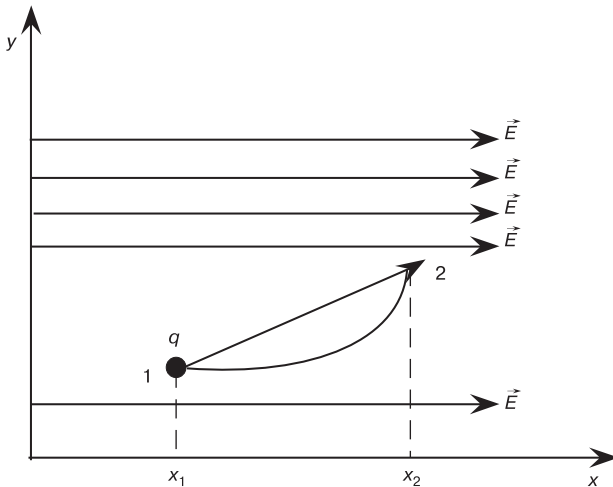


Рис. 31. Электрическая работа

Потенциал и разность потенциалов однородного поля

Потенциал — скалярная энергетическая характеристика поля, которая измеряется потенциальной энергией одиночного положительного заряда, находящегося в заданной точке поля: $\varphi = \frac{W_n}{q}$.

Разность потенциалов (напряжение). Работа сил поля при перемещении некоторого заряда между двумя точками поля прямо пропорциональна напряжению между этими точками:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = -\Delta\varphi = \frac{A}{q}, A = -q\Delta\varphi. \text{ Единица измерения —}$$

1 В (вольт): 1 В = 1 Дж/Кл. Связь между напряженностью электростатического поля и разностью потенциалов: $E_x = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x}$.

Единица измерения в СИ — 1 В/м (вольт на метр).

Потенциальная энергия точечного заряда q_0 в поле точечного заряда q : $W_n = k\frac{qq_0}{r}$.

Эквипотенциальные поверхности

Эквипотенциальная поверхность — поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал. Силовые линии пересекают эквипотенциальные поверхности перпендикулярно (рис. 32).



Рис. 32. Эквипотенциальные поверхности

Проводники в электрическом поле

Проводник — вещество, хорошо проводящее электрический ток. Характерная особенность — в них всегда есть свободные заряды, которые могут перемещаться по всему проводнику под действием электрического поля (в металлах — электроны, в электролитах — ионы). Когда проводник попадает в электрическое поле, он электризуется, так что на одном его конце возникает положительный заряд, а на другом — такой же величины отрицательный. Такая электризация называется *электростатической индукцией*. При равновесии зарядов на проводнике потенциал всех его точек одинаков.

Диэлектрики в электрическом поле

Диэлектрик — вещество, не проводящее электрический ток.

Поляризация диэлектрика — явление возникновения на противоположных сторонах диэлектрика связанных зарядов противоположного знака при внесении диэлектрика во внешнее электрическое поле.

Относительная диэлектрическая проницаемость — величина ϵ , показывающая, во сколько раз поле в диэлектрике слабее, чем в вакууме, если граница диэлектрика перпендикулярна внешнему электрическому полю.

Емкость уединенного проводника и сферы

Емкость — характеристика проводника, показывающая, какой заряд необходимо сообщить проводнику, чтобы его потенциал стал равен 1 В. Емкость — способность проводника накапливать электрический заряд. Зависит от размеров, формы проводника и внешних условий. Измеряется

зарядом, необходимым для повышения потенциала этого проводника на единицу, то есть $C = \frac{q}{\varphi}$. Единица измерения в СИ — 1 Ф (фарад).

Емкость проводящего шара (сферической поверхности) радиуса R : $C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R$. То есть электрическая емкость уединенного проводящего шара прямо пропорциональна его радиусу.

Конденсаторы

Конденсатор — система из двух проводников, разделенных тонким слоем диэлектрика. Обкладки конденсатора — проводники, заряженные зарядами противоположного знака, равными по модулю. Если проводники плоские и расположены параллельно, то конденсатор называется *плоским*, если сферические — *сферическим*.

Емкость конденсатора — отношение заряда конденсатора к разности потенциалов между обкладками:

$$C = \frac{q}{U}.$$

Емкость плоского конденсатора, состоящего из двух пластин, прямо пропорциональна площади его пластины, величине диэлектрической проницаемости и обратно

пропорциональна толщине диэлектрика: $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$.

Емкость сферического конденсатора: $C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1}$.

При параллельном соединении конденсаторов (рис. 33) заряд батареи равен: $q = q_1 + q_2$, а напряжение одинаково для обоих конденсаторов и равно: $U = \varphi_a + \varphi_b$.

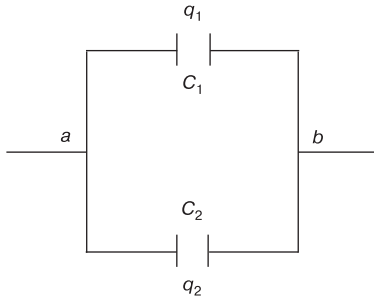


Рис. 33. Параллельное соединение конденсаторов

Емкость батареи двух параллельно соединенных конденсаторов: $C = \sum_{i=1}^n C_i$.

При параллельном соединении n конденсаторов если $C_1 = C_2 = C_3 = \dots = C_n$, то $C = nC_1$.

При последовательном соединении конденсаторов (рис. 34) с емкостями C_1 и C_2 общий заряд батареи равен заряду каждого конденсатора: $q = q_1 = q_2$. Общее напряжение равно сумме напряжений на отдельных конденсаторах: $U = U_1 + U_2$.

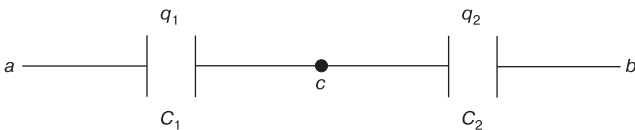


Рис. 34. Последовательное соединение конденсаторов

Емкость батареи двух последовательно соединенных конденсаторов: $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$.

При последовательном соединении n конденсаторов: $\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$.

Энергия заряженного конденсатора: $W = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$.

Плотность энергии электрического поля: $w = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}$.

Постоянный электрический ток

Условия существования электрического тока

Электрический ток — упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.

Для появления и существования электрического тока необходимо наличие:

- ☐ свободных носителей тока;
- ☐ источника электрической энергии.

Электрический ток называется *постоянным*, если движение носителей тока стационарно, то есть $\vec{v}_d$ не изменяется со временем. За *направление тока* принимают направление движения положительно электрически заряженных частиц. В металлах направление тока противоположно направлению дрейфа электронов.

Сила и плотность тока

Сила тока равна отношению заряда Δq , прошедшего через поперечное сечение проводника за промежуток времени Δt , к этому промежутку: $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$. Единица измерения — 1 Кл/с = 1 А (ампер).

Плотность тока — физическая величина, которая показывает, какой ток проходит в единичном сечении проводника:

$j = \frac{I}{S} = q_0 n v$, где q_0 — заряд отдельной частицы, n — концентрация носителей. Единица плотности тока — 1 А/м^2 .

Закон Ома для участка цепи

Закон Ома для однородного участка цепи. Сила тока в участке цепи прямо пропорциональна напряжению на концах этого участка и обратно пропорциональна его сопротивлению:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Электрическое сопротивление проводника — физическая величина, которая показывает, как данный проводник препятствует прохождению тока через него (рис. 35). Единица измерения в СИ — 1 Ом .

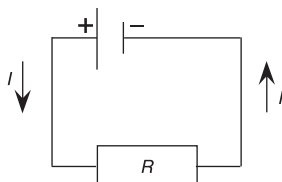


Рис. 35. Участок цепи

Сопротивление металлического проводника длиной l и площадью поперечного сечения S : $R = \rho \frac{l}{S}$, где ρ — удельное сопротивление проводника (значение для каждого вещества можно узнать в справочниках). Единица измерения удельного сопротивления в СИ — $1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Удельное сопротивление проводника зависит от рода вещества и от его температуры: $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$, где

ρ_0 — удельное сопротивление при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, α — температурный коэффициент сопротивления, t — температура (в $^{\circ}\text{C}$).

Удельное сопротивление металлов с ростом температуры увеличивается.

Закон Ома в дифференциальной форме: $j = \sigma E$, где $\sigma = \frac{1}{\rho}$ — удельная электрическая проводимость проводника.

Последовательное и параллельное соединения проводников в электрической цепи

Свойства последовательного соединения проводников (рис. 36):

- ☐ сила тока во всех последовательно соединенных проводниках одинакова: $I_1 = I_2 = \dots = I_n = I$;
- ☐ напряжение на концах рассматриваемого участка цепи равно сумме напряжений на отдельных проводниках:
 $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$;
- ☐ общее сопротивление участка цепи равно сумме сопротивлений отдельных проводников:
 $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$.

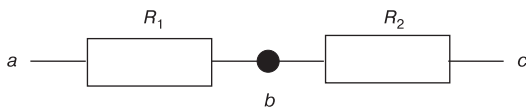


Рис. 36. Последовательное соединение резисторов

Свойства параллельного соединения проводников (рис. 37):

- ☐ напряжения на всех проводниках (ветвях) и на разветвлении одинаковы: $U_1 = U_2 = \dots = U_n = U$;
- ☐ сила тока в неразветвленной части цепи равна сумме сил токов в ветвях: $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$;

- общее сопротивление цепи равно сумме величин, обратно пропорциональных сопротивлению цепи:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

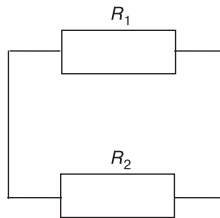


Рис. 37. Параллельное соединение резисторов

Работа и мощность тока

Основные определения. Закон Джоуля — Ленца

Работа электрического тока в проводнике равна количеству выделившейся теплоты: $A = IU\Delta t = I^2 R\Delta t = \frac{U^2 \Delta t}{R}$. Единица измерения в СИ — 1 Дж (джоуль).

Мощность тока — отношение работы A , совершенной за промежуток времени Δt , к этому промежутку: $P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$.

Единица измерения в СИ — 1 Вт (ватт). На практике чаще используются внесистемные единицы работы тока — 1 кВт · ч (киловатт-час): $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.

Закон Джоуля — Ленца. Количество теплоты, выделяемое проводником с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени: $Q = I_2 R \Delta t$.

Электродвижущая сила источника электрической энергии

Электродвижущая сила (ЭДС) — физическая величина, характеризующая работу сторонних сил в источниках постоянного или переменного тока: $\varepsilon = \frac{A_{\text{ст.}}}{q}$. Единица измерения —

1 В (вольт). Можно говорить об электродвижущей силе на любом участке цепи: это удельная работа сторонних сил не во всем контуре, а лишь на данном участке.

