

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
ИНСТИТУТ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НЕПРЕРЫВНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
ЦЕНТР ДОВУЗОВСКОЙ ПОДГОТОВКИ

Н.Д. Толмачева

КРАТКИЙ СПРАВОЧНИК ПО ФИЗИКЕ

Учебно-методическое пособие

Издательство
Томского политехнического университета
2013

УДК 53(076)

ББК 22.3я73

Т89

Толмачева Н.Д.

Т89 Краткий справочник по физике: учебно-методическое пособие / Н.Д. Толмачева; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 116 с.

Пособие ориентировано на подготовку выпускников школ и абитуриентов к Единому государственному экзамену и олимпиадам по физике. В пособии приведены определения основных физических понятий, сформулированы физические законы, описываемые ими явления и закономерности.

Справочник составлен с учетом программ по физике школьного курса и дополнен некоторыми элементами программы вузовского курса.

УДК 53(076)

ББК 22.3я73

Рецензент

Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры общей физики ФТИ ТПУ

Э.Б. Шошин

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2013

© Толмачева Н.Д., 2013

© Обложка. Издательство Томского
политехнического университета, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Краткие сведения о векторах	6
1. МЕХАНИКА	7
1.1. Кинематика материальной точки	7
1.2. Движение тела в поле тяжести Земли	11
1.3. Равномерное движение тела по окружности	14
1.4. Динамика материальной точки	15
1.4.1. Законы Ньютона	17
1.4.2. Силы в механике	17
1.4.3. Закон сохранения импульса	20
1.5. Энергия. Работа	21
1.5.1. Кинетическая и потенциальная энергия	22
1.5.2. Абсолютно неупругий и упругий центральный удар	24
1.6. Статика	25
1.7. Механика жидкостей и газов	26
2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА	27
2.1. Молекулярная физика	27
2.2. Законы идеального газа	30
2.3. Термодинамика	32
2.3.1. Внутренняя энергия газа	32
2.3.2. Работа газа	33
2.3.3. Первый закон термодинамики	33
3. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ	35
3.1. Фазовые переходы. Уравнение теплового баланса	35
3.2. Насыщенный пар. Влажность	38
4. ЭЛЕКТРОСТАТИКА	38
4.1. Закон Кулона	39
4.2. Напряженность и потенциал электростатического поля	42
4.3. Проводники и диэлектрики в электростатическом поле	44
4.4. Емкость. Конденсаторы	45
5. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК	47
5.1. Сила и плотность тока	47
5.2. Законы Ома	48
5.3. Электрическое сопротивление	49
5.4. Работа и мощность постоянного электрического тока	51
5.5. Ток в жидкостях	52
5.6. Полупроводники	52

6. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ	53
6.1. Магнитное поле	53
6.2. Сила Ампера и сила Лоренца	56
6.3. Траектории заряженных частиц в однородном магнитном поле, при отсутствии внешних сил	58
6.4. Магнитные свойства вещества	59
6.5. Электромагнитная индукция	60
7. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ	62
7.1. Механические колебания	62
7.1.1. Гармонические колебания	62
7.1.2. Математический маятник	65
7.1.3. Пружинный маятник	65
7.1.4. Механические волны	66
7.2. Электромагнитные колебания и волны	68
8. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК	71
8.1. Цепи переменного тока	72
8.2. Трансформатор	75
9. ОПТИКА	76
9.1. Геометрическая оптика	76
9.1.1. Законы геометрической оптики	77
9.1.2. Мнимое изображение. Плоское зеркало	79
9.1.3. Линзы	80
9.2. Волновая оптика	85
9.2.1. Интерференция света	86
9.2.2. Дифракция света	90
9.2.3. Поляризация света	92
9.2.4. Дисперсия света	93
9.3. Квантовая оптика	93
9.3.1. Основные положения квантовой оптики	93
9.3.2. Фотоэлектрический эффект	94
9.3.3. Давление света	96
9.3.4. Тепловое излучение	97
10. ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	97
11. ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ	100
11.1. Физика атома	100
11.2. Физика атомного ядра	104
Приложение	112

ПРЕДИСЛОВИЕ

Справочник, охватывает все разделы школьного курса физики: механика, молекулярная физика и термодинамика, электричество и магнетизм, колебания и волны, оптика, элементы специальной теории относительности, элементы физики атома и ядра.

В пособии приведены определения основных физических понятий, сформулированы физические законы, описываемые ими явления и закономерности.

Справочник составлен с учетом программ по физике школьного курса и дополнен некоторыми элементами программы вузовского курса. Материал, дополненный вопросами вузовского курса, отмечен в тексте значком (*). Подобное представление материала устанавливает связь между школьным и вузовским курсом по физике, т. е. данное пособие выполняет две задачи. Первая задача позволяет помочь читателю быстро найти и восстановить в памяти необходимую информацию для подготовки к Единому государственному экзамену (ЕГЭ) и олимпиадам по физике, а вторая – подготовиться к учебе в вузе.

Справочник ни в коем случае не заменяет полностью учебники школьного курса физики, однако он может быть эффективно использован при подготовке к экзамену, при решении задач ЕГЭ всех уровней сложности (А, В и С), а также систематизации и обобщении знаний по курсу физики.

Все формулы записаны в СИ. В конце пособия в Приложении приведены размерности физических величин в СИ (табл. 3), основные физические постоянные (константы) с точностью, принятой для получения правильного ответа при решении задач на ЕГЭ (табл. 4). Кроме того, в табл. 1 приведен греческий алфавит (с названием на русском языке греческих букв), так как применение греческих букв для обозначения физических величин вызывает затруднения у многих абитуриентов и студентов. В табл. 2 представлены десятичные приставки к названиям единиц, а в табл. 5 – некоторые формулы тригонометрии и математические формулы для приближенных вычислений.

Замечания, предложения, а также сообщения об обнаруженных опечатках просим направлять по e-mail: tnd@tpu.ru.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ВЕКТОРАХ

Вектор определяется модулем и направлением.

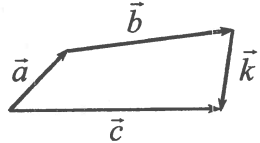
Вектор обозначается буквами со стрелками \vec{a} , \vec{v} , \overline{AB} (в некоторых пособиях вектор обозначается полужирными прямыми буквами — \mathbf{a} , \mathbf{v}).

Модуль вектора (абсолютная величина) обозначается $|\vec{a}|$, $|\vec{v}|$ или теми же буквами, что и сам вектор, обычным шрифтом a , v , AB .

Сложение и вычитание векторов

а) Правило многоугольника:

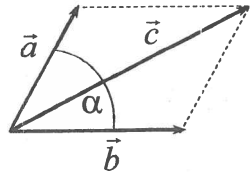
$$\vec{c} = \vec{a} + \vec{b} + \vec{k}$$



б) Правило параллелограмма:

$$\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$$

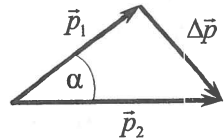
$$c = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos \alpha}$$



в) Вычитание векторов:

$$\Delta \vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$$

$$\Delta p = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 - 2p_1 p_2 \cos \alpha}$$



Проекции точек и векторов на оси координат

Проекцией точки A на ось называется основание перпендикуляра, опущенного из этой точки на ось (рис. 1.1, а).

Проекцией вектора на ось Ox (или Oy) называется отрезок между проекциями на эту ось начала и конца вектора (рис. 1.1, б; рис. 1.1, с).

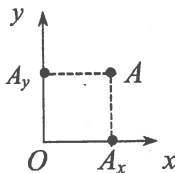


Рис. 1.1, а

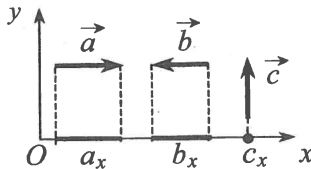


Рис. 1.1, б

$$a_x = a, \quad b_x = -b, \quad c_x = 0;$$

$$a_y = 0, \quad b_y = 0, \quad c_y = c.$$

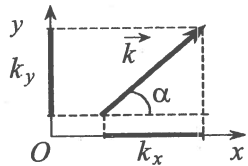


Рис. 1.1, с

$$k_x = k \cos \alpha,$$

$$k_y = k \sin \alpha.$$

Примечание. Проекция вектора на ось — величина скалярная, математические действия с проекциями производятся алгебраически.

1. МЕХАНИКА

1.1. КИНЕМАТИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Кинематика изучает механическое движение тел, не рассматривая причины, которыми это движение вызывается.

Механическим движением называется изменение взаимного положения тел или их частей.

Поступательное движение – движение, при котором любая прямая жестко связанная с движущимся телом, остается параллельной своему первоначальному положению.

Материальная точка – тело, обладающее массой, размерами которого в данной задаче можно пренебречь.

Положение материальной точки определяется по отношению к некоторому, произвольно взятому телу, называемому **телом отсчета**.

Система отсчета – совокупность тела отсчета, связанной с ним системы координат и часов.

В декартовой системе координат (рис. 1.2) положение точки в данный момент времени характеризуется тремя координатами x , y и z или радиусом вектором \vec{r} .

Радиус-вектор \vec{r} – вектор, соединяющий начало отсчета с положением точки в произвольный момент времени, рис. 1.2.

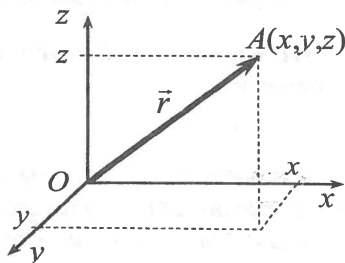


Рис. 1.2

* **Модуль радиуса вектора:**

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Кинематические уравнения

При движении материальной точки её координаты x , y , z и радиус вектор \vec{r} изменяются со временем.

В общем случае движение материальной точки определяется скалярными **кинематическими уравнениями** и эквивалентными векторному уравнению:

$$\begin{aligned}x &= x(t), \\y &= y(t), \\z &= z(t), \\ \vec{r} &= \vec{r}(t)\end{aligned}$$

* или

$$\vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} + z(t)\vec{k}$$

Траектория материальной точки – линия, описываемая в пространстве движущейся точкой.

(В двумерном пространстве $y = f(x)$).

Путь s – скалярная величина, равная длине s участка траектории, пройденного материальной точкой за данный промежуток времени, рис. 1.3.

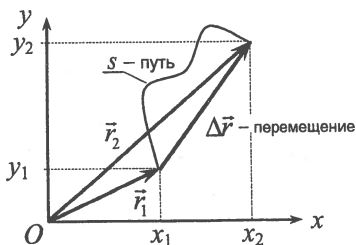


Рис. 1.3

Перемещение $\Delta\vec{r}$ – вектор, проведенный из начального \vec{r}_1 положения материальной точки в конечное \vec{r}_2 :

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$$

Результирующее перемещение равно векторной сумме последовательных перемещений, рис. 1.3.

Модуль вектора перемещения: $|\Delta\vec{r}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$

Изменение любой величины – разность её конечного и начального состояния.

Скорость

Скорость \vec{v} – векторная величина, которая определяет как быстроту движения, так и его направление в данный момент времени.

Скорость – одна из основных кинематических характеристик движения точки.

Средняя скорость $\langle\vec{v}\rangle$ – векторная физическая величина, равная отношению перемещения к промежутку времени, в течение которого это перемещение произошло:

$$\langle\vec{v}\rangle = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$$

Мгновенная скорость \vec{v} – векторная физическая величина, равная пределу отношения перемещения тела $\Delta\vec{r}$ к промежутку времени Δt , за который это перемещение произошло при $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$$

* **Мгновенная скорость** – векторная физическая величина, определяемая производной радиуса-вектора \vec{r} движущейся точки по времени t :

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

Мгновенная скорость \vec{v} всегда направлена по касательной к траектории в сторону движения (рис. 1.4).

Направление вектора средней скорости $\langle \vec{v} \rangle$ совпадает с направлением $\Delta \vec{r}$.

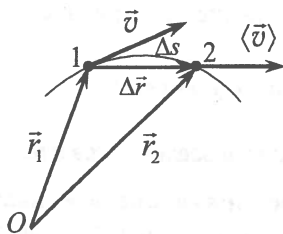


Рис. 1.4

Проекции скорости \vec{v} точки на оси координат x, y, z :

$$v_x = \frac{dx}{dt}; \quad v_y = \frac{dy}{dt}; \quad v_z = \frac{dz}{dt}$$

Модуль мгновенной скорости v :

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

Ускорение

Ускорение \vec{a} – характеризует быстроту изменения скорости по модулю и по направлению.

Среднее ускорение $\langle \vec{a} \rangle$ – векторная физическая величина, равная отношению изменения скорости тела $\Delta \vec{v}$ к промежутку времени Δt , в течение которого это изменение произошло:

$$\langle \vec{a} \rangle = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

Мгновенное ускорение \vec{a} – векторная физическая величина, равная пределу отношения изменения скорости тела $\Delta \vec{v}$ к промежутку времени Δt , в течение которого это изменение произошло при $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

* Мгновенным ускорением называется вектор \vec{a} , равный первой производной по времени t от скорости \vec{v} этой точки:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

Тангенциальное (или касательное) ускорение \vec{a}_τ характеризует быстроту изменения скорости по модулю, направлено по касательной к траектории движения тела (рис. 1.5):

$$\langle a_\tau \rangle = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$\text{или } a_\tau = \frac{dv}{dt}$$

Нормальное (или центростремительное) ускорение \vec{a}_n характеризует быстроту изменения скорости по направлению. Нормальное ускорение направлено перпендикулярно скорости (r – радиус кривизны траектории в данной точке, рис. 1.5):

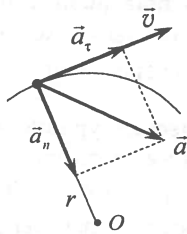


Рис. 1.5

$$a_n = \frac{v^2}{r}$$

Полное ускорение \vec{a} при криволинейном движении, рис. 1.5:

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$$

Модуль полного ускорения:

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}$$

Прямолинейное равномерное и равнопеременное движение

Равномерное прямолинейное движение — движение, при котором тело перемещается с постоянной по модулю и направлению скоростью:

$$\vec{v} = \text{const}$$

$$a = 0$$

При равномерном прямолинейном движении вдоль оси x :

$$x = x_0 \pm vt,$$

(s — путь тела за время t , x — текущая координата x_0 — начальная координата).

$$s = x - x_0 = vt$$

Графики скорости v (рис. 1.6, а), пути s (рис. 1.6, б) и координаты x (рис. 1.6, с) от времени движения тела

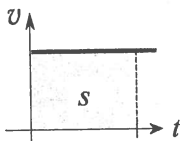


Рис. 1.6, а

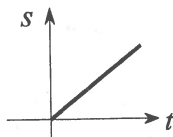


Рис. 1.6, б

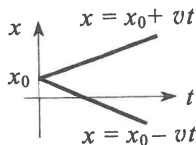


Рис. 1.6, с

Прямолинейное равнопеременное движение — движение с постоянным по модулю и направлению ускорением: $\vec{a} = \text{const}$. Направлено ускорение \vec{a} вдоль траектории движения. Нормальное ускорение отсутствует.

Прямолинейное равноускоренное движение — прямолинейное движение, при котором ускорение совпадает с направлением скорости точки и постоянно по модулю: $\vec{a} \uparrow \vec{v}$, $\vec{a} = \text{const}$.

Прямолинейное равнозамедленное движение — прямолинейное движение с постоянным ускорением, при котором направления векторов ускорения и скорости противоположны: $\vec{a} \downarrow \vec{v}$, $\vec{a} = \text{const}$.

Кинематические уравнения равнопеременного движения вдоль оси x :

(x — текущая координата, x_0 — начальная координата, v_{0x} — проекция начальной скорости \vec{v}_0 на ось x , v_x — проекции скорости \vec{v} на ось x , a_x — проекции ускорения \vec{a} на ось x).

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$$

$$v_x = v_{0x} + a_x t$$

Путь s при равнопеременном прямолинейном движении:

$$s = v_0 t \pm \frac{at^2}{2} \quad (*)$$

В формулах знак "плюс" относится к равноускоренному движению, а знак "минус" к равнозамедленному движению.

При равнозамедленном движении по формуле (*) находится путь до остановки, т. е. до момента времени t , при котором скорость v становится равной нулю.

Графики равнопеременного движения: проекции ускорения a_x (рис. 1.7, а и з), проекции скорости v_x (рис. 1.7, б и д), пути s (рис. 1.7, в) и величины перемещения $|\Delta\vec{r}|$ (рис. 1.7, е) от времени движения тела

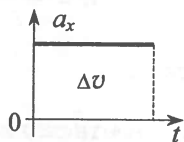


Рис. 1.7, а

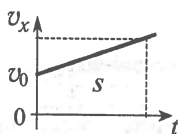


Рис. 1.7, б

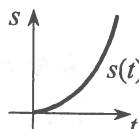


Рис. 1.7, в

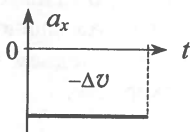


Рис. 1.7, з

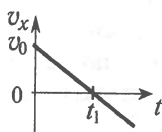


Рис. 1.7, д



Рис. 1.7, е

Площадь под линией графика $a_x(t)$ равна изменению Δv_x скорости за время t , а площадь под кривой графика $v_x(t)$ — пути s и величины перемещения $|\Delta\vec{r}|$, пройденного телом за время t .

1.2. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА В ПОЛЕ ТЯЖЕСТИ ЗЕМЛИ

Для описания движения тела в поле тяжести Земли вводится идеализированная модель, основные допущения которой следующие:

- 1) тело — материальная точка;
- 2) движение рассматривается вблизи поверхности Земли, когда высота подъема тела мала по сравнению с радиусом Земли;
- 3) сопротивление воздуха не учитывается.

Ускорение свободного падения обозначается \vec{g} и направлено всегда к центру Земли. Вблизи поверхности Земли $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$.

Примечание. Следует учитывать, что в контрольно-измерительных материалах ЕГЭ ускорение свободного падения принимается равным 10 м/с^2 .

Свободное падение тела

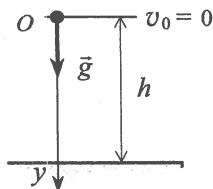


Рис. 1.8

Свободное падение тел – все тела независимо от их массы в отсутствие сил сопротивления воздуха падают на землю (вблизи поверхности земли) с одинаковым ускорением, называемым ускорением свободного падения (рис. 1.8).

Скорость v тела в момент времени t :

$$v = gt$$

Путь при свободном падении тела:

$$h = \frac{gt^2}{2}$$

Движение тела, брошенного вертикально вверх

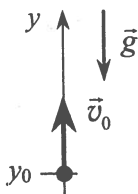


Рис. 1.9

Движение тела, брошенного вертикально вверх. Тело движется вертикально вверх с начальной скоростью v_0 (рис. 1.9). На участке до наивысшей точки подъема движение тела является равнозамедленным, а после достижения точки подъем – свободным падением без начальной скорости.

Кинематическое уравнение проекции скорости:

$$v_y = v_0 - gt$$

Кинематическое уравнение координаты:

$$y = y_0 + v_0 t - \frac{gt^2}{2}$$

Высота подъема тела, если начальная координата $y_0 = 0$:

$$h = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$$

Время подъема t_1 тела до наивысшей точки равно времени падения на прежний уровень:

$$t_1 = v_0 / g$$

Максимальная высота подъема тела:

$$h_{\max} = \frac{gt_1^2}{2}$$

$$h_{\max} = \frac{v_0^2}{2g}$$

Движение тела, брошенного горизонтально с начальной скоростью v_0

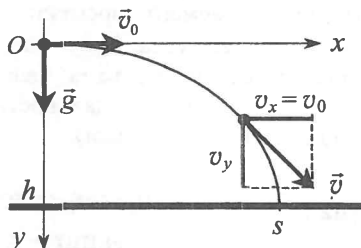


Рис. 1.10

Траекторией движения является парабола (рис. 1.10). Криволинейное движение по параболе обусловлено результатом сложения двух прямолинейных движений: равномерного движения по горизонтальной оси и свободного падения по вертикальной оси (см. кинематические уравнения движения проекций скорости и координат).

(v_0 – начальная скорость тела, v – скорость тела в момент времени t , s – дальность полета по горизонтали, h – высота над поверхностью земли, с которой тело брошено горизонтально со скоростью v_0).

Кинематические уравнения проекции скорости:

$$\begin{aligned} v_x &= v_0 \\ v_y &= gt \end{aligned}$$

Кинематические уравнения координат:

$$\begin{aligned} x &= v_0 t \\ y &= \frac{gt^2}{2} \end{aligned}$$

Скорость тела в момент времени t :

$$v = \sqrt{v_0^2 + (gt)^2}$$

В момент t_n падения на землю $y = h$, $x = s$ (рис. 1.10).

Максимальная дальность полета тела по горизонтали:

$$s = v_0 t_n$$

Высота над поверхностью земли, с которой тело брошено горизонтально:

$$h = \frac{gt_n^2}{2}$$

Движение тела, брошенного под углом α к горизонту с начальной скоростью v_0

Траекторией является парабола (рис. 1.11). Криволинейное движение по параболе обусловлено результатом сложения двух прямолинейных движений: равномерного движения по горизонтальной оси и равнопеременного движения по вертикальной оси (см. кинематические уравнения движения проекций скорости и координат).

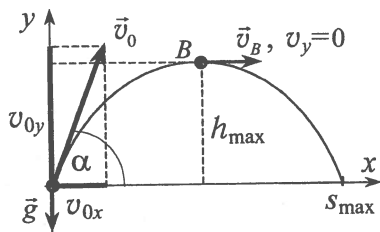


Рис. 1.11

(v_0 – начальная скорость тела, v_x , v_y – проекции скорости \vec{v} на оси координат в момент времени t , τ – время полета тела, h_{\max} – максимальная высота подъема тела, s_{\max} – максимальная дальность полета тела по горизонтали).

Кинематические уравнения проекции скорости:

$$\begin{aligned} v_x &= v_0 \cdot \cos \alpha \\ v_y &= v_0 \cdot \sin \alpha - gt \end{aligned}$$

Кинематические уравнения координат:

$$\begin{aligned} x &= v_0 t \cdot \cos \alpha \\ y &= v_0 t \cdot \sin \alpha - \frac{gt^2}{2} \end{aligned}$$

Время подъема тела до верхней точки траектории:

$$t_1 = \frac{v_{0y}}{g} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$$

В момент времени $t = t_1$, $y = h_{\max}$ (рис. 1.11).

Максимальная высота подъема тела:

$$h_{\max} = \frac{v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha}{2g}$$

Время полета тела:

$$\tau = 2t_1 = \frac{2v_0 \cdot \sin \alpha}{g}$$

В момент времени $t = \tau$, $s = s_{\max}$ (рис. 1.11).

Максимальная дальность полета тела по горизонтали:

$$s_{\max} = \frac{v_0^2 \cdot \sin 2\alpha}{g}$$

1.3. РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА ПО ОКРУЖНОСТИ

Равномерное движение точки по окружности – движение, при котором движущаяся точка за равные промежутки времени проходит равные по длине дуги окружности (или движение, при котором углы поворота радиуса-вектора \vec{r} точки одинаковы за равные промежутки времени).

Частота вращения – число оборотов N , совершенных за единицу времени t :

$$n = \frac{N}{t}$$

Период вращения – время одного оборота по окружности, величина обратная частоте вращения n :

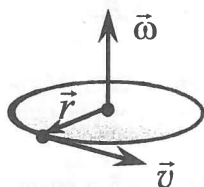
$$T = \frac{t}{N}, \quad T = \frac{1}{n}$$

Средняя угловая скорость – физическая величина равная отношению угла поворота $\Delta\varphi$ радиуса-вектора \vec{r} к промежутку времени Δt , в течение которого этот поворот произошел:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

Средняя угловая скорость:

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



* **Правило буравчика** – если буравчик с правой нарезкой ввинчивать по направлению вектора угловой скорости $\vec{\omega}$, то направление вращения рукоятки совпадет с направлением движения точки по окружности, рис. 1.12.

Рис. 1.12

* **Вектор угловой скорости** направлен вдоль оси вращения по правилу правого винта (правило буравчика).

* **Мгновенная угловая скорость** $\vec{\omega}$ – вектор равный первой производной по времени t от угла $\vec{\varphi}$ поворота радиуса-вектора \vec{r} :

$$\vec{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{\varphi}}{\Delta t}$$

$$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}$$

Скорость движения точки по окружности (линейная скорость) радиусом R :

$$v = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R n$$

$$v = \omega R$$

Центростремительное ускорение (* нормальное ускорение a_n):

$$a_{\text{цс}} = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$$

Кинематическое уравнение равномерного движения по окружности:

$$\varphi = \omega t$$

($\varphi = 2\pi N$ – угол поворота радиус-вектора \vec{r} ; N – число оборотов радиуса вектора за время t).

1.4. ДИНАМИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Динамика – раздел механики, в котором рассматривается влияние взаимодействий между телами на их механическое движение.

Сила – векторная физическая величина, являющаяся мерой механического воздействия на тело со стороны других тел, в результате которого тело приобретает ускорение или изменяет форму и размеры.

Принцип суперпозиции сил. Если на материальную точку одновременно действуют несколько сил ($\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \dots, \vec{F}_N$), то они могут быть заменены одной силой \vec{F}_R , называемой равнодействующей силой, равной векторной сумме этих сил:
$$\vec{F}_R = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N.$$

Результирующая (равнодействующая) сила – это сила, действующая на частицу со стороны других тел, равная векторной сумме сил, с которым каждое из этих тел действует на частицу.

Движение по инерции – движение тела, происходящее без внешних воздействий.

Принцип инерции. Если на тело не действуют внешние силы, то оно сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

Инерциальная система отсчета – система отсчета, в которой тело, не взаимодействующее с другими телами, сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. Во всех инерциальных системах отсчета законы классической динамики имеют один и тот же вид.