ЭДС гальванического элемента — работа сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда внутри элемента от одного полюса к другому. Работа сторонних сил не может быть выражена через разность потенциалов, поскольку сторонние силы непотенциальны и их работа зависит от формы траектории. Так, например, работа сторонних сил при перемещении заряда между клеммами тока вне самого источника равна нулю. Любой источник тока имеет внутреннее сопротивление r .

Закон Ома для полной цепи

На неоднородном участке цепи действуют как электрические, так и сторонние силы.

Закон Ома для неоднородного участка цепи:

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_b + \varepsilon}{R + r}.$$

Закон Ома для полной (замкнутой) цепи. Сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна величине электродвижущей силы источника тока и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи, равному сумме сопротивлений внешней и внутренней цепи: $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$.

Падение напряжения на зажимах источника равно падению напряжения на резисторе R : $U = \varphi_a - \varphi_b = e - Ir = IR$.

Короткое замыкание — явление, возникающее при замыкании концов участка цепи проводником с предельно малым сопротивлением $R \ll r$. Закон Ома для полной цепи в данном случае: $I_{\text{к.з.}} = \frac{\varepsilon}{r}$.

Работа и мощность тока в замкнутой цепи

Полная мощность источника тока P_0 равна работе, совершаемой источником в единицу времени: $P_0 = \frac{\varepsilon^2}{R + r}$.

Полезная мощность — мощность, выделяемая во внешней части цепи: $P = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2}$. Коэффициент полезного действия источника

тока: $\eta = \frac{P}{P_0} = \frac{U}{\varepsilon} = \frac{R}{R + r}$. Когда $R = r$, полезная мощность имеет

максимальное значение: $P_{\text{max}} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$.

Правила Кирхгофа

Правила Кирхгофа — несложные обобщения закона Ома.

При решении задач на правила Кирхгофа используются термины:

- ☐ узел (точка, где сходятся не менее трех проводников);
- ☐ ветвь (участок цепи между двумя узлами);
- ☐ контур (замкнутый участок цепи из нескольких последовательных ветвей).

Первое правило Кирхгофа. Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю: $\sum_i I_i = 0$.

Второе правило Кирхгофа. В любом замкнутом контуре сумма падений напряжения на сопротивлениях равна алгебраической сумме ЭДС в этом контуре: $\sum_i U_i = \sum_i \varepsilon_i$.

Уравнений на основе правил Кирхгофа составляется столько, сколько сопротивлений (резисторов) в контуре.

Соединение источников тока в батарею

Существуют два вида соединения источников тока:
последовательное и *параллельное*.

Последовательное соединение источников — соединение, при котором один полюс промежуточного источника соединяется с полюсом произвольного знака предыдущего, а второй полюс промежуточного источника соединяется с полюсом последующего источника.

ЭДС батареи равна разности потенциалов на ее зажимах:

$\varepsilon_6 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \dots + \varepsilon_n = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i$. В зависимости от полярности

ЭДС ε_i войдет в сумму с тем или иным знаком. Если такую

батарею замкнуть на резистор, то сила тока в цепи: $I_{\text{пол.}} = \frac{\varepsilon_6}{R + r_6}$,

где R — внешнее сопротивление, r_6 — внутреннее сопротивление батареи. При замыкании такой батареи на резистор R

в неразветвленной части цепи сила тока: $I_{\text{пол.}} = \frac{n\varepsilon_i}{R + nr_i}$.

Параллельное соединение источников — соединение, при котором одни полюса соединяют в один узел, другие — в другой. При таком соединении внутри даже отключенной от нагрузки батареи могут протекать токи, и разность потенциалов на ее полюсах (ЭДС батареи) рассчитывается по правилам Кирхгофа.

При подключении внешней нагрузки к зажимам батареи сила

тока, текущего через резистор R : $I_{\text{пар.}} = \frac{\mathcal{E}_i}{R + \frac{r_i}{n}}$.

Электрический ток в различных средах

Электрический ток в металлах

Носители электрического тока в металлах — свободные электроны. Электрическое сопротивление металлов при увеличении температуры увеличивается.

Зависимость от температуры удельного сопротивления металла:

$\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$, от сопротивления металлов: $R = R_0(1 + \alpha t)$, где ρ и ρ_0 — удельные сопротивления, R и R_0 — сопротивления проводника соответственно при температурах t и 0 °C; α — температурный коэффициент сопротивления.

Сверхпроводимость — свойство некоторых материалов обладать строго нулевым электрическим сопротивлением при достижении ими температуры ниже определенного значения. Критическая температура для большинства металлов лежит в интервале 1–20 К.

Электрический ток в электролитах

Электролит — жидкий проводник, в котором подвижными носителями зарядов являются только ионы (рис. 38).

Электролитами являются растворы и расплавы кислот, солей и щелочей. Носители электрического тока в электролитах — положительно и отрицательно заряженные ионы.

Электролитическая диссоциация — распад молекул на ионы электролита под действием растворителя.

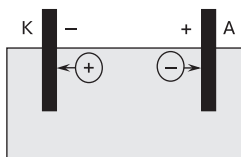


Рис. 38. Электрический ток в электролите

Степень диссоциации — число, показывающее, какую часть всех молекул растворенного вещества составляют молекулы, распавшиеся на ионы.

Электролиз — процесс выделения на электродах вещества, связанный с окислительно-восстановительными реакциями при прохождении тока в растворах электролитов. Положительный электрод — *анод*, отрицательный — *катод*.

Первый закон Фарадея (закон электролиза). Масса вещества, выделяющегося при электролизе, прямо пропорциональна количеству электричества, протекшего через раствор:

$m = kq = kIt$, где I — сила тока, t — время пропускания тока, k — электрохимический эквивалент вещества.

Второй закон Фарадея: $k = \frac{M}{eN_A n}$, где n — валентность атома, M — молярная (или атомная) масса вещества, N_A — постоянная Авогадро.

Электрохимический эквивалент вещества измеряется массой вещества, выделяющегося на электроде при прохождении через электролит единичного заряда.

Удельное сопротивление электролита: $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$, где ρ и ρ_0 — удельные сопротивления электролита при температурах t и 0°C соответственно, α — температурный коэффициент сопротивления ($\alpha < 0$).

Электрический ток в газах

Электрический разряд в газе — процесс протекания тока через газ. Носители электрического тока в газах — электроны, а также положительно и отрицательно заряженные ионы.

Энергия ионизации — энергия, необходимая для выбивания из молекулы (атома) одного электрона из кристаллической решетки (для различных веществ она равна $4 \div 25$ эВ, $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$).

Несамостоятельный газовый разряд — разряд, который происходит только под действием постороннего ионизатора.

Самостоятельный газовый разряд — разряд в газе, который может происходить без воздействия постороннего ионизатора.

Различают следующие типы самостоятельного газового разряда:

- ☐ тлеющий (происходит в разреженном газе, сопровождается свечением);
- ☐ искровой (происходит при высоком напряжении, достаточном для образования лавинного пробоя);
- ☐ дуговой (возникает при уменьшении расстояния между электродами);
- ☐ коронный (происходит в газе, когда ударная ионизация возникает не во всем пространстве, занятом полем, а лишь вблизи электродов или проводов, где напряженность поля наиболее высокая).

Электрический ток в полупроводниках

Полупроводники — материалы, проводимость которых оказалась промежуточной между проводниками и диэлектриками.

Полупроводники *n*-типа — полупроводники с примесью, валентность которой на единицу больше валентности основных

атомов. Основные носители тока — электроны (проводимость n -типа).

Полупроводники p -типа — полупроводники с примесью, валентность которой на единицу меньше валентности основных атомов. Основные носители тока — дырки (проводимость p -типа).

Удельное сопротивление полупроводников уменьшается с увеличением температуры.

Собственная проводимость — проводимость чистых полупроводников (например Ge, Se), осуществляемая перемещением свободных электронов на вакантные места.

Примесная проводимость — проводимость полупроводников, содержащих некоторое количество примесей.

Преимущественно дырочная, или электронная, проводимость у полупроводников сохраняется лишь при температурах ниже той, при которой начинает играть существенную роль собственная проводимость полупроводника.

Электрический ток в вакууме

Полный вакуум — идеальный изолятор.

Электрический ток в вакууме — направленный поток электронов между двумя электродами (от катода к аноду). Наличие электронов обусловлено электронной эмиссией с поверхности электрода.

Электронную эмиссию обуславливают несколько факторов:

- ☐ бомбардировка катода положительными ионами (*ионно-электронная эмиссия*);
- ☐ испускание электронов с поверхности достаточно нагретого металлического катода (*термоэлектронная эмиссия*);

- ☐ воздействие на поверхность металла электромагнитного излучения (*фотоэлектронная эмиссия*);
- ☐ бомбардировка металла быстрыми электронами (*вторичная электронная эмиссия*).

Магнитостатика

Магнитное взаимодействие.

Вектор магнитной индукции и сила Ампера

Магнитное поле создается током или движущимся относительно наблюдателя зарядом и действует только на токи или движущиеся заряды. В отличие от электрического, магнитное поле замкнутое.

А. М. Ампер, исследуя взаимодействия токов, доказал, что магнитное поле воздействует на ток с определенной силой (эту силу впоследствии назвали *силой Ампера*).

Сила Ампера: $F_A = IlB \sin \alpha$, где α — угол между направлением вектора магнитной индукции $\vec{B}$ и направлением тока (рис. 39).

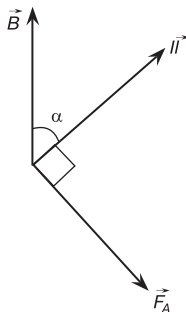


Рис. 39. Сила Ампера

При угле α , равном 90° , сила Ампера достигает максимального значения: $F_{A, \max} = IB$.

Индукция магнитного поля — характеристика магнитного поля: $B = \frac{F_{A, \max}}{Il}$. Единица измерения в СИ — 1 Тл (тесла):

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

Каждую точку пространства, в которой имеется магнитное поле, можно характеризовать векторной физической величиной B . Данная величина показывает, с какой силой данное магнитное поле действует на проводник единичной длины, по которому течет единичный ток.

Графическое изображение магнитного поля

Магнитное поле оказывает не только силовое воздействие на проводник с током, но и ориентирующие действие относительно силовых линий магнитного поля.

Линии магнитной индукции (магнитные силовые линии) — воображаемые линии, касательные к которым в любой точке поля совпадают с направлением магнитной силы (вектора магнитной индукции) в данной точке. С помощью железных опилок можно увидеть, как выглядит магнитное поле прямого, кругового тока и катушки.

Линии магнитной индукции *всегда замкнуты*. Поля с замкнутыми силовыми линиями называют *вихревыми*. Силовые линии магнитного поля «выходят» из северного магнитного полюса и «входят» в южный.

Для облегчения изображения линий магнитной индукции используют летящую стрелу. Если смотреть на летящую стрелу,

мы будем видеть острие стрелы (точку); если на улетающую от нас стрелу — ее оперение (крестик) (рис. 40).

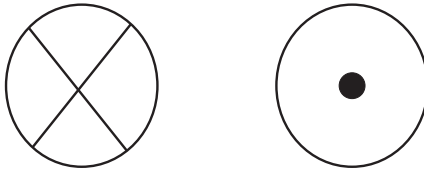


Рис. 40. Линии магнитной индукции

Для образного описания магнитного поля были введены два правила: *правило буравчика* (правило правого винта) и *правило левой руки*.

Правило буравчика определяет направление силовых линий магнитного поля: если направить «штопор буравчика» по току, то вращение рукоятки укажет направление силовых линий магнитного поля.

Для лучшего представления можно использовать письменную ручку (ее вращающийся колпачок): когда мы закручиваем колпачок, линии индукции направлены от нас, когда откручиваем — на нас.

Правило левой руки введено для определения направления силы Ампера: если левую руку расположить так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в ладонь, а четыре пальца направить по направлению тока, то отставленный на 90° большой палец укажет направление силы Ампера.

Закон Био — Савара — Лапласа

В 1820 году французские физики Жан Батист Био и Феликс Савар провели исследования магнитных полей токов различной

формы. Французский математик Пьер Лаплас обобщил эти исследования. Он проанализировал экспериментальные данные и сделал вывод, что магнитное поле любого тока может быть вычислено как векторная сумма (суперпозиция) полей, создаваемых отдельными элементарными участками тока.

Закон Био – Савара – Лапласа: $dB = \frac{\mu_0 I dl \sin \alpha}{4\pi r^2}$, где r – расстояние

от участка тока до рассматриваемой точки поля (рис. 41) α – угол между током и направлением в данную точку $\vec{r}$, μ_0 – магнитная постоянная.

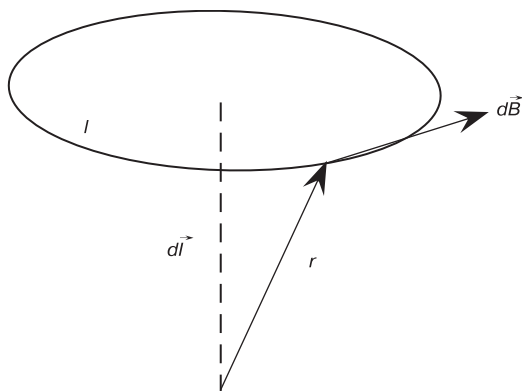


Рис. 41. Закон Био – Савара – Лапласа

Магнитная индукция прямолинейного бесконечно длинного проводника с током I на расстоянии r : $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$.

Магнитная индукция в центре витка с током радиуса R : $B = \frac{\mu_0 I}{2R}$.

Магнитная индукция на оси бесконечно длинного соленоида с током I : $B = \mu_0 n I$, где n — число витков, приходящихся на единицу длины соленоида.

Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в магнитном поле

Сила Лоренца ($\vec{F}_L$) — сила, действующая на движущуюся заряженную частицу: $\vec{F}_L = q[\vec{v} \vec{B}]$.

Модуль силы Лоренца: $F_L = qvB \sin \alpha$, где α — угол между векторами скорости $\vec{v}$ и индукции $\vec{B}$, q — модуль заряда частицы.

Сила Лоренца перпендикулярна скорости частицы и поэтому не совершает работы. Так же, как и направление силы Ампера, направление силы Лоренца определяют правилом буравчика. Для отрицательно заряженной частицы направление силы Лоренца противоположно.

Движение заряженной частицы в магнитном поле с постоянной по модулю скоростью по окружности радиуса R : $R = \frac{mv}{qB}$.

Период обращения частицы: $T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$.

Магнитное поле в веществе

Магнитная проницаемость — физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в однородной среде отличается по модулю от индукции магнитного поля в вакууме.

Магнетики — вещества, у которых магнитная проницаемость не равна единице.

Слабромагнитные вещества делятся на две большие группы: *парамагнетики* (алюминий, платина, азот, кислород, вольфрам) и *диамагнетики* (медь, цинк, стекло, инертные газы, водород). У парамагнетиков магнитная проницаемость больше единицы, у диамагнетиков — меньше единицы. При внесении во внешнее магнитное поле парамагнитные вещества намагничиваются так, что их собственное магнитное поле оказывается направленным по внешнему полю, а диамагнитные вещества намагничиваются против внешнего поля

Ферромагнетики — вещества, способные сильно намагничиваться в магнитном поле (железо, никель).

Правильное расположение магнетиков (в порядке увеличения магнитной проницаемости) легко можно запомнить, расставив их в алфавитной последовательности: диамагнетики — парамагнетики — ферромагнетики.

Температура (точка) Кюри — определенная температура, выше которой ферромагнитные свойства исчезают, и вещество становится парамагнетиком.

Электромагнитная индукция

Явление электромагнитной индукции.

Магнитный поток

Электромагнитная индукция — явление возникновения электрического тока в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, проходящего через него (открыто М. Фарадеем в 1831 году).

Магнитный поток Φ через плоскую площадку S , помещенную в однородное магнитное поле: $\Phi = BS \cos \alpha = B_n S$, где B — модуль вектора магнитной индукции, α — угол между вектором индукции

$\vec{B}$ и вектором нормали $\vec{n}$ к площади S . Магнитный поток пропорционален числу линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность S . Единица измерения магнитного потока — 1 Вб (вебер): $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$.

Закон электромагнитной индукции

ЭДС индукции возникает в контуре только тогда, когда поток вектора индукции магнитного поля, пронизывающий контур, меняется с течением времени.

Величина ЭДС индукции зависит от скорости изменения магнитного потока, пронизывающего контур: $\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Правило Ленца (определяет направление индукционного тока).

Индукционный ток, возникающий в замкнутом контуре при изменении внешнего магнитного поля, всегда направлен так, что создаваемое им собственное магнитное поле препятствует изменению внешнего магнитного поля (рис. 42).

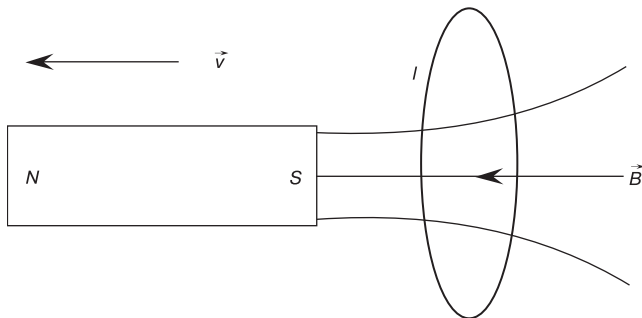


Рис. 42. Схематическое изображение правила Ленца

Если контур состоит из N последовательно соединенных витков (катушка), то ЭДС индукции в контуре равна: $\varepsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Индукционный ток в замкнутом контуре сопротивлением R при изменении магнитного потока на $\Delta\Phi$ за время Δt : $I = -\frac{\Delta\Phi}{R\Delta t}$.

Самоиндукция. Индуктивность. Энергия магнитного поля

Самоиндукция — явление возникновения ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении тока, протекающего через контур. При изменении тока в контуре меняется магнитный поток через поверхность, ограниченную этим контуром, изменение потока магнитной индукции приводит к возбуждению ЭДС самоиндукции. Направление ЭДС оказывается таким, что при увеличении тока в цепи ЭДС препятствует возрастанию тока, а при уменьшении тока — убыванию. ЭДС самоиндукции определяется формулой: $\varepsilon_c = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.

Индуктивность. Электрический ток в контуре создает вокруг него магнитное поле, что приводит к появлению магнитного потока собственного магнитного поля, пронизывающего поверхность, ограниченную контуром: $\Phi_c = LI$. Магнитный поток в катушке пропорционален силе тока, а величина L — *индуктивность* — постоянна для данной катушки. Единица измерения индуктивности в СИ — 1 Гн (генри): 1 Гн = 1 Вт/А. Индуктивность катушки определяется ее параметрами (длина и число витков) и магнитной проницаемостью окружающей среды.

Индуктивность соленоида: $L = \mu_0 n S l$, где n — число витков на единицу длины, $n = N/l$, где N — число витков соленоида длиной l .

Энергия магнитного поля, создаваемого током I в проводнике с индукцией L : $W = \frac{LI^2}{2}$.

Взаимная индукция.

Трансформатор

Взаимоиндукция (взаимная индукция) — возникновение электродвижущей силы (ЭДС) в одном проводнике вследствие изменения силы тока в другом проводнике или вследствие изменения взаимного расположения проводников.

При изменении тока в одном из проводников или при изменении взаимного расположения проводников происходит изменение магнитного потока, созданного током первого проводника и проходящего через контур второго, что по закону электромагнитной индукции вызывает возникновение ЭДС во втором проводнике. Если второй проводник замкнут, то под действием ЭДС взаимной индукции в нем образуется индуцированный ток. И наоборот: изменение тока во второй цепи вызовет появление ЭДС в первой.

Явление взаимной индукции широко используется для передачи энергии из одной электрической цепи в другую, для преобразования напряжения с помощью трансформатора.

Трансформатор — электрический аппарат, имеющий две или более индуктивно связанные обмотки и предназначенный для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

Коэффициент трансформации трансформатора — величина, выражающая масштабирующую (преобразовательную) характеристику трансформатора относительно какого-либо параметра электрической цепи (напряжения, тока, сопротивления):

$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$, где k — коэффициент трансформации. Если $k > 1$, то трансформатор понижает напряжение, если $k < 1$ — повышает.

Электромагнитные колебания и волны

Электромагнитные колебания в колебательном контуре

Электромагнитные колебания — периодическое изменение заряда q , силы тока I и напряжения U , сопровождающиеся взаимными превращениями энергии электрического и магнитного полей.

Колебательный контур — замкнутая цепь, состоящая из катушки индуктивности L и конденсатора ёмкостью C .

Идеальный колебательный контур — контур, состоящий только из катушки индуктивности L и конденсатора ёмкостью C (рис. 43).

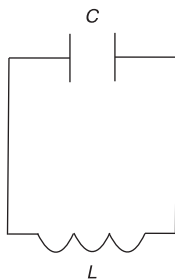


Рис. 43. Идеальный колебательный контур

Период собственных колебаний определяется по формуле Томсона: $T = 2\pi\sqrt{LC}$.

Уравнение гармонических колебаний заряда: $q = q_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right)$,

где q_m — амплитуда заряда, $\varphi = \left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right)$ — фаза колебаний,

φ_0 — начальная фаза колебаний.

Уравнение гармонических колебаний силы тока:

$I = I_m \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right)$, где $I_m = \omega_0 q_m$ — амплитуда силы тока.

Начальные условия колебаний при $t = 0$:

☐ $q_0 = q_m \sin\varphi_0$ — заряд конденсатора в начальный момент времени $t = t_0 = 0$;

☐ $I_0 = \omega_0 q_m \cos\varphi_0$ — сила тока в катушке в начальный момент времени $t = t_0 = 0$.