Инерциальная система отсчета – гелиоцентрическая система отсчета. Начало координат этой системы совмещают с центром Солнца, а координатные оси проводят в направлении на какие-либо определенные звезды, которые могут быть приняты за неподвижные.

Для описания многих механических движений в земных условиях инерциальную систему отсчета связывают с Землей (**геоцентрическая система отсчета**), пренебрегая вращательным движением Земли вокруг собственной оси и вокруг Солнца.

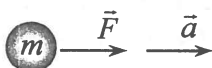
Инертность – физическое свойство, заключающееся в том, что любое тело оказывает сопротивление изменению его скорости (как по модулю, так и по направлению).

Масса тела – физическая величина, характеризующая меру инертности тела.

1.4.1. Законы Ньютона

Первый закон Ньютона. Материальная точка сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не заставит её изменить это состояние. (Первый закон Ньютона устанавливает факт существования инерциальных систем отсчета).

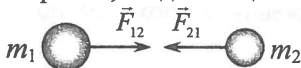
Второй закон Ньютона. В инерциальной системе отсчета ускорение материальной точки пропорционально вызывающей его силы, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе материальной точки:



* **Второй закон Ньютона** (согласно современной терминологии). Скорость изменения импульса материальной точки равна действующей на нее силы:

($\Delta \vec{p}$ – изменение импульса за время Δt ; $\langle \vec{F} \rangle$ – усредненная за время Δt сила).

Третий закон Ньютона. Силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по модулю, противоположны по направлению, приложены к разным телам и действуют вдоль прямой, соединяющей эти тела:



1.4.2. Силы в механике

Сила упругости – сила, возникающая при деформации тела и направленная противоположно направлению смещения частиц при деформации. Упругое воздействие на тело – воздействие, в результате которого тело восстанавливает форму и размеры после прекращения действия силы.

Сила реакции опоры – сила упругости \vec{N} , действующая на тело со стороны опоры перпендикулярно её поверхности.

Сила натяжения (сжатия) – сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$, действующая на тело со стороны нити или пружины.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

или

$$m\vec{a} = \sum \vec{F}_i$$

или

$$m\vec{a} = \vec{F}_R$$

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$$

или

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \langle \vec{F} \rangle$$

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

* **Напряжение** σ – физическая величина, равная отношению силы упругости $F_{\text{упр}}$ к площади поперечного сечения тела S :

$$\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S}$$

Относительное удлинение ε равно отношению абсолютного удлинения тела $|\Delta l|$ к его первоначальной длине l_0 :

$$\varepsilon = \frac{|\Delta l|}{l_0}$$

* **Закон Гука для продольного растяжения (сжатия) стержня** – напряжение σ , возникающее в стержне, прямо пропорционально относительному $(\Delta l/l_0)$ удлинению (сжатию) стержня:

$$\sigma = E\varepsilon$$

или

(F – растягивающая (сжимающая) сила, E – модуль Юнга, характеризующий свойства материала стержня, S – площадь поперечного сечения стержня, Δl – абсолютное удлинение (сжатие) стержня, l_0 – длина стержня до деформации).

$$\frac{F_{\text{упр}}}{S} = E \cdot \frac{\Delta l}{l_0}$$

Закон Гука. Модуль силы упругости $F_{\text{упр}}$, возникающей при деформации тела, пропорционален его удлинению Δl :

$$F_{\text{упр}} = k\Delta l$$

(k – жесткость пружины, x – деформация пружины).

$$F_{\text{упр}} = -kx$$

Сила трения – сила, возникающая при соприкосновении поверхностей тел, препятствующая их относительному перемещению, направленная вдоль поверхности соприкосновения.

Сила трения покоя – сила трения, препятствующая возникновению движения одного тела по поверхности другого.

Сила $F_{\text{тр}}$ трения скольжения: (μ – коэффициент трения, N – модуль силы реакции опоры равный по величине силе нормального давления тела на опору).

$$F_{\text{тр}} = \mu N$$

Закон всемирного притяжения

Закон всемирного притяжения. Между двумя материальными точками действует сила взаимного притяжения F_g , пропорциональная произведению масс этих точек m_1 и m_2 и обратно пропорциональная квадрату расстояния r^2 между ними.

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

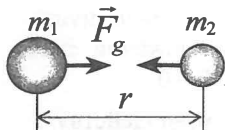


Рис. 1.13

Гравитационная сила притяжения направлена вдоль прямой, соединяющей материальные точки (рис. 1.13).

Гравитационная постоянная численно равна силе гравитационного притяжения двух тел, массой по 1 кг каждое, находящихся на расстоянии 1 м одно от другого, $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$.

Сила тяжести – гравитационная сила $m\vec{g}$, действующая на тело.

Ускорение свободного падения (гравитационное ускорение) – ускорение \vec{g} , приобретаемое телом под действием гравитационной силы вблизи поверхности небесных тел (планет, звезд).

Ускорение свободного падения g на поверхности планеты массой M и радиуса R :

$$g = G \frac{M}{R^2}$$

Ускорение свободного падения g_h на высоте h от поверхности планеты:

$$g_h = G \frac{M}{(R+h)^2}$$

Первой космической скоростью тела называется минимальная скорость v_1 , которую нужно сообщить телу, чтобы оно превратилось в спутник Земли (или другой планеты) и двигалось по окружности, плоскость которой проходит через центр Земли (или другой планеты):

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}} = \sqrt{gR}$$

Второй космической скоростью тела называется минимальная скорость v_2 , которую нужно сообщить телу у поверхности Земли, чтобы оно преодолело гравитационное притяжение Земли (или другой планеты):

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2gR}$$

$$v_2 = \sqrt{2} \cdot v_1$$

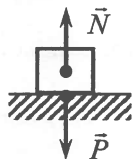


Рис. 1.14

Вес тела – сила, с которой тело вследствие притяжения к Земле, действует на опору или подвес, удерживающие его от свободного падения, рис. 1.14.

Вес тела:

$$P = mg \pm ma$$

$$|\vec{P}| = |\vec{N}|$$

Вес тела при движении системы в вертикальном направлении. При движении вверх с ускорением a вес тела увеличивается, при движении вниз – уменьшается:

вверх: $P = m(g + a)$

вниз: $P = m(g - a)$

Невесомость – состояние, при котором вес тела равен нулю. В гравитационном поле невесомость возникает при движении тела только под действием силы тяжести. Если $\vec{a} = \vec{g}$, то $P = 0$.

Замкнутая система – система тел, для которой равнодействующая внешних сил равна нулю.

1.4.3. Закон сохранения импульса

Импульс силы – векторная физическая величина, равная произведению силы на длительность её действия: $\vec{F}\Delta t$.

Импульс тела \vec{p} – векторная физическая величина, равная произведению массы тела m на его скорость \vec{v} и имеющая направление скорости:

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Закон сохранения импульса: в замкнутой системе тел векторная сумма импульсов тел остается постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы между собой:

$$\begin{aligned} m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 &= \\ &= m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2 \end{aligned}$$

($m_1\vec{v}_1, m_2\vec{v}_2$ – импульсы тел до взаимодействия, $m_1\vec{v}'_1, m_2\vec{v}'_2$ – импульсы тел после взаимодействия).

Общая формулировка закона сохранения импульса. Импульс замкнутой системы тел сохраняется, т. е. не изменяется с течением времени: (n – число материальных точек (тел), входящих в эту систему).

$$\sum \vec{p}_i = \text{const}$$

$$\sum_{i=1}^n m_i\vec{v}_i = \text{const}$$

Закон сохранения импульса является следствием определенного свойства симметрии пространства – его однородности.

Реактивное движение – движение, возникающее при отделении от тела с некоторой скоростью какой-либо его части.

Центр масс является точкой, в которой может считаться сосредоточенной масса тела при его поступательном движении.

Координата $x_{\text{цм}}$ центра масс системы материальных точек при распределении массы системы вдоль оси x :

$$x_{\text{цм}} = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + \dots}{m_1 + m_2 + \dots}$$

(x_1, x_2, \dots – координаты материальных точек массой m_1, m_2, \dots , составляющих систему).

* **Закон движения центра масс:** центр масс системы движется, как материальная точка, масса которой равна массе всей системы и на которую действует сила, равная векторной сумме всех сил, действующих на систему:

$$m \frac{d\vec{v}_c}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$$

v_c – скорость движения центра масс).

1.5. ЭНЕРГИЯ. РАБОТА

Энергия – универсальная мера различных форм движения и взаимодействия всех видов материи.

Работа силы – количественная характеристика процесса обмена энергией между взаимодействующими телами.

Если тело движется **прямолинейно** и на него действует **постоянная сила** \vec{F} , которая составляет некоторый угол α с направлением перемещения (рис. 1.15), то **работа этой силы** определяется по формуле:

$$A = F \Delta r \cdot \cos \alpha$$

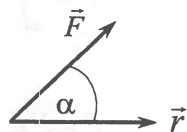


Рис. 1.15

F – модуль силы, Δr – модуль перемещения точки приложения силы, α – угол между направлением силы и перемещения).

Если $\alpha < \pi/2$, то работа силы положительна. Если $\alpha > \pi/2$, то работа силы отрицательна. При $\alpha = \pi/2$ (сила направлена перпендикулярно перемещению), работа силы равна нулю.

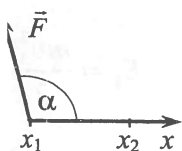


Рис. 1.16

Работа постоянной силы \vec{F} при перемещении вдоль оси x на расстояние $\Delta x = x_2 - x_1$ (рис. 1.16) равна проекции силы $F_x = F \cdot \cos \alpha$ на эту ось умноженной на перемещение Δx :

$$A = F \Delta x \cdot \cos \alpha$$

Примечание. На рис. 1.16 оказан случай $A < 0$, т. к. $\alpha > \pi/2$ – тупой угол.

* **Элементарной работой** dA силы \vec{F} на элементарном перемещении $d\vec{r}$ называется скалярная физическая величина, равная скалярному произведению силы на перемещение:

$$dA = (\vec{F} d\vec{r}) = F dr \cdot \cos \alpha$$

* Работа переменной силы:

$$A = \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx$$

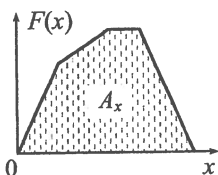


Рис. 1.17

Работа A_x переменной силы $F(x)$ численно равна площади заштрихованной фигуры (рис. 1.17).

Средняя мощность — скалярная физическая величина, равная отношению работы к промежутку времени, за который она совершена:

$$P_{\text{cp}} = \frac{A}{t}$$

Мгновенная мощность — скалярная физическая величина, равная отношению работы к промежутку времени Δt , в течение которого она совершена ($\Delta t \rightarrow 0$):

$$P = \frac{dA}{dt}$$

Мгновенная мощность равна произведению проекции силы, действующей на тело, и мгновенной скорости в направлении его перемещения:

$$P = F_x v_x$$

1.5.1. Кинетическая и потенциальная энергия

Кинетическая энергия материальной точки или тела является мерой их механического движения, зависящей от скоростей их движения в данной инерциальной системе отсчета.

Кинетическая энергия E_k тела — скалярная физическая величина, равная половине произведения массы m тела на квадрат его скорости v :

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

Теорема об изменении кинетической энергии тела. Работа равнодействующей сил, приложенных к телу, равна изменению кинетической энергии тела» или другими словами «изменение кинетической энергии тела равно работе A всех сил, действующих на тело:

$$E_{k2} - E_{k1} = A$$

(E_{k2} и E_{k1} — кинетическая энергия тела в конечный и начальный момент времени).

Потенциальная энергия тела в данной точке – скалярная физическая величина, равная работе совершаемой потенциальной силой при перемещении тела из этой точки в точку, принятую за нуль отсчета потенциальной энергии.

Потенциальная энергия определяется с точностью до некоторой произвольной постоянной. Это не отражается на физических законах, так как в них входит или разность потенциальных энергий в двух положениях тела или производная потенциальной энергии по координатам.

Поэтому потенциальную энергию тела в каком-то определенном положении считают равной нулю, а энергию тела отсчитывают относительно этого положения (нулевого уровня отсчета).

Принцип минимума потенциальной энергии. Любая замкнутая система стремится перейти в такое состояние, в котором её потенциальная энергия минимальна.

Потенциальная энергия упругодеформированной пружины равна работе сил упругости при переходе пружины (или тела) из деформированного состояния в недеформированное:
(k – жесткость пружины, x – деформация пружины).

$$E_p = \frac{kx^2}{2}$$

Потенциальная энергия тела, поднятого над поверхностью Земли на высоту h :

$$E_p = mgh$$

Начало отсчета E_p выбрано так, что у поверхности Земли $E_p = 0$.

Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия двух материальных точек массами m_1 и m_2 , находящихся на расстоянии r друг от друга:

$$E_p = -G \frac{m_1 m_2}{r}$$

Начало отсчета E_p выбрано так, что в бесконечности $E_p = 0$.

*** В случае консервативных сил:**

$$F_x = -\frac{\partial E_p}{\partial x}; \quad F_y = -\frac{\partial E_p}{\partial y}; \quad F_z = -\frac{\partial E_p}{\partial z}$$

или в векторном виде:

$$\vec{F} = -\text{grad } E_p$$

Механическая энергия системы – сумма её кинетической и потенциальной энергии:

$$E = E_k + E_p$$

Закон сохранения механической энергии:

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

В консервативной системе полная механическая энергия сохраняется (не изменяется со временем, то есть $E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$).

Закон сохранения механической энергии (частные случаи):

$$\frac{mv_1^2}{2} + mgh_1 = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2; \quad \frac{mv_1^2}{2} + \frac{kx_1^2}{2} = \frac{mv_2^2}{2} + \frac{kx_2^2}{2}.$$

Закон изменения механической энергии:

$$E_2 - E_1 = A_{\text{внеш}}^{\text{стоп}} + A_{\text{внутр}}^{\text{дис}}$$

Закон сохранения механической энергии не выполняется в незамкнутой неконсервативной системе. Изменение механической энергии такой системы равно суммарной работе всех непотенциальных сил $A_{\text{нр}}$, действующих на систему

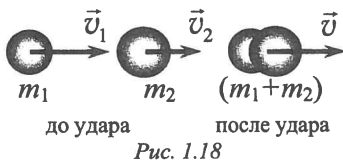
($E_1 = E_{k1} + E_{p1}$, $E_2 = E_{k2} + E_{p2}$, $A_{\text{внеш}}^{\text{стоп}}$ – работа внешних сторонних сил, $A_{\text{внутр}}^{\text{дис}}$ – работа внутренних диссипативных сил).

1.5.2. Абсолютно неупругий и упругий центральный удар

Центральный удар – такой удар, при котором тела до удара, движутся вдоль прямой, проходящей через их центры масс.

Абсолютно неупругий удар – столкновение тел, в результате которого тела движутся как единое целое (рис. 1.18). При абсолютно неупругом ударе механическая энергия системы не сохраняется.

Пример прямого центрального абсолютно неупругого удара



На рисунке: \vec{v}_1 и \vec{v}_2 – скорости движения тел, массы которых m_1 и m_2 до удара ($\vec{v}_1 > \vec{v}_2$); \vec{v} – скорость тела массой $(m_1 + m_2)$ после удара.

Закон сохранения импульса:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{v}$$

Скорость движения тел после абсолютно неупругого удара:

$$\vec{v} = \frac{m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2}{m_1 + m_2}$$

Абсолютный упругий удар – столкновение тел, при котором деформация тел оказывается обратимой, т.е. исчезающей после прекращения взаимодействия (рис. 1.19). При абсолютно упругом ударе сохраняется механическая энергия системы.

Пример прямого центрального абсолютного упругого удара

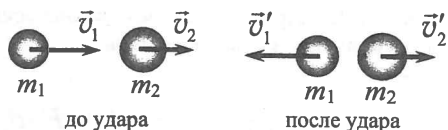


Рис. 1.19

На рисунке: \vec{v}'_1 и \vec{v}'_2 – скорость шаров после их столкновения; \vec{v}_1 и \vec{v}_2 – скорости шаров до удара ($\vec{v}_1 > \vec{v}_2$).

Выполняются закон сохранения механической энергии и закон сохранения импульса:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2}; \quad m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2.$$

Скорости шаров после их столкновения:

$$\vec{v}'_1 = \frac{2m_2 \vec{v}_2 + (m_1 - m_2) \vec{v}_1}{m_1 + m_2}; \quad \vec{v}'_2 = \frac{2m_1 \vec{v}_1 + (m_2 - m_1) \vec{v}_2}{m_1 + m_2}.$$

1.6. СТАТИКА

Модуль момента силы (вращающий момент):

$$M = F \cdot d$$

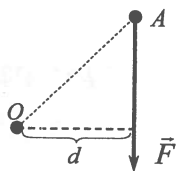


Рис. 1.20

На рисунке: O – ось вращения, A – точка приложения силы F , d – плечо силы F (кратчайшее расстояние между линией действия силы и осью вращения).

Условия равновесия тел:

Векторная сумма сил, действующих на тело равна нулю ($\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$ – силы, действующие на тело):

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

Алгебраическая сумма моментов внешних сил относительно оси вращения тела равна нулю:

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

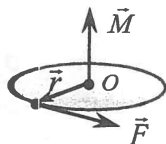


Рис. 1.21

В курсе физики средней школы принято считать (рис. 1.21), что при вращении против часовой стрелки момент силы $M > 0$. При вращении тела по часовой стрелке $M < 0$ (O – ось вращения).

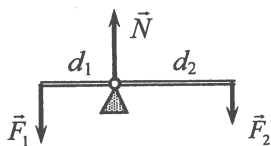


Рис. 1.22. Пример условия равновесия тела с закрепленной осью вращения

Условия равновесия тела с закрепленной осью вращения (рис. 1.22):

$$F_1 \cdot d_1 = F_2 \cdot d_2,$$

$$N = F_1 + F_2$$

1.7. МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Главное отличие жидкостей и газов от твердого тела заключается в их текучести. Главное отличие жидкости от газа состоит в ее несжимаемости, легко изменяя форму, жидкость сохраняет объем и плотности практически неизменными.

Давление p – физическая величина, равная отношению нормальной силы F , действующей на единицу площади поверхности S :

$$p = \frac{F}{S}$$

Гидростатическое давление – давление, вызванное силой тяжести жидкости и зависящее от глубины под поверхностью жидкости.

Давление столба жидкости на глубине h : (p_0 – атмосферное давление, ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения).

$$p = p_0 + \rho gh$$

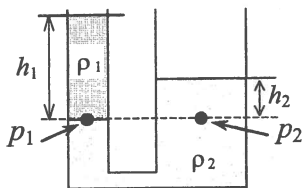


Рис. 1.23

В сообщающихся сосудах, заполненных разнородными жидкостями с плотностью ρ_1 и ρ_2 (рис. 1.23), давления жидкостей на одном уровне одинаковы:

$$p_1 = p_2$$

$$\rho_1 gh_1 = \rho_2 gh_2$$

Закон Паскаля – основной закон гидростатики, согласно которому давление на поверхности жидкости, произведённое внешними силами, передаётся жидкостью одинаково во всех направлениях.

Закон сообщающихся сосудов. Высоты столбов разнородных жидкостей в сообщающихся сосудах обратно пропорциональны плотностям этих жидкостей:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

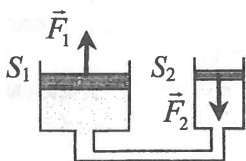


Рис. 1.24

Гидравлический пресс (однородные жидкости):

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$$

$$F_1 = F_2 \frac{S_1}{S_2}$$

Гидравлический пресс (рис. 1.24) дает выигрыш в силе во столько раз, во сколько площадь большего поршня превосходит площадь меньшего.

(F_1 – сила, действующая на большой поршень площадью S_1 , F_2 – сила, действующая на малый поршень площадью S_2).

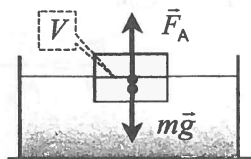


Рис. 1.25

Сила Архимеда:

$$F_A = \rho g V$$

(ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения, V – объем погруженной в жидкость части тела массой m).

Закон Архимеда. На тело, погруженное в жидкость (газ), действует со стороны этой жидкости направленная вверх выталкивающая сила F_A , равная весу жидкости (газа) вытесненной телом и приложенная к центру тяжести вытесненного объема (рис. 1.25).

Закон (принцип) Бернулли. Давление жидкости, текущей в трубе, больше в тех частях трубы, где скорость ее движения меньше, и наоборот, в тех частях, где скорость больше, давление меньше.

2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

2.1. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Молекулярная физика – раздел физики, изучающий строение и свойства вещества исходя из молекулярно-кинетической теории.

Основные положения молекулярно-кинетической теории (МКТ)

1. Все тела состоят из частиц – молекул, атомов, ионов;
2. Эти частицы находятся в непрерывном хаотическом движении;
3. Частицы, составляющие тела, взаимодействуют силами притяжения и отталкивания.

Положения МКТ подтверждаются явлениями диффузии, броуновского движения, свойствами твердых тел, жидкостей и газов, а также исследованиями в области физики элементарных частиц.

Атомная единица массы (1 а.е.м.) – масса, равная $1/12$ массы атома углерода $^{12}_6\text{C}$. $1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

Относительная атомная масса M_r – число атомных единиц массы, содержащихся в массе ядра. Относительная атомная масса почти совпадает с числом нуклонов в ядре: $M_r \approx A$.

Масса атома $m_a = M_r \cdot 1 \text{ а.е.м.} \approx A \cdot 1 \text{ а.е.м.}$

Моль – количество вещества, масса которого, выраженная в граммах, численно равна относительной атомной массе.

Масса одного моля (молярная масса). $M = M_r \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

Количество вещества:

(m – масса вещества, M – молярная масса, N – число молекул (атомов), N_A – постоянная Авогадро).

$$\nu = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A}$$

Постоянная (число) Авогадро – число атомов (или молекул), содержащихся в 1 моле вещества: $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$.

Моль любого вещества содержит одинаковое число атомов (или молекул), равное числу Авогадро.

Закон Авогадро. Моли любых газов при одинаковой температуре и давлении занимают одинаковые объемы.

Система, состоящая из большого числа частиц, характеризуется микроскопическими и макроскопическими параметрами.

Микроскопические параметры – параметры малых масштабов (масса молекулы, ее скорость, импульс, кинетическая энергия), характеризующие движение отдельной молекулы.

Макроскопические параметры – параметры больших масштабов (масса газа m , давление p , объем V , температура T), характеризующие свойства газа как целого.

Идеальный газ – идеализированная модель реальных газов.

Условия идеальности газа:

- 1) Диаметр молекул много меньше среднего расстояния между ними;
- 2) Между молекулами отсутствуют силы взаимодействия, (средняя кинетическая энергия молекул много больше средней потенциальной энергии их взаимодействия);

3) Столкновения молекул газа между собой и со стенками сосуда – абсолютно упругие.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа устанавливает связь между микроскопическими и макроскопическими параметрами газа:

$$p = \frac{1}{3} m_0 n v_{\text{кв}}^2$$

$$p = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle$$

(p – давление газа, m_0 – масса молекулы (атома), $v_{\text{кв}}$ – средняя квадратичная скорость молекулы (атома), $k = R/N_A = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная, n и $\langle E_k \rangle$ – концентрация и средняя кинетическая энергия молекул).

Концентрация n – число молекул N в единице объема V :

$$n = \frac{N}{V}$$

Температура – скалярная величина, мера средней кинетической энергии хаотического движения молекул.

Абсолютная (термодинамическая) температура (t – температура по шкале Цельсия ($^{\circ}\text{C}$)):

$$T = (t + 273)$$

* **Средняя арифметическая скорость** $\langle v \rangle$ движения молекул по модулю равна

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

$$\langle v \rangle = \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_N}{N},$$

где N – общее число молекул газа.

Средняя квадратичная, скорость $v_{\text{кв}}$ движения молекул по модулю равна

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}},$$

где $\langle v^2 \rangle$ – средний квадрат скорости движения молекул.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа:

$$E_k = \frac{m_0 v_{\text{кв}}^2}{2} = \frac{3}{2} kT$$

Зависимость давления p газа от концентрации n молекул и температуры T :

$$p = nkT$$

2.2. ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Уравнение Клапейрона – Менделеева – уравнение состояния идеального газа, связывающее три макроскопических параметра (давления p , объема V и температуры T) данной массы m газа: (R – универсальная газовая постоянная, M – молярная масса).

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

Изопроцессы

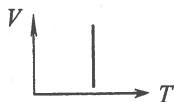
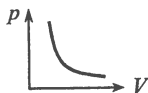
Изопроцесс – процесс, при котором один из макроскопических параметров состояния (p , V или T) данной массы m газа остается постоянным.

Изотермический процесс – изменение состояния определенной массы газа при постоянной температуре.

Закон Бойля – Мариотта – для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления газа на его объем есть величина постоянная ($T = \text{const}$, $m = \text{const}$):

$$pV = \text{const}$$

Изотермы – графики зависимости между параметрами газа при постоянной температуре газа в различных координатах.

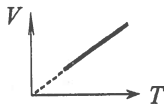


Изобарный процесс – изменение состояния определенной массы газа при постоянном давлении.

Закон Гей-Люссака – объем данной массы газа при постоянном давлении изменяется линейно с температурой ($p = \text{const}$, $m = \text{const}$):

$$V/T = \text{const}$$

Изобары – графики зависимости между параметрами газа при постоянном давлении газа в различных координатах.

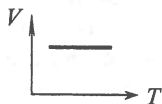
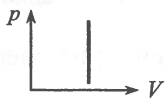


Изохорный процесс – изменение состояния определенной массы газа при постоянном объеме.