Полная энергия колебаний W в произвольный момент времени:

$$W = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2}.$$

Максимальная энергия электрического поля конденсатора:

$$W_3 = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{CU_m^2}{2}.$$

Максимальная энергия магнитного поля катушки: $W_{\max} = \frac{LI_m^2}{2}$.

Переменный ток

Переменный ток — вынужденные колебания свободно заряженных частиц в проводнике.

Колебания напряжения: $u = U_m \sin\omega t$; колебания силы тока:

$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_0)$, где U_m и I_m — амплитудные значения напряжения и силы тока, u и i — их мгновенные значения,

а φ_0 — разность фаз между колебаниями силы тока и напряжения.

Колебания силы тока в контуре опережают колебания заряда по фазе на $\pi/2$. Колебания заряда и напряжения происходят синфазно.

Мгновенное значение мощности: $p = i^2 R$.

Действующее значение силы переменного тока: $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$.

Действующее значение напряжения: $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$.

Амплитуда силы тока: $I_m = CU_m \omega = \frac{U_m}{X_C}$, где $X_C = \frac{1}{\omega C}$ — емкостное сопротивление.

Амплитуда силы тока в катушке: $I_m = \frac{U_m}{X_L}$, где $X_L = \omega L$ —

индуктивное сопротивление.

Полное сопротивление (импеданс): $Z = \frac{U_0}{I_0} = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$,

где $X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ — реактивное сопротивление (*реактанс цепи*).

Резонанс в колебательном контуре — явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний силы тока при совпадении частоты внешнего переменного напряжения ω с собственной частотой колебательного контура ω_0 : $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Электромагнитные волны

Электромагнитная волна — процесс распространения колебаний переменного электромагнитного поля в пространстве. Максвелл утверждал, что электромагнитная волна распространяется с конечной скоростью.

Электромагнитная волна *поперечная*, поскольку взаимно перпендикулярные векторы напряженности электрического поля

$\vec{E}$ и магнитной индукции $\vec{B}$ совершают колебания в плоскости, которая расположена перпендикулярно направлению распространения волны.

Частота волн, излучаемых электромагнитным вибратором Герца:

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \text{ где } L - \text{индуктивность, } C - \text{емкость}$$

открытого колебательного контура.

Скорость электромагнитной волны в вакууме: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с (равна скорости света). Длина электромагнитной волны в вакууме: $\lambda = \frac{c}{\nu}$.

Скорость электромагнитной волны в среде: $v = \frac{c}{n}$, где n —

абсолютный показатель преломления среды. Длина

электромагнитной волны в среде: $\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{c}{n\nu}$.

Оптика

Волновая оптика

Определение понятия

Волновая оптика — раздел физики, изучающий закономерности распространения света и процессы взаимодействия света с веществом. Основана на электромагнитной теории света, согласно которой свет — электромагнитная волна.

Световые волны лежат в достаточно узком диапазоне с длиной волны от 400 (фиолетовый свет) до 700 нм (красный свет). Данный диапазон получил название видимого света, поскольку человеческий глаз воспринимает лишь этот диапазон.

Скорость света в среде с диэлектрической проницаемостью ϵ

и магнитной проницаемостью μ :
$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu}}.$$

Скорость света в вакууме:
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}.$$

Волновая оптика исследует такие волновые явления, как дисперсия, интерференция, дифракция и поляризация света.

Дисперсия света

Спектр — полоса, состоящая из различных цветов, которые получаются в результате прохождения света от источника через призму.

Дисперсия света — явление разложения белого сложного цвета в спектр; зависимость абсолютного показателя преломления вещества от длины волны падающего света (рис. 44). Примеры дисперсии: радуга, маслянистые капли на асфальте.

Скорость света и длина волны при переходе из вакуума в среду уменьшаются, а частота колебаний всегда остается постоянной.

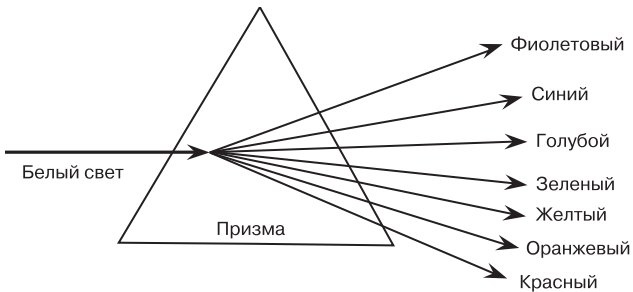


Рис. 44. Дисперсия света

В вакууме дисперсия света не происходит, поскольку все световые волны распространяются с одинаковой скоростью.

Интерференция света

Интерференция света — явление наложения друг на друга двух или нескольких волн, при котором в пространстве образуется устойчивая, неизменяющаяся со временем картина распределения амплитуды результирующих колебаний (чередуются их минимумы и максимумы) в различных точках пространства (рис. 45).

Для возникновения интерференции необходимо, чтобы налагающиеся волны имели одинаковую частоту и неизменный сдвиг фаз колебаний в каждой точке пространства. Такие волны называются *когерентными*. Они создаются когерентными источниками волн, которые колеблются с одинаковой частотой и постоянным сдвигом фаз.

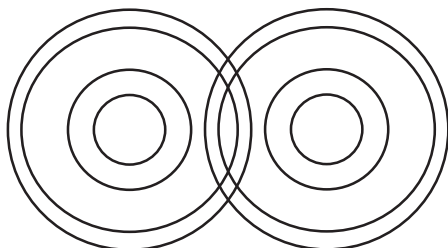


Рис. 45. Интерференция

Разность фаз $\Delta\varphi$ с оптической разностью хода $\Delta L = L_2 - L_1$ связана

формулой: $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L$, где λ — длина волны света, $L = ns$ —

оптическая длина пути (n — абсолютный показатель преломления среды, s — геометрическая длина пути световой волны в среде; путь, который она прошла).

Условие интерференционных максимумов: $\Delta L = 2m \frac{\lambda}{2}$,

$m = 0, 1, 2, \dots$

Условие интерференционных минимумов: $\Delta L = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$,

$m = 0, 1, 2, \dots$

В результате интерференции волн происходит перераспределение энергии волнового движения в пространстве. В точках максимума происходит концентрация энергии за счет того, что в точке минимума энергия не поступает.

Дифракция света

Дифракция света — отклонение волн от прямолинейного распространения или отгибание волнами препятствий. Открыта Ф. Гримальди (рис. 46).

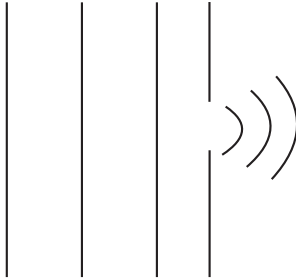


Рис. 46. Дифракция света

Явление дифракции объясняется с помощью принципа Гюйгенса и принципа Гюйгенса — Френеля.

Волновая поверхность — геометрическое место точек, имеющих одинаковую фазу колебаний.

Волновой фронт — поверхность, отделяющая часть среды, охваченную колебательным процессом, от той, что не охвачена колебаниями.

Принцип Гюйгенса. Каждая точка фронта волны, до которой доходит волна, служит источником вторичных волн, а огибающая этих вторичных волн представляет собой волновую поверхность в следующий момент времени.

Принцип Гюйгенса — Френеля. Любая точка поверхности волнового фронта является источником вторичных волн, а световые колебания в какой-либо точке находятся сложением колебаний, создаваемых приходящими в эту точку вторичными волнами, с учетом их амплитуды и фазы.

Дифракционная решетка — оптический прибор, работающий по принципу дифракции света; представляет собой совокупность

большого числа регулярно расположенных штрихов (щелей, выступов), нанесенных на некоторую поверхность.

Дифракционная картина — ряд цветных полос, разделенных темными промежутками.

Постоянная (период) дифракционной решетки: $d = a + b$, где a — ширина каждой щели, b — ширина непрозрачных промежутков. Чаще всего периодом дифракционной решетки называется количество штрихов на 1 мм.

Уменьшение периода решетки приводит к увеличению углового расстояния между максимумами различных длин волн, и тогда с помощью такой дифракционной решетки можно более четко разделить длины волн, то есть качество решетки становится выше, а максимумы — резче.

Условие максимумов: $d \sin \varphi = m\lambda$, где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ — целое число, называемое порядком спектра, λ — длина волны падающего света, φ — угол дифракции (угол отклонения световых лучей от перпендикуляра к плоскости решетки).

Поляризация света

Естественный свет — свет, амплитуда колебаний которого по всем плоскостям одинакова.

Поляризация света — явление направленного колебания векторов напряженности электрического поля E или напряженности магнитного поля H для электромагнитных волн.

Плоскополяризованный свет — свет, в котором вектор $\vec{E}$ колеблется лишь в одном направлении, перпендикулярно лучу. Световые волны, испускаемые обычными источниками света (например Солнцем, лампой накаливания), неполяризованы. Поляризованный свет могут испускать некоторые когерентные источники (например лазеры).

Поляризаторы — оптические устройства, предназначенные для получения поляризованного света.

Анализатор — оптическое устройство, предназначенное для распознавания света (естественного или поляризованного).

Устройства поляризатор и анализатор одинаковы. Вместе эти устройства называются *поляроидами*. Если поляроид стоит перед источником естественного света, то он поляризатор, если же поляроид уже стоит после поляризованного света, то он анализатор (рис. 47).

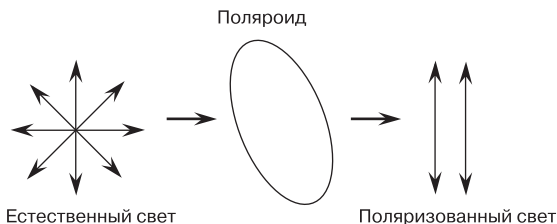


Рис. 47. Поляризация света

После прохождения естественного света через поляризатор свет становится линейно-поляризованным вдоль оси поляризатора. Если на пути поляризованного света расположить второй поляризатор и если оси поляризаторов перпендикулярны, то свет на экран не проходит.

Геометрическая оптика

Основные понятия. Законы геометрической оптики

Геометрическая оптика — раздел оптики, изучающий законы распространения света в прозрачных средах и принципы

построения изображений при прохождении света в оптических системах без учета его волновых свойств.

Световой луч — линия, вдоль которой распространяется световая энергия, или линия, проведенная перпендикулярно волновому фронту и показывающая направление распространения волнового возмущения. Световой луч берет начало на источнике света.

В геометрической оптике существует четыре основных закона, описывающих распространение света.

Закон прямолинейного распространения света. Луч света в однородной среде распространяется прямолинейно.

Закон независимого распространения света. Световые лучи, встречаясь, не оказывают влияние на дальнейшее распространение друг друга. На границе раздела двух однородных прозрачных сред, на которую падает луч *a* (его называют *падающим*), наблюдается отражение и преломление света. Луч *b* называют *отраженным*, а луч *c* — *преломленным*.