Закон Шарля: давление данной массы газа при постоянном объеме изменяется линейно с температурой ($V = \text{const}$, $m = \text{const}$):

$$p/T = \text{const}$$

Изохоры – графики зависимости между параметрами газа при постоянном объеме газа в различных координатах.



Закон Дальтона. Изотерма реального газа

Закон Дальтона. Давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений входящих в нее газов.

$$p = \sum_{i=1}^n p_i$$

или

Парциальное давление p_i – часть общего давления, относящаяся к одному из компонентов газовой смеси, равно давлению, которое он оказывал бы в отсутствие всех других компонентов смеси, т. е. в том случае, когда масса данного компонента, содержащаяся в газовой смеси, одна занимала бы весь объем.

$$\sum_{i=1}^n p_i = p_1 + p_2 + \dots + p_n$$

Понятие парциального давления применимо только к идеальным газам.

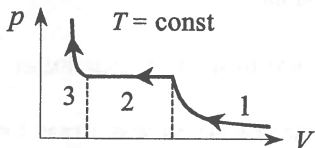


Рис. 2.1. Изотерма реального газа: 1 – процесс сжатия газа, 2 – процесс сжижения газа, 3 – процесс сжатия сжиженного газа (жидкости)

* **Уравнение Ван-дер-Ваальса** для реального газа:

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

В случае реальных газов – надо учитывать силы межмолекулярного взаимодействия и собственный объем молекул. В уравнении **Ван-дер-Ваальса**: b – поправка, учитывающая собственный объем молекул, a/V^2 – поправка на давление, называемая внутренним давлением.

Уравнение Ван-дер-Ваальса справедливо при условии $vb \ll V$ и $v^2 a/V^2 \ll p$, где a и b – константы Ван-дер-Ваальса, v – число молей газа ($v = m/M$).

2.3. ТЕРМОДИНАМИКА

Термодинамика – раздел физики, изучающий возможности использования внутренней энергии тел для совершения механической работы.

Теплообмен – процесс передачи внутренней энергии от одного тела к другому без совершения работы.

Количество теплоты – мера энергии, переданной в форме теплоты в процессе теплообмена.

2.3.1. Внутренняя энергия газа

Внутренняя энергия тела – сумма кинетической энергии хаотического теплового движения частиц (атомов или молекул) системы и потенциальной энергии взаимодействия всех частиц данной термодинамической системы.

Если в термодинамическую систему входит электромагнитное поле, то его энергию включают во внутреннюю энергию системы. Кинетическая энергия движения тела как целого не входит во внутреннюю энергию.

Внутренняя энергия U идеального газа определяется кинетической энергией теплового движения молекул (i – число степеней свободы):

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT = \frac{i}{2} pV$$

Внутренняя энергия теплоизолированной системы сохраняется.

Число степеней свободы i – число возможных независимых направлений движения молекулы.

Для одноатомного газа $i = 3$, для двухатомных молекул газа $i = 5$, для трехатомных (и более) молекул газа $i = 6$ (без учета колебательных процессов).

Изменение внутренней энергии идеального газа:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T$$

или

$$\Delta U = \frac{i}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1)$$

Внутренняя энергия является однозначной функцией состояния термодинамической системы. Значение внутренней энергии в каком-либо произвольном состоянии не зависит от того, каким образом система пришла в это состояние.

Изменение внутренней энергии идеального газа при переходе системы из состояния 1 в состояние 2 не зависит от вида процесса перехода и равно $\Delta U_{1-2} = U_2 - U_1$.

2.3.2. Работа газа

Элементарная работа, совершаемая газом при изменении его объема:

$$dA = p dV$$

***Полная работа** при изменении объема газа (V_1 и V_2 – начальный и конечный объемы газа, соответственно):

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

При расширении ($\Delta V > 0$) газ совершает положительную работу, при сжатии ($\Delta V < 0$) работа, совершаемая газом, отрицательна.

Работа A , совершаемая газом в процессе его расширения (или сжатия) при любом термодинамическом процессе, численно равна площади под кривой, изображающей изменение состояния газа на pV – диаграмме (рис. 2.2, графики a и c).

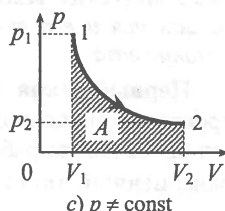
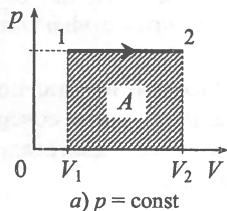


Рис. 2.2

Работа газа в изобарном процессе ($p = \text{const}$) при изменении объема (график a) или температуры:

$$A = p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$$

***Работа газа в изотермическом процессе** ($T = \text{const}$, рис. 2.2, график c): (V_1 и V_2 – начальный и конечный объем газа, p_1 и p_2 – начальное и конечное давление газа).

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$\text{или } A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{p_1}{p_2}$$

2.3.3. Первый закон термодинамики

(закон сохранения энергии для тепловых процессов)

Первый закон термодинамики – количество теплоты Q , подведенной к системе, идет на изменение её внутренней энергии ΔU и на совершение системой работы A над внешними телами:

$$Q = \Delta U + A$$

Первый закон термодинамики при:

изохорном процессе ($V = \text{const}$):

$$A = 0, Q = \Delta U,$$

изотермическом процессе ($T = \text{const}$):

$$\Delta U = 0, Q = A,$$

изобарном процессе ($p = \text{const}$):

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

где $\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{i}{2} p \Delta V, A = p \Delta V = \frac{m}{M} R \Delta T:$

$$Q = \frac{i+2}{2} \nu R \Delta T$$

Адиабатный процесс – термодинамический процесс, в котором система не обменивается теплотой с окружающей средой ($Q = 0$):

$$Q = 0, A = -\Delta U$$

При адиабатном процессе система совершает работу за счет убыли внутренней энергии.

При адиабатическом расширении газа – газ охлаждается. Если в адиабатических условиях совершается работа внешних сил, то газ сжимается и его внутренняя энергия увеличивается, происходит нагревание газа.

Первый закон термодинамики утверждает, что невозможно построить такой периодически действующий двигатель, который совершал бы большую работу, чем энергия, которая подводится к двигателю извне: **вечный двигатель первого рода – невозможен.**

Тепловой двигатель (тепловые машины)

Тепловой двигатель (машина) – устройство, преобразующее внутреннюю энергию топлива в механическую энергию.

Замкнутый процесс (цикл) – совокупность термодинамических процессов, в результате которых система возвращается в исходное состояние.

Коэффициент полезного действия теплового двигателя (КПД) η – отношение работы A , совершаемой двигателем за цикл, к количеству теплоты Q_1 , полученному от нагревателя: (Q_2 – количество теплоты, отданное холодильнику).

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{Q_1}$$
$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

Коэффициент полезного действия теплового двигателя всегда меньше единицы.

Коэффициент полезного действия идеального теплового двигателя (КПД цикла Карно): (T_1, T_2 – температура нагревателя и холодильника соответственно).

$$\eta_{\text{max}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Теорема Карно: из всех периодически действующих тепловых машин, имеющих одинаковые температуры нагревателей (T_1) и холодильников (T_2), наибольшим КПД обладают обратимые машины; при этом КПД обратимых машин, работающих при одинаковых температурах нагревателей и холодильников, равны друг другу и не зависят от природы рабочего тела.

Обратимый процесс – процесс, который может происходить как в прямом, так и в обратном направлении.

Необратимый процесс – процесс, обратный которому самопроизвольно не происходит.

Вечный двигатель второго рода – периодически действующий двигатель, который совершает работу за счет охлаждения одного источника теплоты (например, за счет внутренней энергии океана), не возможен.

Второй закон термодинамики:

1. Невозможен процесс, единственным результатом которого является передача теплоты от холодного тела к горячему;
2. Невозможен процесс, единственным результатом которого является совершение работы за счет охлаждения одного тела.

3. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

3.1. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ. УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОвого БАЛАНСА

Четыре агрегатных состояния (или фазы) вещества: твердое, жидкое, газообразное, плазменное.

Вещество находится в твердом состоянии, если средняя потенциальная $\langle E_p \rangle$ энергия притяжения молекул по модулю много больше их средней кинетической $\langle E_k \rangle$ энергии: $|\langle E_p \rangle| \gg \langle E_k \rangle$.

Вещество находится в жидком состоянии, если средняя кинетическая энергия молекул соизмерима по величине со средней потенциальной энергией их взаимодействия: $|\langle E_p \rangle| \approx \langle E_k \rangle$.

Вещество находится в газообразном состоянии, если средняя кинетическая энергия молекул превышает величину средней потенциальной энергии взаимодействия: $|\langle E_p \rangle| < \langle E_k \rangle$.

Фазовые переходы – процессы перехода вещества из одного агрегатного состояния в другое.

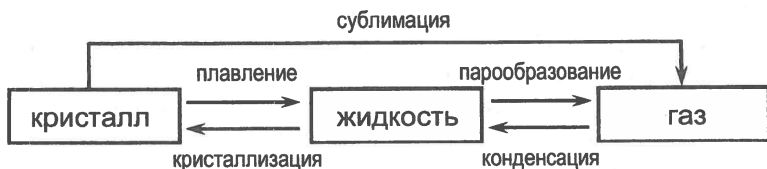


Рис. 3.1

Фазовые переходы происходят с поглощением (плавление, парообразование) или выделением энергии (кристаллизация, конденсация) рис. 3.1.

Если к кристаллическому веществу в теплоизолированной системе подводить количество теплоты Q и измерять при этом температуру T , то получим график зависимости $T(Q)$, представленный на рис. 3.2.

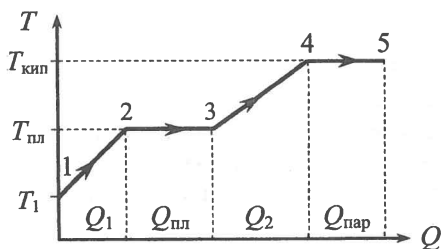


Рис. 3.2

$$Q_1 = cm \cdot (T_{\text{пл}} - T_1)$$

$$Q_{\text{пл}} = \lambda \cdot m$$

$$Q_2 = c_{\text{ж}} m \cdot (T_{\text{кип}} - T_{\text{пл}})$$

$$Q_{\text{пар}} = r \cdot m$$

Процесс 1 – 2 – нагревание кристаллического тела от температуры T_1 до температуры $T_{\text{пл}}$ плавления.

Процесс 2 – 3 – плавление кристаллического вещества ($T_{\text{пл}} = \text{const}$).

Процесс 3 – 4 – нагревание жидкости, образованной при плавлении кристаллического тела, от температуры $T_{\text{пл}}$ плавления до температуры $T_{\text{кип}}$ кипения.

Процесс 4 – 5 – парообразование жидкости ($T_{\text{кип}} = \text{const}$).

Количество теплоты, идущее на нагревание $Q = cm \cdot (T_2 - T_1)$ тела или выделяемое при его охлаждении:
(m – масса тела, c – удельная теплоемкость тела, T_2, T_1 – конечная и начальная температуры тела):

Количество теплоты $Q_{\text{пол}}$, получаемое веществом при нагревании, равно количеству теплоты $Q_{\text{отд}}$, теряемому (отданному) при его охлаждении: $Q_{\text{пол}} = Q_{\text{отд}}$

Удельная теплоемкость – количество теплоты, необходимое для нагревания 1 кг вещества на 1 К: $c = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)}$

Количество теплоты, идущее на плавление кристаллического тела нагретого до температуры плавления:

(λ – удельная теплота плавления).

Удельная теплота плавления – количество теплоты, необходимое для плавления 1 кг вещества при температуре плавления:

Количество теплоты $Q_{\text{пл}}$, получаемое веществом при плавлении, равно количеству теплоты $Q_{\text{крист}}$, теряемому при его кристаллизации:

Количество теплоты, идущее на парообразование жидкости нагретой до температуры кипения: (r – удельная теплота парообразования).

Удельная теплота парообразования (испарения) – количество теплоты, необходимое для парообразования (испарения) 1 кг жидкости при постоянной температуре (температуре кипения):

Количество теплоты $Q_{\text{конд}}$, получаемое жидкостью при конденсации, равно количеству теплоты $Q_{\text{пар}}$, теряемому при её парообразовании (испарении):

Кипение – парообразование, происходящее во всем объеме жидкости при определенной температуре.

Температура кипения – температура, при которой давление насыщенного пара жидкости начинает превосходить внешнее давление на жидкость. Температура кипения зависит от внешнего давления на жидкость и остается постоянной в процессе кипения.

Количество теплоты, выделяемое при сгорании топлива (q – удельная теплота сгорания):

Удельной теплотой сгорания называется величина, равная количеству теплоты, выделяемому при полном сгорании единицы массы вещества:

Уравнение теплового баланса. Алгебраическая сумма количеств теплоты, отданных и полученных всеми телами, участвующими в процессе теплообмена, равна нулю, при этом получаемое количество теплоты $Q_i > 0$, а отданное количество теплоты $Q_i < 0$:

$$Q_{\text{пл}} = \lambda \cdot m$$

$$\lambda = \frac{Q_{\text{пл}}}{m}$$

$$Q_{\text{пл}} = Q_{\text{крист}}$$

$$Q_{\text{пар}} = r \cdot m$$

$$r = \frac{Q}{m}$$

$$Q_{\text{конд}} = Q_{\text{пар}}$$

$$Q_{\text{сгор}} = q \cdot m$$

$$q = \frac{Q_{\text{сгор}}}{m}$$

$$\sum_i Q_i = 0$$

3.2. НАСЫЩЕННЫЙ ПАР. ВЛАЖНОСТЬ

Насыщенный пар – пар, находящийся в термодинамическом равновесии со своей жидкостью. *Скорость парообразования равна скорости конденсации.*

Давление насыщенного пара при данной температуре – максимальное давление, которое может иметь пар над жидкостью при этой температуре.

Давление насыщенного пара не зависит от свободного от жидкости объема сосуда, в котором находится пар. При изотермическом уменьшении объема насыщенного пара часть пара переходит в жидкость, давление насыщенного пара при этом не меняется.

Абсолютная влажность воздуха – величина, равная плотности ρ водяного пара в воздухе или равная парциальному давлению p водяного пара:

(ρ – абсолютная влажность (плотность) водяного пара, m – масса водяного пара в объеме V , M – молярная масса воды, p – парциальное давление водяного пара).

$$\rho = \frac{m}{V}$$

или

$$p = \frac{mRT}{MV}$$

Относительная влажность воздуха – процентное отношение плотности (парциального давления) водяного пара в воздухе к плотности (парциальному давлению) насыщенного пара при той же температуре:

(ρ , ρ_n – абсолютная влажность ненасыщенного и насыщенного водяного пара, p , p_n – парциальное давление ненасыщенного и насыщенного водяного пара, соответственно).

$$\varphi = \frac{p}{p_n} \cdot 100\%$$

или

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_n} \cdot 100\%$$

Точка росы – температура, при достижении которой ненасыщенный водяной пар становится насыщенным в результате изохорического охлаждения.

4. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Электродинамика изучает электромагнитные свойства электромагнитного поля и движения зарядов, взаимодействующих друг с другом посредством этого поля, взаимодействие заряженных частиц.

Электрический заряд – физическая величина, являющаяся источником поля, посредством которого осуществляется взаимодействие заряженных частиц.

Электростатика – раздел электродинамики, изучающий взаимодействие неподвижных (статических) электрических зарядов.

Электризация – процесс получения электрически заряженных макроскопических тел из электронейтральных.

Электрически изолированная система тел – система тел, через границу которой не проникают заряды.

Точечный заряд – заряженное тело, размер которого много меньше расстояния его возможного действия на другие тела.

Электрический заряд любой частицы является целым кратным элементарному электрическому заряду e (равному по величине заряду электрона):

$$q = \pm N \cdot |e|$$

(N – число элементарных зарядов, $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

Закон сохранения заряда. Алгебраическая сумма зарядов электрически изолированной системы постоянна:

$$\sum_{i=1}^n q_i = \text{const}$$

(n – число зарядов).

4.1. ЗАКОН КУЛОНА

Закон Кулона. Сила взаимодействия между двумя точечными зарядами (рис. 4.1), находящимися в вакууме, прямо пропорциональна произведению модулей зарядов q_1 и q_2 , обратно пропорциональна квадрату расстояния r^2 между ними и направлена по прямой, соединяющей заряды:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

или

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

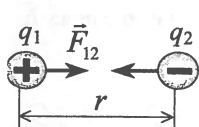


Рис. 4.1

($|q_1|$, $|q_2|$ – абсолютные величины электрических зарядов, r – расстояние между точечными зарядами, ϵ_0 – электрическая постоянная, k – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц. В СИ $k = 1/4\pi\epsilon_0 = 9 \cdot 10^9$ Н·м²/Кл²).

Сила взаимодействия между двумя точечными зарядами q_1 и q_2 (рис. 4.1), находящимися в среде с диэлектрической проницаемостью ϵ , равна:

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2}$$

Диэлектрическая проницаемость ϵ среды – число, показывающее во сколько раз напряженность E_0 электростатического поля в вакууме больше, чем напряженность E в однородном диэлектрике:

$$\epsilon = \frac{E_0}{E} = \frac{F_0}{F} \geq 1$$

Следовательно, напряженность поля в диэлектрике $E = E_0/\epsilon$. Аналогично сила взаимодействия между зарядами в среде меньше, чем в вакууме в ϵ раз, то есть $F = F_0/\epsilon$.

Напряженность электростатического поля – векторная физическая величина, равная отношению силы, с которой электростатическое поле действует на положительный пробный заряд, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

Напряженность поля – силовая характеристика электростатического поля.

Направление вектора напряженности совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд, помещенный в данную точку поля. Если поле создается положительным зарядом, то вектор напряженности \vec{E} направлен вдоль радиус-вектора от заряда во внешнее пространство; если поле создается отрицательным зарядом, то вектор \vec{E} направлен к заряду (см. рис. 4.3).

Сила электрического поля, действующая на заряд q :

$$F_{\text{эл}} = qE$$

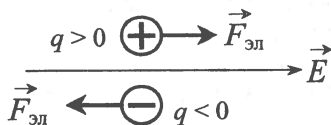


Рис. 4.2

Рис. 4.2. Направление силы $F_{\text{эл}}$, действующей на заряд q , помещенный в электрическое поле \vec{E}

Напряженность поля, создаваемая точечным зарядом Q на расстоянии r от него:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|Q|}{\epsilon r^2} = k \cdot \frac{|Q|}{\epsilon r^2}$$

($k = 1/4\pi\epsilon_0$).

* **Вектор напряженности:**

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|Q|}{\epsilon r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r} = k \cdot \frac{|Q|}{\epsilon r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$$

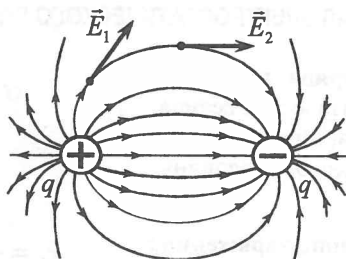


Рис. 4.3

Линии напряженности (силовые линии) — линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают с направлением напряженности электростатического поля в данной точке (рис. 4.3).

Однородное электростатическое поле — поле, векторы напряженности которого одинаковы во всех точках пространства, $\vec{E} = \text{const}$.

Принцип суперпозиции электростатических полей. Напряженность поля системы зарядов в данной точке равна геометрической (векторной) сумме напряженностей полей, созданных в этой точке каждым зарядом в отдельности:

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

или

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$$

Пример применения принципа суперпозиции, рис. 4.4

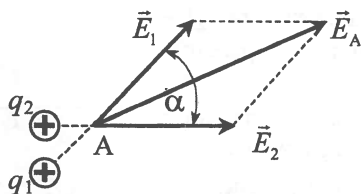


Рис. 4.4

$$E_A = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \alpha}$$

* **Теорема Остроградского — Гаусса** для электростатического поля в вакууме. Поток Φ_E вектора напряженности \vec{E} электростатического поля в вакууме сквозь произвольную замкнутую поверхность равен отношению алгебраической суммы электрических зарядов, охватываемых этой поверхностью, к электрической постоянной ϵ_0 :

$$\Phi_E = \frac{\sum q_i}{\epsilon_0}$$

* **Поток вектора напряженности** электростатического поля сквозь замкнутую поверхность: (E_n — проекция вектора напряженности на нормаль к поверхности dS).

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS$$

4.2. НАПРЯЖЕННОСТЬ И ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Поверхностная плотность заряда на равномерно заряженной плоскости – физическая величина, равная отношению заряда q , равномерно распределенного на поверхности площадью S , к величине этой площади:

$$\sigma = \frac{q}{S}$$

Напряженность поля равномерно заряженной бесконечной плоскости:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon}$$

Напряженность поля в плоском конденсаторе:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0\varepsilon}$$

Линейная плотность заряда равномерно заряженной нити – заряд q , равномерно распределенный по нити, приходящийся на единицу длины l нити:

$$\lambda = \frac{q}{l}$$

***Напряженность поля равномерно заряженной нити:**

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon r}$$

Напряженность поля равномерно заряженной сферы (R – радиус сферической поверхности, Q – общий заряд сферической поверхности r – расстояние от центра сферы).

$r < R$ (**внутри сферы**). Напряженность поля внутри равномерно заряженной сферы равна нулю:

$$E = 0$$

$r \geq R$ (**вне сферы**). Напряженность поля вне равномерно заряженной сферы равна напряженности поля точечного заряда, равного заряду сферы Q и помещенного в его центре:

$$E = k \frac{|Q|}{\varepsilon r^2}$$

Потенциал электростатического поля в данной точке – скалярная физическая величина, равная отношению потенциальной энергии W_p , которой обладает пробный положительный заряд q_0 , помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда:

$$\varphi = \frac{W_p}{q_0}$$

Второе определение потенциала

Потенциал электростатического поля в данной точке – скалярная физическая величина, определяемая работой по перемещению единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность:

$$\varphi = \frac{A_{1\infty}}{q_0}$$

Потенциал – энергетическая характеристика электростатического поля.

Эквипотенциальная поверхность – поверхность, во всех точках которой потенциал имеет одно и то же значение.

Потенциальная энергия W_p взаимодействия двух точечных зарядов находящихся на расстоянии r друг от друга:

$$W_p = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r}$$

Потенциал поля, созданного точечным зарядом Q в некоторой точке поля в вакууме:

$$\phi = k \frac{Q}{\epsilon r}$$

(r – расстояние от точки до заряда q).

Потенциал ϕ поля равномерно заряженной сферической поверхности (R – радиус сферической поверхности, Q – общий заряд сферической поверхности, r – расстояние от центра сферы, ϵ – диэлектрическая проницаемость среды в которой находится заряженная сфера):

$r \leq R$ (внутри сферы):

$$\phi = k \frac{Q}{R}$$

Потенциал поля внутри сферы одинаков во всех точках сферы.

$r \geq R$ (вне сферы):

$$\phi = k \frac{Q}{\epsilon r}$$

Работа электростатического поля по перемещению заряда q между двумя точками поля 1 и 2:

$$A = q(\phi_1 - \phi_2) = qU$$

(ϕ_1 и ϕ_2 – потенциалы точек поля, $U = (\phi_1 - \phi_2)$ – напряжение между точками 1 и 2, рис. 4.5).

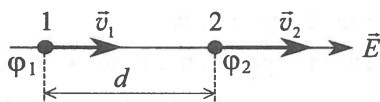


Рис. 4.5

Применение теоремы об изменении кинетической энергии ($A = \Delta E_k$), рис. 4.5:

$$q(\phi_1 - \phi_2) = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$$

(v_1, v_2 – скорости заряженной частицы массой m в точках 1 и 2).

В ускоряющем электрическом поле напряжением U_0 заряженная частица ($v_0 = 0$) приобретает энергию:

$$|q| U_0 = \frac{mv^2}{2}$$

Формула, связывающая напряженность и разность потенциалов однородного поля (рис. 4.5):

$$E = \frac{U}{d} = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{d}$$

* **Вектор напряженности электростатического поля** направлен в сторону уменьшения потенциала:

$$\vec{E} = -\text{grad}\Phi$$

4.3. ПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

По взаимодействию с электрическим полем вещества делятся на проводники, диэлектрики и полупроводники.

Проводники – вещества, содержащие свободные заряды, т. е. такие заряды, которые могут свободно перемещаться по всему объему вещества под действием электрического поля.

Диэлектрики – вещества, в которых нет или пренебрежимо мало свободных зарядов.

Полупроводник – вещество, в котором количество свободных зарядов зависит от внешних условий (температура, напряженность электрического поля и т. д.).

Проводники в электростатическом поле.

В проводнике, внесенном в электрическое поле, начинается движение зарядов. Положительные заряды перемещаются по направлению поля, отрицательные – против направления поля. Эти сместившиеся заряды создают электростатическое поле, полностью компенсирующее внешнее поле, и движение зарядов прекращается.

Суммарное поле при этом внутри проводника равно нулю ($E = 0$).

Перераспределение зарядов в проводнике под влиянием внешнего электростатического поля называется **электростатической индукцией**. Возникающие при этом заряды, численно равные друг другу, но противоположные по знакам, называются **индуцированными** или **наведенными зарядами**. Индуцированные заряды исчезают, как только поле удаляется из электрического поля.

Диэлектрики в электростатическом поле.

Электрический диполь – система, состоящая из двух равных по модулю разноименных точечных зарядов, расположенных на конечном расстоянии l друг от друга.

* **Плечо диполя** – вектор, направленный по оси диполя (прямой, проходящей через оба заряда) от отрицательного заряда к положительному и равный расстоянию между ними.