Закон отражения света. Луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения луча к границе раздела двух сред, лежат в одной плоскости. Угол падения равен углу отражения: $\alpha = \gamma$.

Закон преломления света. Луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения луча к границе раздела двух сред, лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления β есть величина постоянная для данных двух сред и называется относительным показателем преломления первой среды относительно второй:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1}, \text{ где } n_1 \text{ и } n_2 \text{ — абсолютные показатели}$$

преломления первой и второй сред; $n_{2,1}$ — относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

Абсолютный показатель преломления равен отношению скорости света c в вакууме к скорости света v в какой-либо среде: $n = \frac{c}{v}$.

Оптически более плотная среда — среда, у которой больший показатель преломления.

Оптически менее плотная среда — среда, у которой меньший показатель преломления.

При прохождении света из оптически менее плотной среды в более плотную (например, из воздуха в стекло или воду) $v_1 > v_2$ и $n_2 > n_1$, поэтому $\alpha > \beta$ (рис. 48).

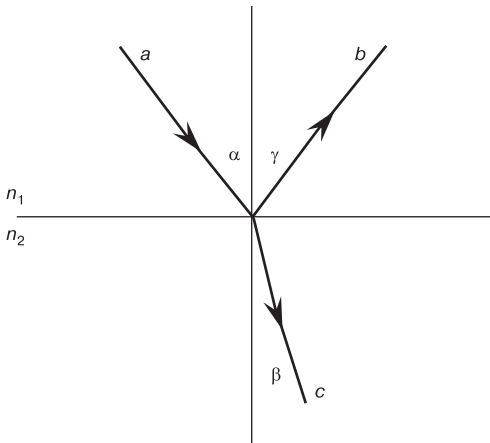


Рис. 48. Преломление света

Если направить луч света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, то $v_2 > v_1$ и $n_1 > n_2$, поэтому $\alpha < \beta$ (рис. 49).

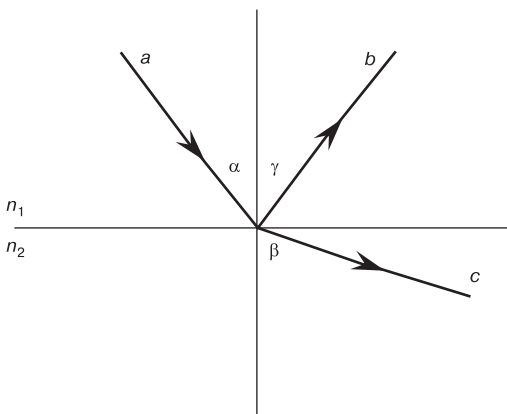


Рис. 49. Преломление света

Отражение света — явление изменения направления хода светового луча, наблюдаемое на границе двух сред. При этом луч света возвращается в исходную среду.

Предельный угол полного отражения — угол падения α_0 , соответствующий наибольшему возможному углу преломления $\beta = 90^\circ$: $\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$.

Полное отражение света — явление, при котором $\alpha > \alpha_0$; преломление света невозможно, то есть луч полностью отражается.

Изображение в плоском зеркале

Изображение предмета в плоском зеркале — мнимое, прямое, равное по размерам предмету; находится за зеркалом на таком же расстоянии, на каком предмет расположен перед зеркалом.

Тонкая линза

Линза — прозрачное для света тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями. Линзы, у которых средняя часть шире по сравнению с краями, — *собирающие*, все остальные — *рассеивающие*. Собирающая линза имеет действительные фокусы, рассеивающая — мнимые.

Тонкая линза — линза, толщина которой мала по сравнению с радиусами кривизны ее поверхностей и расстоянием предмета от линзы.

Главная оптическая ось линзы — прямая O_1O_2 , проходящая через центры кривизны сферических поверхностей, образовавших линзу, и через оптический центр O (рис. 50).

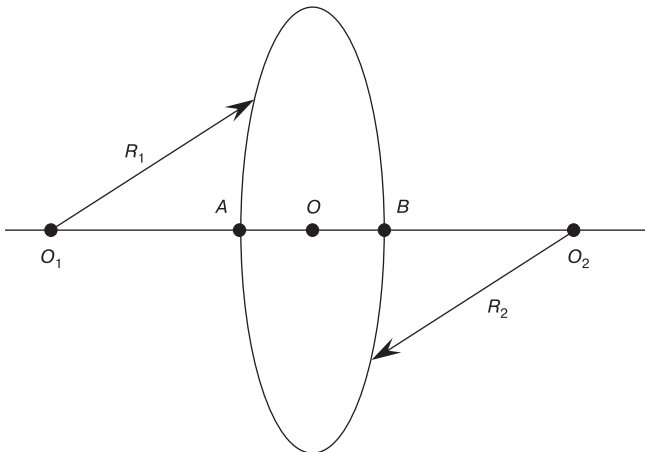


Рис. 50. Линза

По форме поверхностей, образующих линзу, линзы бывают: *выпуклые* (плосковыпуклые, двояковыпуклые и вогнуто-выпуклые) и *вогнутые* (плосковогнутые, двояковогнутые и выпукло-вогнутые).

Свойства луча, проходящего через линзу:

- ☐ любой луч, проходящий через оптический центр линзы, проходит через линзу, не меняя направление распространения;
- ☐ пучок лучей, параллельных главной оптической оси, падающий на собирающую линзу, после прохождения линзы собирается в точке F на главной оптической оси, называемой фокусом линзы (рис. 51).

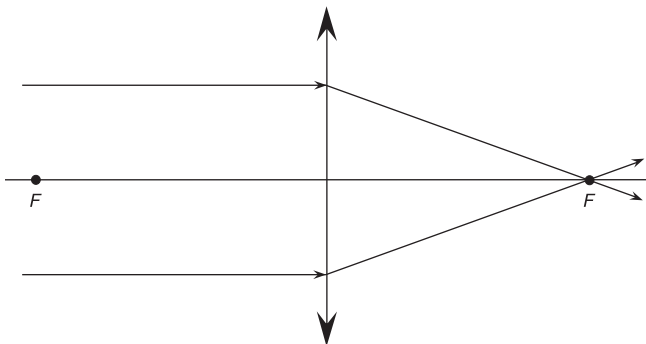


Рис. 51. Плоскость линзы

Двойной фокус — расстояние, вдвое большее фокусного.

Фокальная плоскость линзы — плоскость, проведенная через главный фокус перпендикулярно главной оптической оси линзы.

Построение изображения в линзе

Для построения изображения точки в линзе достаточно построить два любых луча, выходящих из этой точки.

Изображением точки S в линзе будет точка пересечения всех преломленных лучей или их продолжений. В собирающей линзе изображение будет *действительным*, в рассеивающей — *мнимым*.

При таких построениях изображают главную оптическую ось, указывая на ней фокусные расстояния F (расстояния от главных фокусов или от фокальных плоскостей до оптического центра линзы) и двойные фокусные расстояния (для собирающих линз). Затем ищут точку пересечения преломленных лучей (или их продолжений).

Обычно вызывает затруднение построение изображения точки, расположенной на главной оптической оси. Для такого построения нужно взять любой луч, который будет параллелен какой-то побочной оптической оси. После двойного преломления он пройдет через побочный фокус, который лежит в точке пересечения этой побочной оси и фокальной плоскости.

В качестве второго луча удобно использовать луч, идущий без преломления вдоль главной оптической оси (рис. 52).

Формула тонкой линзы: $\pm \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \pm \frac{1}{F}$, где d — расстояние от предмета до линзы, f — расстояние от линзы до изображения, F — фокусное расстояние линзы.

При решении задач с использованием формулы тонкой линзы необходимо придерживаться *правила знаков*:

$+f$ (если изображение действительное);

$-f$ (если изображение мнимое);

$+d$ (если на линзу падает расходящийся пучок лучей);

- d (если на линзу падает сходящийся пучок лучей);
- + F (для собирающей линзы);
- F (для рассеивающей линзы).

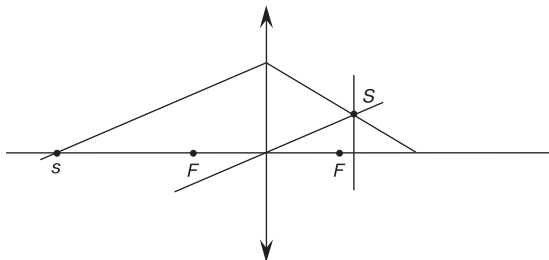


Рис. 52. Построение изображения точки

Действительное изображение — изображение, которое можно получить на экране.

Оптическая сила линзы — величина, обратная фокусному расстоянию: $D = \frac{1}{F}$. Измеряется в *диоптриях* (дптр).

Диоптрия — единица, деленная на *метр*.

Линейное увеличение — отношение линейного размера изображения H к линейному размеру предмета h : $\Gamma = \frac{H}{h}$.

Линейное увеличение можно рассчитать по формуле: $\Gamma = \frac{f}{d}$.

Чтобы построить изображение предмета, достаточно построить изображение его начала и конца.

При построении изображения, даваемого *собирающей линзой*, возможны следующие варианты.

- Предмет находится на расстоянии за двойным фокусом от собирающей линзы: изображение действительное, перевернутое, уменьшенное; формируется в области между фокусом и двойным фокусом (рис. 53).

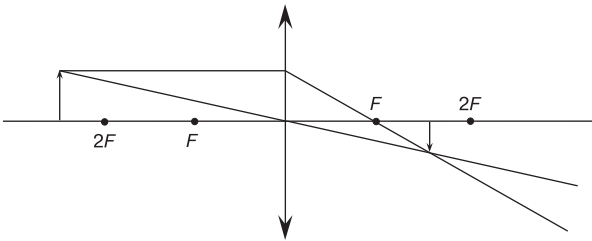


Рис. 53. Изображение, даваемое собирающей линзой

- Предмет находится на расстоянии между фокусом и двойным фокусом от собирающей линзы: изображение действительное, перевернутое, увеличенное; формируется в области за двойным фокусом (рис. 54).

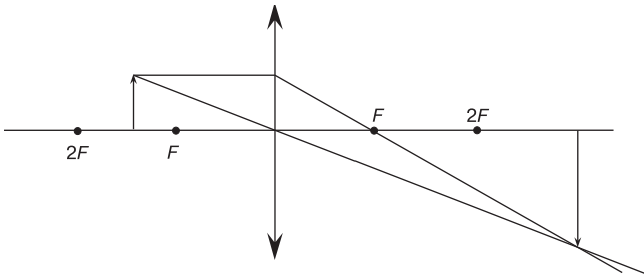


Рис. 54. Изображение, даваемое собирающей линзой

- Предмет находится на расстоянии меньше фокусного от собирающей линзы: изображение прямое, мнимое, увеличенное; формируется в той же области, что и сам предмет — за фокусом линзы (рис. 55).

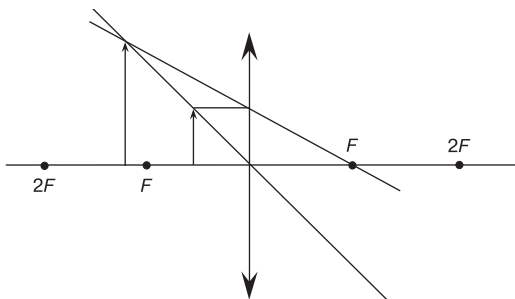


Рис. 55. Изображение, даваемое собирающей линзой

- Предмет находится на расстоянии двойного фокуса от собирающей линзы: изображение действительное, перевернутое, равное по размеру самому предмету; формируется в области двойного фокуса (рис. 56).

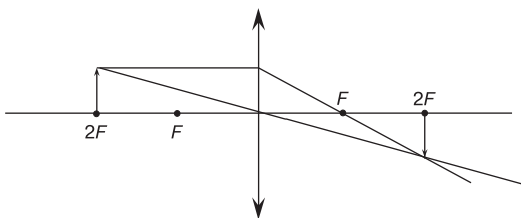


Рис. 56. Изображение, даваемое собирающей линзой

При построении изображение, даваемое *рассеивающей линзой*, *всегда* прямое, мнимое, уменьшенное; находится по ту же сторону от линзы, что и предмет, при любом расстоянии (рис. 57).

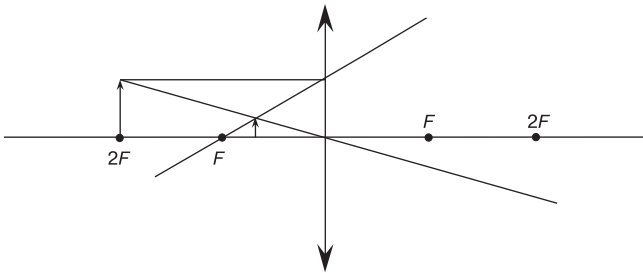


Рис. 57. Изображение, даваемое рассеивающей линзой

Элементы специальной теории относительности

Постулаты Эйнштейна составляют фундамент специальной теории относительности.

Первый постулат Эйнштейна (принцип инвариантности скорости света). Скорость света в вакууме не зависит ни от скорости источника света, ни от скорости приемника. Она одинакова во всех направлениях, во всех инерциальных системах отсчета и является предельной скоростью в природе. Эта предельная скорость равна $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Второй постулат Эйнштейна (принцип относительности). В любых инерциальных системах отсчета все физические явления (механические, электрические, оптические), проведенные внутри данной инерциальной системы отсчета, при одних и тех же условиях должны протекать одинаково. Они (явления) не дают возможности обнаружить, покоится эта система или движется равномерно и прямолинейно, или по-другому: все процессы природы протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета (то есть физические законы должны быть инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчета к другой).

Преобразования Лоренца. При переходе из одной инерциальной системы отсчета K в другую инерциальную систему отсчета K' , движущуюся относительно первой вдоль оси Ox со скоростью v , значения координат и времени преобразуются по следующим законам механики:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{xv}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

При скоростях, которые значительно меньше скорости света $v \ll c$, преобразования Лоренца переходят в классические преобразования Галилея: $x' = x - vt$, $y' = y$, $z' = z$, $t' = t$.

Лоренцево сокращение. Длина стержня l , измеренная в системе отсчета, относительно которой он движется, меньше длины l_0 , измеренной в системе, относительно которой стержень покоится: $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, где l_0 — собственная длина стержня относительно системы. Сокращение длины происходит лишь в направлении движения.

Замедление времени. Время τ_0 (*собственное время*) отсчитанное по часам, движущимся вместе с телом, всегда меньше, чем время τ , отсчитанное по часам, движущимся относительно тела:

$$\tau = \tau_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Релятивистская масса тела: $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, где v — скорость тела

по отношению к определенной системе отсчета, m_0 — масса покоя, то есть значение массы в системе координат, по отношению к которой тело покоится.

Релятивистский импульс: $\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m \vec{v}$.

Соотношение между массой и энергией. Энергия тела равна

энергии покоя: $E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = mc^2$. Энергия покоя: $E_0 = m_0 c^2$.

Релятивистское соотношение между энергией и импульсом:

$$E = c \sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}.$$

Квантовая физика

Световые кванты

Корпускулярно-волновой дуализм (двойственность) света — особенность светового излучения, которое одновременно обладает свойствами непрерывных электромагнитных волн и свойствами дискретных фотонов (*корпускул*).

Свет можно трактовать как поток корпускул (*фотонов*), которые во многих физических эффектах проявляют свойства электромагнитных волн. Свет демонстрирует свойства волны в явлениях дифракции и интерференции при масштабах, сравнимых с длиной световой волны. Например, даже одиночные фотоны, проходящие через двойную щель, создают на экране интерференционную картину.

Корпускулярные свойства света проявляются при фотоэффекте и в *эффекте Комптона*. Фотон ведет себя и как частица, которая излучается или поглощается целиком объектами, размеры которых много меньше его длины волны (например, атомными ядрами) или вообще могут считаться точечными (например, электрон).

Гипотеза Планка. При тепловом излучении энергия испускается и поглощается не непрерывно, а отдельными квантами (порциями).

Фотон — элементарная частица, квант электромагнитного излучения (в узком смысле — света). Это безмассовая частица, способная существовать, двигаясь лишь со скоростью света. Электрический заряд фотона равен нулю.

Энергия фотона: $E = h\nu$, где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж $\cdot$ с (*постоянная Планка*), ν — частота излучения.

Энергия электромагнитного излучения W через общее число фотонов: $W = nE$, где n — общее число фотонов.

Релятивистская масса фотона: $m = \frac{h\nu}{c^2}$.

Импульс фотона, движущегося со скоростью c : $p = mc = \frac{h\nu}{c}$.

Соотношение, связывающее импульс фотона с длиной волны λ :

$$p = \frac{h}{\lambda}.$$

Фотоэффект

Фотоэффект — явление испускания веществом электронов под действием света. Открыт Г. Герцем, исследован А. Столетовым.

Существует несколько типов фотоэффекта.

- ☐ *Внешний (фотоэлектронная эмиссия)* — испускание электронов веществом под действием электромагнитных излучений. Электроны, вылетающие из вещества при внешнем фотоэффекте — *фотоэлектроны*; электрический ток, образуемый ими при упорядоченном движении во внешнем электрическом поле, — *фототок*.
- ☐ *Внутренний* — перераспределение электронов по энергетическим состояниям в твердых и жидких полупроводниках и диэлектриках, происходящее под действием излучений. Проявляется в изменении концентрации носителей зарядов в среде и приводит к возникновению фотопроводимости или вентильного фотоэффекта.
- ☐ *Вентильный (фотоэффект в запирающем слое)* — явление, при котором фотоэлектроны покидают пределы тела, переходя через поверхность раздела в другое твердое тело (полупроводник) или жидкость (электролит).

Законы внешнего фотоэффекта (законы Столетова).

- *I закон:* максимальная скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего излучения, а зависит лишь от его частоты.
- *II закон:* сила фототока насыщения прямо пропорциональна интенсивности падающего излучения, но не зависит от частоты излучения.
- *III закон:* для каждого металла существует предельная наименьшая частота света (или наибольшая длина волны), при которой фотоэффект еще наблюдается. Эту частоту называют красной границей фотоэффекта $\nu_{\min}$.

Красная граница фотоэффекта: $\nu_{\min} = \frac{A}{h}$, $\lambda_{\max} = \frac{c}{\nu_{\min}} = \frac{hc}{A}$.

Вольт-амперная характеристика фотоэффекта — зависимость силы тока I , образованного потоком электронов, испускаемых под действием света, от подаваемого напряжения U между электродами (рис. 58).

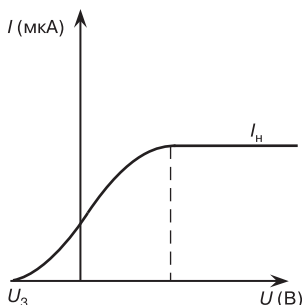


Рис. 58. Вольт-амперная характеристика фотоэффекта

Фототок насыщения определяется таким значением напряжения, при котором все ежесекундно вырываемые электроны достигают анода.

Задерживающее (запирающее) напряжение определяется величиной максимальной скорости фотоэлектронов, которую могут иметь вырванные светом электроны: $U_3 = \frac{mv^2}{2e}$. При $U = U_3$ электрическое поле тормозит вырванные электроны до их полной остановки, а затем возвращает их анод.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Часть энергии расходуется на то, чтобы вырвать электрон из металла, то есть на работу выхода A , а оставшаяся часть энергии сообщается электрону в качестве кинетической энергии: $h\nu = A + \frac{mv_0^2}{2}$.

Атомная физика

Основные определения

Электромагнитный спектр — спектр частот (или энергий квантов) электромагнитного излучения. Атомные спектры — линейчатые, состоят из отдельных спектральных линий, которые характеризуются определенной частотой излучения.

Спектр поглощения — зависимость интенсивности поглощенного веществом излучения (как электромагнитного, так и акустического) от частоты. Связан с энергетическими переходами в веществе.

Спектр излучения (спектр испускания) — относительная интенсивность электромагнитного излучения объекта исследования по шкале частот. Обычно изучается излучение в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазоне от сильно нагретого вещества. Спектр излучения вещества представляют либо в виде горизонтальной цветовой полосы (результат расщепления света от объекта призмой), либо в виде графика относительной интенсивности, либо в виде таблицы.

Спектральные серии водорода — набор спектральных серий, составляющих спектр атома водорода. Поскольку водород наиболее простой атом, его спектральные серии наиболее изучены. Спектральные линии, возникающие при переходах на основной энергетический уровень, называются *резонансными*, все остальные — *субординатными*.

Эмпирическая формула Бальмера описывает серии в линейчатом спектре атома водорода: $\nu = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$, где ν — частота

спектральной линии в p -спектре атома водорода, R — постоянная Ридберга ($R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$); m определяет серию ($m = 1, 2, 3, \dots$);

n определяет отдельные линии соответствующей серии ($n = m + 1, m + 2, \dots$).

Серия Лаймана: $\nu = R(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2})$, $m = 1$, $n = 2, 3, 4, \dots$.

Серия Бальмера: $\nu = R(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2})$, $m = 2$, $n = 3, 4, 5, \dots$.

Существуют также серии Пашена, Брэккета, Пфунда, Хэмпфри.

Для *гелия* существуют серии Фаулера: $\nu = R(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2})$, $m = 1$, $n = 2,$

$3, 4, \dots$ и Пикеринга: $\nu = R(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2})$, $m = 2$, $n = 3, 4, 5, \dots$.

Теория атома

Атом — мельчайшая химически неделимая частица вещества.

Планетарная модель атома Бора — Резерфорда. В 1911 году Эрнест Резерфорд, проделав ряд экспериментов, пришел к выводу, что атом представляет собой подобие планетной системы, в которой электроны движутся по орбитам вокруг расположенного в центре атома тяжелого положительно заряженного ядра (*модель атома Резерфорда*) (рис. 59).

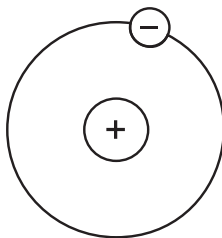


Рис. 59. Планетарная модель атома

Однако такое описание атома вошло в противоречие с классической электродинамикой. Дело в том, что согласно классической электродинамике электрон при движении с центростремительным ускорением должен излучать электромагнитные волны, а следовательно, терять энергию. Расчеты показывали, что время, за которое электрон в таком атоме упадет на ядро, совершенно ничтожно. Для объяснения стабильности атомов Нильсу Бору пришлось ввести постулаты, которые сводились к тому, что электрон в атоме, находясь в некоторых специальных энергетических состояниях, не излучает энергию (*модель атома Бора — Резерфорда*). Постулаты Бора показали, что для описания атома классическая механика неприменима. Дальнейшее изучение излучения атома привело к созданию квантовой механики, которая позволила объяснить подавляющее большинство наблюдаемых фактов.

Первый квантовый постулат Бора. Атом может находиться только в особых (так называемых стационарных) состояниях, в которых он не излучает и не поглощает энергию электромагнитных волн. Состояния характеризуются определенными дискретными значениями энергии E_n . В стационарном состоянии атома электроны движутся по стационарным орбитам, определяемым соотношением:

$$m_e v_n r_n = \frac{nh}{2\pi}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \text{ где } m_e \text{ — масса электрона, } v_n \text{ —}$$

скорость электрона по n -й орбите радиуса r_n , h — постоянная Планка. Диаграмма возможных энергетических состояний атома приведена на рисунке 60 (каждое стационарное состояние атома отмечается горизонтальной линией — *энергетическим уровнем*).

Второй квантовый постулат Бора. При переходе атома из одного стационарного состояния с энергией E_m в другое стационарное состояние с энергией E_n происходит излучение или поглощение

кванта энергии: $h\nu = E_m - E_n$, где ν — частота излучаемого (поглощаемого) света. Излучение фотона происходит при $E_m > E_n$, поглощение — при $E_m < E_n$.

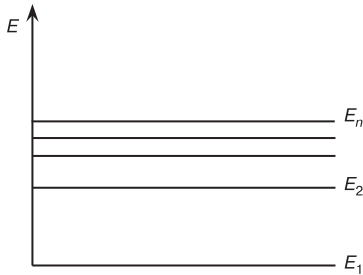


Рис. 60. Энергетические уровни атома

Боровская теория водородоподобного атома

Радиус n -й стационарной орбиты: $r_n = n^2 \frac{\varepsilon_0 h^2}{4\pi m_e e^2}$, $n = 1, 2, 3, \dots$.

Потенциальная энергия электрона в атоме водорода: $E_n = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$.

Кинетическая энергия электрона в атоме водорода:

$$E_k = \frac{m_e v^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}.$$

Полная энергия атома: $E = \frac{1}{2} \cdot \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$.

Ядерная физика

Атомное ядро

Атомное ядро — центральная часть атома, в которой сосредоточена основная его масса и структура которого определяет химический элемент, к которому относится атом.

Атомное ядро состоит из *нуклонов* — положительно заряженных *протонов* (p) и нейтральных *нейтронов* (n), которые связаны между собой при помощи сильного взаимодействия (рис. 61).

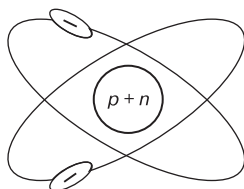


Рис. 61. Строение атомного ядра

Зарядовое число атома Z равно общему числу протонов в ядре N_p и совпадает с порядковым номером химического элемента в периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева: $Z = N_p$.

Электрический заряд ядра атома: $Q_{\text{ядра}} = eN_p = eZ$, где $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл (элементарный заряд).

Массовое число равно общему количеству нуклонов в ядре: $A = Z + N$, где N — число нейтронов в ядре.

Символ химического элемента: A_ZX .

Изотопы — ядра с одинаковым зарядовым числом Z , но разными массовыми числами A .

Изобары — ядра с одинаковым массовым числом A , но разными зарядовыми числами Z .

Изотоны — ядра с одинаковым числом нейтронов N .

Энергия связи нуклонов в ядре

Дефект масс — величина разности между массой покоя атомного ядра данного изотопа, выраженной в атомных единицах массы, и массовым числом данного изотопа. Дефект масс равен разности между суммой масс покоя нуклонов и массой ядра $m_{\text{ядра}}$:

$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_{\text{ядра}}$, где m_p , m_n — массы протона и нейтрона соответственно.

Энергия связи ядра — минимальная энергия, которую необходимо затратить для полного расщепления ядра на отдельные нуклоны:

$E_{\text{св.}} = \Delta mc^2 = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{ядра}}]c^2$. Удельная энергия связи ядра $\delta E_{\text{св.}}$ — энергия связи, приходящаяся на один нуклон: $\delta E_{\text{св.}} = \frac{E_{\text{св.}}}{A}$.

Ядерные силы

Ядерные силы — силы, прочно удерживающие протоны и нейтроны в ядре; относятся к классу сильных взаимодействий. Обуславливают устойчивость атомных ядер.

Ядерные силы:

- ☐ являются короткодействующими (проявляют себя лишь тогда, когда расстояние между частицами соизмерно с величиной самого нуклона 10^{-15} м);
- ☐ являются не центральными;
- ☐ являются обменными силами (вызываются тем, что нуклоны обмениваются между собой π -мезонами);
- ☐ обладают зарядовой независимостью (действуют между частицами независимо от наличия зарядов и их знаков);

- ☐ обладают свойствами насыщения (в ядре нуклон взаимодействует не со всеми окружающими нуклонами, а только с близлежащими).

Радиоактивность

Радиоактивность — процесс самопроизвольного превращения атомных ядер в другие ядра с испусканием различных видов радиоактивных излучений.

Три основных типа радиоактивного излучения:

- ☐ альфа-излучение (поток ядер атомов гелия);
- ☐ бета-излучение (поток быстрых электронов);
- ☐ гамма-излучение (коротковолновое электромагнитное излучение с длиной волны $\lambda < 10^{-10}$ м, называемое потоком фотонов (γ -квантов). Не отклоняется магнитным полем).

Правила смещения при радиоактивном распаде:

- ☐ сумма зарядовых чисел возникающих ядер и частиц равна зарядовому числу исходного ядра;
- ☐ сумма массовых чисел возникающих ядер и частиц равна массовому числу исходного ядра.

Закон радиоактивного распада: $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$, где N — число нераспавшихся ядер в момент времени t ; N_0 — начальное число ядер (при $t = 0$); λ — постоянная радиоактивного распада; e — основание натурального логарифма.

Период полураспада: $T_{1/2}$ — время, за которое исходное число ядер в среднем уменьшается вдвое.

Ядерные реакции

Ядерная реакция — превращение, возникающее при взаимодействии атомного ядра с другими ядрами, элементарными

частицами и гамма-квантами: $X + a \rightarrow Y + b$, где X , Y — соответственно родительские и дочерние ядра, a — бомбардирующая и b — испускаемая в ядерной реакции частицы.

Закон сохранения массового числа в ядерных реакциях. Сумма массовых чисел ядер и частиц, вступающих в реакцию, равна сумме зарядовых чисел конечных продуктов реакции.

Закон сохранения зарядового числа в ядерных реакциях. Сумма зарядовых чисел ядер и частиц, вступающих в реакцию, равна сумме массовых чисел конечных продуктов реакции.

Физика элементарных частиц

Элементарные частицы

Элементарные частицы — объекты, размеры которых значительно меньше 1 фм (ферми): $1 \text{ фм} = 10^{-13} \text{ м}$.

Первоначально элементарные частицы являлись лишь базовыми компонентами, не имеющими внутренней структуры.

Цепочка дробления вещества: молекула — атом — ядро — нуклон — кварк — лептон.

Большинство частиц живет меньше, чем 10^{-20} с , и называется *резонансами*. Спин резонанса: $S = 3/2$. Известно 12 истинно элементарных частиц, не меняющих внутреннее строение: *электрон, мюон, тауон, электронное нейтрино, мюонное нейтрино, тауонное нейтрино*.

Барионы являются адронами, состоят из трех кварков. Имеют полуцелый спин, то есть являются фермионами. Барионный заряд равен $B = 1$. Примеры барионов — *нейтрон, протон*.

Мезоны состоят из кварка и антикварка. Имеют целый спин, то есть являются бозонами. Барионный заряд $B = 0$.

Лептоны — легкие частицы с полуцелым спином. К группе лептонов относятся электроны и мюоны.

Фотоны — переносчики электромагнитного взаимодействия. Имеют целый спин $S = 1$.

Типы взаимодействия между элементарными частицами

На сегодняшний момент известно четыре типа фундаментальных взаимодействий.

- *Гравитационное взаимодействие.* Описывается общей теорией относительности. Переносчик такого взаимодействия — гравитон G . Масса покоя у него равна нулю, спин равен 2. Радиус действия — бесконечность. Константа взаимодействия равна 10^{-38} .
- *Электромагнитное взаимодействие.* Частицы-переносчики — фотоны, имеющие нулевую массу покоя и спин, равный 1. Радиус взаимодействия — бесконечность. Описывается квантовой электродинамикой (КЭД). Константа взаимодействия равна постоянной тонкой структуре $1/137$.
- *Слабое взаимодействие.* Частицы-переносчики — бозоны (W^+ , W^- , Z^0). Масса покоя бозонов — 80,91 ГэВ. Спин бозона равен 1. Радиус взаимодействия — 10^{-16} см. Описывается электрически слабой моделью (ЭСМ). Константа взаимодействия равна 10^{-6} .
- *Сильное ядерное взаимодействие.* Переносчик — глюон (8 видов). Масса покоя глюона равна нулю, спин равен 1. Радиус действия — 10^{-13} см. Описывается квантовой хромодинамикой (КХД). Константа взаимодействия примерно равна 1.

Кварки

Кварк — фундаментальная частица в стандартной модели, обладающая электрическим зарядом, кратным $e/3$. Из кварков состоят адроны, в частности протон и нейтрон. В настоящее время известно шесть разных «сортов» (чаще говорят — «ароматов») кварков.

В настоящее время известно шесть фундаментальных кварков:

- s (strange) — странный;
- u (up) — верхний;

- ☐ d (down) — нижний;
- ☐ c (charm) — очарованный;
- ☐ b (bottom) — прелестный;
- ☐ t (truth) — истинный.

Постулируется, что кварки обладают дополнительной внутренней характеристикой, называемой «цвет». Каждому кварку соответствует антикварк с противоположными квантовыми числами. Кварки участвуют во всех видах взаимодействия (слабое, сильное, электромагнитное). На сегодняшний момент существование кварков твердо установлено, но наблюдение их в свободном виде ввиду особенностей сильного взаимодействия невозможно. Например, нейтрон записывается $n = \{udd\}$, а протон $p = \{uud\}$.

Приложение

Приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц

Приставка	Обозначение	Множитель
экса	Э	10^{18}
пета	П	10^{15}
тера	Т	10^{12}
гига	Г	10^9
мега	М	10^6
кило	к	10^3
гекто	г	10^2
дека	да	10^1
атто	а	10^{-18}
фемто	ф	10^{-15}
пико	п	10^{-12}
нано	н	10^{-9}
микро	мк	10^{-6}
милли	м	10^{-3}
санти	с	10^{-2}
деци	д	10^{-1}

Фундаментальные физические константы

Величина	Значение
Атомная единица массы	$1 \text{ а. е. м.} = 1,6605655(86) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Элементарный заряд	$e = 1,6021892(46) \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Удельный заряд электрона	$e/m = -1,7588047(49) \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$



Окончание таблицы

Величина	Значение
Комптоновская длина волны электрона	$\lambda = 2,4263089(40) \cdot 10^{-12} \text{ м}$
Объем моля идеального газа при нормальных условиях ($T_0 = 273,15 \text{ К}$; $p_0 = 101325 \text{ Па}$)	$V_M = 0,02241383(70) \text{ м}^3/\text{моль}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,022045(31) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,380662(44) \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,31441(26) \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$
Постоянная Стефана — Больцмана	$\sigma = 5,67032(71) \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$
Гравитационная постоянная	$G = 6,6720(41) \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$
Ускорение свободного падения	$g = 9,80665 \text{ м/с}^2$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 12,5663706144 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,854187(7) \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Постоянная Ридберга	$R = 1,097373177(83) \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$
Первый Боровский радиус	$r_0 = 0,52917706(44) \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Скорость света в вакууме	$c = 299792458 \text{ м/с}$
Энергия покоя нейтрона	$m_n c^2 = 939,5731(27) \text{ МэВ}$
Энергия покоя протона	$m_p c^2 = 938,2796(27) \text{ МэВ}$
Энергия покоя электрона	$m_e c^2 = 0,5110034(14) \text{ МэВ}$
Энергия, соответствующая 1 а. е. м.	$931,5016(26) \text{ МэВ}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,6749543(86) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,6726485(86) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя электрона	$m_e = 0,9109534(47) \cdot 10^{-30} \text{ кг}$
Постоянная Планка	$h = 6,626176(36) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ $\hbar = 1,0545887(57) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$

Элементы периодической системы

Z*	Элемент	Символ	A**
1	Водород	H	1,01
2	Гелий	He	4,00
3	Литий	Li	6,94
4	Бериллий	Be	9,01
5	Бор	B	10,8
6	Углерод	C	12,00
7	Азот	N	14,0
8	Кислород	O	16,0
9	Фтор	F	19,0
10	Неон	Ne	20,2
11	Натрий	Na	23,0
12	Магний	Mg	24,4
13	Алюминий	Al	27,0
14	Кремний	Si	28,1
15	Фосфор	P	31,0
16	Сера	S	32,1
17	Хлор	Cl	35,5
18	Аргон	Ar	40,0
19	Калий	K	39,1
20	Кальций	Ca	40,1
21	Скандий	Sc	45,0



Продолжение таблицы

Z*	Элемент	Символ	A**
22	Титан	Ti	47,9
23	Ванадий	V	51,0
24	Хром	Cr	52,0
25	Марганец	Mn	54,9
26	Железо	Fe	55,9
27	Кобальт	Co	58,9
28	Никель	Ni	58,7
29	Медь	Cu	63,5
30	Цинк	Zn	65,4
31	Галлий	Ga	69,7
32	Германий	Ge	72,6
33	Мышьяк	As	74,9
34	Селен	Se	79,0
35	Бром	Br	79,9
36	Криптон	Kr	83,8
37	Рубидий	Rb	85,5
38	Стронций	Sr	87,6
39	Иттрий	Y	88,9
40	Цирконий	Zr	91,2
41	Ниобий	Nb	92,9
42	Молибден	Mo	96,0

Продолжение таблицы

Z*	Элемент	Символ	A**
43	Технеций	Tc	99
44	Рутений	Ru	101
45	Родий	Rh	103
46	Палладий	Pd	106
47	Серебро	Ag	108
48	Кадмий	Cd	112
49	Индий	In	115
50	Олово	Sn	119
51	Сурьма	Sb	122
52	Теллур	Te	128
53	Йод	J	127
54	Ксенон	Xe	131
55	Цезий	Cs	133
56	Барий	Ba	137
57	Лантан	La	139
58	Церий	Ce	140
59	Празеодим	Pr	141
60	Неодим	Nd	144
61	Прометий	Pm	145
62	Самарий	Sm	150
63	Европий	Eu	152



Продолжение таблицы

Z*	Элемент	Символ	A**
64	Гадолиний	Gd	157
65	Тербий	Tb	159
66	Диспрозий	Dy	163
67	Гольмий	Ho	165
68	Эрбий	Er	167
69	Тулий	Tu	169
70	Иттербий	Yb	173
71	Лютеций	Lu	175
72	Гафний	Hf	178
73	Тантал	Ta	181
74	Вольфрам	W	184
75	Рений	Re	186
76	Осмий	Os	190
77	Иридий	Ir	192
78	Платина	Pl	195
79	Золото	Au	197
80	Ртуть	Hg	201
81	Таллий	Tl	204
82	Свинец	Pb	207
83	Висмут	Bi	209
84	Полоний	Po	210

Окончание таблицы

Z*	Элемент	Символ	A**
85	Астат	At	210
86	Радон	Rn	222
87	Франций	Fr	223
88	Радий	Ra	226
89	Актиний	Ac	227
90	Торий	Th	232
91	Протактиний	Pa	231
92	Уран	U	238
93	Нептуний	Np	237
94	Плутоний	Pu	244
95	Амереций	Am	243
96	Кюрий	Cm	247
97	Берклий	Bk	249
98	Калифорний	Cf	249
99	Эйнштейний	Es	254
100	Фермий	Fm	262
101	Менделевий	Md	259
102	Нобелий	No	260

Примечание. Z* — порядковый номер элемента; A** — относительная атомная масса химического элемента (округленные значения).

Учебное издание

Для старшего школьного возраста

СПРАВОЧНИК В КАРМАНЕ

Клименко Елена Сергеевна

ФОРМУЛЫ ПО ФИЗИКЕ

Ответственный редактор *В. Обручев*

Ведущий редактор *Ю. Лаврова*

Художественный редактор *С. Власов*

ООО «Издательство «Эксмо»

127299, Москва, ул. Клары Цеткин, д. 18/5. Тел. 411-68-86, 956-39-21.

Home page: **www.eksmo.ru** E-mail: **info@eksmo.ru**

Подписано в печать 26.07.2012. Формат 70х100¹/₃₂.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 5, 19.

Тираж экз. Заказ

ISBN 978-5-699-58451-2



9 785699 584512 >

Оптовая торговля книгами «Эксмо»:

ООО «ТД «Эксмо». 142702, Московская обл., Ленинский р-н, г. Видное,
Белокаменное ш., д. 1, многоканальный тел. 411-50-74.
E-mail: reception@eksmo-sale.ru

По вопросам приобретения книг «Эксмо»

зарубежными оптовыми покупателями

обращаться в отдел зарубежных продаж ТД «Эксмо»

E-mail: international@eksmo-sale.ru

International Sales: *International wholesale customers should contact
Foreign Sales Department of Trading House «Eksmo» for their orders.
international@eksmo-sale.ru*

**По вопросам заказа книг корпоративным клиентам,
в том числе в специальном оформлении,**

обращаться по тел. 411-68-59, доб. 2299, 2205, 2239, 1251.

E-mail: vipzakaz@eksmo.ru

Оптовая торговля бумажно-беловыми

и канцелярскими товарами для школы и офиса «Канц-Эксмо»:

Компания «Канц-Эксмо»: 142700, Московская обл., Ленинский р-н,
г. Видное-2, Белокаменное ш., д. 1, а/я 5.

Тел./факс +7 (495) 745-28-87 (многоканальный).

e-mail: kanc@eksmo-sale.ru, сайт: www.kanc-eksmo.ru

Полный ассортимент книг издательства «Эксмо» для оптовых покупателей:

В Санкт-Петербурге: ООО СЗКО, пр-т Обуховской Обороны, д. 84Е.

Тел. (812) 365-46-03/04.

В Казани: Филиал ООО «РДЦ-Самара», ул. Фрезерная, д. 5.

Тел. (843) 570-40-45/46.

В Самаре: ООО «РДЦ-Самара», пр-т Кирова, д. 75/1, литера «Е».

Тел. (846) 269-66-70.

В Екатеринбурге: ООО «РДЦ-Екатеринбург», ул. Прибалтийская, д. 24а.

Тел. +7 (343) 272-72-01/02/03/04/05/06/07/08.

В Новосибирске: ООО «РДЦ-Новосибирск», Комбинатский пер., д. 3.

Тел. +7 (383) 289-91-42. E-mail: eksmo-nsk@yandex.ru

В Киеве: ООО «РДЦ Эксмо-Украина», Московский пр-т, д. 6.

Тел./факс: (044) 498-15-70/71.

В Донецке: ул. Артема, д. 160. Тел. +38 (062) 381-81-05.

В Харькове: ул. Гвардейцев Железнодорожников, д. 8.

Тел. +38 (057) 724-11-56.

Во Львове: ул. Бузкова, д. 2. Тел. +38 (032) 245-01-71.

Интернет-магазин: www.knigka.ua. Тел. +38 (044) 228-78-24.

В Казахстане: ТОО «РДЦ-Алматы», ул. Домбровского, д. 3а.

Тел./факс (727) 251-59-90/91. RDC-Almaty@eksmo.kz

Полный ассортимент продукции издательства «Эксмо»

можно приобрести в магазинах «Новый книжный» и «Читай-город».

Телефон единой справочной: 8 (800) 444-8-444.

Звонок по России бесплатный.

В Санкт-Петербурге в сети магазинов «Буквоед»:

«Парк культуры и чтения», Невский пр-т, д. 46. Тел. (812) 601-0-601

www.bookvoed.ru

Этот справочник станет незаменимым помощником старшим школьникам, студентам младших курсов и вузов при подготовке к самостоятельным и контрольным работам, тестам, экзаменам, ЕГЭ. Быстро освежить в памяти полученные знания, систематизировать материал, вспомнить самые важные формулы – такие задачи призван решить сборник. Материалы, вошедшие в справочник, одновременно доступны, удобны для использования, снабжены наглядными схемами и чертежами.

В справочник включены все разделы физики, изучаемые в старшей школе и вузах: механика, молекулярная физика, термодинамика, электродинамика, колебания и волны, а также элементы теории относительности. Приведены словесные формулировки законов и их графическое изображение.



ISBN 978-5-699-58451-2



9 785699 584512 >