* **Дипольный момент** p равен произведение заряда q диполя на его плечо l :

$$\vec{p} = |q|\vec{l}$$
$$p = ql$$

При внесении диэлектрика в электрическое поле происходит **поляризация диэлектрика**, состоящая в том, что в любом макроскопическом малом его объеме ΔV возникает отличный от нуля суммарный дипольный электрический момент молекул. На поверхности диэлектрика появляются связанные электрические заряды, которые создают электрическое поле, напряженность которого направлена в сторону противоположную направлению напряженности внешнего поля. В результате поляризации диэлектрика напряженность поля внутри диэлектрика уменьшается (*по сравнению с полем в вакууме в ϵ раз*).

Связанные заряды – разноименные заряды, входящие в состав атомов (или молекул), которые не могут перемещаться под действием электрического поля независимо друг от друга.

Поляризация диэлектрика – процесс ориентации диполей или появление под действием электрического поля ориентированных по полю диполей.

4.4. ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ. КОНДЕНСАТОРЫ

Электрическая емкость (электроемкость) C **уединенного проводника** – физическая величина, равная отношению заряда q проводника к потенциалу ϕ этого проводника:

$$C = \frac{q}{\phi}$$

Конденсатор – система двух проводников, предназначенная для накопления электрических зарядов с равными по величине и противоположными по знаку зарядами. *Электрическое поле, созданное этими проводниками, сосредоточено в пространстве между ними.*

Заряженный конденсатор – система двух проводников, с равными по величине и противоположными по знаку зарядами.

Зарядом конденсатора считают абсолютное значение заряда одной из обкладок.

Электрическая емкость (электроемкость) C конденсатора – физическая величина, равная отношению заряда q одного из проводников к разности потенциалов U между этим проводником и соседним:

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

Емкость плоского конденсатора: (S – площадь пластины конденсатора, d – расстояние между пластинами, ϵ_0 – электрическая постоянная, ϵ – диэлектрическая проницаемость среды).

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$$

Емкость шарового проводника: (R – радиус шара).

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R$$

Емкость батареи n параллельно соединенных конденсаторов, рис. 4.6:

$$C_{\text{пар}} = \sum_{i=1}^n C_i$$

(C_i – емкость отдельного конденсатора).

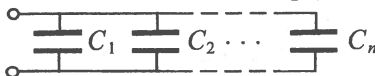


Рис. 4.6

Если $C_1 = C_2 = \dots = C$, то общая емкость n параллельно соединенных одинаковых конденсаторов:

$$C_{\text{пар}} = n \cdot C$$

При параллельном соединении на конденсаторах – одинаковое напряжение, но разные заряды.

Емкость батареи n последовательно соединенных конденсаторов, рис. 4.7:

$$\frac{1}{C_{\text{посл}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

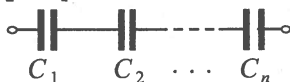


Рис. 4.7

Если $C_1 = C_2 = \dots = C$, то общая емкость n последовательно соединенных одинаковых конденсаторов:

$$C_{\text{посл}} = C/n$$

При последовательном соединении обкладки предыдущего и последующего конденсаторов составляют один проводник. Эти проводники электрически нейтральны, поэтому заряды всех конденсаторов одинаковы ($q_1 = q_2 = \dots = q_n$). Разность потенциалов на батарее $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$.

Энергия электростатического поля конденсатора:

$$W = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

(q – заряд на пластине конденсатора, C – емкость конденсатора, U – напряжение между пластинами конденсатора).

Объемная плотность энергии электростатического поля – физическая величина, равная энергии W электростатического поля, сосредоточенного в единице объема.

$$w = \frac{W}{V}$$

или

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

5. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Электрический ток – упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц или заряженных макроскопических тел.

За направление тока принимают направление упорядоченного движения положительно заряженных частиц, т. е. направление тока совпадает с направлением напряженности электрического поля, вызывающего этот ток.

Различают два вида электрических токов: токи проводимости и конвекционные токи.

Электрический ток проводимости – упорядоченное движение в веществе или вакууме свободных заряженных частиц – носителей тока.

Носителями тока в металлах являются электроны, в электролитах – ионы, ионизованных газах – электроны и ионы, в полупроводниках – электроны и дырки, в вакууме – пучки электронов или ионов.

5.1. СИЛА И ПЛОТНОСТЬ ТОКА

Электрический ток характеризуется силой тока I и плотностью тока \vec{j} .

Постоянный электрический ток – ток, сила и направление которого не изменяются с течением времени:

$$I = \frac{q}{t}$$

Сила тока – скалярная физическая величина, определяемая электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника за единицу времени:

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Плотность тока – физическая величина численно равная силе тока I через единицу площади S поперечного сечения, проводника перпендикулярного направлению тока:

$$j = \frac{I}{S}$$

Плотностью тока называется вектор \vec{j} , ориентированный по направлению тока, т. е. направление вектора \vec{j} , совпадает с направлением средней скорости упорядоченного движения положительных зарядов: (n – концентрация носителей тока, $\langle \vec{v} \rangle$ – средняя скорость упорядоченного движения (дрейфовая скорость) зарядов q_0).

$$\vec{j} = q_0 n \langle \vec{v} \rangle$$

Плотность тока в металлах: $j = en\langle v \rangle$, где e – абсолютное значение заряда электрона.

5.2. ЗАКОНЫ ОМА

Для поддержания постоянного тока проводимости в замкнутой цепи на заряды должны, помимо кулоновских сил, действовать силы, отличные от сил электростатического поля, называемые **сторонними**. Устройство, в котором сторонние силы производят работу, называют **источником (генератором) тока**.

Электродвижущая сила (ЭДС) – скалярная физическая величина, равная отношению работы сторонних сил $A_{ст}$ по перемещению единичного положительного заряда от отрицательного полюса источника к положительному:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q}$$

Закон Ома для замкнутой цепи с одним источником тока. Сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС источника и обратно пропорциональна сумме внешнего R и внутреннего r сопротивлений:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

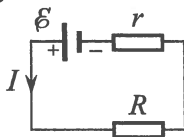


Рис. 5.1

На рис. 5.1: \mathcal{E} – ЭДС источника постоянного тока, R – сопротивление внешнего участка цепи, r – сопротивление источника тока.

Закон Ома для замкнутой цепи с несколькими последовательно соединенными источниками тока: ($R_{п} = R + \sum r_i$ – полное сопротивление цепи, $\sum \mathcal{E}_i$ – алгебраическая сумма ЭДС).

$$I = \frac{\sum \mathcal{E}_i}{R_{п}}$$

Закон Ома для замкнутой цепи при последовательном соединении n одинаковых источников тока:

$$I = \frac{n \mathcal{E}_i}{R + nr}$$

Закон Ома для замкнутой цепи при параллельном соединении n одинаковых источников тока:

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R + r/n}$$

Закон Ома для однородного участка цепи. Сила тока в однородном проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению U и обратно пропорциональна сопротивлению проводника R :

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

Напряжение U равно разности потенциалов между концами однородного проводника.

Напряжением (падением напряжения) на

участке 1–2 цепи с источником тока (рис. 5.2) называется физическая величина, определяемая работой, совершаемой суммарным полем электростатических (кулоновских) и сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда на данном участке цепи.

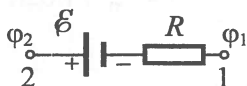


Рис. 5.2

Напряжение на участке цепи равно разности потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2)$ только в том случае, если на этом участке не приложена ЭДС \mathcal{E} :

$$U_{2-1} = \frac{A_{1-2}}{q} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи (участка цепи с источником ЭДС \mathcal{E} , рис. 5.2):

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}}{R}$$

Сила тока прямо пропорциональна сумме падения электрического потенциала на этом участке и ЭДС всех источников электрической энергии, включенных на рассматриваемом участке и обратно пропорциональна сопротивлению участка.

5.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Сопротивление однородного проводника:

(ρ – удельное сопротивление проводника, l и S – длина и площадь поперечного сечения проводника).

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Удельное сопротивление – скалярная физическая величина, численно равная сопротивлению однородного цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади поперечного сечения:

$$\rho = R \frac{S}{l}$$

Удельное сопротивление зависит от материала, из которого изготовлен проводник и от температуры.

***Электрическая проводимость** – скалярная физическая величина обратная сопротивлению проводника:

$$G = \frac{1}{R}$$

Удельное сопротивление металлического проводника линейно возрастает с температурой:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta T)$$

(ρ , ρ_0 – удельное сопротивление проводника при температуре T и $T_0 = 273$ К соответственно, α – температурный коэффициент сопротивления, $\Delta T = T - T_0$).

Учитывая, что температурный коэффициент линейного расширения металлов значительно меньше температурного коэффициента сопротивления, можно считать, что и **сопротивление металлического проводника** линейно возрастает с температурой:

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T)$$

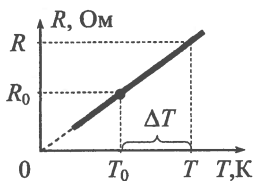


Рис. 5.3

Рис. 5.3. Зависимость сопротивления металлического проводника от температуры: R и R_0 – сопротивление проводника при температуре T и $T_0 = 273$ К соответственно

Сверхпроводимость – физическое явление, заключающееся в том, что у многих химических элементов, соединений, сплавов (называемых сверхпроводниками) при охлаждении ниже критической (характерной для данного материала) температуры наблюдается переход из нормального состояния в так называемое сверхпроводящее состояние, в котором их электрическое сопротивление постоянному току полностью отсутствует. Критическая температура для металлов составляет 1 – 20 К. При этом переходе структурные и оптические (в области видимого света) свойства сверхпроводников остаются практически неизменными. Электрические и магнитные свойства вещества в сверхпроводящем состоянии (фазе) резко отличаются от этих же свойств в нормальном состоянии.

* **Электрический ток в сверхпроводнике** обусловлен согласованным движением куперовских пар электронов.

Резистор – техническое устройство, выполняющее функцию электрического сопротивления.

При последовательном соединении проводников – (резисторов) вследствие закона сохранения заряда – сила тока в проводниках будет одинаковой.

При параллельном соединении проводников (резисторов) – вследствие потенциальности электростатического поля – разность потенциалов на каждом проводнике будет одинакова.

Сопротивление $R_{\text{посл}}$ участка цепи из n последовательно соединенных проводников (рис. 5.4):

$$R_{\text{посл}} = \sum_{i=1}^n R_i$$

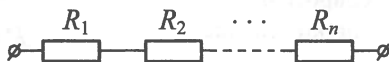


Рис. 5.4

Если $R_1 = R_2 = \dots = R_i = \dots = R$:
(R_i – сопротивление i – го проводника).

$$R_{\text{посл}} = n \cdot R$$

Сопротивление $R_{\text{пар}}$ участка цепи из n параллельно соединенных проводников (рис. 5.5):

$$\frac{1}{R_{\text{пар}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

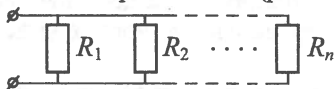


Рис. 5.5

Если $R_1 = R_2 = \dots = R_i = \dots = R$:
(R_i – сопротивление i – го проводника).

$$R_{\text{пар}} = R/n$$

Шунт – проводник, присоединяемый параллельно амперметру для увеличения предела его измерений. **Амперметр** – прибор для измерения силы электрического тока.

Дополнительное сопротивление – проводник, присоединяемый последовательно с вольтметром для увеличения предела его измерений. **Вольтметр** – прибор для измерения электрического напряжения.

5.4. РАБОТА И МОЩНОСТЬ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Работа постоянного электрического тока.

$$A = qU = IUt$$

При перемещении заряда q по проводнику электрическое поле совершает работу A за время t :

$$Q = A$$

Работа A , совершаемая электрическим током при упорядоченном движении зарядов в покоем проводнике равна количеству теплоты Q , выделяющееся в проводнике с током:

Закон Джоуля - Ленца. Количество теплоты, выделяемое в проводнике с током пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению R проводника и времени t прохождения по нему тока:

$$Q = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t$$

(U – падение напряжения в проводнике).

Мощность постоянного электрического тока – работа, совершаемая током за единицу времени:

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

Полная мощность источника тока: (\mathcal{E} – ЭДС источника тока, R – сопротивление внешнего участка цепи, r – сопротивление источника тока).

$$P = I\mathcal{E} = I^2 (R + r)$$

$$P = \frac{\mathcal{E}^2}{R + r}$$

5.5. ТОК В ЖИДКОСТЯХ

Электролиты – вещества, растворы и расплавы которых обладают ионной проводимостью.

Электролитическая диссоциация – расщепление молекул электролита на положительные и отрицательные ионы под действием растворителя.

Электролиз – выделение на электродах веществ, входящих в состав электролита, при протекании через его раствор (или расплав) электрического тока.

Первый закон электролиза (первый закон Фарадея) – масса m вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна заряду q , прошедшему через электролит:

$$m = kq$$

(k – электрохимический эквивалент вещества).

Закон Фарадея при $I = \text{const}$:

$$m = kI$$

* Если ток изменяется со временем, т. е. $I = I(t)$:

$$m = k \int Idt$$

Второй закон электролиза (второй закон Фарадея) – электрохимические эквиваленты веществ прямо пропорциональны отношениям их молярных (атомных) масс M к валентности n :

$$k = \frac{1}{F} \frac{M}{n}$$

Объединенный закон электролиза Фарадея:

(M и n – молярная масса и валентность химического элемента, $F = 96500$ Кл/моль – постоянная Фарадея).

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} q$$

5.6. ПОЛУПРОВОДНИКИ

Полупроводники – вещества, удельное электрическое сопротивление которых может изменяться в широких пределах и резко по экспоненциальному закону убывает с повышением температуры.

В полупроводниках концентрация подвижных носителей заряда значительно ниже, чем концентрация атомов, и может изменяться под влиянием температуры, освещения или относительно малого количества примесей. Эти свойства, а также увеличение проводимости с ростом температуры, качественно отличают полупроводники от металлов.

Электрический ток в полупроводниках обусловлен движением электронов и дырок (электронно-дырочная проводимость).

Сопротивление полупроводников с увеличением температуры уменьшается по экспоненциальному закону.

Собственная проводимость – проводимость чистых полупроводников в отсутствие примесей. Собственная проводимость определяется свойствами самого полупроводника.

Примесная проводимость – проводимость полупроводников, обусловленная внесением в их кристаллические решетки примесей. Различают донорные (n -типа) и акцепторные (p -типа) примеси.

Дырка – вакантное электронное состояние в кристаллической решетке, имеющее избыточный положительный заряд.

p - n -переход – контактный слой двух примесных полупроводников p - и n -типа.

Запирающий слой – двойной слой разноименных электрических зарядов, создающий электрическое поле на p - n -переходе, препятствующее свободному разделению зарядов.

Полупроводниковый диод – элемент электрической системы, содержащий p - n -переход и два вывода для включения в электрическую цепь. Диоды обладают односторонней проводимостью.

Транзистор – полупроводниковый прибор с двумя p - n -переходами и тремя выводами для включения в электрическую цепь. Транзисторы способны усиливать электрические сигналы.

6. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

6.1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Магнитное поле – силовое поле в пространстве, окружающем токи и постоянные магниты. Магнитное поле создается только движущимися зарядами и воздействует на движущиеся заряды, другие проводники с током и постоянные магниты.

Вектор магнитной индукции \vec{B} – векторная физическая величина, характеризующая магнитное поле.

Модуль вектора индукции однородного магнитного поля равен наибольшей силе, которая действует на помещенный в это поле проводник единичной длины, по которому протекает ток в единицу силы тока (см. закон Ампера).

Магнитная индукция численно равна отношению силы, действующей на заряженную частицу со стороны магнитного поля, к произведению абсолютного значения заряда и скорости частицы, если направление скорости частицы таково, что эта сила максимальна (см. сила Лоренца).

Направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением северного полюса свободной магнитной стрелки в данной точке, т. е. вектор магнитной индукции \vec{B} направлен от северного полюса к южному полюсу, рис. 6.1.

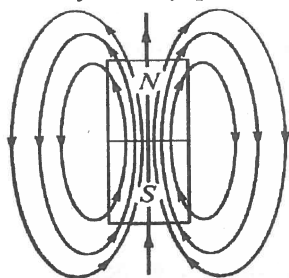


Рис. 6.1

Рис. 6.1. Магнитное поле постоянного магнита в виде стержня: N – северный полюс; S – южный полюс

Линии со стрелками – силовые линии магнитного поля. Линии замыкаются в окружающем пространстве.

Линии магнитной индукции – линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции \vec{B} в этой точке.

Линии магнитной индукции всегда замкнуты: они не имеют начала и конца.

Магнитное поле – вихревое поле, т. е. поле с замкнутыми линиями магнитной индукции.

Однородное магнитное поле – поле, для которого в некоторой области пространства вектор магнитной индукции остается постоянным по величине и направлению, $\vec{B} = \text{const}$.

Магнитное поле B бесконечного прямого проводника с током I :

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2r}$$

(μ – магнитная проницаемость среды, μ_0 – магнитная постоянная, r – расстояние от оси проводника).

Вокруг бесконечного прямого проводника с током существует магнитное поле, линии магнитной индукции которого представляют собой концентрические окружности в плоскости перпендикулярной проводу, рис. 6.2, а.

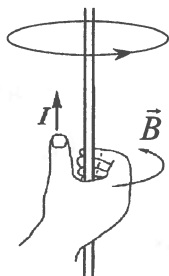


Рис. 6.2, а. Иллюстрация правила правой руки (правого винта)

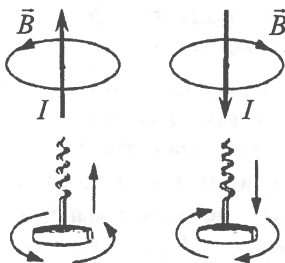


Рис. 6.2, б. Иллюстрация правила буравчика

Направление линии магнитной индукции определяется по правилу буравчика (правило правого винта, рис. 6.2, б).

Правило буравчика. Если буравчик с правой нарезкой ввинчивать по направлению тока (I), то направление вращения рукоятки совпадет с направлением вектора индукции магнитного поля (\vec{B}).

Принцип суперпозиции. Результирующий вектор магнитной индукции \vec{B} в данной точке складывается из векторов магнитной индукции, созданной различными токами в этой точке ($\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$):

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$$

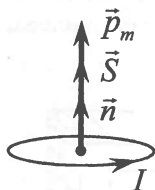


Рис. 6.3

* **Магнитный момент контура с током:**

(\vec{S} – вектор, равный по модулю площади S , охватываемой контуром, и совпадающей по направлению с нормалью \vec{n} к его плоскости (рис. 6.3). Направление нормали определяется по правилу буравчика (рис. 6.2, б).

$$\vec{p}_m = I\vec{S} = IS\vec{n}$$

* **Модуль магнитного момента контура с током:**

$$p_m = IS$$

Вращающий момент. Момент сил, действующий на контур с током, помещенный в магнитное поле:

(S – площадь рамки, α – угол между векторами \vec{p}_m и \vec{B} или между вектором \vec{B} и нормалью \vec{n} к плоскости контура).

Вращающий момент, действующий на плоскую катушку с током в магнитном поле:

(N – число витков катушки, I – сила тока в катушке, S – площадь поперечного сечения катушки, α – угол между вектором магнитной индукции \vec{B} и осью катушки, M_{\max} – максимальный вращающий момент ($\alpha = 90^\circ$)).

$$M = ISB \sin \alpha$$

или

$$* \vec{M} = \left[\vec{p}_m \vec{B} \right]$$

$$M = NIBS \sin \alpha$$

$$M_{\max} = NIBS$$

6.2. СИЛА АМПЕРА И СИЛА ЛОРЕНЦА

Закон Ампера. Сила dF_A , с которой магнитное поле действует на помещенный в него отрезок проводника с током, равна произведению силы тока I , модуля вектора магнитной индукции B , длины отрезка проводника dl и синуса угла α между направлением тока и магнитной индукции:

$$dF_A = IBdl \sin \alpha$$

Сила Ампера, с которой однородное магнитное поле действует на помещенный в него прямолинейный отрезок проводника с током:

$$F_A = IBl \sin \alpha$$

Правило левой руки. Если кисть левой руки расположить так, чтобы четыре вытянутых пальца указывают направление тока в проводнике, а вектор магнитной индукции входит в ладонь, то отогнутый (в плоскости ладони) на 90° большой палец показывает направление силы Ампера, действующей на отрезок проводника (рис. 6.4).

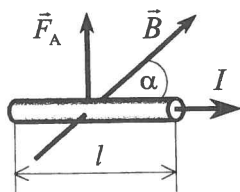


Рис. 6.4, а

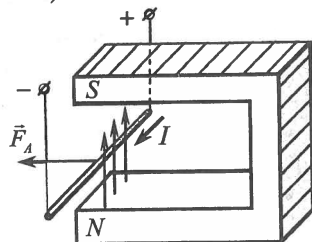


Рис. 6.4, б

Модуль вектора магнитной индукции – физическая величина, равная отношению максимальной силы $(F_A)_{\max}$, действующей со стороны магнитного поля на отрезок проводника с током, к произведению силы тока I на длину отрезка l проводника:

$$B = \frac{(F_A)_{\max}}{Il}$$

Сила взаимодействия бесконечно длинных параллельных проводников, по которым протекают постоянные токи:

$$F = \mu\mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi d}$$

(d – расстояние между параллельными проводниками с токами I_1 и I_2).

Проводники с одинаково направленными токами притягиваются, с противоположно направленными токами отталкиваются.

Действие силы Ампера \vec{F}_A на проводник с током определяется суммарным действием сил Лоренца на отдельные заряды, движущиеся в проводнике.

Сила Лоренца – сила, действующая на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля.

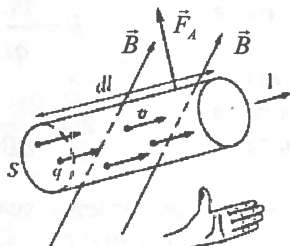


Рис. 6.6

Направление силы Лоренца определяется правилом левой руки (рис. 6.6): если ладонь левой руки расположить так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь, а четыре вытянутых пальца направить вдоль вектора скорости \vec{v} частицы (для положительно заряженных частиц направления силы тока и скорости совпадают, а для $q < 0$ – противоположны), то отогнутый большой палец покажет направление силы, действующей на положительный заряд.

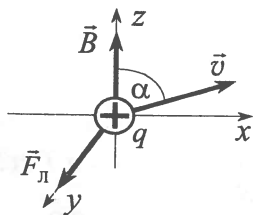


Рис. 6.7, а

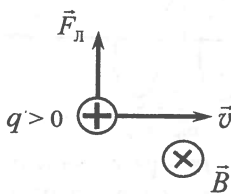


Рис. 6.7, б

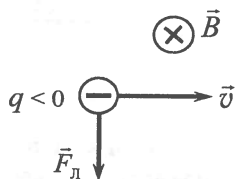


Рис. 6.7, в

Сила Лоренца \vec{F}_L перпендикулярна векторам \vec{v} и \vec{B} , рис. 6.7.

Величина силы Лоренца – пропорциональна заряду q частицы, скорости v ее движения, магнитной индукции B поля и синусу угла между направлением скорости \vec{v} и вектора магнитной индукции \vec{B} , рис. 6.7, а:

$$F_{\text{Л}} = qvB \sin \alpha$$

6.3. ТРАЕКТОРИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ, ПРИ ОТСУТСТВИИ ВНЕШНИХ СИЛ

1. **Прямолинейное равномерное движение** наблюдается, если заряженная частица влетает в магнитное поле параллельно силовым линиям. Сила Лоренца в этом случае равна нулю.

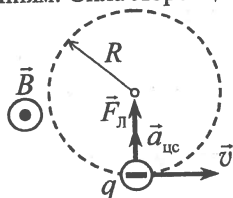


Рис. 6.8

2. **Равномерное движение по окружности** наблюдается, если заряженная частица влетает в магнитное поле перпендикулярно силовым линиям магнитного поля ($\alpha = \pi/2$, рис. 6.8).

Радиус вращения заряженной частицы в магнитном поле ($\alpha = \pi/2$):
(m – масса заряженной частицы, q – заряд частицы).

$$R = \frac{mv}{qB}$$

Период вращения заряженной частицы в магнитном поле – время, затраченное частицей на один полный оборот:

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

3. **Равномерное движение по винтовой линии** наблюдается, если заряженная частица влетает в магнитное поле под углом α ($0 < \alpha < \pi/2$) к силовым линиям магнитного поля, рис. 6.9.

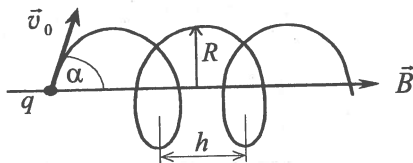


Рис. 6.9

Шаг силовой линии – расстояние h , пройденное вдоль силовой линии за один период, рис. 6.9:
(v_0 – скорость частицы массой m и зарядом q , T – период вращения частицы, α – угол между вектором скорости \vec{v}_0 и вектором магнитной индукции \vec{B}).

$$h = v_0 T \cos \alpha$$

$$h = 2\pi \frac{mv_0}{qB} \cos \alpha$$

Радиус винтовой линии (рис. 6.9):

$$R = \frac{mv \sin \alpha}{qB}$$

* **Формула Лоренца** определяет результирующую силу, действующую на движущийся заряд q со стороны электрического поля напряженностью \vec{E} и магнитного поля индукцией \vec{B} :

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}\vec{B}]$$

6.4. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Все вещества при рассмотрении их магнитных свойств принято называть **магнетиками**.

По своим магнитным свойствам магнетики подразделяются на три основные группы: **диамагнетики**, **парамагнетики** и **ферромагнетики**.

Магнитная проницаемость среды – физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля B в однородной среде отличается от магнитной индукции B_0 внешнего (намагничивающего) поля в вакууме:

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

Магнитная проницаемость среды может быть больше, меньше и равна единице.

Диамагнетик – вещество, у которого вектор индукции собственного магнитного поля \vec{B}_c , направленный противоположно вектору магнитной индукции внешнего (намагничивающего) поля \vec{B}_0 , значительно меньше его по модулю:

$$\vec{B}_c \uparrow \downarrow \vec{B}_0$$

$$B_c \ll B_0$$

Величина магнитной индукции в диамагнетике:

$$B = B_0 - B_c$$

В диамагнетике $\mu \leq 1$.

Парамагнетик – вещество, у которого вектор индукции собственного магнитного поля \vec{B}_c , сонаправленный с вектором магнитной индукции внешнего (намагничивающего) поля \vec{B}_0 , меньше его по модулю:

$$\vec{B}_c \uparrow \uparrow \vec{B}_0$$

$$B_c < B_0$$

Величина магнитной индукции в парамагнетике:

$$B = B_0 + B_c$$

В парамагнетике $\mu \geq 1$.

Ферромагнетик – вещество, у которого вектор индукции собственного магнитного поля \vec{B}_c , сонаправленный с вектором магнитной индукции внешнего (намагничивающего) поля \vec{B}_0 , значительно превышает его по модулю:

В ферромагнетике $\mu \gg 1$.

Температура Кюри (точка Кюри) – критическая температура, выше которой происходит переход вещества из ферромагнитного состояния в парамагнитное.

6.5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Магнитный поток (поток магнитной индукции Φ) через поверхность площадью S – физическая величина, равная скалярному произведению вектора магнитной индукции \vec{B} на вектор площади \vec{S} .

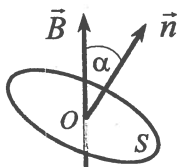


Рис. 6.10

α – угол между вектором магнитной индукции \vec{B} и нормалью \vec{n} к поверхности S

Индуктивность контура (или коэффициент самоиндукции) – физическая величина, равная коэффициенту пропорциональности L между магнитным потоком Φ через площадь, ограниченную контуром проводника, и силой тока I в контуре:

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле:

($\Delta\Phi$ – магнитный поток, пересеченный этим проводником, I – сила тока в проводнике).

Электромагнитная индукция – физическое явление, заключающееся в возникновении электрического тока в замкнутом контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром.

$$\vec{B}_c \uparrow \uparrow \vec{B}_0$$

$$B_c \gg B_0$$

$$\Phi = (\vec{B} \cdot \vec{S})$$

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

$$\Phi = L \cdot I$$

$$A = I \cdot \Delta\Phi$$

Закон электромагнитной индукции (или закон Фарадея – Максвелла) – ЭДС электромагнитной индукции в замкнутом контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром: ($\langle \mathcal{E}_i \rangle$) и \mathcal{E}_i – мгновенное и среднее значение ЭДС).

$$\langle \mathcal{E}_i \rangle = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

или

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

ЭДС индукции не зависит от способа изменения магнитного потока.

Всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле, которое и является причиной возникновения индукционного тока в проводнике.

Правило Ленца. Индукционный ток в контуре имеет такое направление, что созданный им магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, препятствует изменению магнитного потока, вызвавшего этот ток.

ЭДС индукции в катушке, состоящей из N витков:

$$\langle \mathcal{E}_i \rangle = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

или

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

ЭДС индукции, возникающая на концах проводника, движущегося в стационарном однородном магнитном поле:

(v – скорость движения прямого проводника длиной l , α – угол между направлением скорости \vec{v} и вектором магнитной индукции \vec{B}).

$$\mathcal{E}_i = vBl \sin \alpha$$

ЭДС индукции, возникающая в рамке площадью S при вращении рамки с угловой скоростью ω в однородном магнитном поле, индукция которого \vec{B} : (ωt – мгновенное значение угла между вектором \vec{B} и нормалью к плоскости рамки \vec{n}).

$$\mathcal{E}_i = BS\omega \sin \omega t$$

Самоиндукция – возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нем силы тока.

ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения силы тока:

($\langle \mathcal{E}_{si} \rangle$ и \mathcal{E}_{si} – среднее и мгновенное значение ЭДС самоиндукции, $\Delta I/\Delta t$, dI/dt – средняя и мгновенная скорость изменения тока в катушке, L – индуктивность катушки).

$$\langle \mathcal{E}_{si} \rangle = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

или

$$\mathcal{E}_{si} = -L \frac{dI}{dt}$$

* **Индуктивность соленоида** длиной l и площадью сечения витка S с общим числом витков N :
 (μ_0 – магнитная постоянная, μ – магнитная проницаемость среды, $n = N/l$ – число витков на единицу длины, $V = Sl$ – объем соленоида).

$$L = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{l}$$

$$L = \mu\mu_0 n^2 V$$

Энергия магнитного поля катушки с током I и индуктивностью L :

$$W_m = \frac{L I^2}{2}$$

7. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

7.1. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Колебания – движения или процессы, которые характеризуются определенной повторяемостью во времени.

Колебаться могут только те системы, энергия которых может быть выражена как сумма двух и более видов энергии (например, кинетической и потенциальной).

7.1.1. Гармонические колебания

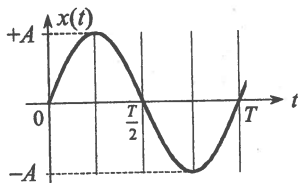


Рис. 7.1

Рис. 7.1. Гармонические колебания – колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем косинусоидально (или синусоидально)

Уравнение гармонического колебания:

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

или

$$x(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$x(t)$ – отклонение колеблющейся величины (например, смещение материальной точки от положения равновесия в момент времени t), A – амплитуда колебания, $\varphi = (\omega_0 t + \varphi_0)$ – фаза колебания в момент времени t , ω_0 – циклическая (круговая) частота колебания, φ_0 – начальная фаза колебания (при $t = 0$); $A = \text{const}$, $\omega_0 = \text{const}$, $\varphi_0 = \text{const}$.

Амплитуда колебаний – максимальное отклонение A колеблющейся величины от положения равновесия.

Частота колебаний – величина, равная числу колебаний N , совершаемых в единицу времени:

$$\nu = \frac{N}{t}$$

Период колебаний – интервал времени T , в течение которого происходит одно полное колебание (или наименьший промежуток времени, через который система, совершающая колебания, снова возвращается в то же состояние, в котором она находилась в начальный момент, выбранный произвольно):

$$T = \frac{t}{N} = \frac{1}{\nu}$$

Фаза колебаний – аргумент периодически изменяющейся функции, описывающей колебательный или волновой процесс:

$$\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$$

$$\varphi = \frac{2\pi}{T} t + \varphi_0$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$$

Круговая (циклическая) частота колебания – число колебаний, которое совершается за 2π единиц времени:

Скорость колеблющейся точки, если смещение точки изменяется по синусоидальному закону $x(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$:

$$v(t) = \frac{dx}{dt} =$$

$$= A\omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$v_{\max} = A\omega_0$$

Максимальная скорость точки – амплитуда скорости:

Ускорение гармонического колебания, если смещение точки изменяется по синусоидальному закону $x(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$:

$$a(t) = \frac{dv}{dt} =$$

$$= -A\omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$a_{\max} = A\omega_0^2$$

Максимальное ускорение точки – амплитуда ускорения:

Сила, действующая на колеблющуюся материальную точку массой m :

$$F = -kx = -m\omega_0^2 x$$

Знак “минус” отражает тот факт, что сила направлена к положению равновесия, т. е. противоположно смещению x от положения равновесия.

*** Дифференциальное уравнение гармонических колебаний:**

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$$

Свободные (собственные) колебания – колебания, происходящие под действием внутренних сил в системе, выведенной из положения равновесия и представленной самой себе, т. е. колебания, совершаемые системой за счет собственного запаса энергии при отсутствии внешних воздействий на систему.

Вынужденные колебания – колебания, происходящие под действием внешней периодической силы.

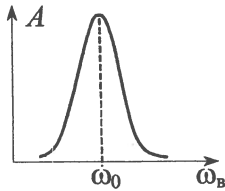


Рис. 7.2

Резонанс – явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты ω_b внешней силы с частотой ω_0 собственных колебаний системы, рис. 7.2 (при отсутствии силы трения).

Условие резонанса:

$$\omega_b = \omega_0$$

Примером колебательных систем служат маятники – тела (или система тел), совершающие колебания, приближенные к гармоническим колебаниям.

Кинетическая энергия материальной точки, совершающей гармонические колебания по закону $x(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$:

$$E_k = \frac{m\dot{x}^2}{2} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \frac{mA^2\omega_0^2}{4} (1 + \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0)).$$

Потенциальная энергия материальной точки, совершающей гармонические колебания под действием упругой силы F :

$$\begin{aligned} E_p &= -\int_0^x F_x dx = \frac{m\omega_0^2 x^2}{2} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \\ &= \frac{mA^2\omega_0^2}{4} (1 - \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0)). \end{aligned}$$

Из выше приведенных уравнений можно сделать вывод, что кинетическая энергия и потенциальная энергии материальной точки периодически изменяются от 0 до $\frac{mA^2\omega_0^2}{2}$, совершая гармонические колебания с циклической частотой $2\omega_0$ и амплитудой $\frac{mA^2\omega_0^2}{2}$.

Механическая энергия W материальной точки, совершающей гармонические колебания:

$$W = E_p + E_k = \text{const}$$

$$W = \frac{mA^2\omega_0^2}{2} = \text{const}$$

7.1.2. Математический маятник

Математический маятник – идеализированная система, состоящая из материальной точки массой m подвешенной на невесомой нерастяжимой нити (рис. 7.3) и совершающей колебания в вертикальной плоскости под действием силы тяжести mg .

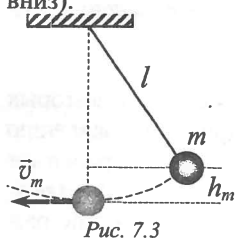
Период математического маятника:

а) в инерциальной системе отсчета:
(l – длина маятника, g – ускорение свободного падения).

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

б) в неинерциальной системе отсчета:
("плюс", если система движется с ускорением \vec{a} , направленным вверх, и "минус", если система движется с ускорением \vec{a} , направленным вниз).

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g \pm a}}$$



Закон сохранения механической энергии при колебаниях математического маятника:

(h_m – максимальная высота подъема груза, v_m – максимальная скорость груза).

$$W = mgh_m = \frac{mv_m^2}{2} =$$

$$= mgh + \frac{mv^2}{2} = \text{const}$$

7.1.3. Пружинный маятник

Пружинный маятник – система из груза массой m , прикрепленного к упругой пружине (рис. 7.4), совершающая гармонические колебания под действием упругой силы пружины ($F = -kx$).

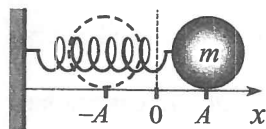


Рис. 7.4

Период и циклическая частота колебаний пружинного маятника:

(m – масса груза, прикрепленного к пружине, k – жесткость пружины, ω – циклическая частота).

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$k = m\omega^2$$

Закон сохранения механической энергии при колебаниях пружинного маятника: $W = \frac{kA^2}{2} = \frac{mv_m^2}{2} =$
 (A – амплитуда колебаний, v_m – максимальная скорость груза, x, v – смещение и скорость груза). $= \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = \text{const}$

7.1.4. Механические волны

Волновой процесс (или волна) – процесс распространения колебаний в пространстве.

Основным свойством всех волн, независимо от их природы, является перенос энергии без переноса вещества.

Поверхность, разделяющее пространство на части, где есть колебания и где они еще не возникли, называют **волновым фронтом**.

Геометрическое место точек, в которых фаза колебаний имеет одно и тоже значение, называют **волновой поверхностью или фронтом волны**.

Механическая волна – возмущение, распространяющееся в упругой среде.

Скорость механической волны – скорость распространения возмущения в среде.

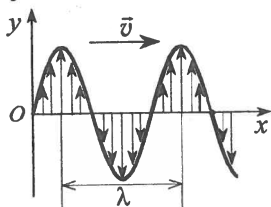


Рис. 7.5

Поперечные волны – волны, в которых колебания перпендикулярны направлению распространения волны. (Поперечные механические волны распространяются только в твердых телах и на границе раздела двух сред).

Продольные волны – волны, в которых колебания происходят в направлении распространения волны. (Распространяются в упругих средах: твердых, жидких, газообразных).

Гармоническая волна – волна, порожденная гармоническими колебаниями частиц среды.

Поляризация – упорядоченность направления колебаний частиц среды в волне.

Плоскость поляризации – плоскость, в которой колеблются частицы среды в волне.

Линейно-поляризованная механическая волна – волна, частицы которой колеблются вдоль определенного направления (линии).

Уравнение гармонической линейно-поляризованной волны, распространяющейся в положительном направлении оси x : $y(x,t)$ – смещение от положения равновесия точки с координатой x в момент времени t , рис. 7.5).

$$y(x,t) = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

или

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

$$\lambda = vT$$

Длина волны – минимальное расстояние между точками, колеблющимися в одинаковой фазе, или расстояние, которое проходит волна за время, равное периоду T колебаний (рис. 7.5):

Связь между длиной волны λ , скоростью v распространения волны и периодом T (или частотой ν):

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu$$

Скорость распространения синусоидальной волны называется **фазовой скоростью**, она равна скорости перемещения в пространстве точек поверхности соответствующей любому фиксированному значению фазы синусоидальной волны.

Стоячая волна – волна, образующаяся в результате наложения двух бегущих синусоидальных волн, распространяющихся навстречу друг другу и имеющих одинаковые частоты и амплитуды, а в случае поперечных волн еще и одинаковую поляризацию.

В отличие от бегущей волны, в стоячей волне не происходит переноса энергии, а осуществляется лишь пространственная перекачка энергии одного вида в энергию другого вида с удвоенной частотой.

Пучности стоячей волны – положения точек, имеющих максимальную амплитуду колебаний.

Узлы стоячей волны – неподвижные точки волны, амплитуда колебаний которых равна нулю.

Звуковые волны – упругие волны в среде вызывающие у человека слуховые ощущения.

Диапазон частот звуковых волн – от 16 до 20 000 Гц. Звуковые волны характеризуются высотой звука (частотой колебаний), тембром (формой колебаний) и громкостью (амплитудой колебаний).

Интенсивность звука – отношение падающей на поверхность звуковой мощности к площади этой поверхности.

* **Интенсивность звука или сила звука** – средняя по времени энергия, переносимая звуковой волной через единичную площадку, перпендикулярную к направлению распространения волны, в единицу времени:

$$J = \frac{1}{S} \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

(ΔW – энергия, переносимая упругой волной через перпендикулярную к направлению распространения волны поверхность площадью S за время Δt).

Интенсивность звука пропорциональна квадрату ее амплитуды A и квадрату циклической частоты ω , плотности ρ среды и скорости v распространения волны:

$$J = \frac{\rho A^2 \omega^2 v}{2}$$

Интенсивность звука точечного изотропного источника звука на расстоянии r от источника звука мощностью P до точки звукового поля, в которой определяется интенсивность:

$$J = \frac{P}{4\pi r^2}$$

7.2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Электромагнитные колебания в идеальном закрытом колебательном контуре

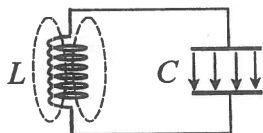


Рис. 7.6

Идеальным колебательным контуром называется электрическая цепь, состоящая из последовательно соединенных конденсатора электроемкостью C и катушки индуктивности L , рис. 7.6.

Период T собственных колебаний в колебательном контуре (**формула Томсона**):

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

Циклическая частота незатухающих электромагнитных колебаний в контуре:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Закон сохранения энергии:

(I_m, q_m, U_m – максимальное значение силы тока в катушке индуктивности L , заряда и напряжения на обкладках конденсатора емкостью C ; I, q – значение силы тока в катушке и заряда на обкладках конденсатора в момент времени t).

$$W = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{L \cdot I_m^2}{2} = \frac{q^2}{2C} + \frac{L \cdot I^2}{2} = \text{const}$$

$$\text{или} \\ \frac{LI_m^2}{2} = \frac{CU_m^2}{2}$$

Электромагнитные волны

Электромагнитная волна (ЭМ волна) – возмущение электромагнитного поля, распространяющееся в пространстве (или в веществе), рис. 7.7.

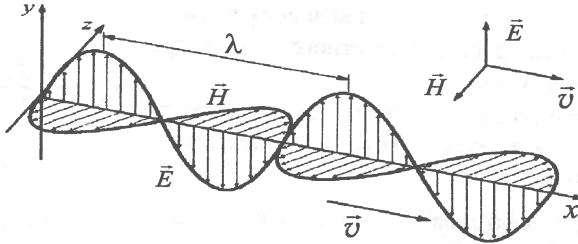


Рис. 7.7

Источниками электромагнитных волн являются изменяющиеся во времени электрические токи, а также отдельные ускоренно движущиеся электрические заряды.

В веществе электромагнитные волны могут создаваться заряженными частицами, движущимися равномерно со скоростью v , превышающей скорость света c/n в данном веществе, где n – показатель преломления вещества. (Излучение Вавилова – Черенкова).

Фронт электромагнитной волны – поверхность постоянной фазы напряженности электрического поля и индукции магнитного поля.

Луч ЭМ волны – линия, вектор касательной к которой в каждый момент времени направлен перпендикулярно фронту волны, в сторону ее направления.

Распространение ЭМ волн связано с переносом энергии электромагнитного поля. Энергия переносится в направлении распространения волны.

* **Поток энергии электромагнитной волны** – энергия электромагнитного излучения, проходящего в единицу времени (мощность $P_{эм}$) сквозь поверхность площадью S :

$$\Phi_W = P_{эм} = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

* **Плотность потока энергии электромагнитной волны** – мощность электромагнитного излучения, проходящего сквозь единицу площади поверхности, расположенной перпендикулярно направлению распространения волны:

$$\frac{\Phi_W}{S} = \frac{P_{\text{эм}}}{S} = \frac{1}{S} \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

(ΔW – энергия, переносимая ЭМ волной через перпендикулярную к направлению распространения волны поверхность площадью S за время Δt).

* **Объемная плотность энергии электромагнитной волны**, распространяющейся в вакууме – энергия ΔW электромагнитного поля, сосредоточенного в объеме ΔV :

$$w_{\text{эм}} = \frac{\Delta W}{\Delta V}$$

(ϵ_0 – электрическая постоянная, E_m – амплитуда напряженности электрического поля электромагнитной волны).

$$w_{\text{эм}} = \frac{\epsilon \epsilon_0 E_m^2}{2} + \frac{\mu \mu_0 H_m^2}{2}$$

$$B = \mu \mu_0 H$$

* Модули векторов \vec{E} и \vec{B} в плоской электромагнитной волне связаны соотношением:

$$\epsilon \epsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu \mu_0}$$

* **Скорость электромагнитных волн в среде** с диэлектрической проницаемостью ϵ и магнитной проницаемостью μ :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

* **Скорость электромагнитных волн в вакууме**, так как в вакууме $\epsilon = \mu = 1$:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

* Связь между модулями магнитной индукции B и напряженности E электрического поля в вакууме:

$$B = \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \cdot E = \frac{E}{c}$$

* **Интенсивность электромагнитной волны** – среднее значение плотности потока энергии электромагнитной волны:

$$J = \frac{P_{\text{эм}}}{S} = w_{\text{эм}} c$$

* **Интенсивность электромагнитной волны в вакууме:**

$$J = c \epsilon_0 \langle E^2 \rangle$$

($\langle E^2 \rangle$ – среднее значение квадрата напряженности электрического поля за период колебания. c – скорость света в вакууме, ϵ_0 – электрическая постоянная).

Интенсивность излучения точечного источника обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника: $J \sim 1/r^2$ и прямо пропорциональна четвертой степени частоты колебаний: $J \sim \nu^4$.

Спектр электромагнитных волн (диапазон частот и длин волн):

а) звуковые	$\nu = 0 - 2 \cdot 10^4$ Гц ($\lambda = 1,5 \cdot 10^4 - \infty$ м);
б) радиоволны	$\nu = 2 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^9$ Гц ($\lambda = 0,3 - 1,5 \cdot 10^4$ м);
в) сверхвысокочастотное (СВЧ) излучение	$\nu = 1 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{11}$ Гц ($\lambda = 1$ мм - 0,3 м);
г) инфракрасное (ИК) излучение	$\nu = 3 \cdot 10^{11} - 3,85 \cdot 10^{14}$ Гц ($\lambda = 780$ нм - 1 мм);
д) видимый свет	$\nu = 3,85 \cdot 10^{14} - 7,89 \cdot 10^{14}$ Гц ($\lambda = 380$ нм - 780 нм);
е) ультрафиолетовое (УФ) излучение	$\nu = 8 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$ Гц ($\lambda = 10$ нм - 380 нм);
ж) рентгеновское излучение	$\nu = 3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{20}$ Гц ($\lambda = 10^{-12} - 10^{-8}$ м);
з) γ -излучение	$\nu > 3 \cdot 10^{20}$ Гц ($\lambda < 10^{-12}$ м).

8. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

Переменный ток – электрический ток, периодически меняющий свою величину и направление протекания в цепи.

Простейшей моделью индукционного генератора переменного тока может служить проводящая рамка, вращающаяся в магнитном поле. Почти вся электрическая энергия, потребляемая человечеством, производится индукционными генераторами.

Магнитный поток (поток магнитной индукции Φ) через поверхность рамки площадью S :

$$\Phi = BS \cos \omega t$$

ЭДС электромагнитной индукции:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin \omega t$$

или

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_m \sin \omega t$$

Максимальная ЭДС индукции (амплитудное значение ЭДС):

$$\mathcal{E}_m = BS\omega$$

Соответственно, в рамке сопротивлением R , будет протекать ток, изменяющийся по закону синуса:

$$i = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = \frac{\mathcal{E}_m \sin \omega t}{R}$$

$$i = \frac{\mathcal{E}_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t$$

Амплитудное (максимальное) значение силы тока:

$$I_m = \frac{BS\omega}{R}$$

8.1. ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Закон Ома справедлив для амплитудных (I_m и U_m) и действующих (I_d и U_d) значений переменного тока и напряжения, справедлив для мгновенных значений (i и u), если выполняется условие квазистационарности (время распространения света (переменного тока) и одного конца схемы в другой намного меньше периода колебаний).

Активное сопротивление – сопротивление элемента электрической цепи (резистора), в котором электрическая энергия необратимо преобразуется во внутреннюю энергию:

$$R = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U_d}{I_d}$$

На активном сопротивлении энергия выделяется в виде тепла.

Реактивное сопротивление – сопротивление элементов электрической цепи (электрической емкости и индуктивности), в которых средняя активная мощность переменного электрического тока равна нулю.

Емкостное сопротивление конденсатора:

$$X_C = \frac{U_m}{I_m} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi\nu C}$$

($\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота тока; ν – частота переменного тока).

Индуктивное сопротивление катушки, соленоида:

$$X_L = \frac{U_m}{I_m} = \omega L = 2\pi\nu L$$

Сила переменного электрического тока равна первой производной заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника, по времени:

$$i = \frac{dq}{dt}$$

Напряжение, приложенное к концам участка цепи:

$$u = U_m \sin \omega t$$

Переменный ток, текущий через резистор сопротивлением R :

$$i = \frac{U_m \sin \omega t}{R} = I_m \sin \omega t$$

($I_m = U_m/R$ – амплитудное (максимальное) значение силы тока).

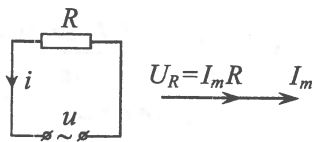


Рис. 8.1

Если к концам участка цепи приложено напряжение u , изменяющееся по закону $u = U_m \sin \omega t$, то ток i , текущий через сопротивление R , совпадает по фазе с напряжением, что показано на векторной диаграмме (рис. 8.1) амплитудных значений тока I_m и напряжения U_R .

Переменный ток, текущий через конденсатор емкостью C

Если напряжение на емкости C меняется по гармоническому закону $u = U_m \sin \omega t$, то по такому же закону будет изменяться заряд на емкости:

$$q(t) = C \cdot u = CU_m \sin \omega t$$

Переменный ток, текущий через конденсатор емкостью C :

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = CU_m \omega \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + \pi/2)$$

Амплитудное (максимальное) значение силы тока текущего через конденсатор:

$$I_m = CU_m \omega$$

Амплитудное (максимальное) значение напряжения на конденсаторе:

$$U_C = X_C I_m = \frac{1}{\omega C} I_m$$

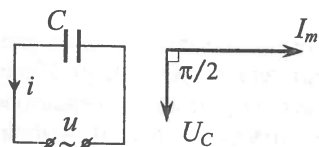


Рис. 8.2

Из анализа формулы $i(t)$ следует, что сила тока i , опережает по фазе падение напряжения u на конденсаторе на $\pi/2$. (Или падение напряжения на конденсаторе отстает по фазе от текущего через конденсатор тока на $\pi/2$), что и показано на векторной диаграмме (рис. 8.2) амплитудных значений тока I_m и напряжения

$$U_C = X_C I_m = \frac{1}{\omega C} I_m$$

Переменное напряжение на катушке индуктивностью L при протекании через нее переменного тока

Цепь с индуктивностью L характеризуется наличием двух источников ЭДС: источника питания u и ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_s .

Переменное напряжение на катушке индуктивностью L :

($i = I_m \sin \omega t$, $U_m = \omega L I_m$ – амплитудное (максимальное) значение напряжения на катушке).

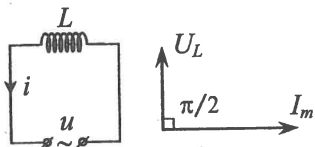


Рис. 8.3

$$\begin{aligned} u_L(t) &= L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} \\ &= I_m L \omega \cos \omega t = \\ &= \omega L I_m \sin(\omega t + \pi/2) \end{aligned}$$

Если сила тока изменяется по закону $i = I_m \sin \omega t$, то падение напряжения u_L опережает по фазе ток i , текущий через катушку на $\pi/2$, что и показано на векторной диаграмме, рис. 8.3.

Переменный ток i , текущий через последовательно включенные резистор R , катушку индуктивности L и конденсатор C

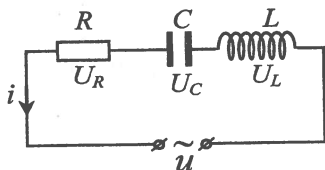


Рис. 8.4, а

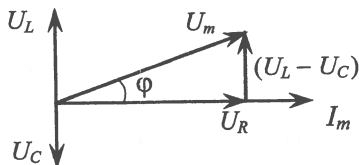


Рис. 8.4, б

Переменный ток i , текущий через последовательно включенные резистор R , катушку индуктивности L и конденсатор C , отличается от напряжения u по фазе, $-\pi/2 < \varphi < \pi/2$.

В цепи возникает переменный ток, который вызывает на всех элементах цепи соответствующие падения напряжения (рис. 8.4, а). Падения напряжений на резисторе (U_R), на катушке (U_L) и на конденсаторе (U_C) приведены на векторной диаграмме амплитуд (рис. 8.4, б). Амплитуда (U_m) приложенного напряжения должна быть равна векторной сумме амплитуд этих падений напряжений. Угол φ определяет разность фаз между напряжением и силой тока.

Если напряжение, приложенное к концам участка цепи $u = U_m \sin \omega t$, то сила тока изменяется по закону $i = I_m \cos(\omega t - \varphi)$.

Полное сопротивление цепи, состоящей из последовательно соединенных элементов R , L и C , переменному току:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$$

Закон Ома для цепи переменного (гармонического) тока:

(I_m , U_m и I_d , U_d – амплитудные и действующие (или эффективные) значения переменного тока и напряжения соответственно).

$$I_m = \frac{U_m}{Z} \quad \text{или} \quad I_d = \frac{U_d}{Z}$$

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}$$

Количество теплоты, выделяющееся в резисторе с активным сопротивлением R при протекании по нему переменного тока в течение времени t :

$$Q = I_d^2 R t = \frac{I_m^2 R t}{2} = \frac{U_m^2 t}{2R}$$

Действующие значения силы тока, напряжения и ЭДС переменного тока:

Действующее значение силы переменного тока равно силе постоянного тока, при котором в проводнике выделяется такое же количество теплоты, что и при переменном токе за тот же промежуток времени. Действующее (эффективное) значение переменного тока и напряжения в $\sqrt{2}$ раз меньше его амплитуды.

$$I_d = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

$$\mathcal{E}_d = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{2}}$$

Средняя мощность переменного тока в цепи, содержащей активное и реактивное сопротивление:

$$P = I_d U_d \cos \varphi$$

$$P = \frac{I_m U_m}{2} \cos \varphi$$

8.2. ТРАНСФОРМАТОР

Трансформатор – устройство, применяемое для повышения или понижения переменного напряжения, рис. 8.5.

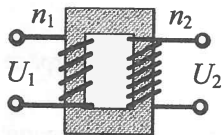


Рис. 8.5

Коэффициент трансформации (в режиме «холодного хода») – величина, равная отношению напряжения на первичной обмотке к напряжению на вторичной обмотке трансформатора:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

(N_1 , N_2 – число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора, U_1 , U_2 – напряжение на клеммах первичной и вторичной обмоток. Для повышающего трансформатора – ($k < 1$), для понижающего – ($k > 1$)).

Коэффициент трансформации (в режиме нагрузки):

($I_2 r_2$ – падение напряжения на вторичной обмотке трансформатора, I_2 – сила тока нагрузки, r_2 – сопротивление вторичной обмотки).

$$k = \frac{U_1}{U_2 + I_2 r_2}$$

КПД трансформатора:

(I_1, I_2 – сила тока в первичной и вторичной обмотках трансформатора).

$$\eta = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1}$$

9. ОПТИКА

Оптика – раздел физики, занимающийся изучением природы света, закономерностей его испускания, распространения и взаимодействия с веществом.

Оптическое излучение представляет собой электромагнитные волны, и поэтому оптика – часть общего учения об электромагнитном поле. Оптику принято подразделять на геометрическую, волновую и квантовую.

9.1. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Геометрическая оптика не использует в явном виде представление о волновой природе света, т. е. длина волны λ света считается исчезающе малой.

Геометрическая оптика опирается на понятие о независимых световых лучах, важное значение в геометрической оптике имеет понятие изображения.

Световой луч – линия, указывающая направление распространения световой энергии.

Изображением точечного источника называют точку, в которой пересекаются лучи от этого источника после прохождения ими оптической системы. Если прошедшие лучи образуют сходящийся пучок, то изображение называют **действительным**; если же лучи расходятся и воображаемой точки, лежащей за оптической системой, то изображение называют **мнимым**.

9.1.1. Законы геометрической оптики

1. **Закон прямолинейного распространения света в однородной среде:** в оптически однородных средах свет распространяется прямолинейно.
2. **Закон независимости световых лучей:** световые лучи, встречаясь, не воздействуют друг на друга.
3. **Закон отражения света от зеркальной поверхности.**
4. **Закон преломления света на границе двух прозрачных сред.**

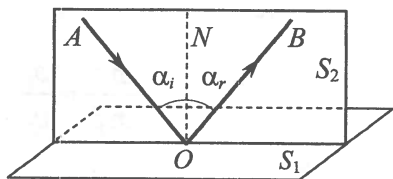


Рис. 9.1

Рис. 9.1. Угол падения равен углу отражения (S_1 – отражающая поверхность; S_2 – плоскость падения и отражения; AO – падающий луч; OB – отраженный луч; ON – нормаль к отражающей поверхности S_1).

Закон отражения света. Луч падающий, нормаль к отражающей поверхности и луч отраженный лежат в одной плоскости (рис. 9.1), причем углы между лучами и нормалью равны между собой: угол падения α_i равен углу отражения α_r :

$$\angle \alpha_i = \angle \alpha_r$$

Падающий луч и отраженный лучи обратимы, т.е. если пустить падающий луч в направлении отраженного, то он отразится в направлении падающего луча.

Преломление – изменение направления распространения волн при прохождении из одной среды в другую.

Абсолютный показатель преломления среды – физическая величина, равная отношению скорости света c в вакууме к скорости света v в данной среде:

$$n = \frac{c}{v}$$

В любых средах $n > 1$.

Абсолютный показатель преломления среды определяет оптическую плотность среды.

Относительный показатель преломления n_{21} второй среды относительно первой:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

(n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления первой и второй среды, v_1 и v_2 – скорость света в этих средах соответственно).

Закон преломления
(закон Снеллиуса):

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

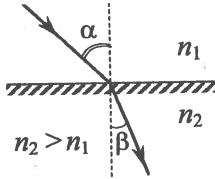


Рис. 9.2

Падающий луч, перпендикуляр, восстановленный в точке падения, и преломленный луч лежат в одной плоскости (рис. 9.2), а отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления β равно отношению показателей преломления второй среды к первой.

Закон преломления волн:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

Угол преломления β – угол между преломленным лучом и перпендикуляром к границе раздела, восстановленным в точке падения, рис. 9.2.

Полное внутреннее отражение – явление отражения света от оптически менее плотной среды, при котором преломленный луч отсутствует, а интенсивность отраженного света практически равна интенсивности падающего света, т. е. происходит полное отражение от границы раздела.

Полное внутреннее отражение происходит при падении луча из оптически более плотной среды под углом большим предельного угла полного внутреннего отражения, рис. 9.3.

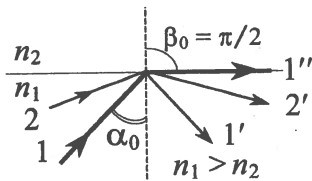


Рис. 9.3

Рис. 9.3. Ход лучей при падении на границу двух сред ($n_1 > n_2$): 1, 2 – падающие лучи; 1', 2' – отраженные лучи, 1'' – преломленный луч при падении луча на границу сред под предельным углом α_0

Предельный угол полного внутреннего отражения – минимальный угол падения света α_0 , начиная с которого возникает явление полного внутреннего отражения:

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$$

Предельный угол полного внутреннего отражения луча на границе раздела “вещество – воздух” (для воздуха $n_2 \approx 1$):

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}$$

Призма

Преломляющий угол призмы – угол между гранями призмы, на которых происходит преломление света.

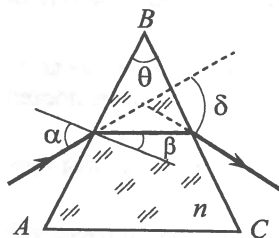


Рис. 9.4

Рис. 9.4. Прохождение луча света через призму в плоскости её главного сечения: α и β – угол падения и преломления луча, δ – угол отклонения луча призмой, θ – преломляющий угол призмы, AC – основание призмы, n – показатель преломления материала призмы

9.1.2. Мнимое изображение. Плоское зеркало

Изображение S' называется действительным, если в точке S' пересекаются сами лучи пучка, и мнимым, если в ней пересекаются продолжения этих лучей.

В точке, где возникает действительное изображение, происходит концентрация энергии световых лучей, и это может быть обнаружено, например, фотоэлементом или светочувствительной бумагой.

При мнимом изображении (рис. 9.5) этого не происходит, – световые лучи как бы выходят из точки, в которой обнаружить энергию нельзя.

Однако существенно, что при мнимом изображении точки на сетчатке глаза возникает ее действительное изображение.

Мнимое изображение – изображение предмета, возникающее при пересечении продолжений расходящегося пучка лучей. Простейший пример мнимого изображения – изображение предмета в плоском зеркале.

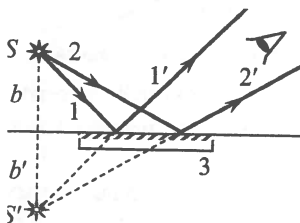


Рис. 9.5

Мнимое изображение S' точечного источника S в плоском зеркале находится в симметричной точке относительно зеркала 3 (рис. 9.5).

Изображение предмета в плоском зеркале равно по размеру самому предмету.

9.1.3. Линзы

Линза – прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями. В частном случае одна из поверхностей может быть плоской, т. е. радиус кривизны поверхности $R \rightarrow \infty$.

Тонкая линза – линза, толщина которой l пренебрежимо мала по сравнению с радиусами кривизны её сферических поверхностей ($l \ll R_1, R_2$, рис. 9.6).

Главная оптическая ось – прямая, проходящая через центры кривизны сферических поверхностей линзы.

Побочная оптическая ось – прямая, проходящая через оптический центр линзы под углом к главной оптической оси.

Оптический центр линзы – точка, лежащая на главной оптической оси внутри линзы и обладающая тем свойством, что лучи проходят, сквозь нее, не преломляясь.

Собирающие линзы – линзы, преобразующие параллельный пучок световых лучей в сходящийся (рис. 9.6, а).

Рассеивающие линзы – линзы, преобразующие параллельный пучок световых лучей в расходящийся (рис. 9.6, б).

Фокусы линзы – точки, лежащие по обе стороны линзы на расстоянии, равном фокусному расстоянию.

Главный фокус F линзы – точка на главной оптической оси, в которой собираются преломленные лучи (продолжения преломленных лучей), падающие на линзу параллельно главной оптической оси, после преломления их в линзе, рис. 9.6.

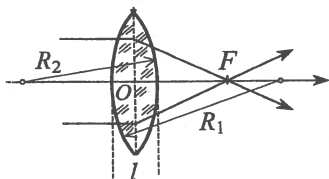


Рис. 9.6, а. Собирающая линза

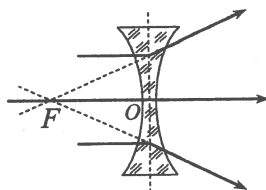


Рис. 9.6, б. Рассеивающая линза

Фокусное расстояние – расстояние от главного фокуса F до оптического центра O линзы (рис. 9.6, а и б). Здесь l – измеренная вдоль оси толщина линзы. Для тонких линз $l \ll F$.

Падающий на **рассеивающую линзу** пучок лучей, параллельных оптической оси, после преломления расходится так, как если бы лучи выходили из **фокуса F** , лежащего перед линзой.

Фокальная плоскость линзы – плоскость, проходящая через главный фокус линзы перпендикулярно главной оптической оси.

Побочный фокус линзы – точка пересечения побочной оптической оси с фокальной плоскостью. В побочном фокусе собираются преломленные лучи, рис. 9.7, а (продолжения преломленных лучей, рис. 9.7, б), падающие под углом к главной оптической оси, после преломления их в линзе.

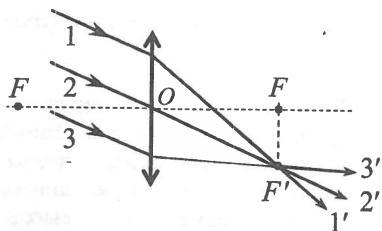


Рис. 9.7, а

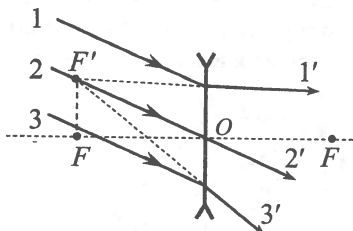


Рис. 9.7, б

Фокусное расстояние F линзы определяется радиусами кривизны R_1 и R_2 её поверхности и относительным показателем преломления n/n_1 :

Здесь n и n_1 – абсолютные показатели преломления линзы и среды соответственно; **радиусы кривизны вогнутых поверхностей** подставляются в формулу со знаком «минус»; а **выпуклых со знаком «плюс»**.

Таким образом, для рассеивающей линзы при $n/n_1 > 1$ получается $F < 0$, а для собирающей – фокусное расстояние $F > 0$.

Фокусное расстояние F плосковыпуклой ($1/R_2 = 0$) линзы в вакууме (воздухе) определяется радиусом кривизны R её выпуклой поверхности и абсолютным показателем преломления материала линзы n :

$$\frac{1}{F} = (n-1) \frac{1}{R}$$

Оптическая сила – величина, обратная фокусному расстоянию F линзы:

$$D = \frac{1}{F}$$

Оптическая сила собирающей линзы положительна, рассеивающей – отрицательна.

Построение изображения предмета в линзах

Изображение точки – точка пересечения не менее двух лучей, берущих начало в исходной точке и прошедших через линзу.

Для построения изображения точки в линзах обычно используют два из трех лучей (см. рисунки 9.8 – 9.10):

- 1) луч 1, проходящий без преломления через оптический центр линзы;
- 2) луч 2, падающий параллельно главной оптической оси линзы; после преломления в линзе этот луч (или его продолжение) проходит через второй главный фокус, луч 2';
- 3) луч 3 (или его продолжение), проходящий из главного фокуса по одну сторону линзы, выходит с другой стороны параллельно главной оптической оси, луч 3'.

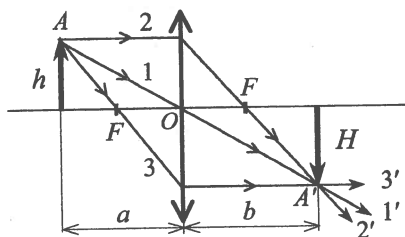


Рис. 9.8

Собирающие линзы дают действительные перевернутые изображения всех действительных объектов, находящихся до переднего фокуса, на рис. 9.8 при $a > F$ и мнимые прямые изображения при $a < F$ (см. рис. 9.10).

Действительное изображение точки A – точка A' , в которой сходится после преломления в линзе пучок лучей, испускаемых точкой A .

Мнимое изображение точки A – точка A' , в которой пересекаются после преломления в линзе продолжения расходящегося пучка лучей, как бы (мнимо) испускаемых точкой A .

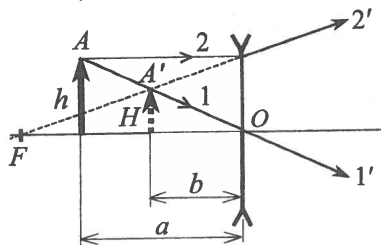


Рис. 9.9

Рассеивающая линза дает уменьшенное, прямое, мнимое изображение предмета, расположенного на любом расстоянии a от линзы.

Рис. 9.8. Построение изображения предмета в собирающей линзе: O – оптический центр линзы; F – фокусное расстояние линзы; h – высота предмета; H – высота изображения; a – расстояние от предмета до линзы; b – расстояние от изображения до линзы

Рис. 9.9. Построение изображения предмета в рассеивающей линзе: O – оптический центр линзы; F – фокусное расстояние линзы; h – высота предмета; H – высота мнимого изображения; a – расстояние от предмета до линзы; b – расстояние от мнимого изображения до линзы

Поперечное увеличение тонкой линзы – величина, равная отношению высоты H изображения к высоте h предмета, (равная отношению расстояния b от изображения до линзы к расстоянию a от предмета до линзы):

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \left| \frac{b}{a} \right|$$

Оптическая сила системы близко расположенных линз равна сумме оптических сил линз этой системы:

$$D = D_1 + D_2$$

Следует учитывать, что оптическая сила рассеивающей линзы отрицательная величина, а собирающей – положительная.

Формула тонкой линзы:

(a – расстояние от предмета до линзы, b – расстояние от линзы до изображения, если изображение мнимое, то величина b берется со знаком минус; F – фокусное расстояние линзы, если линза рассеивающая, то величина F берется со знаком минус).

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$$

Примечание. При решении задач иногда удобнее использовать следующую запись формулы тонкой линзы: $\pm \frac{1}{|F|} = \frac{1}{a} \pm \frac{1}{|b|}$. Знак “минус” перед $\frac{1}{|F|}$ ставится, если линза рассеивающая. Знак “минус” перед $\frac{1}{|b|}$ ставится, если изображение мнимое.

Знак “минус” перед $\frac{1}{|b|}$ ставится, если изображение мнимое.

Лупа, очки, фотоаппарат

Лупа – короткофокусная собирающая линза.

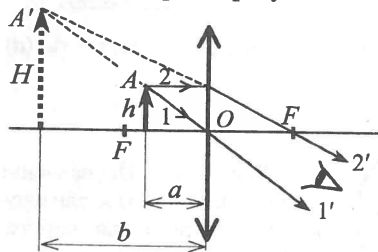


Рис. 9.10

Рис. 9.10. Построение изображения предмета в лупе: O – оптический центр линзы; F – фокусное расстояние линзы; h – высота предмета; H – высота мнимого изображения; a – расстояние от предмета до линзы; b – расстояние от мнимого изображения до линзы

Часовая лупа. Предмет помещают в фокусе лупы или на расстоянии, немного меньшем фокусного. Изображение – прямое, мнимое, увеличенное и расположено с той же стороны, что и предмет (рис. 9.10).

Увеличением лупы принято называть отношение угла, под которым виден предмет через лупу, к углу, под которым предмет виден невооруженным глазом с расстояния наилучшего зрения d :

$$a \approx F; b \approx d$$

Расстояние наилучшего зрения – расстояние от объекта до глаза, при котором угол зрения оказывается максимальным, а глаз не утомляется при длительном наблюдении:

$$d = 25 \text{ см}$$

Формула тонкой линзы (лупы) с учетом знаков:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{a} - \frac{1}{|b|}$$

Увеличение лупы:

$$\Gamma = \frac{b}{a} = \frac{d}{F}$$

Очки – простейший прибор для коррекции оптических дефектов зрения или для защиты глаз. Близорукость корректируется рассеивающими линзами, дальность зрения – собирающими, астигматизм – цилиндрическими и сфероцилиндрическими линзами, косоглазие – призматическими стеклами.

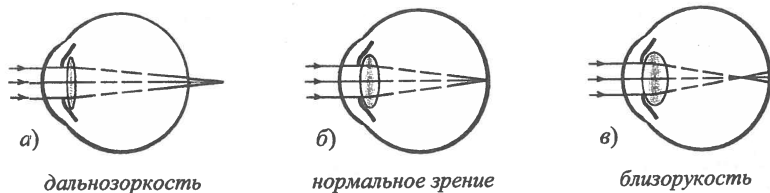


Рис. 9.11. Ход лучей в глазу, когда у человека дальность зрения (а) нормальное зрение (б) и близорукость (в)

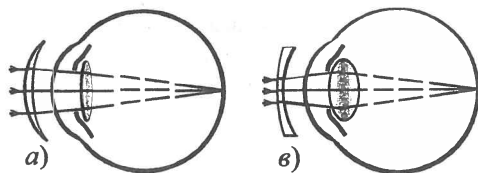


Рис. 9.12. Исправлены дальности зрения (а) и близорукости (б) с помощью собирающей и рассеивающей линз

Фотоаппарат (фотокамера) – оптико-механическое устройство для получения изображения фотографируемого объекта на фотопленке, фотопластинке или ином носителе изображения.

Изображение фотографируемых предметов в фотоаппарате (действительное, перевернутое, уменьшенное) создается объективом.

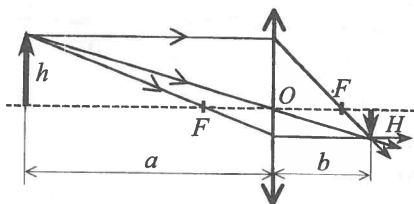


Рис. 9.13

Рис. 9.13. Построение изображения предмета в объективе фотоаппарата: h – высота предмета; H – высота действительного уменьшенного и перевернутого изображения; a – расстояние от предмета до объектива; b – расстояние от изображения до объектива ($a \gg b$, $b \approx F$)

9.2. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Волновая оптика рассматривает оптические явления, в которых проявляется волновая природа света: явления интерференции, дифракции, поляризации и дисперсии.

Свет – видимое излучение, т. е. электромагнитные волны в интервале частот, воспринимаемых глазом ($7,5 \cdot 10^{14}$ – $4,0 \cdot 10^{14}$ Гц), что соответствует длинам волн в вакууме от ~ 400 до ~ 760 нм. Свет очень высокой интенсивности глаз воспринимает в несколько более широком диапазоне.

Электромагнитные волны характеризуются колебаниями векторов напряженности электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей.

Электромагнитные волны – поперечные волны. Векторы напряженности электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей взаимно перпендикулярны и колеблются в одинаковой фазе, рис. 9.14.

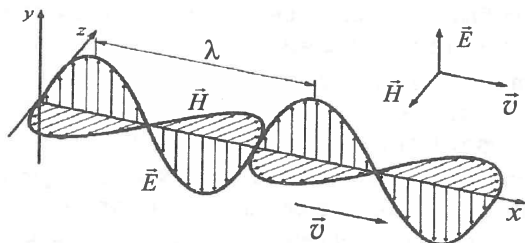


Рис. 9.14

Электромагнитные волны в вакууме распространяются со скоростью света независимо от частоты колебаний:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

(μ_0 – магнитная постоянная, ϵ_0 – электрическая постоянная).

Скорость распространения электромагнитных волн в среде зависит от диэлектрической и магнитной проницаемости среды:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} = \frac{c}{n}$$

Величину $n = \sqrt{\mu \epsilon}$ называют абсолютным показателем преломления, μ и ϵ – магнитная и электрическая проницаемость среды.

Абсолютный показатель преломления среды – физическая величина, показывающая во сколько раз скорость света в вакууме больше скорости света в среде:

$$n = \frac{c}{v}$$

Монохроматической называется волна со строго определенной длиной волны λ (или частотой ν).

Интенсивность света – среднее по времени значение плотности светового потока; пропорциональна квадрату амплитуды вектора напряженности электрического поля \vec{E} .

Вектор \vec{E} называют световым вектором.

9.2.1. Интерференция света

Когерентные волны – волны с одинаковой частотой, поляризации и постоянной разностью фаз.

Интерференция – явление наложения волн, вследствие которого наблюдается устойчивое во времени усиление или ослабление результирующего колебаний в различных точках пространства. Волны должны быть когерентными.

Результат наложения когерентных световых волн, наблюдаемый на экране, фотопластинке и т. д., называется интерференционной картиной.

Стационарная (постоянная во времени) интерференционная картина представляет собой чередование в пространстве областей повышенной и пониженной интенсивности света, получающейся в результате наложения когерентных световых пучков.

Другими словами, **интерференционная картина в монохроматическом свете** – чередование светлых и темных полос (максимумов и минимумов).

Интерференционная картина в белом свете является окрашенной, т. к. каждая составляющая белого цвета с длиной волны λ дает усиление и ослабление света в разных местах на экране.

Максимумы интенсивности света в интерференционной картине наблюдаются в тех местах, для которых оптическая разность хода лучей равна целому числу длин волн λ , а **минимумы** – в местах, где оптическая разность хода равна нечетному числу полуволн.

Условие усиления света длиной волны λ при интерференции: $\Delta = k\lambda$
(условие интерференционных максимумов; $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$; Δ – оптическая разность хода двух волн).

Условие ослабления света длиной волны λ при интерференции: $\Delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$
(условие интерференционных минимумов; $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$).

Оптическая длина пути световой волны: $L = n \cdot l$
(n – показатель преломления среды, l – геометрическая длина пути световой волны).

Оптическая разность хода двух световых волн: $\Delta = L_2 - L_1$

При определении оптической разности хода двух световых волн, отраженных от плоскостей (от границы раздела двух сред) необходимо учитывать, что при отражении света от оптически более плотной среды происходит сдвиг фаз на π , что эквивалентно дополнительной разности хода $\pm \lambda/2$: $\Delta = L_2 - L_1 \pm \lambda/2$

Разность фаз двух когерентных световых волн: $\delta = 2\pi \cdot \frac{\Delta}{\lambda_0}$
(λ_0 – длина волны в вакууме, Δ – оптическая разность хода двух волн).

Метод Юнга

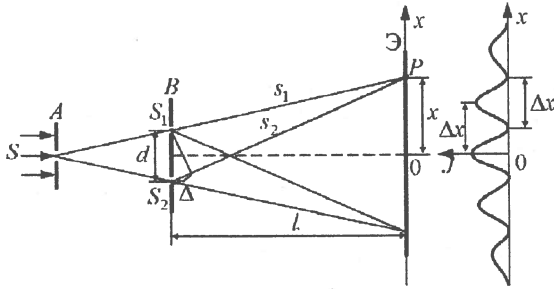


Рис. 9.15

Свет от источника S прошедший через узкую щель в экране A , падает на экран B с двумя щелями S_1 и S_2 , расположенными достаточно близко друг к другу на расстоянии d , рис. 9.15. Эти щели являются когерентными источниками света. На экране \mathcal{E} мы видим чередование полос с максимумом и минимумом интенсивности света. Экран расположен на расстоянии l от щелей, причем $l \gg d$.

Ширина интерференционной полосы – расстояние между соседними минимумами (равно расстоянию между двумя соседними максимумами):

$$\Delta x = \frac{l}{d} \lambda_0$$

Условие усиления света длиной волны λ при интерференции (**условие интерференционных максимумов**). Здесь $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

$$\Delta = k \lambda$$

Условие ослабления света длиной волны λ при интерференции (**условие интерференционных минимумов**). Здесь $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

Кольца Ньютона

Кольца Ньютона – пример полос равной толщины. Интерференционная картина, образуется при отражении света от воздушного зазора, образованного плоскопараллельной пластинкой и соприкасающейся с ней плосковыпуклой линзой с большим радиусом кривизны, рис. 9.16, а.

Оптическая разность хода при нормальном падении лучей $\Delta = 2h + \frac{\lambda}{2}$, здесь слагаемое $\frac{\lambda}{2}$ учитывает тот факт, что при отражении света от оптически более плотной плоскопараллельной пластинки происходит сдвиг фаз на π , что эквивалентно дополнительной разности хода $+\lambda/2$.

Условие усиления света:

$$\Delta = k\lambda$$

Условие ослабления света:

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

(λ – длина волны света).

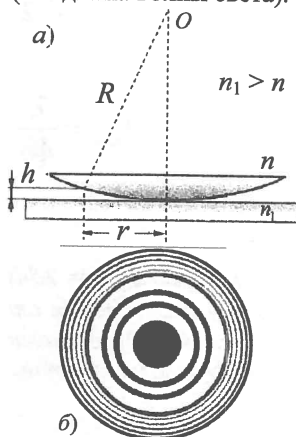


Рис. 9.16, а и б

* Радиусы светлых колец Ньютона в отраженном свете (или темных в проходящем свете, рис. 9.16, б):

$$r_m = \sqrt{\left(k - \frac{1}{2}\right) \lambda R}$$

* Радиусы темных колец Ньютона в отраженном свете (или светлых в проходящем свете, рис. 9.16, б):

$$r_m = \sqrt{k\lambda R}$$

($k = 1, 2, 3, \dots$ – номер кольца; R – радиус кривизны линзы).

Просветление оптики

Просветление оптики – уменьшение отражения света от поверхностей оптических деталей путём нанесения на них плёнок, толщина которых соизмерима с длиной волны оптического излучения.

Просветление оптики – результат интерференции света, отражаемого от передних и задних границ просветляющих плёнок; она приводит к взаимному "гашению" отражённых световых волн и, следовательно, к усилению интенсивности проходящего света.

На рис. 9.17 показан ход лучей (при углах падения лучей, близких к нормальному) отражающихся от поверхностей плёнки, при этом лучи 1 и 2 на рисунке «разнесены» для наглядности по горизонтали от точки падения.



Рис. 9.17

Оптическая разность хода Δ лучей (волн), отраженных от передней границы (1) просветляющей плёнки и лучей (волн), отраженных от задней границы (2) просветляющей плёнки равна $2dn$, т. е.

$$\Delta = 2dn$$

Абсолютный показатель n преломления пленки должен быть меньше показателя преломления стекла ($n < n_{ст}$).

Условие минимума отраженного света:
($k = 0, 1, 2, \dots$).

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$\text{Следовательно, } 2dn = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

Если $k = 0$, то $d \rightarrow d_{min}$, следовательно при углах падения, близких к нормальному, минимальная толщина d_{min} тонкой плёнки, при которой эффект просветления оптики максимален удовлетворяет условию:

$$d_{min} = \frac{\lambda}{4n}$$

* При определении оптической разности хода Δ лучей ($\Delta = 2dn$) учитывается, что каждый из лучей 1 и 2 (рис. 9.17) отражается от оптически более плотной среды, поэтому сдвиг фаз между волнами 1 и 2, обусловленный отражением лучей от оптически более плотной среды равен нулю.

9.2.2. Дифракция света

Дифракцией света называется совокупность явлений наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями, размеры которых сравнимы с длиной волны. Явление дифракции указывает на нарушение законов геометрической оптики.

Дифракция света – в узком, но наиболее употребительном смысле – явление огибания светом препятствий, соизмеримых с длиной волны света.

Явление дифракции объясняется с помощью принципа Гюйгенса согласно которому каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая поверхность этих волн задает положение волнового фронта в следующий момент времени.

Согласно принципу Гюйгенса: каждую точку фронта волны можно рассматривать как источник вторичных волн.

Френель существенно развил этот принцип:

1. Все вторичные источники фронта волны, исходящей из одного источника, когерентны между собой.
2. Равные по площади участки волновой поверхности излучают равные интенсивности (мощности).
3. Каждый вторичный источник излучает свет преимущественно в направлении внешней нормали к волновой поверхности в этой точке.

4. Для вторичных источников справедлив принцип суперпозиции: излучение одних участков волновой поверхности не влияет на излучение других.

Дифракция света на дифракционной решетке при нормальном падении лучей

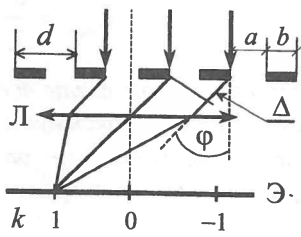


Рис. 9.18

Дифракционная решетка (простейшая) представляет собой совокупность большого числа узких равных щелей шириной a , разделенных равными непрозрачными промежутками шириной b , рис. 9.18.

На рисунке: Л – линза; Э – экран; Δ – оптическая разность хода двух световых лучей. В точке $k = 0$ всегда наблюдается нулевой или центральный дифракционный максимум.

Период (или постоянная) решетки – расстояние между серединами соседних щелей:

$$d = a + b$$

(N – число щелей на длине l дифракционной решетки).

$$d = \frac{l}{N}$$

По принципу Гюйгенса – Френеля каждая щель является источником когерентных вторичных волн, способных интерферировать между собой. Если на дифракционную решетку перпендикулярно к ней падает пучок параллельных лучей света, то под углом дифракции φ на экране (рис. 9.18), расположенном в фокальной плоскости линзы, будет наблюдаться система дифракционных максимумов и минимумов, полученная в результате интерференции света от различных щелей.

Условие главного максимума для дифракционной решетки:

$$d \cdot \sin \varphi = k \lambda$$

($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ – номер спектра (главного дифракционного максимума) или порядок дифракционного максимума, φ – угол дифракции (угол между нормалью к поверхности решетки и направлением на соответствующий дифракционный максимум интенсивности света), λ – длина световой волны).

Главные минимумы на дифракционной решетке наблюдаются под такими углами φ дифракции, для которых свет от разных частей каждой щели гасится в результате интерференции.

* **Условие главных минимумов** для решетки совпадает с условием ослабления света на одной щели:
(a – ширина щели).

$$a \cdot \sin \varphi = k\lambda$$

Число максимумов N монохроматического света, которое дает дифракционная решетка:
(k_{max} – максимальный порядок спектра).

$$N = 2k_{max} + 1$$

$$k_{max} = \frac{d}{\lambda}$$

При наблюдении дифракции в некогерентном свете все главные максимумы, кроме центрального нулевого максимума, окрашены. Радужная полоска, содержащая семь цветов – от фиолетового до красного, называется дифракционным спектром.

9.2.3. Поляризация света

Поляризацией света называется совокупность явлений волновой оптики, в которой проявляется поперечность электромагнитных волн.

Естественный свет – электромагнитная световая волна со всевозможными равновероятными ориентациями вектора \vec{E} (и, следовательно, \vec{B} , направление которого всегда перпендикулярно к направлению колебаний вектора \vec{E}). На рис. 9.19, *a* изображены ориентации вектора \vec{E} луча естественного света, направленного перпендикулярно плоскости рисунка. (Вектор \vec{B} на рисунке не показан).

Электромагнитная световая волна называется плоскополяризованной (линейно-поляризованной) волной, если направления колебаний векторов \vec{E} и \vec{B} строго фиксированы и лежат в определенных плоскостях.

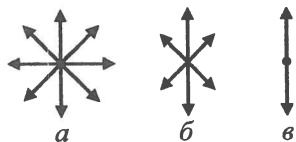


Рис. 9.19

Поляризованный свет – в котором направления колебаний вектора \vec{E} каким-то образом упорядочены.

Частично поляризованный свет – свет с преимущественным (но не исключительным) направлением колебаний вектора \vec{E} (рис. 9.19, *б*).

Плоскополяризованный (линейно-поляризованный) свет – свет в котором вектор \vec{E} колеблется только в одном направлении, перпендикулярном лучу (рис 9.19, *в*).

Поляризатор – устройство, которое служит для преобразования естественного света в поляризованный свет. Простейшим поляризатором является кристалл турмалина.

9.2.4. Дисперсия света

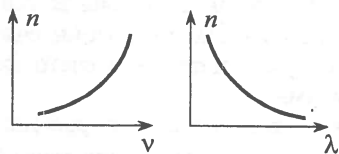


Рис. 9.20

Дисперсией света называется зависимость показателя преломления n вещества от частоты ν (длины волн λ) света, рис. 9.20.

Дисперсия света представляется в виде зависимости $n = f(\nu)$ или $n = f(\lambda)$.

На рис. 9.20 показана **нормальная дисперсия** вещества, при которой показатель преломления с увеличением длины волны уменьшается, а с уменьшением частоты показатель преломления увеличивается.

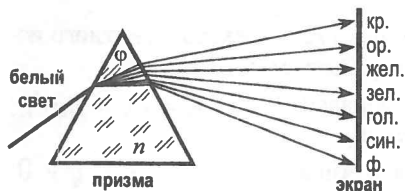


Рис. 9.21

Следствием дисперсии является разложение в спектр пучка белого света при прохождении его через призму, рис. 9.21.

Призма разлагает лучи света в спектре по значениям показателя преломления n .

Материал призмы обладает нормальной дисперсией, поэтому, красные лучи отклоняются призмой слабее, чем фиолетовые (рис. 9.21).

* Дисперсия вещества:

Дисперсия вещества D показывает, как быстро меняется показатель преломления n с частотой ν или с длиной волн λ .

$$D = \frac{dn}{d\nu} \text{ или } D = \frac{dn}{d\lambda}$$

9.3. КВАНТОВАЯ ОПТИКА

9.3.1. Основные положения квантовой оптики

Квантовой оптикой называется раздел оптики, в котором изучается дискретный характер излучения, распространения и взаимодействия света с веществом.

Немецкий ученый Планк выдвинул теорию о том, что излучение электромагнитных волн происходит не непрерывно, а отдельными порциями (квантами), энергия которых может принимать лишь дискретный

ряд значений, кратных неделимой порции – кванту $h\nu$, где ν – частота электромагнитной волны, h – постоянная Планка. Развивая идею Планка, Альберт Эйнштейн ввёл гипотезу световых квантов, согласно которой электромагнитное излучение само состоит из таких квантов, и на её основе объяснил ряд закономерностей фотоэффекта, люминесценции, фотохимических реакций. Построенная Эйнштейном специальная теория относительности (1905) создала предпосылки для того, чтобы считать электромагнитное излучение одной из форм материи, а световые кванты – реальными элементарными частицами.

На основании вышеизложенного в квантовой оптике свет рассматривается как поток особых частиц – **фотонов**, не обладающих массой покоя и движущихся со скоростью c , равной скорости света в вакууме.

Скорость света в вакууме: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с
 (λ – длина световой волны, ν – частота световой волны). $c = \lambda \cdot \nu$

Фотон – элементарная микрочастица, квант электромагнитного излучения. Фотон обладает следующими свойствами:

1) энергия фотона прямо пропорциональна частоте электромагнитного излучения: $E = h\nu = hc/\lambda$;

2) фотон – электрически нейтральная частица: $q = 0$;

3) масса покоя фотона равна нулю, т. е. он не существует в состоянии покоя;

4) масса фотона: $m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}$;

5) фотон обладает импульсом p : $p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$.

9.3.2. Фотоэлектрический эффект

Фотоэлектрический эффект (фотоэффект) – явление взаимодействия света с веществом, в результате которого энергия фотонов передается электронам вещества.

Внешний фотоэффект – явление вырывания электронов из твердых и жидких веществ под действием света (электромагнитного излучения).

Внутренний фотоэффект – это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу.

Электроны, вылетающие с поверхности тела при внешнем фотоэффекте, называются **фотоэлектронами**.

Первые фундаментальные исследования фотоэффекта выполнены русским ученым Столетовым. Принципиальная схема для исследования внешнего фотоэффекта и вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотоэффекта приведены на рис. 9.22, а.

Кривые на рис. 9.22, б соответствуют двум различным интенсивностям (световым потокам Φ) монохроматического света, падающего на катод, ($\Phi_1 > \Phi_2$). При увеличении напряжения сила фотоэлектрического тока увеличивается до наибольшего значения $I = I_{\text{нас}}$, которое называется током насыщения (все электроны, выбиваемые из катода при его освещении достигают анода).

Сила тока насыщения $I_{\text{нас}} = |e| \cdot n$, где e – заряд электрона, n – общее число фотоэлектронов, вылетающих из катода за единицу времени.

Существование фототока при отрицательных напряжениях от 0 до $-U_3$ объясняется тем, что фотоэлектроны, выбитые светом из катода, имеют начальную кинетическую энергию, максимальное значение которой равно $mv_m^2/2$.

За счет этой энергии электроны могут совершать работу против сил задерживающего электрического поля между катодом и анодом и достигнуть анода. По закону сохранения энергии $\frac{mv_m^2}{2} = eU_3$, ($mv_m^2/2$ – максимальная начальная кинетическая энергия фотоэлектрона, e – заряд электрона, U_3 – задерживающее напряжение, m – масса электрона, v_m – максимальная начальная скорость фотоэлектрона).

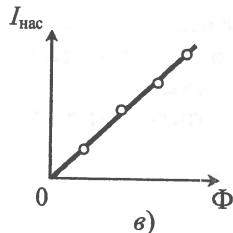
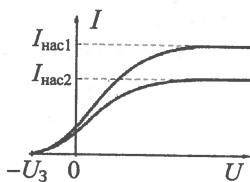
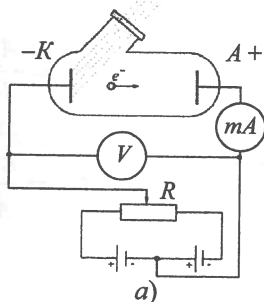


Рис. 9.22

Законы внешнего фотоэффекта

- 1) Сила фототока насыщения $I_{\text{нас}}$ прямо пропорциональна интенсивности света (световому потоку Φ или энергетической освещенности), падающего на катод при фиксированной частоте ν света или число фотоэлектронов, вырываемых из катода в единицу времени, пропорционально интенсивности света, рис. 9.22, в.
- 2) Максимальная начальная скорость v_m (кинетическая энергия $mv_m^2/2$) фотоэлектронов прямо пропорциональна частоте ν света и не зависит от его интенсивности (светового потока Φ).
- 3) Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т. е. минимальная частота света ν_0 , ниже которой фотоэффект невозможен (ν_0 зависит от химической природы вещества и состояния его поверхности).

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта ($v_m \ll c$, нерелятивистский случай):

$$h\nu = A_B + \frac{mv_m^2}{2}$$

Энергия падающего фотона $h\nu$ расходуется на совершение электроном работы выхода A_B из металла и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии.

Учитывая, что $\frac{mv_m^2}{2} = eU_3$:

$$h\nu = A_B + eU_3$$

(m – масса электрона, v_m – максимальная начальная скорость фотоэлектрона).

Работа выхода – минимальная работа A_B , которую нужно совершить для удаления электрона из металла:

$$A_B = h\nu_0$$

Красная граница фотоэффекта для вещества с работой выхода электрона A_B :

$$\nu_0 = \frac{A_B}{h}$$

(ν_0 и $\lambda_{\text{кр}}$ – минимальная частота и соответственно максимальная длина световой волны, способной вызвать фотоэффект).

или
$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{hc}{A_B}$$

9.3.3. Давление света

Давление света – давление, которое производят электромагнитные световые волны, падающие на поверхность какого-либо тела.

Согласно квантовой теории, давление света на поверхность обусловлено тем, что каждый фотон при соударении с этой поверхностью передает ей импульс.

Давление света при его нормальном падении на поверхность:

ρ – коэффициент отражения света (в случае зеркальной поверхности $\rho = 1$, в случае черной поверхности $\rho = 0$), w – объемная плотность энергии излучения, I – интенсивность излучения, c – скорость света в вакууме).

$$p = w(1 + \rho)$$

или

$$p = \frac{I}{c}(1 + \rho)$$

Интенсивность света – энергия $Nh\nu$ фотонов, падающих в единицу времени на единицу площади поверхности, расположенной перпендикулярно направлению распространения потока фотонов:

$$I = wc = \frac{Nh\nu}{St}$$

Объемная плотность w энергии монохроматического излучения:

N – число фотонов с энергией $h\nu$, содержащихся в объеме V).

$$w = \frac{Nh\nu}{V}$$

9.3.4. Тепловое излучение

Тепловое излучение – электромагнитное излучение, испускаемое нагретыми телами за счет своей внутренней энергии и зависящее только от температуры и оптических свойств этого тела.

Абсолютно черное тело – тело, поглощающее всю энергию, падающего на него излучения любой частоты.

* **Энергетическая светимость R_T** – мощность теплового излучения с единицы поверхности тела.

* **Закон Стефана – Больцмана.** Энергетическая светимость абсолютно черного тела R_T пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры T :

$$R_T = \sigma T^4$$

σ – постоянная Стефана – Больцмана).

10. ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Специальная (частная) теория относительности (СТО), иначе называемая **релятивистской теорией** – это физическая теория, описывающая движение тел и элементарных частиц со скоростями, сравнимыми со скоростью света.

Помимо СТО Эйнштейном создана общая теория относительности, сведения о которой выходят за рамки элементарного курса физики.

В основе специальной теории относительности два постулата Эйнштейна (1905 г):

1) **Принцип относительности.** Во всех инерциальных системах отсчета все законы природы протекают одинаково. Иными словами, никакими опытами нельзя выделить какую-то одну систему отсчета и считать именно ее покоящейся.

2) **Принцип инвариантности скорости света.** Скорость света в вакууме является предельной скоростью любого взаимодействия и одинакова во всех инерциальных системах отсчета (т. е. не зависит от скорости движения источника и приемника света).

Преобразования Лоренца, при скоростях движения сравнимых со скоростью света.

* **Преобразованиями Лоренца** в физике, в частности в специальной теории относительности (СТО), называются преобразования, которым подвергаются пространственно-временные координаты (x, y, z, t) каждого события при переходе от одной инерциальной системы отсчета (ИСО) к другой.

Рассмотрим две инерциальные системы отсчета k и k' .

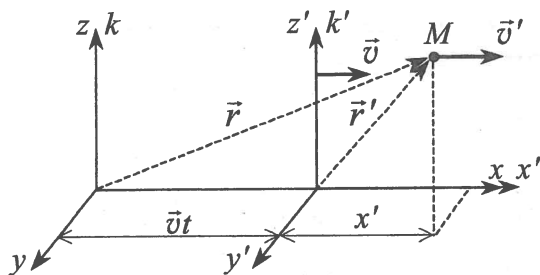


Рис. 10.1

Система k' движется относительно k со скоростью $\vec{v} = \text{const}$ вдоль оси x . Точка M движется в двух системах отсчета: со скоростью \vec{v}' относительно системы k' и со скоростью \vec{v} относительно системы k (на рис. 10.1 скорость \vec{v} на указана).

Пусть x, y, z, t координаты и время некоторого события в системе k , а x', y', z', t' координаты и время того же события в k' .

* **Преобразования Лоренца**, при скоростях движения сравнимых со скоростью света c :

($\beta = \frac{v}{c}$, v – скорость движения системы k' относительно k вдоль оси x , c – скорость света в вакууме).

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$y = y'; \quad y' = y;$$

$$z = z'; \quad z' = z;$$

$$t = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Из постулата Эйнштейна следует, что все законы физики, описывающие любые физические явления, должны во всех ИСО иметь одинаковый вид. Преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея при условии $v \ll c$:

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t$$

$$x = x' + vt, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'.$$

Следствия из преобразований Лоренца (релятивистские эффекты)

Относительность одновременности. Два события, происходящие в одной инерциальной системе отсчета (ИСО) одновременно, но в разных точках пространства, могут быть не одновременными в другой ИСО.

Релятивистское замедление хода часов:

(τ – время, измеренное наблюдателем, движущимся вместе с часами (собственное время), t – время, измеренное наблюдателем в лабораторной (условно неподвижной) системе отсчета).

$$t = \frac{\tau}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Релятивистское сокращение длины:

(l_0 – длина тела, измеренная в системе отсчета, относительно которой тело покоится (собственная длина), l – длина тела, измеренная в системе отсчета, относительно которой тело движется со скоростью v).

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Релятивистский закон сложения скоростей:

(u – скорость тела относительно системы k , т. е. лабораторной системе отсчета, v' – скорость тела относительно системы k' , т. е. движущейся относительно системы k со скоростью v).

$$u = \frac{v' + v}{1 + v'v/c^2}$$

Релятивистская зависимость массы от скорости:

(m – релятивистская масса тела, m_0 – масса покоя тела, v – скорость движения тела, c – скорость света в вакууме).

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Релятивистский импульс тела:

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Энергия покоя частицы (системы):

(m_0 – масса покоя частицы (системы)).

$$W_0 = m_0 c^2$$

Закон взаимосвязи массы и энергии (фундаментальный закон природы):

$$W = mc^2$$

Полная энергия W системы равна произведению ее массы на квадрат скорости света в вакууме.

Энергия релятивистской частицы:

$$W = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Изменение энергии частицы (системы):

Всякое изменение энергии ΔW частицы (системы) сопровождается изменением релятивистской массы Δm и наоборот.

$$\Delta W = \Delta m \cdot c^2$$

Кинетическая энергия релятивистской частицы равна разности полной энергии частицы и ее энергии покоя:

$$W_k = mc^2 - m_0 c^2$$

$$W_k = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - m_0 c^2$$

* **Формула**, выражающая связь между энергией W и импульсом p релятивистской частицы:

$$W^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2$$

11. ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

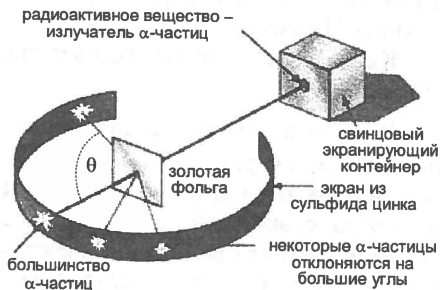
11.1. ФИЗИКА АТОМА

1896 году А. Беккерель открыл естественную радиоактивность.
1897 году Дж. Томсон экспериментально обнаружил электрон.
1911 году Э. Резерфорд доказал существование атомного ядра.
1913 году Н. Бор разработал теорию водородоподобного атома.

Планетарная модель атома

Э. Резерфорда, исследуя рассеяния α -частиц (ядер гелия) золотой фольгой (рис. 11.1), доказал, что почти вся масса атома сосредоточена в малом объеме – атомном ядре, диаметр которого $10^{-14} - 10^{-15}$ м. Линейные размеры атома порядка 10^{-10} м.

Рис. 11.1. Геометрия опыта Э. Резерфорда по рассеянию α -частиц при их прохождении через тонкую золотую фольгу, θ – угол рассеяния



Предложена планетарная модель атома (модель атома Резерфорда). Вокруг положительного ядра по замкнутым орбитам движутся электроны, образуя электронную оболочку атома.

Заряд ядра:

(Z – порядковый номер элемента в таблице Менделеева, e – элементарный заряд).

$$q = +Ze$$

Атомы нейтральны, следовательно, заряд ядра равен суммарному заряду электронов, т.е. вокруг ядра нейтрального атома должно вращаться Z электронов.

Планетарная модель атома находится в противоречии с классической электродинамикой, так как не может объяснить устойчивость атома и линейчатый характер атомных спектров. Линейчатые спектры были изучены, формула Бальмера точно описывала частоты спектральных линий, но их природа не была ясна.

Атом водорода по Бору

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний): в атоме существуют стационарные (не изменяющиеся со временем) состояния, в которых атом не излучает энергию.

Этим стационарным состояниям соответствуют вполне определенные (стационарные) орбиты, по которым двигаются электроны. При движении по стационарным орбитам электроны, несмотря на наличие у них ускорений, не излучают электромагнитных волн.

В стационарном состоянии атома электрон, двигаясь по круговой орбите, должен иметь квантованные значения момента импульса L_n : (m_e – масса электрона, v – скорость электрона на n -й стационарной орбите радиуса r_n , n – главное квантовое число ($n = 1, 2, 3, \dots$), $\hbar = h/2\pi$, h – постоянная Планка).

$$L_n = m_e v r_n = n\hbar$$

Каждому состоянию соответствует определенная энергия E_n .

Второй постулат Бора (правило частот) – при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую излучается (поглощается) фотон с энергией, равной разности энергий соответствующих стационарных состояний: ($h\nu_{nm}$ – энергия фотона, излучаемая или поглощаемая атомом, E_n , E_m – энергии стационарных состояний атома до и после излучения (поглощения) кванта света).

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m$$

При $n > m$ – излучение кванта света (рис. 11.2), а при $n < m$ – поглощение кванта света.

Радиус стационарной орбиты:

(r_n – радиус n -й стационарной орбиты, r_1 – радиус 1-й стационарной орбиты, $r_1 = 52,8$ пм, m_e – масса электрона, e – заряд электрона, $k = 1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9$ м/Ф).

$$r_n = \frac{\hbar^2}{km_e e^2} n^2$$

или

$$r_n = r_1 n^2$$

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{km_e e^2}$$

Первый боровский радиус – радиус орбиты, соответствующий стационарному состоянию с наименьшей энергией, т.е. при $n = 1$.

Энергия E_n электрона на n -й стационарной орбите атома водорода:

(E_1 – энергия основного состояния атома ($n = 1$), $E_1 = -13,6$ эВ).

Знак «минус» показывает, что электрон связан в атоме силой притяжения к ядру.

$$E_n = E_1 \cdot \frac{1}{n^2}$$

где

$$E_1 = -\frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2}$$

Связанные состояния электрона – энергетические состояния с отрицательной энергией электрона. Энергетический спектр связанных состояний дискретен, рис. 11.2.

Свободные состояния электрона – энергетические состояния с положительной энергией электрона.

Возбужденное состояние атома – состояние с $n > 1$.

Энергия ионизации – минимальная энергия, которую необходимо затратить для перевода электрона из основного состояния атома в свободное состояние: $\epsilon_i = |E_1|$, где E_1 – энергия основного состояния атома).

Энергетические состояния атома водорода образуют последовательность энергетических уровней, изменяющихся в зависимости от значения главного квантового числа n (рис. 11.2).

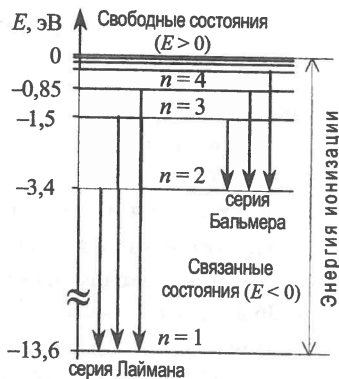


Рис. 11.2

Целое число n , определяющее энергетические уровни водородного атома, называется **главным квантовым числом**.

Основное состояние атома (молекулы) – состояние с минимальной энергией, $n = 1$.

Энергетический уровень – энергия, которой обладает атомный электрон в определенном стационарном состоянии.

Линейчатый спектр – спектр излучения, состоящий из отдельных узких спектральных линий различной интенсивности.

Светящиеся газы дают линейчатые спектры испускания.

Длины волн спектра атома водорода удовлетворяют формуле Бальмера (рис. 11.2):

(λ и ν – соответственно длина волны и частота спектральной линии в спектре атома водорода ($n = 3, 4, 5, \dots$), R' и R – постоянная Ридберга ($R' = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$, $R = R' \cdot c = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$), c – скорость света в вакууме).

$$\frac{1}{\lambda} = R' \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Примечание. Обычно в литературе оба значения постоянной Ридберга обозначаются одной буквой R и лишь указывается, в каких единицах она выражена: с^{-1} или м^{-1} .

Спектральный анализ – метод определения химического состава и других характеристик вещества по его спектру.

Волны де Бройля – волны, связанные с любой движущейся микрочастицей, отражающие квантовую природу микрочастиц.

Длина волны де Бройля:

(p – импульс частицы; если $v \ll c$, то $p = m_0 v$)

$$\lambda_B = \frac{h}{p}$$

11.2. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

1932 год. Открытие нейтрона. Создание нейтронно-протонной модели атомного ядра.

Ядром называется центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся масса атома и его положительный заряд.

Ядра состоят из нуклонов: протонов (p) и нейтронов (n).

Протон p – положительно заряженная элементарная частица, заряд которой равен заряду электрона, а масса покоя $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг = $1836 \cdot m_e$, где m_e – масса электрона.

Нейтрон n – нейтральная элементарная частица с массой покоя $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг = $1839 \cdot m_e$

Символическая запись ядра:

(X – химический символ элемента; A – массовое число; Z – число протонов в ядре совпадает с атомным номером элемента в таблице Менделеева).

$${}^A_Z X$$

Например, ${}^{235}_{92}\text{U}$ – уран-235; ${}^{12}_6\text{C}$ – углерод.

Массовое число равно числу нуклонов (протонов и нейтронов) в ядре:

$$A = Z + N$$

(N – число нейтронов в ядре).

* **Радиус ядра R** не имеет четко выраженной границы, это связано с тем, что нуклоны обладают волновыми свойствами. Поэтому размер ядра имеет условный смысл:

$$R = R_0 A^{1/3}$$

($R_0 \approx 1,4 \cdot 10^{-15}$ м при $A \geq 20$).

Свойства ядерных сил

В ядре протоны и нейтроны удерживаются ядерными силами, т. е. ядерные силы – это силы притяжения.

Ядерные силы пример сильного взаимодействия.

Ядерные силы являются короткодействующими, проявляются только в пределах ядра (радиус их действия $\sim 10^{-15}$ м).

Зарядовая независимость: Ядерные силы не зависят от величины заряда, т. е. ядерные силы, действующие между двумя протонами, между двумя нейтронами или протоном и нейтроном одинаковы по величине. Следовательно, ядерные силы не относятся к электромагнитным силам.

Ядерные силы обладают свойством насыщения, которое заключается в том, что с увеличением числа нуклонов в ядре удельная энергия связи нуклонов остаётся примерно постоянной (рис. 11.3). Это приводит к возможности существования ядерной материи.

Энергия связи ядра

Энергия связи $E_{\text{св}}$ ядра – минимальная энергия, которую необходимо затратить, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны:

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2$$

Энергия связи ядра равна произведению дефекта Δm массы на квадрат скорости света в вакууме.

(c – скорость света в вакууме).

Дефектом массы Δm называется разность между суммарной массой всех нуклонов входящих в состав ядра в свободном состоянии и массой ядра покоя $M_{\text{я}}$:

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - M_{\text{я}}$$

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_{\text{я}}$$

(m_p – масса покоя протона, m_n – масса покоя нейтрона, Z – число протонов в ядре, N – число нейтронов в ядре, $N = A - Z$).

Удельная энергия ε связи ядра равна средней энергии связи, приходящейся на один нуклон:

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{св}}}{A}$$

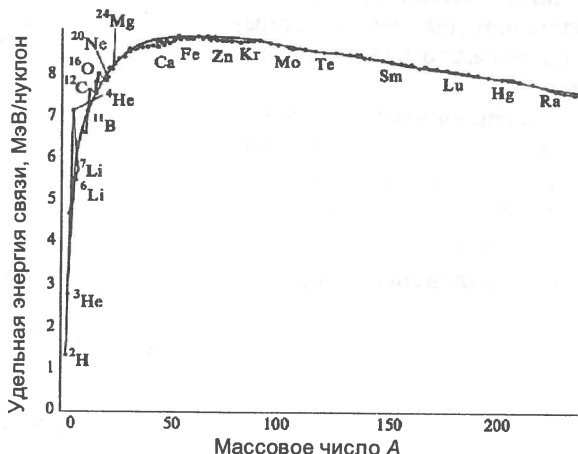


Рис. 11.3. Экспериментальная зависимость удельной энергии связи (энергии связи, приходящейся на один нуклон) от массового числа A .

Наибольшей удельной энергией связи обладают элементы середины таблицы Менделеева (от Cr до Zn).

На графике не показаны многие ядра, особенно для больших значениях A . Отметим сравнительно высокие значения удельной энергии связи для четно-четных ядер ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$ и т.д. (особенно для магического ядра ${}^4\text{He}$ по сравнению с его соседями).

С увеличением Z – числа протонов в ядре – силы электрического отталкивания увеличиваются, а ядерные – остаются постоянными. Ядра с большим Z ($Z \geq 85$) становятся **неустойчивыми**. Это ограничивает число элементов, имеющих в природе, и объясняет **естественную радиоактивность тяжелых ядер**.

Изотоп – разновидность одного и того же химического элемента, атом которого содержит одинаковое число Z протонов в ядре и различное число N нейтронов. Например, ${}_{92}^{235}\text{U}$ – уран-235 и ${}_{92}^{238}\text{U}$ – уран-238.

Радиоактивность

Радиоактивность – явление самопроизвольного превращения одних ядер в другие с испусканием различных частиц.

Радиоактивный распад – радиоактивное (самопроизвольное) превращения исходного (материнского) ядра в новые (дочерние) ядра.

Закон радиоактивного распада описывает статистический процесс. Поэтому он применим для систем, состоящих из очень большого числа радиоактивных ядер:

(N – число **нераспавшихся** ядер в момент времени t , N_0 – первоначальное число ядер (число ядер при $t = 0$), $T_{1/2}$ – период полураспада, λ – постоянная радиоактивного распада.

Число ΔN распавшихся ядер, за время t :

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} =$$

$$= N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\Delta N = N_0 - N$$

$$\Delta N = N_0 \cdot \left(1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \right)$$

$$\Delta N = N_0 \cdot \left(1 - e^{-\lambda t} \right)$$

Период полураспада – промежуток времени $T_{1/2}$, за который распадется половина первоначального числа атомов.

Рис. 11.4. Кривая радиоактивного распада ядер

На рисунке показана зависимость доли **нераспавшихся** ядер от времени на протяжении четырех периодов полураспада.

(N_0 – число ядер в начальный момент времени, $T_{1/2}$ – период полураспада, τ – среднее время жизни радиоактивного ядра).

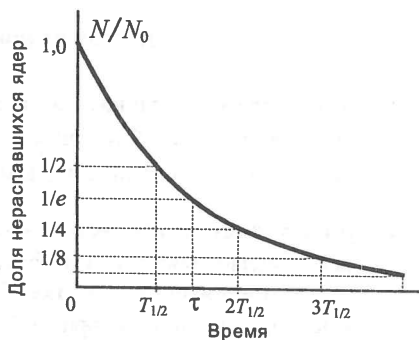


Рис. 11.4

Постоянная распада – константа, характеризующая радиоактивный распад, индивидуальна для каждого химического элемента:

(τ – среднее время жизни радиоактивного ядра).

$$\lambda = 1/\tau,$$

Постоянная распада связана с периодом полураспада $T_{1/2}$ соотношением:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

Активность радиоактивного вещества – число распадов радиоактивных ядер за 1 с:

Единица активности – беккерель (Бк).

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N$$

* **Беккерель** – активность радиоактивного вещества (нуклида), при которой за 1 с происходит 1 акт распада. В ядерной физике применяется и внесистемная единица нуклида – кюри (Ки). $1 \text{ Ки} = = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$.

Рис. 11.5. Классический опыт, позволивший обнаружить сложный состав радиоактивного излучения

Радиоактивный препарат помещался на дно узкого канала в свинцовом контейнере. Против канала помещалась фотопластинка. На вышедшее из канала излучение действовало сильное магнитное поле, перпендикулярное к лучу. Вся установка размещалась в вакууме.

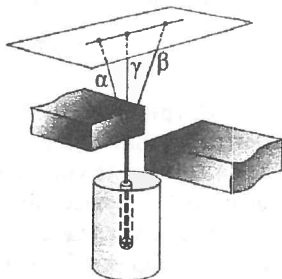


Рис. 11.5

Три типа радиоактивного излучения

- 1) **α -излучение** отклоняется электрическим и магнитным полями; представляет собой поток ядер гелия (${}^4_2\text{He}$); обладает высокой ионизирующей способностью и малой проникающей способностью.
- 2) **β -излучение** отклоняется электрическим и магнитным полями; представляет собой поток быстрых электронов (e^-) или позитронов (e^+); его ионизирующая способность значительно меньше, а проникающая способность гораздо больше, чем у α -частиц.
- 3) **γ -излучение** не отклоняется электрическим и магнитным полями; представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение с малой длиной волны ($\lambda < 10^{-10}$ м) обладает слабой ионизирующей способностью и большой проникающей способностью. Вследствие малой длины волны обладает выраженными корпускулярными свойствами, т. е. является потоком частиц – γ -квантов (фотонов).

Правила смещения при радиоактивном распаде

- а) Для α -распада:
$${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + {}^4_2\text{He}$$
- б) Для β^- -распада:
$${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{Y} + {}^0_{-1}e$$
- в) Для β^+ -распада:
$${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{Y} + {}^0_{+1}e$$

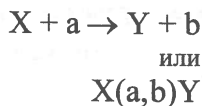
(Y, ${}^4_2\text{He}$, ${}^0_{-1}e$, ${}^0_{+1}e$ – ядро, возникшее в процессе радиоактивного распада, α -частица, электрон и позитрон соответственно).

Ядерные реакции

Ядерные реакции – процессы, идущие при столкновении ядер или элементарных частиц с другими ядрами, в результате которых изменяются квантовое состояние и нуклонный состав исходного ядра, а также появляются новые частицы среди продуктов реакции. Ядерные реакции позволяют исследовать механизм взаимодействия элементарных частиц и ядер с ядрами. Это основной метод изучения структуры ядра, получения новых изотопов и элементов. Для осуществления ядерных реакций

необходимо сближение частиц (нуклона и ядра, двух ядер и т. д.) до расстояния $\sim 10^{-15}$ м (радиус сильного взаимодействия), между частицей и поверхностью ядра или между поверхностями ядер.

Символическая запись ядерной реакции.
(X – исходное ядро-мишень, a – налетающая частица, b – новая вылетающая частица, Y – результирующее ядро).



В ядерных реакциях выполняются законы сохранения: электрических зарядов, массовых чисел, энергии, импульса, момента импульса, барионного заряда.

Закон сохранения электрических зарядов: сумма зарядов ядер и частиц, вступающих в реакцию, равна сумме зарядов конечных продуктов реакции.

Закон сохранения массовых чисел (числа нуклонов): сумма массовых чисел ядер и частиц, вступающих в реакцию, равна сумме массовых чисел конечных продуктов реакции.



Закон сохранения массовых чисел (числа нуклонов): $A_X + A_a = A_Y + A_b$

Закон сохранения электрических зарядов: $Z_X + Z_a = Z_Y + Z_b$

Ядерные реакции сопровождаются выделением или поглощением энергии (тепловым эффектом).

Тепловой эффект реакции определяется разностью масс покоя исходных и конечных ядер.

Энергия (тепловой эффект) ядерной реакции:

$$Q = [(m_1 + m_2) - (m_3 + m_4)] \cdot c^2,$$

где m_1 и m_2 – массы покоя ядра мишени и бомбардирующей частицы, $(m_3 + m_4)$ – сумма масс покоя ядер продуктов реакции, c – скорость света в вакууме.

Если $(m_1 + m_2) > (m_3 + m_4)$, то энергия освобождается, энергетический эффект положителен, **реакция экзотермическая.**

Если $(m_1 + m_2) < (m_3 + m_4)$, то энергия поглощается, энергетический эффект отрицателен, **реакция эндотермическая.**

Примечание. Необходимым условием протекания эндотермической ядерной реакции является наличие у бомбардирующей ядро частицы наименьшей (пороговой) кинетической энергии, большей энергии эндотермической реакции.

Энергия ядерной реакции может быть записана также в виде:

$$Q = (E_1 + E_2) - (E_3 + E_4),$$

где E_1 и E_2 – энергии покоя ядра мишени и бомбардирующей частицы,

E_3 и E_4 – энергии покоя ядра и частицы – продуктов реакции.

Энергия распада – суммарная кинетическая энергия продуктов распада.

Цепная реакция деления

Цепная реакция деления – ядерная реакция, в которой частицы, вызывающие реакцию, образуются как продукты реакции.

Реакции под действием нейтронов наиболее вероятны в области низких энергий налетающих нейтронов. Отсутствие у нейтрона электрического заряда позволяет ему беспрепятственно проникать в ядро при сколь угодно малых энергиях и вызывать ядерные реакции.

Коэффициент размножения нейтронов – отношение числа N_i нейтронов в данном поколении цепной реакции к их числу N_{i-1} в предыдущем поколении.

$$k = \frac{N_i}{N_{i-1}}$$

Необходимым условием для развития цепной реакция деления является требование $k > 1$.

* **Критические размеры** – минимальные размеры активной зоны, при которой возможно осуществление цепной реакции.

* **Критическая масса** – минимальное количество ядерного горючего, содержащего делящиеся нуклиды (^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , ^{251}Cf), при котором возможно осуществление ядерной цепной реакции деления.

Критическая масса зависит от размеров и формы системы, а также от её химического состава. Критическая масса растёт пропорционально квадрату (или кубу) линейных размеров системы. Зависимость от формы связана с утечкой нейтронов через поверхность системы. Чем больше поверхность, тем больше критическая масса. Минимальная критическая масса имеет сферическую поверхность. Для ^{235}U критическая масса равна 0,8 кг, для ^{239}Pu – 0,5 кг, для ^{251}Cf – 10 г.

Ядерный реактор – устройство, в котором выделяется тепловая энергия в результате управляемой цепной реакции деления ядер.

Мощность реактора – количество тепловой энергии, выделяющейся в реакторе в единицу времени.

Термоядерный синтез (термоядерная реакция) – реакция, в которой при высокой температуре, больше 10^7 К, из легких ядер синтезируются более тяжелые. Термоядерные реакции являются источником энергии Солнца и других звезд.

Элементарные частицы

Фундаментальные частицы – бесструктурные элементарные частицы, которые до настоящего времени не удалось описать как составные.

Античастица \bar{a} (элементарной частицы a) – элементарная частица, имеющая (по отношению к a) равную массу покоя, одинаковый спин, время жизни и, например, противоположный заряд.

Аннигиляция – один из видов взаимопревращения элементарных частиц. Термином "аннигиляция" первоначально назывался процесс превращения электрона и его античастицы – позитрона при их столкновении в электромагнитное излучение (в фотоны, или γ -кванты). В процессах аннигиляции материя не уничтожается, а лишь превращается из одной формы в другую. Пример аннигиляции электрона и позитрона: $e^- + e^+ \rightarrow h\nu + h\nu$.

Рождение пары – процесс обратный аннигиляции.

* **Фермионы** – частицы с полуцелым спином (электрон, протон, нейтрон, электронное нейтрино).

* **Бозоны** – частицы с целым спином (фотон, γ -квант, π^+ – мезон).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Греческий алфавит

(в скобках дано другое название или начертание букв)

буквы	название букв	буквы	название букв	буквы	название букв	буквы	название букв
Α α	альфа	Η η	эта	Ν ν	ни (ню)	Τ τ	тау
Β β	бета	Θ θ(θ)	тета	Ξ ξ	кси	Υ υ	ипсилон
Γ γ	гамма	Ι ι	йота	Ο ο	омикрон	Φ φ	фи
Δ δ	дельта	Κ κ	каппа	Π π	пи	Χ χ	хи
Ε ε	эпсилон	Λ λ	лямбда	Ρ ρ	ро	Ψ ψ	пси
Ζ ζ	дзета	Μ μ	ми (мю)	Σ σ	сигма	Ω ω	омега

Таблица 2

Десятичные приставки к названиям единиц

Наименование	тера	гига	мега	микро	нано	пико	фемто	атто
Приставка	Т	Г	М	мк	н	п	ф	а
Множитель	10^{12}	10^9	10^6	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}	10^{-18}

Международная система единиц (СИ)

При решении задач и подстановке числовых значений в физические уравнения все числовые значения физических величин должны быть приведены к одной и той же системе единиц.

С 1963 года установлена единая унифицированная система единиц: "Международная система единиц", или сокращенно "СИ" (*SI – System International*). Для построения СИ используются семь основных единиц (три механические, две термодинамических, одна электрическая, одна световая) дополнительные и производные единицы.

Таблица 3

Список единиц СИ

Физическая величина	Единица измерения	Обозначение единиц	Размер единиц
Основные единицы			
Длина	метр	м	
Масса	килограмм	кг	
Время	секунда	с	
Термодинамическая температура	кельвин	К	

Количество вещества	моль	моль	
Сила электрического тока	ампер	А	
Сила света	кандела	кд	

Дополнительные единицы

Плоский угол	радиан	рад	
Телесный угол	стерадиан	ср	

Производные единицы пространства и времени

Площадь	квадратный метр	м^2	
Объем	кубический метр	м^3	
Скорость	метр в секунду	м/с	
Ускорение	метр на секунду в квадрате	$\text{м}/\text{с}^2$	
Частота	герц	Гц	$\text{Гц} = \text{с}^{-1}$
Угловая скорость	радиан в секунду	рад/с	

Производные единицы механических величин

Плотность	килограмм на кубический метр	$\text{кг}/\text{м}^3$	
Сила	ньютон	Н	$\text{Н} = \text{м} \cdot \text{кг}/\text{с}^2$
Давление	паскаль	Па	$\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$
Работа, энергия	джоуль	Дж	$\text{Дж} = \text{Н} \cdot \text{м}$
Работа, энергия	джоуль	Дж	$\text{Дж} = \text{Н} \cdot \text{м}$
Мощность	ватт	Вт	$\text{Вт} = \text{Дж}/\text{с}$
Момент силы	ньютон на метр	$\text{Н} \cdot \text{м}$	

Производные единицы тепловых величин

Количество теплоты	джоуль	Дж	
Удельная теплота	джоуль на килограмм	Дж/кг	
Теплоемкость	джоуль на кельвин	Дж/К	
Удельная теплоемкость	джоуль на килограмм-кельвин	Дж/(кг·К)	

Производные единицы электрических и магнитных величин

Количество электричества	кулон	Кл	$\text{Кл} = \text{А} \cdot \text{с}$
Плотность электрического тока	ампер на квадратный метр	$\text{А}/\text{м}^2$	
Электрическое напряжение, потенциал, электродвижущая сила	вольт	В	$\text{В} = \text{Вт}/\text{А}$

Напряженность электрического поля	вольт на метр	В/м	
Электрическая ёмкость	фарада	Ф	$\Phi = \text{Кл/В}$
Электрическое сопротивление	ом	Ом	$\text{Ом} = \text{В/А}$
Удельное электрическое сопротивление	ом·метр	Ом·м	
Электрическая проводимость	сименс	См	$\text{См} = \text{Ом}^{-1}$
Удельная электрическая проводимость	сименс на метр	См/м	
Магнитная индукция	тесла	Тл	$\text{Тл} = \text{Н}/(\text{А}\cdot\text{м})$
Магнитный поток	вебер	Вб	$\text{Вб} = \text{Тл}\cdot\text{м}^2$
Индуктивность	генри	Гн	$\text{Гн} = \text{Вб/А}$
Производные единицы световых величин			
Световой поток	люмен	лм	$\text{лм} = \text{кд}\cdot\text{ср}$
Освещенность	люкс	лк	$\text{лк} = \text{лм/м}^2$
Яркость	кандела на квадратный метр	кд/м ²	

Таблица 4

Физические константы

(численные значения ускорения свободного падения и некоторые другие физические константы приведены с точностью, принятой при сдаче ЕГЭ по физике)

Ускорение свободного падения	$g = 10 \text{ м/с}^2$
Гравитационная постоянная	$G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ Н}\cdot\text{м}^2/\text{кг}^2$
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$
Число Авогадро	$N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Элементарный электрический заряд (модуль заряда электрона)	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Коэффициент пропорциональности в законе Кулона	$k = 1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}$
Постоянная Фарадея	$F = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$
Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Постоянная Планка	$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$

Массы частиц

Электрона $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг = $5,5 \cdot 10^{-4}$ а.е.м.

Протона $1,673 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,007 а.е.м.

Нейтрона $1,675 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,008 а.е.м.

Соотношения между различными единицами

Температура	0 К = -273 °С
Атомная единица массы	1 а.е.м. = $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
1 атомная единица массы эквивалентна	931,5 МэВ
1 электронвольт	1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж

Таблица 5

Некоторые математические формулы

Формулы тригонометрии

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \sin \beta \cos \alpha;$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta;$$

$$\sin^2 \alpha = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha); \quad \cos^2 \alpha = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\alpha).$$

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha; \quad \cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha;$$

Некоторые приближенные числа и тригонометрические функции некоторых углов

$$\ln 2 \approx 0,693;$$

$$\lg 2 \approx 0,301;$$

$$\sin \frac{\pi}{3} = \cos \frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 0,866;$$

$$\sin \frac{\pi}{4} = \cos \frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,707;$$

Формулы для приближенных вычислений

Если $a \ll 1$, то в первом приближении можно принять:

$$\frac{1}{1 \pm a} \approx 1 \mp a;$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 \pm a}} \approx 1 \mp \frac{1}{2}a;$$

$$(1 \pm a)^2 \approx 1 \pm 2a;$$

$$\sqrt{1 \pm a} \approx 1 \pm \frac{1}{2}a;$$

$$e^a \approx 1 + a;$$

$$\ln(1 + a) \approx a.$$

Если угол α мал ($\alpha < 5^\circ$ или $\alpha < 0,1$ рад) и выражен в радианах, то в первом приближении можно принять: $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$; $\cos \alpha \approx 1$.

Учебное издание

ТОЛМАЧЕВА Нелла Дмитриевна

КРАТКИЙ СПРАВОЧНИК ПО ФИЗИКЕ

Учебно-методическое пособие


Редактор *Н.Т. Синельникова*
Компьютерная верстка *В.М. Толмачев*
Дизайн обложки *Т.А. Фатеева*

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 16. 08.2013. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать RISO. Усл. печ. л. 6.68. Уч.-изд. л. 6.05.

Заказ 788-13. Тираж 700 экз.

ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru