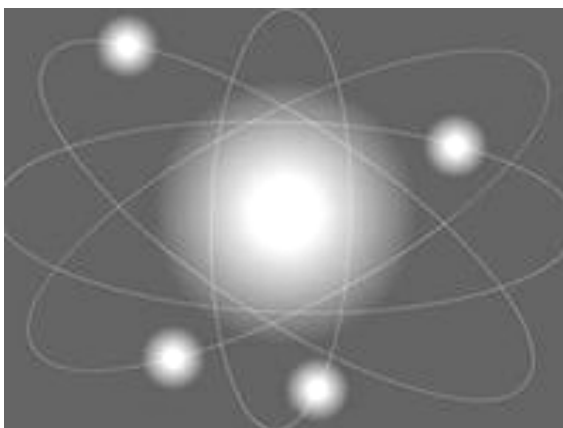


И. Т. СТЕПАНЕНКО, Е. В. СТЕПАНЕНКО

ФИЗИКА. ОСНОВНОЙ КУРС



Тамбов

• Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ» •
2014

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

И. Т. СТЕПАНЕНКО, Е. В. СТЕПАНЕНКО

ФИЗИКА. ОСНОВНОЙ КУРС

Утверждено Учёным советом университета
в качестве учебного пособия для студентов-иностранцев,
проходящих предвузовскую подготовку



Тамбов
Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
2014

УДК 53(075.8)
ББК В3я723
С79

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Общая физика»
ФГБОУ ВПО «ТГУ им. Г. Р. Державина»
В. А. Федоров

Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАЕН,
заведующий кафедрой «Физика»
О. С. Дмитриев

Степаненко, И. Т.

С79 Физика. Основной курс : учебное пособие для студентов-иностранцев, проходящих предвузовскую подготовку / И. Т. Степаненко, Е. В. Степаненко. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. – 96 с. – 100 экз.

ISBN 978-5-8265-1346-0

Учебное пособие знакомит иностранных учащихся с основными понятиями механики, молекулярной физики и термодинамики, электродинамики. Содержит тексты, лексико-грамматический материал и вопросы, позволяющие закрепить на русском языке знания по физике в объёме, необходимом для обучения иностранных студентов в вузах Российской Федерации. Текстовый материал дополнен необходимыми иллюстрациями и соответствует программе по физике на подготовительных факультетах для иностранных граждан.

Предназначено для студентов-иностранцев, проходящих предвузовскую подготовку.

УДК 53(075.8)
ББК В3я723

ISBN 978-5-8265-1346-0

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Структура и содержание пособия соответствуют требованиям к минимуму содержания и уровню подготовки выпускников факультетов и отделений предвузовского обучения иностранных граждан по физике и разработаны с учётом специфических особенностей системы обучения иностранных студентов.

Изложение материала рассчитано на начало чтения курса физики после изучения вводного курса по физике и курса научного стиля речи.

В пособии приведён необходимый объём учебной информации, обеспечивающий овладение основами курса физики. Материал, освещающий основные понятия механики, молекулярной физики и термодинамики, электродинамики, даётся в сжатом виде. Для обеспечения доступности усвоения приводятся адаптированные тексты, дополненные необходимыми иллюстрациями. После каждого текста приводится введённый лексико-грамматический материал, а также вопросы для повторения и самопроверки.

Часть 1. МЕХАНИКА

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ КИНЕМАТИКИ

1.1. МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ. ВЕКТОР ПЕРЕМЕЩЕНИЯ. ПУТЬ

Механика изучает самый простой вид движения – изменение положения тела (или его частей) относительно других тел. Такое движение называется *механическим движением*.

Для описания механического движения необходимо указать тело, относительно которого рассматривается движение. Это тело называется *телом отсчёта*. Тело отсчёта, связанная с ним система координат и синхронизированные между собой часы образуют *систему отсчёта*.

Простейшей системой отсчёта является прямоугольная декартова система координат $Oxyz$ (рис. 1.1). Часы отсчитывают промежутки времени от произвольно выбираемого начального момента времени.

Кинематика изучает механическое движение тел во времени, но не рассматривает причины этого движения.

Тело, размеры и форму которого в данной задаче можно не учитывать, называется *материальной точкой*. Примеры, в которых движущееся тело можно рассматривать как материальную точку: футбольный мяч в полёте; автомобиль, движущийся по шоссе по отношению к окружающим предметам; земной шар при движении вокруг Солнца.

В других случаях размеры тела не учитывать нельзя, например движение Земли вокруг своей оси при анализе суточного движения.

Положение материальной точки A в пространстве определяется тремя координатами x_A, y_A, z_A или радиус-вектором \vec{r} (рис. 1.1).

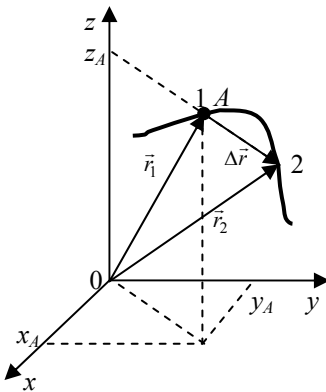


Рис. 1.1

Радиус-вектор – это вектор, задающий положение точки в пространстве. Начало радиус-вектора находится в начале координат, а конец – в данной точке.

Механическое движение происходит во времени. При этом тело движется по некоторой линии. Линия, по которой движется точка, называется *траекторией*.

При движении координаты точки A изменяются. Изменяется и радиус-вектор \vec{r} .

Уравнение зависимости радиус-вектора движущейся точки от времени

$$\vec{r} = \vec{r}(t) \quad (1.1)$$

или эквивалентная ему система уравнений

$$x = x(t), y = y(t), z = z(t) \quad (1.1')$$

называются *уравнениями движения точки*.

По форме траектории механические движения разделяются на *прямолинейные* (если траектория – прямая линия) и *криволинейные* (если траектория – некоторая кривая).

Разность радиус-векторов, характеризующих начальное и конечное положения точки за интервал времени $\Delta t = t_2 - t_1$:

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1. \quad (1.2)$$

Вектор $\Delta \vec{r}$ называется *вектором перемещения (перемещением)*. Вектор $\Delta \vec{r}$ соединяет концы радиус-векторов \vec{r}_1 и \vec{r}_2 .

Путь Δs – это длина участка траектории, пройденного движущейся точкой за промежуток времени Δt . При прямолинейном движении в одном направлении $\Delta s = |\Delta \vec{r}|$.

Единица пути – метр, $[s] = 1 \text{ м (1 m)}$.

Положение тела	Криволинейное движение
Кинематика	Прямолинейное движение
Материальная точка	Путь
Радиус-вектор	Перемещение
Траектория	

Вопросы для повторения

- Что изучает кинематика?
- Что такое механическое движение?
- Что составляет систему отсчёта?
- Что называется материальной точкой?
- Как определяют положение точки в пространстве?
- Что называют траекторией?
- Какое движение называется прямолинейным?
- Какое движение называется криволинейным?
- Что такое перемещение?
- Что такое путь?

1.2. СКОРОСТЬ. РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ. ГРАФИКИ ПУТИ И СКОРОСТИ. СЛОЖЕНИЕ СКОРОСТЕЙ

Для количественной характеристики процесса движения тела вводится понятие скорости.

Средней скоростью $\langle \vec{v} \rangle$ за промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$ называется физическая величина, равная отношению вектора перемещения $\Delta \vec{r}$ точки к длительности этого перемещения Δt :

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad (1.3)$$

Направление вектора средней скорости совпадает с направлением вектора перемещения $\Delta \vec{r}$. Средняя скорость характеризует движение в течение всего промежутка времени Δt .

Единица скорости – *метр в секунду*, $[v] = 1 \text{ м/с}$ (1 m/s).

Внесистемная единица скорости – *километр в час*, $[v] = 1 \text{ км/ч}$ (1 km/h).

Скоростью (мгновенной скоростью) называется физическая величина, равная пределу, к которому стремится средняя скорость при бесконечном уменьшении промежутка времени Δt :

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \langle \vec{v} \rangle = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}. \quad (1.4)$$

Вектор скорости направлен по касательной к траектории. Направление скорости называют направлением движения точки (рис. 1.2).

Равномерным движением точки называется движение, при котором модуль её мгновенной скорости с течением времени не меняется $v = \text{const}$.

При прямолинейном движении направление скорости совпадает с направлением перемещения.

Средней путевой скоростью $v_{\text{сп}}$ называется физическая величина, определяемая отношением пути Δs , пройденному точкой за промежуток времени Δt , к длительности этого промежутка:

$$v_{\text{сп}} = \frac{\Delta s}{\Delta t}. \quad (1.5)$$

График зависимости пути $\Delta s = s$ от времени называется *графиком пути*.

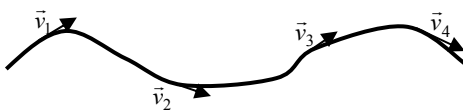


Рис. 1.2

Если движение происходит вдоль оси x , то проекция вектора перемещения на ось равна $x - x_0 = v_x t = s$ и уравнение движения принимает вид

$$x = x_0 + v_x t, \quad (1.6)$$

где x_0 – координата точки в момент времени t_0 ; v_x – проекция вектора скорости \vec{v} на ось x ; t – время движения точки.

Формулу (1.6) называют *уравнением координаты равномерного прямолинейного движения*. Это линейная функция, графиком линейной функции является прямая.

График зависимости координаты от времени для случаев движения в положительном направлении оси x ($v_{x1} > 0$) и отрицательном направлении оси x ($v_{x2} < 0$) показан на рис. 1.3. Тангенс угла наклона α_1 (α_2) графика координаты численно равен скорости v_{x1} (v_{x2}).

Графиком скорости называют график зависимости от времени проекции скорости на какую-либо координатную ось ($v_x = v_x(t)$ или $v_y = v_y(t)$, или $v_z = v_z(t)$). При этом по оси абсцисс в определённом масштабе откладывается время, измеренное от условно выбранного момента времени t_0 . Графиком скорости также называют график зависимости $v = v(t)$ модуля скорости точки в различные моменты времени. График скорости при равномерном прямолинейном движении представляет собой прямую линию, параллельную оси времени (рис. 1.4).

На графике скорости (см. рис. 1.4) заштрихованная площадь численно равна пути, пройденному точкой за промежуток времени от $t = t_0$ до $t = t_1$.

Проявлением относительности механического движения является закон сложения скоростей.

Если тело (материальная точка) движется относительно системы отсчёта, которая сама движется относительно неподвижной системы отсчёта, то при этом имеет место следующий закон сложения скоростей: скорость тела \vec{v} относительно неподвижной системы отсчёта равна векторной сумме скорости \vec{v}_1 подвижной системы отсчёта относительно неподвижной и скорости тела \vec{v}_2 относительно подвижной системы отсчёта, т.е.

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2. \quad (1.7)$$

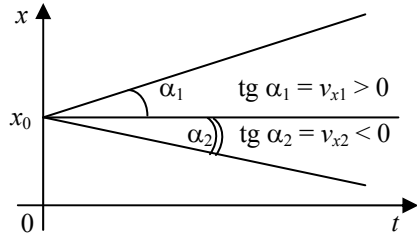


Рис. 1.3

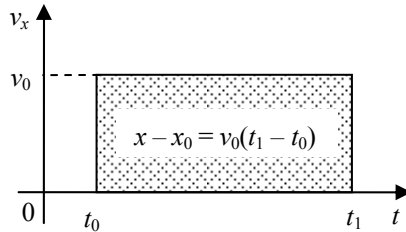


Рис. 1.4

Например, человек движется со скоростью v_2 по вагону, который едет по железной дороге со скоростью v_1 . Тогда v_1 – скорость вагона относительно Земли, v_2 – скорость человека относительно вагона, v – скорость человека относительно Земли.

Относительно системы отсчёта	Численно равна
Координата	Закон сложения скоростей
График скорости	Векторная сумма
Заштрихованная площадь	

Вопросы для повторения

- Какое движение называется равномерным движением?
- Что называют скоростью?
- Какое направление имеет скорость?
- Какие единицы скорости вы знаете?
- Чем выражается проекция скорости на графике координат?
- Чем выражается путь на графике скорости?
- Сформулируйте закон сложения скоростей.

1.3. УСКОРЕНИЕ. РАВНОУСКОРЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ. СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ ТЕЛ. УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

Если модуль мгновенной скорости точки с течением времени изменяется, движение называется неравномерным (переменным).

Среднее ускорение $\langle \vec{a} \rangle$ – физическая величина, равная отношению изменения скорости $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$ материальной точки к длительности промежутка времени $\Delta t = t_2 - t_1$, в течение которого происходит это изменение:

$$\langle \vec{a} \rangle = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}. \quad (1.8)$$

Направления векторов $\langle \vec{a} \rangle$ и $\Delta \vec{v}$ совпадают.

Ускорением (мгновенным ускорением) материальной точки в момент времени t называется физическая величина \vec{a} , равная пределу, к которому стремится среднее ускорение за промежуток времени от t до $t + \Delta t$ при неограниченном уменьшении Δt :

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}. \quad (1.9)$$

Единица ускорения – метр на секунду в квадрате, $[a] = 1 \text{ м/с}^2$ (1 м/с^2).

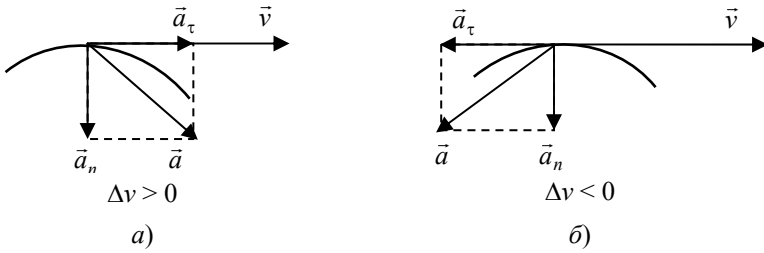


Рис. 1.5

В случае произвольного криволинейного движения вектор скорости может изменяться с течением времени как по модулю, так и по направлению (рис. 1.5).

Составляющая \vec{a}_τ вектора ускорения, которая направлена по касательной к траектории в данной точке, называется *тангенциальным ускорением*. Тангенциальное ускорение характеризует изменение вектора скорости по модулю.

Составляющая \vec{a}_n вектора ускорения, которая направлена по нормали к траектории в данной точке, называется *нормальным ускорением*. Нормальное ускорение характеризует изменение вектора скорости по направлению при криволинейном движении. Нормальное ускорение направлено к центру кривизны траектории.

Вектор \vec{a}_τ направлен в сторону движения точки при увеличении её скорости (рис. 1.5, а) и в противоположную сторону (рис. 1.5, б) – при уменьшении скорости.

Из рисунка 1.5 видно, что для $a = |\vec{a}|$, $a_\tau = |\vec{a}_\tau|$, $a_n = |\vec{a}_n|$ имеет место соотношение

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}. \quad (1.10)$$

Равнопеременное прямолинейное движение является частным случаем неравномерного движения, при котором $\vec{a} = \text{const}$ как по величине, так и по направлению. Среднее ускорение равно мгновенному ускорению. Ускорение направлено вдоль траектории точки. При этом $\vec{a}_n = 0$.

Если направление ускорения \vec{a} при прямолинейном движении совпадает с направлением скорости \vec{v} точки, то такое равнопеременное движение называется *равноускоренным*. Если направления векторов \vec{a} и \vec{v} противоположны, то такое равнопеременное движение называется *равнозамедленным*.

При равнопеременном прямолинейном движении скорость \vec{v} в произвольный момент времени t

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t, \quad (1.11)$$

где \vec{v}_0 – скорость точки в момент начала отсчёта времени ($t_0 = 0$).

Проекция вектора скорости на ось x

$$v_x = v_{0x} + a_x t. \quad (1.12)$$

Проекция вектора перемещения на ось x

$$\Delta r_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}. \quad (1.13)$$

Уравнение координаты имеет вид

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}. \quad (1.14)$$

Путь, пройденный телом при равноускоренном движении,

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (1.15)$$

Путь, пройденный телом при равнозамедленном движении,

$$s = v_0 t - \frac{at^2}{2}. \quad (1.15')$$

Формула (1.15') справедлива только до момента прекращения движения.

При равнопеременном движении справедлива формула

$$s = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}. \quad (1.16)$$

Свободным падением называется движение тел в безвоздушном пространстве (вакууме) без начальной скорости только под действием силы тяжести. Свободное падение тела – это равноускоренное движение. Падение тел в воздухе приближённо считают свободным при условии, что сопротивление воздуха мало и им можно пренебречь. Ускорение, которое возникает при свободном падении тела, называется *ускорением свободного падения* и обозначается g . Ускорение свободного падения направлено по вертикали к центру Земли.

Ускорение свободного падения одно и то же для всех тел, не зависит от массы тела и зависит от радиуса Земли R , массы Земли M и высоты h тела над её поверхностью:

$$g = G \frac{M}{(R+h)^2}, \quad (1.17)$$

где G – гравитационная постоянная, $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1}$.

При расчётах используют значение ускорения свободного падения $g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$.

Неравномерное движение	Ускорение
Среднее ускорение	Равноускоренное движение
Свободное падение	Ускорение свободного падения
Сопrotивление воздуха	Гравитационная постоянная

Вопросы для повторения

- Что такое среднее ускорение?
- Что называется мгновенным ускорением? Назовите единицу ускорения.
- Какое движение называется равноускоренным?
- Какое направление имеет ускорение равноускоренного движения, если скорость тела: а) увеличивается, б) уменьшается?
- Что называется свободным падением?
- Каким движением является свободное падение?
- Какое направление имеет ускорение свободного падения?

1.4. РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ. УСКОРЕНИЕ ПРИ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ ТЕЛА ПО ОКРУЖНОСТИ (ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЕ УСКОРЕНИЕ)

Движение по окружности – простейший пример криволинейного движения. Скорость \vec{v} движения по окружности называется *линейной скоростью*. При равномерном движении по окружности модуль v мгновенной скорости материальной точки с течением времени не изменяется: $v = \text{const}$ ($v_A = v_B$ на рис. 1.6). Движущаяся точка за равные промежутки времени проходит равные по длине дуги окружности.

Изменение положения точки на окружности характеризуется изменением угловой координаты точки $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$. Угол $\Delta\varphi$ называется *углом поворота* радиус-вектора точки (рис. 1.7).

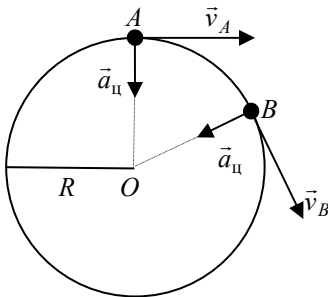


Рис. 1.6

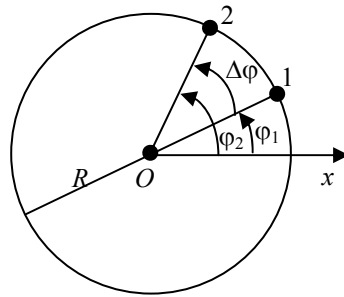


Рис. 1.7

Средней угловой скоростью движения точки по окружности вокруг центра или оси называется величина

$$\langle \omega \rangle = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}. \quad (1.18)$$

Угловой скоростью ω называется величина

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

При равномерном движении точки по окружности за любые равные промежутки времени углы поворота её радиус-вектора одинаковы ($\Delta\varphi = \text{const}$). Угол поворота $\Delta\varphi$ радиус-вектора точки, равномерно движущейся по окружности, равен

$$\Delta\varphi = \omega \Delta t. \quad (1.20)$$

Промежуток времени T , в течение которого точка совершает один полный оборот по окружности, называется *периодом обращения* (периодом вращения), а величина, обратная периоду: $\nu = \frac{1}{T}$ – *частотой обращения*. Единица частоты – *секунда в минус первой степени*, $[\nu] = 1 \text{ с}^{-1} (1 \text{ с}^{-1}) = 1 \text{ Гц} (1 \text{ Hz})$.

За один период угол поворота радиус-вектора точки равен 2π рад, поэтому $2\pi = \omega T$, откуда

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad \text{или} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu. \quad (1.21)$$

Путь s , пройденный точкой, равномерно движущейся по окружности, за промежуток времени $\Delta t = t - t_0$ при $t_0 = 0$, равен

$$s = vt. \quad (1.22)$$

Путь, пройденный точкой за один период по окружности радиуса R , равен $2\pi R$, а угол поворота радиус-вектора точки за тот же промежуток времени равен 2π рад, т.е. $2\pi R = \nu T$ и $2\pi = \omega T$. Связь между линейной и угловой скоростью

$$\nu = \omega R. \quad (1.23)$$

Изменение вектора скорости \vec{v} по направлению характеризуется центростремительным ускорением $\vec{a}_ц$ (нормальным ускорением $\vec{a}_н$). Тангенциальное ускорение $\vec{a}_т = 0$. В каждой точке траектории вектор центростремительного ускорения $\vec{a}_ц$ направлен по радиусу к центру окружности (см. рис. 1.6), а его модуль равен

$$a_ц = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R = 4\pi^2 \nu^2 R = \frac{4\pi^2}{T^2} R. \quad (1.24)$$

Движение по окружности	Угловая координата
Линейная скорость	Угол поворота
Угловая скорость	Оборот
Период обращения	Частота обращения
Центростремительное ускорение	

Вопросы для повторения

- Что такое линейная скорость?
- Что называется угловой скоростью?
- Что такое период вращения?
- Что называется частотой обращения?

ОСНОВЫ ДИНАМИКИ

1.5. ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА. ИНЕРЦИАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОТСЧЁТА. ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Задача динамики состоит в определении положения тела в любой момент времени по известным начальному положению тела, начальной скорости и силам, действующим на тело. Причиной изменения скорости движения тела всегда является взаимодействие с другими телами.

Свободным (изолированным) телом называют тело, на которое не действуют какие-либо другие тела.

Первый закон Ньютона: материальная точка сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока внешние воздействия не изменят этого состояния.

Первый закон Ньютона устанавливает факт существования инерциальных систем отсчёта и описывает характер движения свободной материальной точки в инерциальной системе отсчёта. Системы отсчёта, в которых свободная материальная точка находится в покое или движется прямолинейно и равномерно, называются *инерциальными системами отсчёта*. Прямолинейное и равномерное движение свободной материальной точки в инерциальной системе отсчёта называется *движением по инерции*. При таком движении вектор скорости материальной точки остаётся постоянным ($\vec{v} = \text{const}$).

Системы отсчёта, в которых скорость движения свободного тела изменяется, называются *неинерциальными*. Неинерциальной является система отсчёта, которая движется с ускорением относительно любой инерциальной системы отсчёта. В неинерциальной системе отсчёта даже свободное тело может двигаться с ускорением.

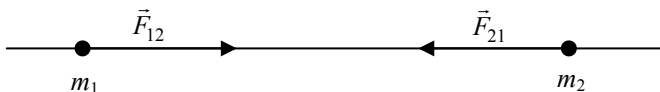


Рис. 1.8

Третий закон Ньютона: в инерциальной системе отсчёта силы взаимодействия двух тел равны по модулю и направлены в противоположные стороны.

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \quad (1.25)$$

Здесь \vec{F}_{12} – сила, действующая на первое тело со стороны второго; \vec{F}_{21} – сила, действующая на второе тело со стороны первого. Знак минус указывает на противоположную направленность векторов сил (рис. 1.8).

Третий закон Ньютона отражает факт равноправия взаимодействующих материальных точек.

Динамика	Изолированное тело
Определение положения тела	Состояние покоя
Внешнее воздействие	Точка покоится
Инерциальная система отсчёта	Движение по инерции
Силы взаимодействия	Равны по модулю
Противоположная направленность	

Вопросы для повторения

- В чём состоит задача динамики?
- Что является причиной возникновения ускорения тела?
- Сформулируйте первый закон Ньютона.
- Какая система отсчёта называется инерциальной?
- В каком состоянии находится тело, если на него не действуют другие тела или действия других тел компенсируются?
- Как формулируют третий закон Ньютона?

1.6. СИЛА. МАССА. ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Силой называется векторная физическая величина, которая является мерой механического воздействия на тело со стороны других тел. Сила полностью определена, если заданы её модуль, направление и точка приложения. Прямая, вдоль которой направлена сила, называется *линией действия силы*.

В результате действия силы тело изменяет скорость движения (приобретает ускорение) или деформируется.

Существует несколько типов взаимодействия: гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое. Сила как количественная характеристика позволяет оценить только гравитационные и электромагнитные взаимодействия. В задачах механики учитываются *гравитационные силы (силы тяготения)* и две разновидности электромагнитных сил – *силы упругости и силы трения*.

Система тел, на каждое из которых не действуют внешние силы, называется *замкнутой (изолированной) системой*.

Свойство тела сохранять свою скорость при отсутствии взаимодействий с другими телами называется *инертностью*. Физическая величина, являющаяся количественной мерой инертности тела, называется *массой (m)*.

Масса также характеризует способность тел взаимодействовать с другими телами в соответствии с законом всемирного тяготения.

Масса тела измеряется в *килограммах*, $[m] = 1 \text{ кг (1 kg)}$.

В механике Ньютона считается, что: масса тела не зависит от скорости; масса тела равна сумме масс всех частиц (или материальных точек), из которых оно состоит; для системы тел выполняется *закон сохранения массы: при любых процессах, происходящих в системе тел, её масса остается постоянной*.

Второй закон Ньютона: ускорение материальной точки в инерциальной системе отсчёта прямо пропорционально действующей на точку силе, обратно пропорционально массе точки и по направлению совпадает с силой:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (1.26)$$

В такой форме закон справедлив, если масса точки не изменяется.

Второй закон Ньютона в более общей форме (при постоянной силе \vec{F}):

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t}, \quad (1.27)$$

где Δt – промежуток времени действия силы \vec{F} ; $\Delta \vec{p}$ – изменение импульса точки или тела за время Δt .

В такой форме закон справедлив и в тех случаях, когда масса m точки изменяется с течением времени и при возрастании скорости.

Если на материальную точку одновременно действуют несколько сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$, то их заменяют одной силой, которую *называют равнодействующей* (рис. 1.9).

Эта сила \vec{R} равна сумме сил

$$\vec{R} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i. \quad (1.28)$$

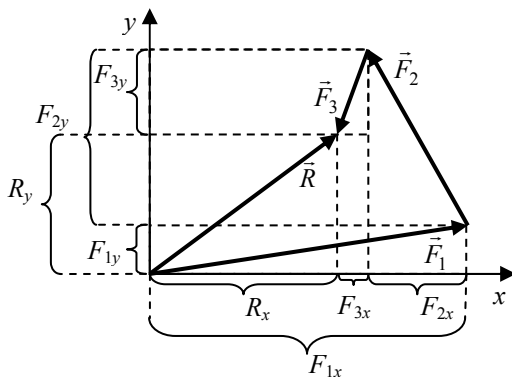


Рис. 1.9

Если равнодействующая сила равна нулю, то силы, которые действуют на тело, называются *уравновешенными*.

Если на материальную точку одновременно действуют несколько сил, то каждая из них сообщает точке своё ускорение (*принцип независимости действия сил*). Результирующее ускорение \vec{a} точки с массой m , получаемое от воздействия на неё нескольких сил, определяется по второму закону Ньютона:

$$\vec{a} = \frac{\vec{R}}{m}. \quad (1.29)$$

Единица силы – *ньютон*, $[F] = 1 \text{ Н} (1 \text{ N}) = 1 \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2 (1 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2)$.

Инертность	Количественная мера
Масса	Процесс
Мера механического воздействия	Точка приложения
Линия действия силы	Деформировать (ся)
Деформация	Равнодействующая сила
Сообщать ускорение	Уравновешенные силы
Результирующее ускорение	Независимость действия сил

Вопросы для повторения

- Что такое инертность?
- Что такое масса?
- Что является единицей массы?
- Сформулируйте закон сохранения массы.
- Что такое сила?
- Какие единицы силы вы знаете?

- Перечислите известные вам силы.
- Сформулируйте второй закон Ньютона.
- Что называется равнодействующей силой?
- В каком состоянии находится тело, если на него действуют уравновешенные силы?
 - Может ли тело двигаться равномерно по прямой линии, если на него действует одна сила?
 - Что можно сказать о направлении ускорения тела, на которое действует несколько сил?

1.7. СИЛЫ УПРУГОСТИ. ЗАКОН ГУКА. СИЛЫ ТРЕНИЯ

Деформацией твёрдого тела называется изменение его размеров и объёма, при котором обычно изменяется форма тела. При деформации возникают силы взаимодействия, которые препятствуют смещению частиц тела в узлах кристаллической решётки.

Упругостью называется свойство тел восстанавливать свои размеры, форму и объём после прекращения действия внешних сил, вызывающих деформацию. При упругой деформации деформация исчезает после прекращения действия внешней силы.

Силы, возникающие при упругой деформации тел, называются *силами упругости*. Силой упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$ называется сила, возникающая при деформации тела и направленная в сторону, противоположную направлению смещения частиц тела при деформации. Силы упругости имеют электромагнитную природу.

Силы упругости действуют между слоями деформируемого тела, а также в месте контакта деформируемого тела с телом, которое вызывает деформацию. Например, со стороны упруго деформированной доски *D* на брусок *C*, лежащий на ней (рис. 1.10), действует сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$.

В задачах элементарной физики при деформации растяжения и сжатия силы упругости направлены вдоль линии действия внешней силы, т.е. вдоль осей продольно деформируемых пружин (рис. 1.11) или перпендикулярно к поверхностям соприкасающихся тел (рис. 1.10).

Сила упругости, которая действует на тело со стороны опоры или подвеса, называется *силой реакции опоры* (подвеса) или *силой натяжения подвеса*.

Сила упругости зависит от деформации $\Delta \vec{l}$. Эту зависимость называют *законом Гука*: сила

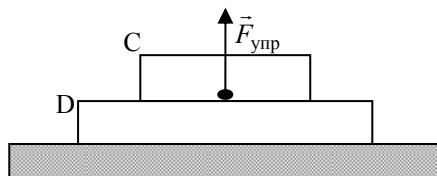


Рис. 1.10

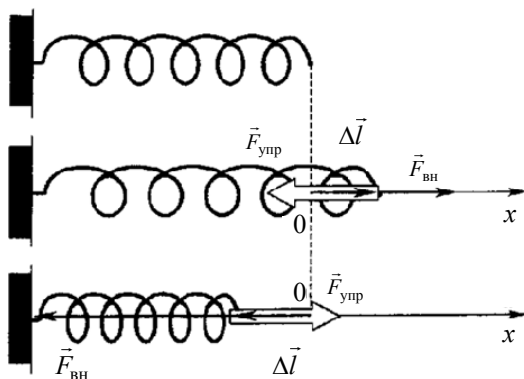


Рис. 1.11

упругости прямо пропорциональна деформации тела и направлена противоположно ей (рис. 1.11), т.е.

$$\vec{F}_{\text{упр}} = -k\Delta\vec{l}. \quad (1.30)$$

Величина k называется *коэффициентом упругости тела*.

Коэффициент упругости – это величина, равная силе упругости, возникающей при деформации тела на единицу длины:

$$k = \frac{F_{\text{упр}}}{\Delta l}. \quad (1.31)$$

Трение – это взаимодействие между соприкасающимися телами, которое препятствует их относительному перемещению. Например, трение существует между бруском и наклонной плоскостью, на которой брусок лежит или с которой он соскальзывает. Сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ направлена вдоль поверхностей соприкасающихся тел противоположно скорости их относительного перемещения. Различают:

а) *трение покоя* – трение при отсутствии относительного перемещения соприкасающихся тел;

б) *трение скольжения* – трение при относительном движении соприкасающихся тел.

Сила трения $\vec{F}_{\text{тр}0}$, которая препятствует возникновению движения одного тела по поверхности другого, называется *силой трения покоя*. Причина силы трения покоя – взаимодействие неровностей поверхностей тел и межмолекулярное притяжение в тех местах, где расстояния между частицами тел очень малы. Поэтому силу трения покоя можно рассматривать как разновидность проявления сил упругости.

Если к телу, которое соприкасается с другим телом, прикладывать возрастающую внешнюю силу $\vec{F}_{\text{вн}}$, параллельную плоскости соприкосно-

вения, то при изменении $\vec{F}_{\text{вн}}$ от нуля до некоторого значения $\vec{F}_{\text{тр}0 \text{ max}}$ движение тела не возникает. Следовательно, при попытке вывести тело из состояния покоя сила трения покоя изменяется от нуля до максимального значения.

Относительное движение тела возникает при условии $\vec{F}_{\text{вн}} > \vec{F}_{\text{тр}0 \text{ max}}$.

Силу $\vec{F}_{\text{тр}0 \text{ max}}$ называют *предельной силой трения покоя* или просто *силой трения покоя* (рис. 1.12)

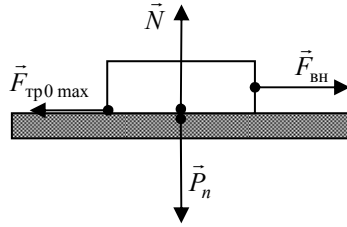


Рис. 1.12

$$F_{\text{тр}0 \text{ max}} = \mu_0 N = \mu_0 P_n. \quad (1.32)$$

Силу \vec{N} , которая действует на данное тело со стороны опоры перпендикулярно к его поверхности, называют *силой нормальной реакции*, а силу \vec{P}_n , которая действует со стороны тела на опору – *силой нормального давления*. По третьему закону Ньютона $P_n = N$. Коэффициент пропорциональности μ_0 называется *коэффициентом трения покоя*. Он зависит от материала соприкасающихся тел, качества обработки соприкасающихся поверхностей, наличия между ними смазки и других факторов. Коэффициенты трения покоя определяют экспериментально.

Сила трения скольжения $\vec{F}_{\text{тр.с}}$ между поверхностями соприкасающихся тел при их относительном движении зависит от силы нормальной реакции \vec{N} , или от силы нормального давления \vec{P}_n , причём $F_{\text{тр.с}} = \mu N = \mu P_n$, где μ – *коэффициент трения скольжения*. Он зависит от тех же факторов, что и коэффициент трения покоя μ_0 , а также от скорости относительного движения соприкасающихся тел. Коэффициент трения скольжения определяется экспериментально. Обычно он меньше коэффициента трения покоя ($\mu < \mu_0$).

Если тело катится по поверхности другого тела, то возникает сила трения качения $\vec{F}_{\text{тр.к}}$.

- Деформация
- Силы упругости
- Закон Гука
- Сила реакции опоры
- Трение
- Трение скольжения

- Упругость
- Деформируемое тело
- Электромагнитная природа
- Сила натяжения подвеса
- Трение покоя

Вопросы для повторения

- Какие силы называют силами упругости?
- Какую природу имеют силы упругости?
- Сформулируйте закон Гука.
- Что такое сила трения?
- Что является причиной трения?
- От чего зависит коэффициент трения?
- Для чего смазывают поверхности тел?
- Какое направление имеет сила трения?
- Чему равна сила трения покоя?
- Что называют силой трения скольжения?
- От чего зависит коэффициент трения скольжения?

1.8. СИЛЫ ТЯГОТЕНИЯ. НЕИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЁТА. СИЛА ТЯЖЕСТИ

Гравитационные силы характеризуют гравитационное взаимодействие. Гравитационное взаимодействие осуществляется через гравитационное поле. Вокруг каждого тела существует гравитационное поле. Все тела притягиваются друг к другу.

Ньютон показал, что между двумя материальными точками действуют силы взаимного притяжения (силы тяготения, гравитационные силы), прямо пропорциональные массам этих точек и обратно пропорциональные квадрату расстояния между ними. Модуль силы тяготения

$$|\vec{F}_{\text{тяг}}| = G \frac{m_1 m_2}{r^2}. \quad (1.33)$$

Эта формула выражает закон всемирного тяготения. Здесь m_1 , m_2 – массы взаимодействующих точек, r – расстояние между ними, $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ – гравитационная постоянная. Гравитационная постоянная численно равна силе, с которой притягиваются две материальные точки массой 1 кг каждая, находящиеся на расстоянии 1 м друг от друга.

В первом приближении можно считать, что Земля имеет форму шара (фактически геоид, сплюснутый эллипсоид). Поэтому сила тяготения к Земле $\vec{F}_{\text{тяг}}$ тела массой m направлена к центру Земли, а её модуль

$$F_{\text{тяг}} = G \frac{m M_3}{r^2}, \quad (1.34)$$

где M_3 – масса Земли; r – расстояние от тела до центра Земли.

Системы отсчёта, движущиеся относительно инерциальной системы с ускорением, называются *неинерциальными системами отсчёта*.

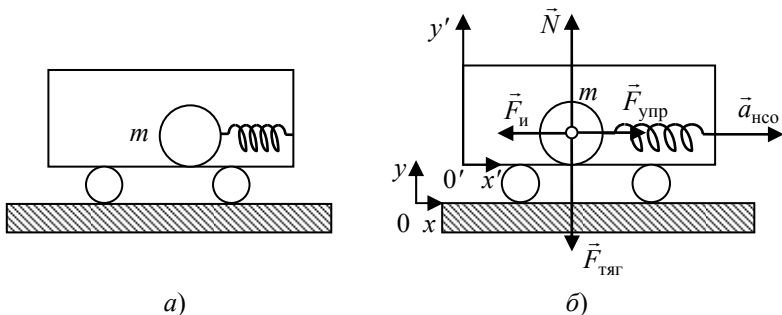


Рис. 1.13

В элементарном курсе физики рассматриваются простейшие примеры неинерциальных систем отсчёта, движущихся поступательно. В неинерциальных системах отсчёта законы Ньютона не выполняются. В частности, материальная точка может изменять состояние своего движения относительно неинерциальной системы отсчёта без всякого воздействия на эту точку со стороны других тел. Например, шарик, подвешенный на нити к потолку вагона равномерно и прямолинейно движущегося поезда, отклоняется назад при ускорении движения поезда и вперёд – при его замедлении, т.е. приходит в движение относительно неинерциальной системы отсчёта, связанной с вагоном. При этом никакие горизонтальные силы на шарик не действуют, или шарик, который прикреплен пружиной к передней стенке вагона, движущегося с ускорением, изменяет своё положение (рис. 1.13).

Покой или движение материальных точек и тел в неинерциальных системах отсчёта описываются уравнениями, по форме аналогичными уравнению второго закона Ньютона, но в уравнение вводятся *силы инерции*. Силы инерции отражают неинерциальность движения самой системы отсчёта.

$$\vec{F}_{\text{и}} = -m\vec{a}_{\text{нсо}}, \quad (1.35)$$

где m – масса тела; $\vec{a}_{\text{нсо}}$ – ускорение данной неинерциальной системы отсчёта относительно какой-либо инерциальной.

Система xOy – неподвижная инерциальная система отсчёта; $x'O'y'$ – неинерциальная система отсчёта, связанная с вагоном. При движении пружина растянется на Δl и шарик будет неподвижен относительно вагона. Состояние покоя шарика относительно вагона описывается уравнением

$$\vec{F}_{\text{тяги}} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{упр}} + \vec{F}_{\text{и}} = 0, \quad (1.36)$$

причём $P = N$, $F_{\text{и}} = F_{\text{упр}}$.

Движение шарика с вагоном относительно инерциальной системы отсчёта подчиняется второму закону Ньютона

$$\vec{F}_{\text{тяг}} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{упр}} = m\vec{a}_{\text{нсо}}, \quad (1.37)$$

откуда

$$F_{\text{упр}} = ma_{\text{нсо}}. \quad (1.38)$$

Поскольку сила $F_{\text{упр}} = k\Delta l$, сила инерции может быть измерена по растяжению пружины.

Отмечаем, что силы инерции вызываются не взаимодействием тел, а ускоренным движением системы отсчёта. Поэтому они не подчиняются третьему закону Ньютона. Два основных положения механики, согласно которым ускорение вызывается силой, а сила всегда обусловлена взаимодействием между телами, в системах отсчёта движущихся с ускорением, одновременно не выполняются. В неинерциальных системах отсчёта не выполняются законы сохранения импульса, энергии и момента импульса.

К силам инерции также относятся центробежная и кориолисова силы.

Численно центробежная сила

$$F_{\text{цб}} = m\Omega^2 \rho, \quad (1.39)$$

где ρ – расстояние от материальной точки до мгновенной оси вращения системы отсчёта; Ω – угловая скорость.

Система отсчёта, связанная с Землёй, неинерциальна по двум причинам: во-первых, вследствие суточного вращения Земли с постоянной угловой скоростью $\Omega = 7,3 \cdot 10^{-5}$ рад/с и, во-вторых, вследствие действия на Землю гравитационного поля Солнца, Луны и других астрономических тел.

Сила тяжести $\vec{F}_{\text{тяж}}$ тела – это сила, приложенная к телу и равная геометрической сумме силы тяготения $\vec{F}_{\text{тяг}}$ тела к Земле и центробежной силы инерции $\vec{F}_{\text{цб}}$, обусловленной суточным вращением Земли. Сила тяжести вызывает падение на Землю незакреплённых тел (рис. 1.14).

Сила тяжести тела не зависит от скорости его относительного движения. Она пропорциональна массе m тела и может быть представлена в виде

$$\vec{F}_{\text{тяж}} = m\vec{g}. \quad (1.40)$$

В данном месте Земли вектор \vec{g} одинаков для всех тел и изменяется с изменением этого места.

Сила тяжести совпадает с силой тяготения к Земле только на её полюсах ($F_{\text{цб}} = 0$).

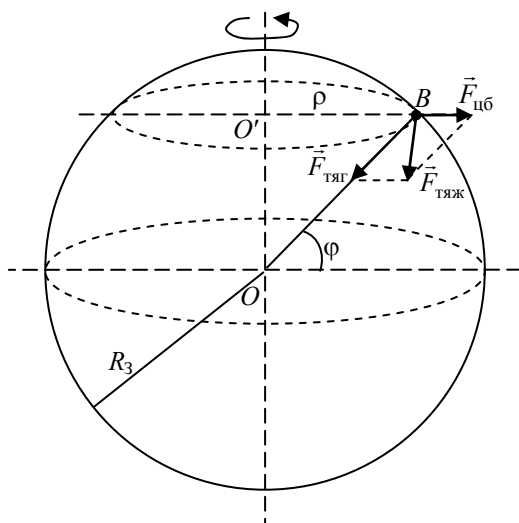


Рис. 1.14

Во всех точках земной поверхности, кроме полюсов и экватора, $\vec{F}_{\text{тяж}}$ и $\vec{F}_{\text{тяг}}$ не совпадают по величине и направлению. Но максимальный угол между ними не превосходит $6'$.

Сила тяжести уменьшается с увеличением высоты над поверхностью земли. Вблизи поверхности Земли это уменьшение составляет приблизительно 0,034% на каждый километр подъёма.

Ускорение g вблизи поверхности Земли изменяется от значения $9,78 \text{ м/с}^2$ на экваторе до значения $9,83 \text{ м/с}^2$ на полюсах. Это связано с зависимостью центробежной силы инерции от географической широты места, а также с нешарообразностью Земли, которая слегка сплюснута вдоль оси вращения. Полярный и экваториальный радиусы Земли равны $R_{\text{пол}} = 6357 \text{ км}$, $R_{\text{эkv}} = 6378 \text{ км}$.

Вес тела \vec{P} – это сила, с которой тело действует на опору или подвес вследствие притяжения к Земле. Вес приложен не к самому рассматриваемому телу, а к опоре или подвесу. Если опора (подвес) неподвижны относительно Земли, то вес тела равен силе тяжести тела.

Невесомость называется такое состояние механической системы, при котором действующее на неё гравитационное поле не вызывает взаимного давления частей системы друг на друга и их деформации. Состояние невесомости характерно, например, для тел, находящихся в космическом корабле, так как основную часть своей траектории в поле тяготения корабль проходит с неработающим двигателем.

Притягивать(ся)	Закон всемирного тяготения
Притяжение	Силы притяжения
Силы тяготения	Широта
Сила реакции	Суточное движение
Сила тяжести	Вес тела
Неинерциальная система отсчёта	Невесомость

Вопросы для повторения

- Какие силы называют силами тяготения?
- Как формулируется закон всемирного тяготения?
- Что такое сила тяжести?
- От чего зависит ускорение свободного падения?
- Что такое вес тела?

1.9. ИМПУЛЬС МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Импульсом \vec{p}_i *материальной точки* называется векторная величина, равная произведению массы m_i точки на скорость \vec{v}_i её движения:

$$\vec{p}_i = m_i \vec{v}_i. \quad (1.41)$$

Вектор импульса точки имеет такое же направление, как и вектор скорости точки.

Уравнение второго закона Ньютона (1.27) может быть записано в виде

$$\vec{F}\Delta t = \Delta \vec{p} = \Delta(m\vec{v}).$$

Произведение $\vec{F}\Delta t$ носит название *импульса силы*. Импульс силы, действующей на материальную точку, равен изменению импульса точки (тела).

Единица импульса – *килограмм на метр в секунду*, $[p] = 1 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{с}$ ($1 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s} = 1 \text{ Н}\cdot\text{с}$ ($1 \text{ N}\cdot\text{s}$)).

Если система состоит из n материальных точек, то её импульс \vec{p} равен сумме импульсов всех точек системы

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i. \quad (1.42)$$

Изменение импульса системы материальных точек (тел) определяется только действием внешних сил. Если внешние силы не действуют (замкнутая система), то в такой системе действуют только внутренние силы. Для замкнутой системы выполняется *закон сохранения импульса системы: в инерциальной системе отсчёта суммарный импульс замкну-*

той системы тел не изменяется во времени (остаётся постоянным). Взаимодействие между телами приводит к изменению импульсов отдельных тел, к передаче импульса от одного тела к другому, но это не изменяет суммарный импульс всей системы.

Закон сохранения импульса системы лежит в основе реактивного движения. Реактивным движением называют движение тела вследствие вытекания из него жидкости или газа.

При сгорании топлива и выбросе его из ракетного двигателя, масса ракеты уменьшается, а скорость – увеличивается.

Импульс точки (тела)

Импульс силы

Реактивное движение

Закон сохранения импульса

Суммарный импульс

Вопросы для повторения

- Что такое импульс материальной точки?
- Какие единицы импульса вы знаете?
- Что такое импульс силы?
- Что такое замкнутая система?
- Сформулируйте закон сохранения импульса системы тел.

1.10. ЭНЕРГИЯ. РАБОТА. МОЩНОСТЬ

Энергия (от греч. $\epsilon\nu\acute{\rho}\gamma\epsilon\iota\alpha$ – действие, деятельность) – общая количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи. Энергия не возникает из ничего и не исчезает, она может только переходить из одной формы в другую. Понятие энергии связывает воедино все явления природы.

В соответствии с различными формами движения материи рассматривают разные виды энергии: механическую, внутреннюю, электромагнитную, химическую, ядерную и др. Это деление до известной степени условно. Так, химическая энергия складывается из кинетической энергии движения электронов и электрической энергии их взаимодействия друг с другом и с атомными ядрами. Внутренняя энергия равна сумме кинетической энергии хаотического движения молекул относительно центра масс и потенциальной энергии взаимодействия молекул друг с другом.

Механическая энергия характеризует движение и взаимодействие тел и является функцией скоростей и взаимного расположения тел.

Изменение механического движения тела вызывается силами, действующими на него со стороны других тел. Для количественного описания такого процесса обмена энергией между взаимодействующими телами в механике пользуются понятием *работы силы*, которая приложена телу.

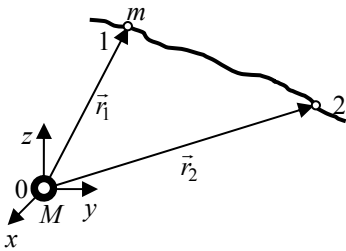


Рис. 1.15

Элементарной работой силы \vec{F} на малом перемещении $\Delta\vec{r}$ называется скалярная величина

$$\Delta A = F \Delta r \cos \alpha, \quad (1.43)$$

где α – угол между векторами \vec{F} и $\Delta\vec{r}$.

В случае действия на материальную точку системы n сил

$$\Delta A_{\Sigma} = F_{\Sigma} \Delta r \cos \alpha, \quad (1.43')$$

где F_{Σ} – модуль равнодействующей всех сил; α – угол между векторами \vec{F}_{Σ} и $\Delta\vec{r}$.

В обоих случаях сила является постоянной величиной.

Значение элементарной работы силы зависит от выбора системы отсчёта и может быть величиной положительной, отрицательной или равной нулю. Если в выбранной системе отсчёта проекция силы на направление перемещения $F \cos \alpha > 0$, то силу \vec{F} называют *движущей* силой. Если $F \cos \alpha < 0$, то силу \vec{F} называют *тормозящей* силой (силой сопротивления).

Из второго закона Ньютона (1.27) следует, что для материальной точки

$$\Delta A = \vec{v} \Delta \vec{p} = \vec{v} \Delta (m \vec{v}),$$

где \vec{p} – импульс точки; m – масса точки.

Потенциальными силами называются силы, работа которых зависит только от начального и конечного положения движущейся материальной точки и не зависит от формы траектории. К потенциальным силам относятся силы тяготения, силы упругости, электростатические силы и др.

Работа потенциальных сил определяется интегралом

$$A = \int_1^2 F dr, \quad (1.44)$$

где A – работа силы \vec{F} при перемещении точки из произвольного положения 1 в положение 2.

Работа силы тяготения при перемещении точки m относительно другой материальной точки M , помещённой в начало системы координат (рис. 1.15):

$$A_{\text{тяг}} = GmM \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right), \quad (1.45)$$

где r_1 и r_2 – модули радиус векторов точки в 1-м и 2-м положениях.

А работа силы тяжести при подъёме тела массой m на высоту h над поверхностью Земли равна

$$A_{\text{тяж}} = -\frac{GmM_3h}{R_3(R_3+h)}, \quad (1.46)$$

где M_3 – масса Земли; R_3 – радиус Земли.

Если $h \ll R_3$, то

$$A_{\text{тяж}} \approx -mgh. \quad (1.47)$$

Работа потенциальной силы при перемещении вдоль любой замкнутой траектории равна нулю.

Силы, работа которых зависит от формы траектории, называются *непотенциальными* силами. Работа непотенциальных сил при перемещении материальной точки по замкнутой траектории не равна нулю.

К непотенциальным силам относятся силы трения. В большинстве случаев, угол между силой трения и элементарным перемещением тела составляет π радиан, работа силы трения отрицательна. Найдём работу силы трения:

$$A_{\text{тр}} = \left| \vec{F}_{\text{тр}} \right| \left| \Delta \vec{r} \right| \cos \alpha = -F_{\text{тр}} s, \quad (1.48)$$

где s – путь между точками 1 и 2.

Работа силы трения тем больше, чем длиннее траектория.

Единица механической энергии (работы) – *джоуль*, $[E] = 1 \text{ Дж} (1 \text{ J}) = 1 \text{ Н}\cdot\text{м} (1 \text{ N}\cdot\text{m})$. Один джоуль – это работа силы 1 ньютона на пути в один метр.

Для характеристики работы, совершаемой за единицу времени, в механике пользуются понятием *мощности*.

Средняя мощность $\langle N \rangle$ – физическая величина, которая равна отношению работы ΔA , силы или системы сил в течение промежутка времени Δt к промежутку времени Δt :

$$\langle N \rangle = \frac{\Delta A}{\Delta t}. \quad (1.49)$$

Мощность (мгновенная мощность) – мощность в данный момент времени:

$$N = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \langle N \rangle = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta A}{\Delta t}. \quad (1.50)$$

Если материальная точка перемещается со скоростью v , то

$$N = Fv \cos \alpha,$$

где α – угол между векторами \vec{F} и \vec{v} .

Единица мощности – *ватт*, $[N] = 1 \text{ Вт} (1 \text{ W}) = 1 \text{ Дж/с} (1 \text{ J/s})$.

Для характеристики эффективности использования энергии машинами или механизмами введена величина – коэффициент полезного действия (КПД).

Коэффициент полезного действия (η) – это величина, которая равна отношению полезной работы (мощности) к полной работе (мощности), которую совершает машина.

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A} = \frac{N_{\text{п}}}{N}, \quad (1.51)$$

где $A_{\text{п}}$ ($N_{\text{п}}$) – полезная работа (мощность); A (N) – полная работа (мощность).

Коэффициент полезного действия всегда меньше 1.

Для отображения КПД в процентах необходимо η умножить на 100%.

Движение материи	Энергия
Формы движения материи	Механическая энергия
Работа	Потенциальные силы
Замкнутая траектория	Непотенциальные силы
Движущие силы	Тормозящие силы
Мощность	Коэффициент полезного действия

Вопросы для повторения

- Что называется энергией?
- Что такое механическая энергия?
- Что является причиной изменения механической энергии тела?
- Чему равна работа постоянной силы?
- Чему равна работа силы реакции опоры?
- Что является единицей работы?
- Что называется мощностью?
- Что является единицей мощности?
- Что называется коэффициентом полезного действия?

1.11. КИНЕТИЧЕСКАЯ И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИИ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Механическая энергия равна сумме кинетической и потенциальной энергий. Механическая энергия подчиняется закону сохранения.

Кинетической энергией E_k точки (тела) называется энергия его механического движения. Кинетическая энергия зависит от скорости движения тел в данной системе отсчёта.

Кинетическая энергия материальной точки с массой m , движущейся в данной инерциальной системе отсчёта со скоростью v , или имеющей импульс $p = mv$, равна

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}. \quad (1.52)$$

Кинетическая энергия системы n тел равна сумме кинетических энергий всех n тел, из которых состоит система.

Значения кинетической энергии материальной точки или тела зависят от выбора системы отсчёта, но не могут быть отрицательными ($E_k \geq 0$).

Теорема о кинетической энергии: изменение кинетической энергии тела ΔE_k при его переходе из одного состояния в другое равно алгебраической сумме работ всех внешних и внутренних сил, действующих на тело:

$$\Delta E_k = \Delta A_{\text{внешн}} + \Delta A_{\text{внутр}}.$$

Если тело не деформируется, то $\Delta A_{\text{внутр}} = 0$ и

$$\Delta E_k = \Delta A_{\text{внешн}} = E_{k2} - E_{k1}, \quad (1.53)$$

где E_{k2} и E_{k1} – кинетическая энергия тела в конечном и начальном положениях соответственно. Например, изменение кинетической энергии абсолютно твёрдого тела, движущегося поступательно,

$$\Delta E_k = \vec{F}_{\text{внешн}} \Delta \vec{r}. \quad (1.54)$$

Из формулы (1.54) следует, что кинетическая энергия имеет те же единицы, что и работа, т.е. 1 джоуль.

Потенциальной энергией E_n называется часть механической энергии, зависящая от конфигурации системы, т.е. от взаимного расположения её частей и их положения во внешнем силовом поле. Когда говорят о потенциальной энергии одной точки (тела), всегда имеют в виду другие точки (тела), с которыми рассматриваемые точки (тела) находятся во взаимодействии.

Нулевой уровень отсчёта потенциальной энергии выбирают произвольно, поэтому E_n может быть положительной, отрицательной или равной нулю.

Мерой изменения E_n системы при её переходе из одного состояния в другое является работа потенциальных сил, действующих на систему. При этом работа потенциальных сил $A_{\text{пот}}$ равна изменению потенциальной энергии ΔE_n системы при переходе её из начального состояния в конечное, взятому с обратным знаком:

$$A_{\text{пот}} = -\Delta E_n = -(E_{n2} - E_{n1}), \quad (1.55)$$

где E_{n2} и E_{n1} – потенциальная энергия системы в конечном и начальном состояниях соответственно.

Учитывая формулу (1.45), потенциальная энергия гравитационного взаимодействия материальных точек с массами m и M , находящихся на расстоянии r одна от другой, равна

$$E_{\text{п}} = -\frac{GmM}{r}. \quad (1.56)$$

Здесь нуль отсчёта $E_{\text{п}} = 0$ при $r = \infty$.

Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия тела массой m с Землёй равна

$$E_{\text{п}} = mgh, \quad (1.57)$$

где g – модуль ускорения свободного падения. Здесь нуль отсчёта потенциальной энергии выбран при $h = 0$, а также $h \ll R_3$.

Найдём работу силы тяжести при падении тела массой m с высоты h_1 до высоты h_2 (рис. 1.16).

Выберем нулевой уровень на поверхности Земли. Пусть $mgh_1 = E_{\text{п}1}$ – потенциальная энергия тела в положении 1, $mgh_2 = E_{\text{п}2}$ – потенциальная энергия тела в положении 2, тогда работу силы тяжести можно представить в виде убыли потенциальной энергии

$$A_{\text{тяж}} = -(E_{\text{п}2} - E_{\text{п}1}) = -(mgh_2 - mgh_1). \quad (1.58)$$

Работа силы тяжести (потенциальной силы) совершается за счёт убыли потенциальной энергии.

Потенциальная энергия упругого взаимодействия равна

$$E_{\text{п}} = \frac{k(\Delta l)^2}{2}, \quad (1.59)$$

где k – коэффициент, характеризующий упругие свойства деформируемого тела; Δl – модуль вектора деформации. При отсутствии деформации, т.е. при $\Delta l = 0$, эта энергия равна нулю.

Энергия механического движения и взаимодействия составляют *полную механическую энергию* тела. Механическая энергия E системы материальных точек равна сумме их кинетических энергий $E_{\text{к}}$ и потенциальной энергии $E_{\text{п}}$ взаимодействия этих точек друг с другом и с внешними телами:

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}}.$$

Система тел называется *консервативной*, если внутренние и внешние силы, действующие на тела системы, являются потенциальными.

Закон сохранения механической энергии: механическая энергия E консервативной системы сохраняется постоянной при движении системы:

$$E = \text{const}. \quad (1.60)$$

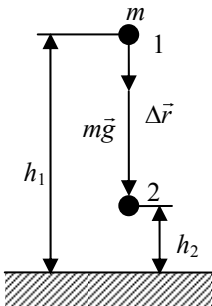


Рис. 1.16

Этот закон справедлив как для замкнутых, так и для незамкнутых консервативных систем.

Найдём скорость тела массой m в положении 2, которое перемещается под действием силы тяжести из положения 1 в положение 2 (см. рис. 1.16). В инерциальной системе отсчёта, связанной с Землёй, и при выборе нуля отсчёта на поверхности Земли имеем

$$\frac{mv_2^2}{2} + mgh_2 = \frac{mv_1^2}{2} + mgh_1. \quad (1.61)$$

Так как $v_1 = 0$, то

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)}. \quad (1.62)$$

Кинетическая энергия

Потенциальная энергия

Консервативная система

Полная механическая энергия

Вопросы для повторения

- Что называется потенциальной энергией?
- Что называется кинетической энергией?
- Как зависит кинетическая энергия тела от его скорости?
- Что составляет полную механическую энергию тела?
- От чего зависит потенциальная энергия тела, поднятого над Землёй?
 - Чему равна работа силы тяжести?
 - Чему равна работа силы упругости?
 - Сформулируйте закон сохранения механической энергии консервативной системы тел.

Часть 2. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ

Молекулярная физика и термодинамика – разделы физики, в которых изучаются макроскопические процессы в телах, связанные с огромным числом содержащихся в них атомов и молекул.

Для исследования этих процессов применяют два качественно различных и взаимно дополняющих друг друга метода: *статистический* (молекулярно-кинетический) и *термодинамический*. Первый лежит в основе молекулярной физики, второй – термодинамики.

Молекулярная физика – раздел физики, в котором изучаются строение и свойства веществ исходя из молекулярно-кинетических представлений, основывающихся на том, что все тела состоят из молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении. Законы поведения огромного числа молекул изучаются с помощью *статистического метода*. Этот метод основан на том, что свойства макроскопической системы определяются свойствами частиц системы, особенностями их движения и *усреднёнными* значениями динамических характеристик этих частиц (скорости, энергии и т.д.). Например, температура тела определяется скоростью хаотического движения его молекул, но так как в любой момент времени разные молекулы имеют различные скорости, то она может быть выражена только через среднее значение скорости движения молекул.

Термодинамика – раздел физики, в котором изучаются общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между этими состояниями. Термодинамика не рассматривает микропроцессы, которые лежат в основе этих превращений. Термодинамика базируется на двух началах – фундаментальных законах, установленных в результате обобщения опыта. Область применения термодинамики значительно шире, чем молекулярно-кинетической теории.

Молекулярно-кинетическая теория и термодинамика взаимно дополняют друг друга. Они отличаются различными методами исследования.

Термодинамика имеет дело с *термодинамической системой* – совокупностью макроскопических тел, которые взаимодействуют и обмениваются энергией как между собой, так и с другими телами (внешней средой). Основа термодинамического метода – определение *термодинамического состояния* термодинамической системы. Термодинамическое состояние системы определяется *термодинамическими параметрами* (*параметрами состояния*) – совокупностью физических величин, характеризующих свойства термодинамической системы. К термодинамическим параметрам относятся: температура, теплоёмкость, удельное электрическое сопротивление и многие другие физические величины. Основными

параметрами состояния химически однородной системы являются: *температура, давление и удельный объём*.

Макроскопическая система находится в *термодинамическом равновесии*, если её состояние с течением времени не меняется (предполагается, что внешние условия рассматриваемой системы при этом не изменяются).

Температура – одно из основных понятий, играющих важную роль не только в термодинамике, но и в физике в целом. Температура – физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы.

В настоящее время для измерения температуры можно применять только две температурные шкалы – термодинамическую и Международную практическую, градуированные соответственно в Кельвинах (К) и в градусах Цельсия (°С).

Температурная шкала – способ получения численных значений температуры посредством измерения другой физической величины, с которой температура связана известной физической зависимостью. Такой физической величиной может быть: электрическое сопротивление металла, тепловое расширение жидкости и т.д. Число температурных шкал может быть неограниченно велико.

В *Международной практической шкале* температура замерзания и кипения воды при давлении $1,013 \cdot 10^5$ Па соответственно 0 и 100 °С (реперные точки).

Термодинамическая температурная шкала определяется по одной реперной точке, в качестве которой взята тройная точка воды (температура, при которой лёд, вода и насыщенный пар при давлении 609 Па находятся в термодинамическом равновесии). Температура этой точки по термодинамической шкале равна 273,15 К. Градус Цельсия равен кельвину.

По определению термодинамическая температура T и температура по Международной практической шкале t связаны соотношением

$$T = 273,15 + t. \quad (2.1)$$

Температура $T = 0$ К называется нулём кельвин. 0 К недостижим, хотя приближение к нему сколь угодно близко возможно.

Давлением p называется физическая величина, равная модулю силы, действующей на единицу площади поверхности тела перпендикулярно к ней:

$$p = \frac{\Delta F_n}{\Delta S}. \quad (2.2)$$

Если на поверхности S давление везде постоянно, то

$$p = \frac{F_n}{S}. \quad (2.3)$$

Удельным объёмом v называется объём единичной массы:

$$v = \frac{1}{\rho}, \quad (2.4)$$

где ρ – плотность. Для однородного тела ($\rho = \text{const}$)

$$v = \frac{V}{M}, \quad (2.5)$$

где M – масса тела.

Молекулярная физика	Термодинамика
Макроскопическая система	Термодинамическая система
Термодинамические параметры	Температура
Температурная шкала	Давление
Объём	Термодинамическое равновесие

Вопросы для повторения

- Что изучает молекулярная физика?
- Что изучает термодинамика?
- Что такое термодинамическая система?
- Перечислите основные параметры состояния системы.
- Что такое температура?
- Какие температурные шкалы вы знаете?
- Укажите связь между термодинамической температурой и температурой по Международной практической шкале.

2.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

В основе молекулярно-кинетической теории (МКТ) строения вещества лежат три важнейших положения.

Первое положение МКТ. Все тела состоят из частиц – молекул, атомов и ионов.

Молекулой (новолат. *molecula*, уменьшительное от лат. *moles* – масса) называется наименьшая устойчивая частица данного вещества, обладающая его основными химическими и физическими свойствами.

Молекула состоит из нескольких *атомов* одинаковых или различных химических элементов. Можно считать молекулы системой атомов, связанных друг с другом различными связями.

Атом (от др.-греч. *ατομος* – неделимый) – наименьшая частица химического элемента, способная к самостоятельному существованию и являющаяся носителем его свойств. Атом состоит из электрически положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов.

Линейные размеры: атомных ядер $\sim 10^{-12} \dots 10^{-13}$ м; атома $\sim 10^{-10}$ м. Размеры молекул больше размеров атома. Размер молекулы воды $3 \cdot 10^{-10}$ м.

Масса атомов и молекул $\sim 10^{-27} \dots 10^{-23}$ кг. Масса молекулы воды $3 \cdot 10^{-26}$ кг.

Молекула и атом электрически нейтральны.

Ион (др.-греч. *ión* – идуший) – одноатомная или многоатомная электрически заряжённая частица, образующаяся в результате потери или присоединения атомом в составе молекулы одного или нескольких электронов. Положительно заряженные ионы называются *катионами*, отрицательно заряженные – *анионами*.

Количеством вещества называется физическая величина, определяемая числом специфических структурных элементов – молекул, атомов или ионов. Масса не является мерой количества вещества. Единицей количества вещества является *моль*, а также кратные и дольные от него единицы.

Моль – это количество однородного вещества, которое содержит столько структурных элементов (атомов, молекул, ионов), сколько атомов содержится в 0,012 кг изотопа углерода $^{12}_6\text{C}$.

Число атомов (молекул или других структурных единиц), содержащихся в одном моле вещества, называется *постоянной Авогадро* N_A :

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Объём одного моля называется молярным объёмом V_μ

$$V_\mu = \nu \mu = \mu / \rho, \quad (2.6)$$

где ν – удельный объём; ρ – плотность вещества; μ – масса одного моля (молярная масса).

Второе положение МКТ. Молекулы, атомы и ионы находятся в непрерывном хаотическом движении.

Хаотическое движение большого числа молекул, атомов и ионов в газах, твёрдых телах и жидкостях называется *тепловым движением*.

Броуновское движение и диффузия – убедительные доказательства теплового движения частиц вещества.

Броуновским движением называется непрерывное хаотическое движение частиц, взвешенных в жидкости или газе, происходящее под действием молекул окружающей среды. Наблюдаемые частицы размером $\approx 10^{-6}$ м и меньше совершают неупорядоченные независимые движения, описывая сложные зигзагообразные траектории. Интенсивность броуновского движения не зависит от времени, но возрастает с ростом температуры среды, уменьшением её вязкости и размеров частиц.

Причины броуновского движения – тепловое движение молекул среды и отсутствие точной компенсации ударов, испытываемых частицей со стороны окружающих молекул. Удары молекул среды приводят частицу в

беспорядочное движение: скорость её быстро меняется по величине и направлению. На рисунке 2.1 изображено броуновское движение трёх частиц в воде. Точками отмечены положения частиц через каждые 30 с. Радиус частиц $0,52 \cdot 10^{-6}$ м, расстояние между делениями сетки $3,4 \cdot 10^{-6}$ м.

Кроме поступательного броуновского движения существует также вращательное броуновское движение – беспорядочное вращение броуновской частицы под влиянием ударов молекул среды.

Диффузией (от лат. *diffusio* – распространение, рассеивание) называется неравновесный процесс, вызываемый молекулярным тепловым движением и приводящий к установлению равновесного распределения концентраций внутри фаз. Диффузия наблюдается в газах, жидкостях и твёрдых телах.

Примеры диффузии:

- а) граница раздела жидкостей с течением времени исчезнет;
- б) если бы не было диффузии, то вследствие различной силы тяжести молекул газов все составные части атмосферы были бы расслоены;
- в) притёртые и прижатые пластины золота и свинца «срастаются» на глубину примерно в 10^{-3} м за 5 лет.

Диффузия ускоряется с повышением температуры. Убыстрение диффузии связано с тем, что при повышении температуры возрастают скорости движения молекул.

Третье положение МКТ. Между частицами любого тела существуют *силы взаимодействия* – *притяжения* и *отталкивания*.

Силы межмолекулярного взаимодействия действуют одновременно и имеют электрическое происхождение.

На расстоянии r между центрами молекул $\sim 10^{-9}$ м действуют силы притяжения, которые увеличиваются по мере сближения молекул и быстро убывают с увеличением расстояния между молекулами. Эти силы зависят от строения молекул.

На расстоянии r между центрами молекул, сравнимых с линейными размерами молекул ($\sim 10^{-10}$ м), проявляют себя силы отталкивания, главным образом за счёт взаимного отталкивания положительно заряженных ядер атомов молекул. Силы отталкивания убывают с увеличением расстояния между молекулами ещё быстрее, чем силы притяжения, и также зависят от строения молекул.

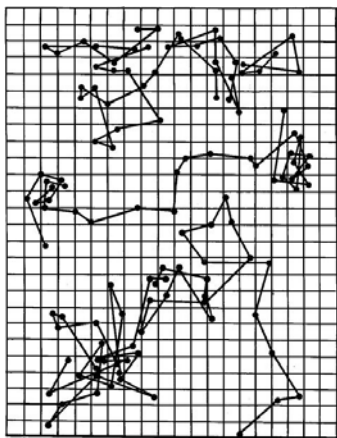


Рис. 2.1

Так как силы притяжения и отталкивания существуют одновременно, то на молекулу действует равнодействующая сил межмолекулярного взаимодействия $F(r)$, рис. 2.2.

При $r = r_0$ силы притяжения уравновешивают силы отталкивания и $F(r) = 0$. Этому соответствует наиболее устойчивое расположение взаимодействующих молекул. При растяжении или сжатии твёрдого тела силы взаимодействия способствуют возвращению частиц в первоначальное положение.

Потенциальная энергия взаимодействия двух молекул

Система из двух молекул является консервативной. Потенциальной энергией $E_n(r)$ взаимодействия двух молекул называется часть энергии системы двух молекул, зависящая от расстояния r между молекулами. Величина $E_n(r)$ измеряется той работой, которая совершается силой $F(r)$ при изменении расстояния между молекулами от r до ∞ . $E_n(r) = 0$ при $r \rightarrow \infty$. Если молекулы под действием силы притяжения сближаются на малое расстояние, то система совершает положительную работу, потенциальная энергия уменьшается. Из закона сохранения энергии следует, что при этом увеличивается кинетическая энергия молекул. При сближении двух молекул в области действия сил притяжения потенциальная энергия их взаимодействия является величиной отрицательной.

Если две молекулы сближаются на расстояние, где действуют силы отталкивания, то система совершает отрицательную работу. Потенциальная энергия увеличивается, а кинетическая энергия уменьшается. $E_n(r) > 0$. При $r = d$ (рис. 2.3) вся кинетическая энергия молекул израсходована на совершение работы против сил отталкивания. $E_n(r)$ достигает максимального значения и равна полной энергии системы двух молекул E .

Несимметричность кривой объясняется совместным действием сил притяжения и отталкивания, которые по-разному зависят

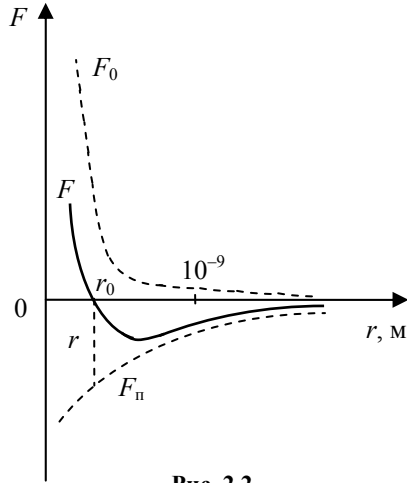


Рис. 2.2

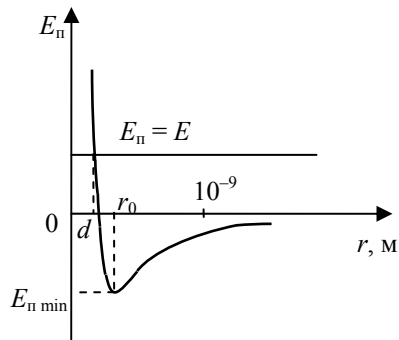


Рис. 2.3

от расстояния. Чем больше кинетическая энергия молекул (больше температура), тем меньше расстояние d . Также d зависит от строения молекул. Расстояние d – эффективный диаметр молекулы, который определяет размеры области, в которую другая молекула проникнуть не может.

При $r = r_0$ система молекул находится в состоянии устойчивого равновесия. Этому соответствует наименьшее значение $E_{п}(r) = E_{п\ min}$. Если средняя кинетическая энергия молекулы $\langle \varepsilon_0 \rangle$, то сравнение $\langle \varepsilon_0 \rangle$ с $E_{п\ min}$ позволяет различить три агрегатных состояния вещества: твёрдое, жидкое и газообразное: $\langle \varepsilon_0 \rangle \gg E_{п\ min}$ – газ; $\langle \varepsilon_0 \rangle \ll E_{п\ min}$ – твёрдое тело; $\langle \varepsilon_0 \rangle \approx E_{п\ min}$ – жидкость.

В газах силы притяжения между молекулами не могут удержать их вместе и молекулы разлетаются в разные стороны, занимая весь объём сосуда, в котором находится газ. Газы не имеют определённого объёма и формы. Расстояние между молекулами в среднем во много раз больше размеров самих молекул. Газы легко сжимаются под действием внешнего давления. Скорости молекул – сотни метров в секунду. Но из-за частых соударений с другими молекулами путь представляет собой ломаную линию, состоящую из большого числа коротких прямолинейных отрезков.

В твёрдых телах силы взаимного притяжения частиц больше, чем в газах. Частицы твёрдого тела не могут удалиться от других частиц. Твёрдые тела имеют постоянные форму и объём. Тепловое движение частиц представляет собой хаотические колебания относительно их положения равновесия.

Жидкости по своему строению и характеру теплового движения занимают промежуточное положение. Жидкости имеют определённый объём, но не имеют своей формы, принимая форму сосуда, в котором находятся. Потенциальная энергия взаимодействия молекул жидкости соизмерима с кинетической энергией молекул. Молекулы жидкости совершают хаотические колебания около определённого положения равновесия. По истечении некоторого времени положения равновесия молекул перемещаются на расстояние порядка среднего расстояния между молекулами (10^{-10} м). Перемещение совершается скачком. Время между скачками быстро убывает с повышением температуры.

Структурные единицы	Молекула
Атом	Ион
Моль	Однородное вещество
Постоянная Авогадро	Хаотическое движение
Броуновское движение	Диффузия
Силы притяжения	Силы отталкивания
Устойчивое равновесие	Агрегатное состояние

Вопросы для повторения

- Как формулируются основные положения МКТ строения вещества?
- Что такое молекула?
- Что такое атом?
- Что такое броуновское движение?
- Что такое диффузия?
- Как зависят силы молекулярного взаимодействия от расстояния между молекулами?
 - Как движутся частицы газов?
 - Какой характер движения имеют частицы твёрдого тела?
 - Как движутся частицы жидкости?

2.2. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

В МКТ используют идеализированную модель реальных газов – идеальный газ. Модель предложена в 1847 г. **Дж. Герпато** (John Herapath (1790 – 1868), англ.).

Идеальный газ – теоретическая модель газа, в которой:

- пренебрегают размерами и взаимодействием частиц газа;
- столкновения молекул газа между собой и со стенками сосуда – абсолютно упругие.

В расширенном понимании идеальный газ состоит из частиц, представляющих собой упругие сферы радиусом r или эллипсоиды, у них проявляется атомная структура. Расширенная модель позволяет учитывать не только поступательное, но и вращательное и колебательное движения его частиц, вводить в рассмотрение как центральное, так и нецентральное соударение.

Внутренняя энергия идеального газа определяется только кинетической энергией его частиц. На основе этой модели были теоретически выведены экспериментально установленные газовые законы (Бойля–Мариотта, Гей-Люссака, Шарля, Авогадро). Теоретически отклонения от законов идеальных газов были обоснованы в 1883 г. **Й. Д. Ван-дер-Ваальсом** (J. D. van der Waals (1837 – 1923), нидерл.).

Модель идеального газа справедлива для реальных газов при достаточно высоких температурах и малых давлениях. Например, гелий при комнатной температуре и атмосферном давлении с хорошим приближением подчиняется законам идеальных газов.

Основные законы идеальных газов, *уравнение состояния и закон Авогадро*, впервые связали макрохарактеристики газа (давление, температура, массу) с массой его молекулы.

Давление газа. Каждая молекула газа, ударяясь о стенку сосуда, в течение малого промежутка времени действует на неё с некоторой силой.

Действия, вызванные ударами отдельных молекул, очень малы. Но газ содержит огромное число молекул.

Давление газа на любую поверхность сосуда равна модулю средней силы, действующей со стороны газа на единицу площади:

$$p = \frac{\langle F \rangle}{S}, \quad (2.7)$$

где p – давление газа; $\langle F \rangle$ – модуль средней силы; S – площадь поверхности.

Давление газа зависит от числа молекул в единице объёма и от средней кинетической энергии движения молекул.

Единица давления – *паскаль*, $[p] = 1 \text{ Па} (1 \text{ Pa}) = 1 \text{ Н/м}^2 (1 \text{ N/m}^2)$.

Модель идеального газа позволяет оценить скорость молекул газов и среднюю длину свободного пробега молекулы.

Скорость молекул газов. Движение каждой молекулы может быть описано законами механики Ньютона. Но число молекул в любом газе очень большое. В таком случае для исследования применяется статистический метод. Этим методом вычисляются средние значения физических величин.

Средняя арифметическая скорость движения молекул при данной температуре T по модулю

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}, \quad (2.8)$$

где R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$; μ – молярная масса.

Средняя квадратичная скорость движения N молекул

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}. \quad (2.9)$$

Средней длиной свободного пробега $\langle l \rangle$ называется среднее расстояние, которое молекула проходит без соударения. На длине свободного пробега молекула движется равномерно и прямолинейно.

Средняя длина свободного пробега

$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}n\pi d^2}, \quad (2.10)$$

где n – число молекул в единице объёма; d – эффективный диаметр молекулы.

Для данного газа при неизменной температуре ($T = \text{const}$) для двух его состояний

$$p_1 \langle l_1 \rangle = p_2 \langle l_2 \rangle. \quad (2.11)$$

где p – давление газа.

Основное уравнение кинетической теории газов устанавливает зависимость между давлением газа p , его объёмом V и кинетической энергией поступательного движения его молекул E_k

$$pV = \frac{2}{3} E_k, \quad (2.12)$$

где $E_k = \sum_{i=1}^N \frac{mv_i^2}{2}$ – суммарная кинетическая энергия поступательного движения N одинаковых молекул газа; m – масса молекулы; v_i – скорость молекулы.

Другая форма записи основного уравнения с использованием среднеквадратичной скорости

$$pV = \frac{1}{3} Nm \langle v_{\text{кв}} \rangle^2. \quad (2.13)$$

Это уравнение позволяет найти давление газа

$$p = \frac{1}{3} nm \langle v_{\text{кв}} \rangle^2, \quad (2.14)$$

где n – число молекул газа в единице объёма ($n = N/V$ – концентрация молекул).

Давление идеального газа зависит от концентрации молекул и их среднеквадратичной скорости.

Для одного моля газа объёмом V_μ уравнение (2.13) имеет вид

$$pV_\mu = \frac{1}{3} N_A m \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 = \frac{2}{3} N_A \frac{m \langle v_{\text{кв}} \rangle^2}{2} = \frac{2}{3} N_A \langle \varepsilon_0 \rangle, \quad (2.15)$$

где $\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{m \langle v_{\text{кв}} \rangle^2}{2}$ – средняя кинетическая энергия хаотического теплового движения молекулы газа.

Из уравнения (2.15) можно получить зависимость $\langle \varepsilon_0 \rangle$ от термодинамической температуры T

$$\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{3}{2} kT, \quad (2.16)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Данная формула раскрывает физический смысл термодинамической температуры. *Термодинамическая температура* является мерой средней кинетической энергии теплового хаотического движения молекул идеального газа.

Давление идеального газа зависит от концентрации его молекул и термодинамической температуры

$$p = nkT. \quad (2.17)$$

При одинаковых давлениях и температурах концентрация молекул у всех газов одна и та же.

Закон Авогадро. В равных объёмах газов при одинаковых температурах и давлениях содержится одинаковое число молекул.

При температуре 0 К давление или объём идеального газа обращается в нуль. Удобно отсчитывать температуру от абсолютного нуля. Так строится термодинамическая температурная шкала.

Идеальный газ	Давление газа
Скорость молекул	Свободный пробег
Постоянная Больцмана	Уравнение состояния
Основное уравнение	

Вопросы для повторения

- Что такое идеальный газ?
- Как можно объяснить давление газа с точки зрения МКТ?
- Чему равно давление газа?
- Как читается основное уравнение МКТ газов?
- Какой физический смысл термодинамической температуры?

2.3. ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

Уравнение состояния. Два состояния тела (системы тел) считаются различными, если для них неодинаковы значения хотя бы одного из термодинамических параметров.

Если ни один термодинамический параметр системы тел, определяющий её состояние, не меняется во времени, то состояние называется *стационарным*.

Стационарное *состояние* называется *равновесным*, если параметры системы не меняются в условиях изолированности от окружающей среды. Равновесное состояние определяется только тремя термодинамическими параметрами – p , v и T (основными параметрами состояния).

В равновесном состоянии тела:

– параметры его состояния равны соответствующим параметрам состояния внешней среды;

– параметры состояния p , v и T одинаковы во всех частях тела.

Между тремя основными параметрами состояния тела существует связь, называемая *уравнением состояния*. Оно записывается в форме функциональной зависимости между p , v и T :

$$f(p, v, T) = 0. \quad (2.18)$$

Это уравнение описывает только равновесные состояния тела.

Уравнение состояния позволяет:

1. Определить одну из величин, характеризующих состояние системы, если известны две другие величины.
2. Сказать, как протекают в системе различные процессы при определённых внешних условиях.
3. Определить, как меняется состояние системы, если она совершает работу или получает теплоту от окружающих тел.

Уравнение состояния идеального газа для одного моля имеет вид

$$pV_{\mu} = RT, \quad (2.19)$$

где p , V_{μ} , T – давление, молярный объём и термодинамическая температура газа; R – молярная газовая постоянная.

Данное уравнение называют уравнением Клапейрона (**Бенуа Поль Эмиль Клапейрон** (фр. Benoît Paul Émile Clapeyron; (1799 – 1864)) – французский физик и инженер).

Уравнение состояния для произвольной массы M идеального газа

$$pV = \frac{M}{\mu} RT. \quad (2.20)$$

Уравнение (2.20) называют уравнением Клапейрона–Менделеева (**Дмитрий Иванович Менделеев** – великий русский учёный-энциклопедист: химик, физик, метролог, экономист, технолог, геолог, метеоролог, педагог, 1834 – 1907).

Чтобы правильно описать состояние реального газа, необходимо учитывать притяжение частиц и их истинный объём. Уравнение состояния для одного моля реального газа получено **Ван-дер-Ваальсом** (голл., физик, 1837 – 1923).

Уравнение состояния смеси идеальных газов находится при помощи эмпирически установленного *закона Дальтона* (англ., химик и физик, 1766 – 1844). Пусть в различных сосудах одинакового объёма V заключены различные идеальные газы, поддерживаемые при одной и той же температуре T . Обозначим давления этих газов через p_1 , p_2 , p_3 . Какое давление p установится, если все газы смешать в том же объёме и поддерживать прежнюю температуру смеси T ? В соответствии с законом Дальтона

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots \quad (2.21)$$

Давления p_1 , p_2 , p_3 называются *парциальными давлениями* газов, входящих в смесь. Таким образом, по закону Дальтона *давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений этих газов*.

Всякое изменение состояния тела (системы тел) называется *термодинамическим процессом*. Например, при увеличении давления, оказываемого на газ, происходит уменьшение его объёма. При повышении температуры металлического стержня он удлиняется.

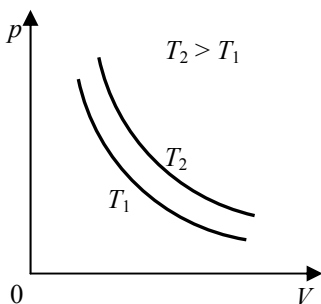


Рис. 2.4

Равновесным процессом называется термодинамический процесс, при котором тело проходит непрерывный ряд равновесных состояний.

Для изучения и сравнения различных термодинамических процессов их изображают графически. Графически можно изобразить только равновесные процессы. В случае неравновесных процессов нельзя говорить о параметрах состояния p , v , T всего тела, так как параметры состояния p , v и T неодинаковы во

всех частях тела и теряет смысл уравнение состояния тела.

Законы изопроцессов в идеальных газах. *Изопроцессами* называются термодинамические процессы, протекающие в системе с неизменной массой при постоянном значении одного из параметров состояния системы:

- *изотермический* процесс при $T = \text{const}$;
- *изобарический (изобарный)* процесс при $p = \text{const}$;
- *изохорический (изохорный)* процесс при $V = \text{const}$.

Изотермический процесс подчиняется *закону Бойля–Мариотта* (**Р. Бойль** (1627 – 1691) – английский учёный; **Э. Мариотт** (1620 – 1684) – французский физик): для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления газа на его объём есть величина постоянная:

$$pV = \text{const} \quad (2.22)$$

при $T = \text{const}$, $m = \text{const}$.

График зависимости между параметрами состояния газа при постоянной температуре называется *изотермой*. Изотермы в координатах p , V представляют собой гиперболы, расположенные на графике тем выше, чем выше температура, при которой происходит процесс (рис. 2.4).

Для изобарического процесса справедлив закон Гей-Люссака (**Ж. Гей-Люссак** (1778 – 1850) – французский учёный): при постоянном давлении объём данной массы газа прямо пропорционален его термодинамической температуре:

$$V = V_0(1 + \alpha_V t) = V_0 \frac{T}{T_0} \quad (2.23)$$

при

$$p = \text{const}, m = \text{const},$$

где V_0 – объём идеального газа при $T_0 = 273,15$ К; $\alpha_V = 1/T_0$ – термический коэффициент объёмного расширения, который считается одинаковым для всех идеальных газов. Характеризует относительное увеличение объёма газа при изменении его температуры на один градус.

На рисунке 2.5 зависимость V от T изображается отрезком прямой.

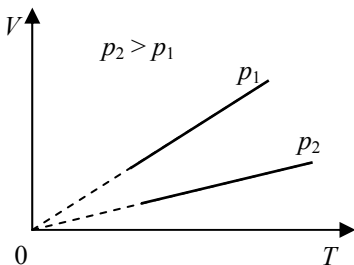


Рис. 2.5

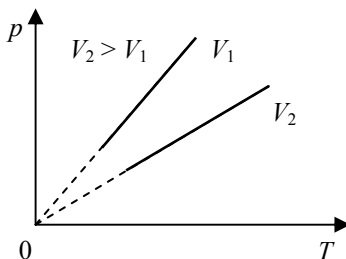


Рис. 2.6

Изохорический процесс описывается законом Шарля (**Ж. Шарль** (1746 – 1823) – французский учёный): при постоянном объёме давление данной массы газа прямо пропорционально его термодинамической температуре:

$$p = p_0 \left(1 + \alpha_p t\right) = p_0 \frac{T}{T_0} \quad (2.24)$$

при

$$V = \text{const}, m = \text{const},$$

где p_0 – давление идеального газа при $T_0 = 273,15$ К; $\alpha_p = p/(p_0 T)$ – термический коэффициент давления, который характеризует относительное увеличение давления газа при нагревании его на один градус.

На рисунке 2.6 зависимость p от T изображается отрезком прямой.

В области низких температур законы идеальных газов неприменимы.

Законы изопроцессов могут быть получены из уравнения Клапейрона – Менделеева.

Стационарное состояние	Уравнение состояния
Уравнение Клапейрона–Менделеева	
Изопроцессы	Изотермический процесс
Изобарический процесс	Изохорический процесс
Изотерма	Изохора
Изобара	

Вопросы для повторения

- Какие макропараметры определяют состояние идеального газа?
- Какое уравнение называется уравнением состояния?
- Сформулируйте закон Клапейрона.
- Что описывает закон Клапейрона–Менделеева?
- Как формулируется закон Дальтона?
- Какие процессы называются изопроцессами?
- Сформулируйте закон Бойля–Мариотта.
- Как формулируется закон Гей-Люссака?
- Как формулируется закон Шарля?

2.4. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Внутренняя энергия. Важной характеристикой тела (системы тел) является внутренняя энергия тела (системы тел) U . Она состоит из следующих частей:

- кинетической энергии теплового хаотического движения частиц (молекул, атомов, ионов и др.);
- потенциальной энергии частиц, обусловленной силами их межмолекулярного взаимодействия.

При фундаментальных исследованиях также рассматривают:

- энергию электронов в электронных слоях атомов и ионов;
- внутриядерную энергию.

Внутренняя энергия определяется термодинамическим состоянием системы и не зависит от того, каким образом система оказалась в этом состоянии.

Внутренняя энергия одного моля одноатомного идеального газа (потенциальная энергия взаимодействия частиц равна 0) зависит только от его термодинамической температуры T :

$$U = \frac{3}{2} RT, \quad (2.25)$$

где R – универсальная газовая постоянная.

Внутренняя энергия не зависит от объёма и других макроскопических параметров системы.

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа массой M равна

$$U = \frac{3}{2} \frac{M}{\mu} RT. \quad (2.26)$$

У одноатомного газа три степени свободы поступательного движения. На каждую степень свободы приходится одинаковая кинетическая энергия.

Изменение внутренней энергии моля такого газа (газа массой M) ΔU при переходе его из одного состояния в другое пропорционально изменению температуры ΔT :

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} RT_2 - \frac{3}{2} RT_1 = \frac{3}{2} R \Delta T, \quad (2.27)$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{M}{\mu} R \Delta T, \quad (2.27')$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$.

Внутренняя энергия неоднаатомного идеального газа зависит от числа степеней свободы молекулы газа. У трёхатомной молекулы газа три степени свободы поступательного и три степени свободы вращательного движений.

У реальных газов потенциальная энергия взаимодействия молекул *не равна нулю*. Правда, она много меньше кинетической энергии молекул, но для твёрдых и жидких тел сравнима с ней.

Потенциальная энергия взаимодействия молекул газа зависит от объёма вещества, так как при изменении объёма вещества меняется среднее расстояние между молекулами. Следовательно, внутренняя энергия U реального газа в термодинамике в общем случае зависит и от температуры T , и от объёма V .

Работа в термодинамике. Представления о работе и энергии, рассмотренные в механике, используются и в термодинамике. Необходимым условием совершения телом (или системой) работы является перемещение тела при наличии действующих сил. При этом происходит изменение состояния тела (или системы).

Различаются работа A , которая совершается *над внешними телами*, и работа A' , которая совершается внешними силами *над системой*. Эти работы численно равны и противоположны по знаку:

$$A = -A'. \quad (2.28)$$

Работа A принимается положительной, работа A' – отрицательной.

В термодинамике движение тела как целого не рассматривается, речь идёт о перемещении частей макроскопического тела друг относительно друга. В результате может меняться объём тела, а его скорость остаётся равной нулю. Работа в термодинамике определяется так же, как и в механике, но она равна не изменению кинетической энергии тела, а изменению его внутренней энергии.

Работой расширения идеального газа называется работа, которую совершает газ против внешнего давления (рис. 2.7). Пусть идеальный газ находится в цилиндре с подвижным поршнем. Силой тяжести поршня и силой его трения о стенки сосуда пренебрегаем.

Тогда элементарная работа ΔA определяется формулой

$$\Delta A = pS\Delta x = p\Delta V, \quad (2.29)$$

где p – внешнее давление; S – площадь поршня, под которым находится газ; Δx – элементарное перемещение поршня из положения 1 в положение 2; $\Delta V = S\Delta x$ – приращение объёма газа.

Такой же формулой выражается работа, совершаемая не только газом, но и любым телом против внешнего давления.

При расширении газа он совершает положительную работу против внешних сил ($\Delta V > 0$). При сжатии газа совершается

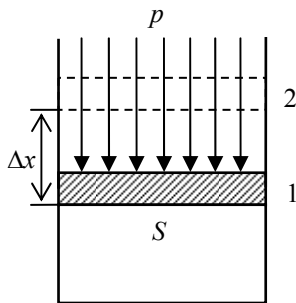


Рис. 2.7

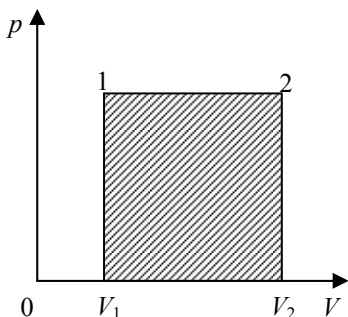


Рис. 2.8

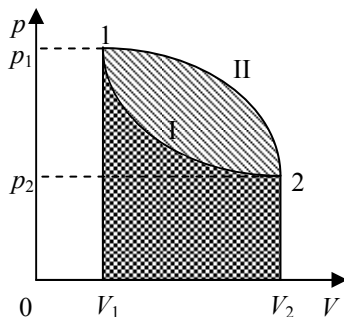


Рис. 2.9

отрицательная работа ($\Delta V < 0$). Она совершается теми внешними телами, которые создали внешнее давление.

В общем случае работа, которая совершается газом против внешних сил при переходе из состояния 1 в состояние 2, равна:

$$A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV . \quad (2.30)$$

В случае изобарического процесса ($p = \text{const}$) работа расширения

$$A = p(V_2 - V_1), \quad (2.31)$$

где V_2 и V_1 – начальный и конечный объёмы тела.

При изобарическом процессе работа расширения изображается на диаграмме $p - V$ площадью заштрихованного прямоугольника (рис. 2.8). При любом процессе работа измеряется площадью, ограниченной кривой процесса, осью абсцисс и вертикальными прямыми $V = V_1$ и $V = V_2$ (рис. 2.9).

Работа расширения, совершаемая телом (системой тел), зависит от характера процесса изменения его состояния (см. рис. 2.9). Площади под кривыми процессов 1–I–2 и 1–II–2 различны. На этом основано действие тепловых машин.

Работа, совершённая системой в том или ином процессе, является мерой изменения её энергии в этом процессе. При совершении работы энергия упорядоченного движения одного тела переходит в энергию упорядоченного движения другого тела. Например, газ, расширяющийся в цилиндре двигателя внутреннего сгорания, перемещает поршень и передаёт ему свою энергию. Электродвигатели, приводящие в движение разнообразные станки и машины, также осуществляют передачу энергии.

Теплота. *Теплотой* называется такая форма *передачи* энергии, при которой осуществляется непосредственный обмен энергией между хаотически движущимися частицами взаимодействующих тел. Например, при

соприкосновении двух тел с различной температурой частицы более нагретого тела передают часть своей энергии частицам менее нагретого тела. Внутренняя энергия первого тела уменьшается, а второго – увеличивается, и их температуры выравниваются.

«Запас теплоты в теле» – это неправильное выражение. Здесь смешивается один из видов энергии с формой передачи энергии – теплотой.

Процесс передачи внутренней энергии без совершения работы называется *теплообменом*. Мерой энергии, переданной в форме теплоты в процессе теплообмена, служит величина, называемая *количеством теплоты (теплотой)*.

В реальных условиях два способа передачи энергии (в форме работы и в форме теплоты) сопутствуют друг другу. Например, при нагревании металлического стержня происходит увеличение его внутренней энергии и одновременно тепловое расширение стержня, а, следовательно, совершается работа расширения.

Количество теплоты обозначают Q . Единица количества теплоты, как и работы, в Международной системе единиц – *джоуль*. Для измерения количества теплоты применяется и внесистемная единица *калория*. 1 калория = 4,19 Дж. 1 Дж = 0,24 калории.

Теплоёмкость. *Теплоёмкостью* C называется физическая величина, равная отношению количества теплоты Q , которое необходимо сообщить телу для нагревания его на 1 К:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}. \quad (2.32)$$

Теплоёмкость тела зависит от его массы, химического состава, термодинамического состояния и вида процесса. Для нагревания данной массы газа на один градус требуется различное количество теплоты, если нагревание происходит в различных условиях, например при постоянном объёме или при постоянном давлении. Во втором случае требуется большее количество теплоты.

В случае адиабатического (адиабатного) процесса, когда $Q = 0$, теплоёмкость равна нулю. *Адиабатическим (адиабатным)* процессом называется термодинамический процесс, который осуществляется в системе без теплообмена её с внешними телами. Примером адиабатного процесса может служить быстрое расширение в атмосферу газа из термоизолированного сосуда. Адиабатный процесс происходит только за счёт убыли внутренней энергии газа. При этом резко падает давление газа и происходит понижение его температуры.

При изотермическом процессе ($\Delta T = 0$) понятие теплоёмкости не имеет смысла ($C = \infty$). При кипении жидкости и плавлении твёрдых тел изменения температуры не происходит ($\Delta T = 0$) и понятие теплоёмкости не применяется.

Единица теплоёмкости – 1 джоуль на Кельвин, $[C] = 1 \text{ Дж/К}$ (1 J/K).

Удельная теплоёмкость вещества c – величина, равная количеству теплоты, необходимому для нагревания 1 кг вещества на 1 К:

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m\Delta T}. \quad (2.33)$$

В таблицах теплоёмкостей указываются условия, для которых данные таблицы справедливы. Единица удельной теплоёмкости – 1 джоуль на килограмм Кельвин, $[c] = 1 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ (1 J/(kg·K)).

Молярная теплоёмкость C_μ – величина, равная количеству теплоты, необходимому для нагревания 1 моль вещества на 1 К:

$$C_\mu = c\mu, \quad (2.34)$$

где μ – молярная масса вещества.

Единица молярной теплоёмкости – 1 джоуль на моль Кельвин, $[C_\mu] = 1 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$ (1 J/(M·K)).

Количество теплоты Q , необходимое для нагревания тела от температуры T до температуры $T + \Delta T$, равно

$$Q = C\Delta T. \quad (2.35)$$

Для тела массой m

$$Q = mc\Delta T. \quad (2.36)$$

Различают теплоёмкости при постоянном объёме и постоянном давлении, если в процессе нагревания вещества его объём или давление поддерживается постоянным.

Термодинамика	Внутренняя энергия
Расширение газа	Сжатие газа
Работа расширения газа	Теплота
Передача энергии	Теплообмен
Количество теплоты	Теплоёмкость
Удельная теплоёмкость	Молярная теплоёмкость

Вопросы для повторения

- Что изучает термодинамика?
- Чему равна внутренняя энергия одноатомного идеального газа?
- Что называют работой расширения идеального газа?
- Как определить работу расширения на диаграмме $p - V$?
- Что такое теплообмен?
- Что называют количеством теплоты?
- Чему равна теплоёмкость тела?
- Чему равна удельная теплоёмкость?

2.5. ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Внутренняя энергия тела может изменяться за счёт двух различных процессов:

- совершения над телом работы A' внешними силами;
- сообщения ему количества теплоты Q .

Первый закон (начало) термодинамики. Изменение внутренней энергии ΔU тела (системы) при переходе из одного состояния в другое равно сумме совершённой над телом работы A' и полученного им количества теплоты Q :

$$\Delta U = A' + Q. \quad (2.37)$$

В этой формулировке учитывается, что существуют две формы передачи энергии – работа и теплота.

Но $A' = -A$ (работе, совершённой телом или системой над внешними силами), тогда

$$Q = \Delta U + A. \quad (2.38)$$

Количество теплоты Q , которое получено телом (системой), расходуется на изменение внутренней энергии ΔU и на работу A тела (системы) против внешних сил. Это другая формулировка первого закона термодинамики. Например, если к газу, заключённому в сосуде под поршнем, подводится некоторое количество теплоты, то оно может быть израсходовано на повышение температуры газа и на работу против внешнего давления p при перемещении поршня (см. рис. 2.7).

Этот закон был открыт в середине XIX в. немецким учёным, врачом по образованию, Р. Майером (1814 – 1878), английским учёным Дж. Джоулем (1818 – 1889) и получил наиболее точную формулировку в трудах немецкого учёного Г. Гельмгольца (1821 – 1894).

Первый закон (начало) термодинамики – это закон сохранения энергии, распространённый на тепловые явления. Он показывает, от каких причин зависит изменение внутренней энергии.

Закон сохранения энергии. Энергия в природе не возникает из ничего и не исчезает: количество энергии неизменно, она только переходит из одной формы в другую.

Законы сохранения – это физические закономерности, согласно которым численные значения некоторых физических величин не изменяются со времени в любых процессах или в определённом классе процессов. Важнейшими законами сохранения, справедливыми для любых изолированных систем, являются законы сохранения энергии, импульса, углового момента, электрического заряда.

Применение первого закона термодинамики к изопроцессам в идеальном газе

1. Изотермический процесс ($T = \text{const}$). Температура газа не меняется, следовательно, не изменяется и внутренняя энергия ($\Delta U = 0$). Всё под-

ведённое количество теплоты расходуется на работу против внешнего давления:

$$Q = A. \quad (2.39)$$

2. Изохорический процесс ($\Delta V = 0$). Газ не совершает работу ($A = 0$), следовательно, всё количество теплоты Q идёт только на увеличение внутренней энергии газа:

$$Q = \Delta U. \quad (2.40)$$

3. Изобарический процесс ($p = \text{const}$). Количество теплоты, подводимое к газу, расходуется и на увеличение внутренней энергии и на работу расширения, которую совершает газ против внешнего давления:

$$Q = \Delta U + A. \quad (2.41)$$

Адиабатический процесс ($Q = 0$). Если нет теплообмена, работа, которую совершает тело против внешних сил, происходит за счёт убыли его внутренней энергии:

$$A = -\Delta U. \quad (2.42)$$

Например, при адиабатическом расширении идеального газа, работа расширения газа против внешних сил сопровождается убылью его внутренней энергии и охлаждением.

Второй закон термодинамики имеет несколько формулировок:

– невозможен процесс, единственным результатом которого является передача энергии в форме теплоты от менее нагретого тела к более нагретому телу;

– невозможен периодический процесс, единственным результатом которого является превращение теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную ей работу.

Второй закон динамики указывает на необратимость процесса превращения одной формы передачи энергии – работы в другую форму передачи энергии – теплоту. Например, при относительном перемещении тел при наличии трения происходит необратимый переход энергии движения тела в энергию теплового движения частиц тел.

Термодинамический процесс называется *обратимым*, если он допускает возвращение тела (системы) в первоначальное состояние без того, чтобы в окружающей среде остались какие-либо изменения. Всякий термодинамический процесс, не удовлетворяющий условиям обратимости, называется *необратимым* термодинамическим процессом. Все реальные процессы являются необратимыми.

Третий закон термодинамики рассматривает поведение термодинамической системы при $T \rightarrow 0$. Третий закон термодинамики приводит к недостижимости абсолютного нуля температуры. Для всех тел при абсолютном нуле обращаются в нуль теплоёмкости и коэффициенты линейного расширения.

Внутренняя энергия
Закон сохранения

Законы термодинамики

Вопросы для повторения

- Чему равна внутренняя энергия тела?
- Как формулируется первый закон (начало) термодинамики?
- Как формулируется первый закон (начало) термодинамики для изопроцессов?
 - Как формулируется первый закон (начало) термодинамики для адиабатического процесса?
 - Как формулируется второй закон термодинамики?
 - Какой термодинамический процесс называется обратимым (необратимым)?

2.6. ПАРООБРАЗОВАНИЕ И КОНДЕНСАЦИЯ

Парообразование и конденсация – это процессы, при которых происходит изменение агрегатного состояния вещества.

Испарение жидкостей. *Парообразованием* называется процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное. Парообразование может произойти из твёрдого состояния. Этот процесс называется *сублимацией (возгонкой)*.

Парообразование, происходящее при любой температуре со свободной поверхности жидкости, называется *испарением*. Совокупность молекул, вылетевших из жидкости при парообразовании, называется *паром* жидкости. Из поверхностного слоя жидкости вылетают молекулы, которые обладают наибольшей скоростью и кинетической энергией теплового движения, поэтому в результате испарения жидкость охлаждается.

Мерой парообразования является *скорость парообразования* – количество жидкости, переходящей в пар за единицу времени с единицы площади поверхности жидкости.

Скорость испарения зависит от нескольких причин:

- рода жидкости (для разных жидкостей удельная теплота парообразования разная);
- температуры жидкости (чем выше температура, тем больше «быстрых» молекул в жидкости, больше скорость испарения);
- площади свободной поверхности (чем больше эта поверхность, тем больше скорость испарения);
- давления над поверхностью жидкости (чем выше давление, тем больше возможность возвращения в жидкость испарившихся молекул и медленнее идёт процесс испарения);
- скорости движения газа над свободной поверхностью жидкости (чем больше движения газа (воздуха) над поверхностью жидкости, тем быстрее идёт процесс испарения).

Охлаждение при испарении жидкостей имеет большое практическое значение. Испарение жидкого аммиака или жидкой двуокиси углерода применяется в холодильных установках.

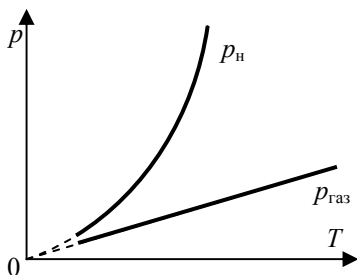


Рис. 2.10

Насыщающий (насыщенный) пар.

Если процесс парообразования происходит в закрытом сосуде, то через некоторое время количество жидкости перестаёт убывать, хотя молекулы жидкости продолжают переходить в пар. В этом случае вместе с процессом парообразования происходит обратный процесс *конденсации* – превращения пара в жидкость.

Скорость конденсации определяется числом молекул, переходящих из пара в жидкость через единицу площади поверхности жидкости в единицу времени.

Через некоторое время в закрытом сосуде с жидкостью наступает *динамическое равновесие* между процессами парообразования и конденсации: скорость парообразования становится равной скорости конденсации. С этого момента перестают меняться количества жидкости и находящегося над ней пара.

Пар, находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью, называется *насыщающим (насыщенным) паром*.

Давление насыщающего пара p_n зависит только от его химического состава и температуры и не зависит от величины свободного от жидкости объёма сосуда, в котором находится пар. При уменьшении объёма насыщенного пара всё большая часть пара переходит в жидкость, и наоборот. Это не нарушает динамическое равновесие. Давление насыщающего (насыщенного) пара быстро возрастает с увеличением его температуры. На рисунке 2.10 приведены графики зависимости $p_n(T)$ для насыщенного пара и $p_{\text{газ}}(T)$ для идеального газа при постоянном объёме.

Кипение. *Кипением* называется процесс интенсивного парообразования не только со свободной поверхности, но и по всему объёму жидкости внутрь образующихся при этом пузырьков пара.

Давление p внутри пузырька определяется формулой

$$p = p_0 + \rho gh + \frac{2\sigma}{R}, \quad (2.43)$$

где p_0 – внешнее давление; ρgh – гидростатическое давление вышележащих слоёв жидкости; $2\sigma/R$ – дополнительное давление, связанное с кривизной поверхности пузырька; R – радиус пузырька жидкости; h – расстояние от его центра до поверхности жидкости; ρ и σ – плотность и коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Кипение начинается при условии, что

$$p_n \geq p_0 + \rho gh + \frac{2\sigma}{R}, \quad (2.44)$$

где p_n – давление насыщенного пара.

Если в жидкости имеются *центры парообразования* (пылинки, пузырьки растворённых газов и т.п.), кипение начинается при меньших температурах. Условие кипения принимает вид

$$p_n \approx p_0. \quad (2.45)$$

Температурой кипения называется температура жидкости, при которой давление её насыщенного пара равно или превышает внешнее давление. Температура кипения повышается с ростом внешнего давления и понижается при его уменьшении. Например, при давлении 1 атм ($1,013 \cdot 10^5$ Па) вода закипает при 100 °С. При давлении 0,5 атм вода закипит при 80 °С, а при давлении 2 атм – при 120 °С.

Если в жидкости нет пузырьков, необходимых для процесса кипения, то можно перегреть жидкость до температуры более высокой, чем точка кипения при данном давлении. Возникающее состояние характерно для *перегретой жидкости*.

В процессе кипения температура жидкости остаётся постоянной, если не изменяется внешнее давление p_0 .

Для превращения жидкости в пар в процессе кипения необходима передача ей определённого количества теплоты. Превращение жидкости в пар при постоянной температуре не ведёт к увеличению кинетической энергии молекул, но сопровождается увеличением потенциальной энергии их взаимодействия. Ведь среднее расстояние между молекулами газа намного больше, чем между молекулами жидкости.

Величина, численно равная количеству теплоты, необходимому для превращения при постоянной температуре жидкости массой 1 кг в пар, называется *удельной теплотой парообразования* r .

Единица удельной теплоты парообразования – *джоуль на килограмм*, $[r] = 1 \text{ Дж/кг}$ (1 J/kg).

Очень велика удельная теплота парообразования воды: $r_{\text{воды}} = 2,256 \cdot 10^6$ Дж/кг при температуре 100 °С. У других жидкостей, например у спирта, эфира, ртути, керосина, удельная теплота парообразования меньше в 3 – 10 раз, чем у воды.

Для превращения жидкости массой m в пар требуется количество теплоты Q_n , равное

$$Q_n = rm. \quad (2.46)$$

При перегреве насыщенного пара образуется *перегретый пар*.

При конденсации пара происходит выделение такого же количества теплоты

$$Q_k = -rm. \quad (2.47)$$

Рассмотрим изменение температуры жидкости при её нагревании и кипении и при обратном переходе – охлаждении и конденсации (рис. 2.11, а, б).

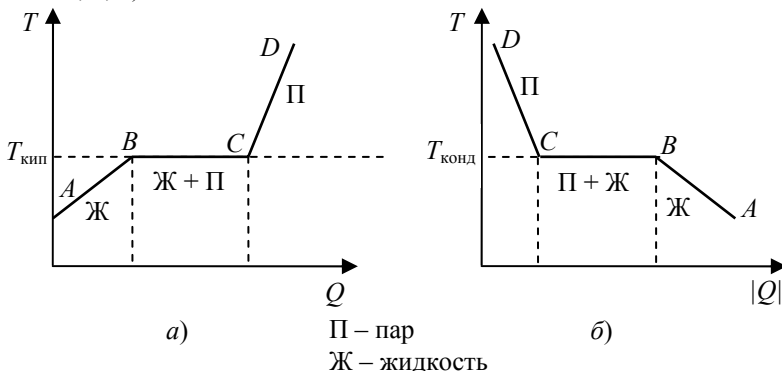


Рис. 2.11

При нагревании жидкости (рис. 2.11, а) внутренняя энергия жидкости возрастает в результате увеличения кинетической энергии теплового движения (E_k) молекул жидкости и потенциальной энергии (E_n) их взаимодействия. Температура жидкости повышается, в точке В начинается процесс кипения.

Количество теплоты во время кипения идёт на увеличение её внутренней энергии, при этом E_k молекул не меняется, а увеличивается E_n всей системы. Температура не меняется до окончания процесса парообразования (точка С).

При дальнейшем нагревании пара E_k молекул пара увеличивается, температура пара повышается.

График процесса конденсации пара показан на рис. 2.11, б.

Температуры кипения и конденсации данного вещества одинаковы.

Парообразование

Пар

Сублимация

Конденсация

Насыщающий пар

Кипение

Удельная теплота парообразования

Испарение

Свободная поверхность жидкости

Возгонка

Динамическое равновесие

Насыщенный пар

Температура кипения

Вопросы для повторения

- Что такое испарение и конденсация?
- От каких условий зависит скорость испарения жидкости?
- Что такое кипение?

- Какой пар называется насыщенным?
- Какая температура называется температурой кипения?
- Что такое удельная теплота парообразования?

2.7. ПЛАВЛЕНИЕ, КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ И СУБЛИМАЦИЯ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Плавление и отвердевание (кристаллизация) – это процессы, при которых происходит изменение агрегатного состояния вещества. При плавлении система получает тепло, при отвердевании система отдаёт тепло.

Плавление. *Плавлением* твёрдых тел называется их переход из твёрдого состояния в жидкое.

Процессы плавления и отвердевания кристаллических и аморфных тел отличаются друг от друга.

Кристаллические тела (большинство твёрдых тел, таких как лёд, соль, алмаз, металлы) обладают *анизотропией* – зависимостью физических свойств (тепловое расширение, механическая прочность, оптические свойства) от направления внутри кристалла. В кристаллическом веществе атомы или молекулы занимают определённое, упорядоченное положение.

За счёт энергии, которая подводится к твёрдому телу при плавлении, амплитуда смещения частиц, колеблющихся в узлах кристаллической решётки, возрастает, становится сравнимой с периодом кристаллической решётки, происходит разрушение кристаллической решётки.

Температурой (точкой) плавления $T_{пл}$ называется температура, при которой плавится данное кристаллическое вещество. У большинства твёрдых тел $T_{пл}$ возрастает с увеличением внешнего давления.

Как правило, плавление твёрдых тел сопровождается увеличением удельного объёма (уменьшением плотности). Исключение составляют лёд и висмут. У этих тел возрастание внешнего давления приводит к уменьшению температуры плавления.

В процессе плавления твёрдого тела оно существует одновременно и в твёрдом и в жидком состояниях.

Количество теплоты, необходимое для перехода единицы массы твёрдого вещества в жидкое состояние при температуре плавления, называется *удельной теплотой плавления* λ .

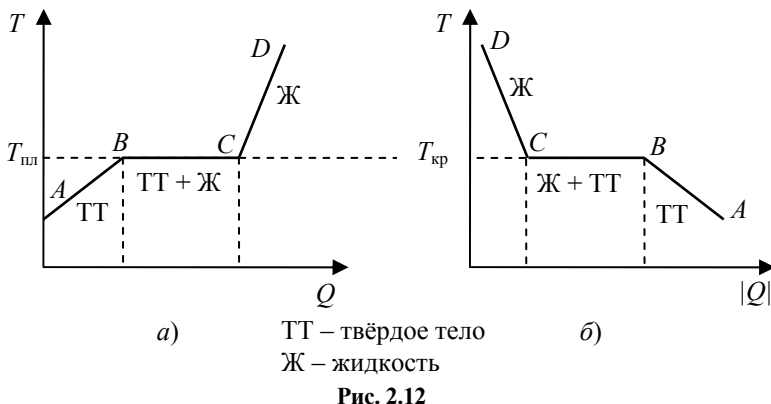
Единица удельной теплоты плавления – *джоуль на килограмм*, $[\lambda] = 1 \text{ Дж/кг} (1 \text{ J/kg})$.

Количество теплоты $Q_{пл}$, необходимое для плавления кристаллического тела массой m при температуре плавления:

$$Q_{пл} = \lambda m. \quad (2.48)$$

У аморфных тел нет строгого порядка в расположении атомов, например, куски затвердевшей смолы, янтарь, изделия из стекла. Аморфные вещества плавятся в интервале температур и не имеют определённой температуры плавления.

Кристаллизация. Переход вещества из жидкого состояния в твёрдое кристаллическое состояние называется *кристаллизацией*. Во время кристаллизации увеличивается среднее время оседлой жизни молекул жидкости,



упорядочивается их движение, которое постепенно превращается в тепловые колебания около некоторых средних положений – узлов кристаллической решётки. Для любой химически чистой жидкости процесс кристаллизации идёт при определённой температуре $T_{кр}$.

На графике рис. 2.12, а, б показано изменение температуры вещества при плавлении и кристаллизации.

При нагревании кристаллического тела (рис. 2.12, а) возрастает его внутренняя энергия, увеличивается кинетическая энергия теплового движения (E_k) его частиц и потенциальная энергия (E_n) их взаимодействия. В точке В начинается процесс плавления. При температуре плавления (отрезок ВС) вещество переходит в жидкое состояние, E_k не меняется, E_n увеличивается, кристаллическая решётка разрушается. Температура тела не меняется до окончания процесса плавления (точка С). При дальнейшем нагревании жидкости E_k увеличивается, температура жидкости увеличивается.

График процесса кристаллизации тела показан на рис. 2.12, б. Температуры плавления и кристаллизации данного вещества одинаковы.

Сублимация. В твёрдых телах может происходить процесс испарения (*сублимации*) – непосредственный отрыв молекул от поверхности твёрдого тела и переход их в газообразное состояние.

Сублимация характерна для йода I_2 , который при нормальных условиях не имеет жидкой фазы. Кристаллы чёрно-серого цвета с фиолетовым металлическим блеском сразу превращаются (сублимируются) в газообразный молекулярный йод (медицинский «йод» представляет собой спиртовой раствор).

Хорошо поддается сублимации лёд, что определило широкое применение данного процесса как одного из способов сушки.

На эффекте сублимации основан один из способов очистки твёрдых веществ. При определённой температуре одно из веществ в смеси возгоняется с более высокой скоростью, чем другое. Пары очищаемого вещества конденсируют на охлаждаемой поверхности. Прибор, применяемый для этого способа очистки, называется сублиматором.

Плавнение	Кристаллизация (отвердевание)
Температура плавления	Температура кристаллизации
Кристаллические тела	Анизотропия
Удельная теплота плавления	Аморфные тела
Сублимация	

Вопросы для повторения

- Что называется плавлением и кристаллизацией?
- Чем отличается процесс плавления кристаллических и аморфных веществ?
 - Изменяется ли температура в процессе плавления кристаллического вещества?
 - Какая температура называется температурой плавления?
 - Что такое удельная теплота плавления?
 - Что такое сублимация?

2.8. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ I И II РОДА

Фазой называется термодинамически равновесное состояние вещества, отличающееся по физическим свойствам от других возможных равновесных состояний того же вещества. Если, например, в закрытом сосуде находится вода, то эта система является двухфазной: жидкая фаза – вода, газообразная фаза – смесь воздуха с водяными парами. Если в воду бросить кусочки льда, то эта система станет трёхфазной, в которой лёд является твёрдой фазой.

Часто понятие «фаза» употребляется в смысле агрегатного состояния, однако надо учитывать, что оно шире, чем понятие «агрегатное состояние».

Переход вещества из одной фазы в другую – *фазовый переход* – всегда связан с качественными изменениями свойств вещества. Примером фазового перехода могут служить изменения агрегатного состояния вещества или переходы, связанные с изменениями в составе, строении и свойствах вещества (например, переход кристаллического вещества из одной модификации в другую).

Различают фазовые переходы двух родов. *Фазовый переход I рода* (например, плавление, кристаллизация) сопровождается поглощением или выделением теплоты, называемой теплотой фазового перехода. Фазовые переходы I рода характеризуются постоянством температуры, изменениями энтропии и объёма. Объяснение этому можно дать следующим образом. Например, при плавлении телу нужно сообщить некоторое количество теплоты, чтобы вызвать разрушение кристаллической решётки. Подводимая при плавлении теплота идёт не на нагрев тела, а на разрыв межатомных связей, поэтому плавление протекает при постоянной температуре.

Фазовые переходы, не связанные с поглощением или выделением теплоты и изменением объёма, называются *фазовыми переходами II рода*. Эти переходы характеризуются постоянством объёма и энтропии, но скачкообразным изменением теплоёмкости. Примерами фазовых переходов II рода являются: переход металлов и некоторых сплавов при температуре, близкой к 0 К, в сверхпроводящее состояние, характеризующееся скачкообразным уменьшением электрического сопротивления до нуля; превращение обыкновенного жидкого гелия (гелия I) при $T = 2,9$ К в другую жидкую модификацию (гелий II), обладающую свойствами сверхтекучести.

Фазовый переход	Постоянство температуры
Скачкообразное изменение теплоёмкости	

Вопросы для повторения

- Какое состояние вещества называется фазой?
- Что называется фазовым переходом?
- Что такое «фазовый переход I рода»?
- Что такое «фазовый переход II рода»?

Часть 3. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

3.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА. ЗАКОН КУЛОНА

Электростатикой называется раздел электродинамики, в котором рассматриваются свойства и взаимодействие *неподвижных* в инерциальной системе отсчёта электрически заряженных тел или частиц, обладающих зарядом.

Ещё в глубокой древности было известно, что янтарь, потёртый о шерсть, притягивает лёгкие предметы. Английский врач Джильберт (конец XVI в.) назвал тела, способные после натирания притягивать лёгкие предметы, *наэлектризованными*. Сейчас мы говорим, что тела при этом приобретают электрические заряды.

Физическая величина, характеризующая свойство тел или частиц вступать в электромагнитные взаимодействия и определяющая значения сил и энергий при таких взаимодействиях, называется *электрическим зарядом*. Именно электромагнитные взаимодействия занимают первое место по широте и разнообразию проявлений (силы упругости и трения, световые явления и т.д.).

Несмотря на огромное разнообразие веществ, в природе существует только два типа электрических зарядов: заряды, подобные возникающим на стекле, потёртом о кожу (их назвали положительными), и заряды, подобные возникающим на эбоните, потёртом о мех (их назвали отрицательными).

Единица заряда – *кулон*, $[q] = 1 \text{ Кл} (1 \text{ C})$. Кулон – производная единица ($1 \text{ Кл} = 1 \text{ A}\cdot\text{c}$). **Кулон** (Coulomb) **Шарль Огюстен** (1736 – 1806), французский физик.

Наименьшими устойчивыми частицами, которые обладают отрицательным (положительным) электрическим зарядом и входят в состав любого вещества, являются электроны (протоны). Электрический заряд электрона и протона называется *элементарным зарядом*. Электрический заряд электрона (протона) e по абсолютной величине равен $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$. Массы электрона (протона) равны: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$, $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

Электрический заряд любого заряженного тела равен целому числу элементарных зарядов. В электрически незаряженной (нейтральной) системе содержится равное число электронов и протонов (атомы, молекулы и макроскопические тела).

В наэлектризованном теле содержится избыток зарядов того или другого знака.

Закон сохранения заряда. В изолированной системе взаимодействующих тел алгебраическая сумма электрических зарядов сохраняется

постоянной при всех явлениях, связанных с перераспределением электрических зарядов.

Электрические заряды называются *точечными*, если они распределяются на телах, размеры которых много меньше расстояний между ними.

Силы электростатического взаимодействия зависят от формы, размеров наэлектризованных тел и характера распределения зарядов на этих телах. Для неподвижных точечных зарядов q_1 и q_2 и заряженных тел шарообразной формы, если их заряды q_1 и q_2 равномерно распределены по всему объёму или по всей поверхности, справедлив *закон Кулона*. Закон Кулона определяет величину и направление силы взаимодействия таких зарядов (тел).

Сила \vec{F} электростатического взаимодействия между зарядами q_1 и q_2 , находящимися в вакууме, прямо пропорциональна произведению их зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними. Сила \vec{F} называется *кулоновской силой*.

Модуль силы электростатического взаимодействия

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}, \quad (3.1)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Кулоновские силы подчиняются третьему закону Ньютона: силы взаимодействия между зарядами равны по модулю и направлены противоположно друг от друга по прямой, соединяющей точечные заряды или центры шаров.

Разноимённые электрические заряды притягиваются, а одноимённые – отталкиваются. Этим кулоновские силы принципиально отличаются от гравитационных сил, которые всегда являются силами притяжения.

Электростатические силы отталкивания $\vec{F}_{от}$ считают *положительными* (направления $\vec{F}_{от}$ и радиус-вектора \vec{r} совпадают), силы притяжения $\vec{F}_{пр}$ – *отрицательными* (направления $\vec{F}_{пр}$ и \vec{r} противоположны) (рис. 3.1, а, б).

Коэффициент пропорциональности k численно равен силе взаимодействия единичных зарядов на расстоянии, равном единице длины и может быть найден по формуле

$$k = \frac{Fr^2}{|q_1||q_2|} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}. \quad (3.2)$$

Коэффициент k также может быть найден по формуле

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \quad (3.3)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м ($\text{Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2)$) – электрическая постоянная. Фарад (Ф) – единица ёмкости.

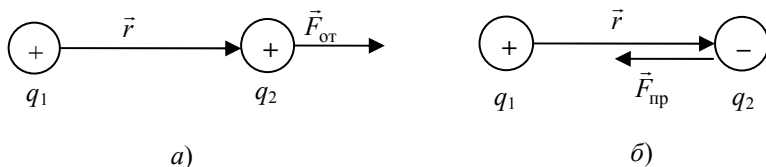


Рис. 3.1

Закон Кулона для точечных зарядов или шаров в вакууме записывается в форме

$$F = \frac{|q_1||q_2|}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (3.4)$$

Закон Кулона для точечных зарядов или шаров в однородном газообразном или жидком диэлектрике

$$F = \frac{|q_1||q_2|}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}. \quad (3.5)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость. Это безразмерная величина, показывающая, во сколько раз сила взаимодействия между зарядами в данной среде меньше их силы взаимодействия в вакууме. Величина ϵ всегда больше единицы.

Кулоновские силы очень большие. В атоме водорода электрон притягивается к ядру с силой, в 10^{39} раз превышающей силу гравитационного взаимодействия.

Сила взаимодействия двух точечных зарядов, по 1 Кл каждый, расположенных на расстоянии 1 км друг от друга, немного меньше силы, с которой земной шар притягивает груз массой 1 т. Заряд 1 Кл очень велик. Поэтому сообщить небольшому телу (размером порядка нескольких метров) заряд в 1 Кл невозможно. Отталкиваясь друг от друга, заряженные частицы не могут удержаться на теле. Никаких других сил, способных в данных условиях компенсировать кулоновское отталкивание, в природе не существует.

Электростатика	Электрический заряд
Электрон	Протон
Элементарный электрический заряд	
Электрически нейтральная система	
Наэлектризованное тело	Точечный заряд
Закон Кулона	Кулоновская сила
Относительная диэлектрическая проницаемость	

Вопросы для повторения

- Что изучает электростатика?
- Что такое электрический заряд?
- Какие виды зарядов существуют в природе?
- Сформулируйте закон Кулона.
- Как взаимодействуют одноимённые электрические заряды?
- Как взаимодействуют разноимённые электрические заряды?
- Назовите единицу заряда.
- Что характеризует коэффициент пропорциональности k ?
- Что такое относительная диэлектрическая проницаемость?

3.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. НАПРЯЖЁННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Если в пространство, окружающее электрический заряд, внести другой заряд, то на него будет действовать кулоновская сила, следовательно, в пространстве, окружающем электрические заряды, существует *силовое поле*. Согласно представлениям современной физики, поле реально существует и наряду с веществом является одной из форм существования материи, посредством которого осуществляются определённые взаимодействия между макроскопическими телами или частицами, входящими в состав вещества. Поле обладает энергией, импульсом и другими свойствами. Заряженное тело возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле.

Между электрически заряженными частицами или макроскопическими заряженными телами существует *электромагнитное взаимодействие*.

Электромагнитные взаимодействия заряженных частиц или тел осуществляются посредством *электромагнитного поля*.

Электрическим полем называется одна из частей электромагнитного поля. Электрическое поле создаётся любыми электрическими зарядами или заряженными телами, независимо от того, движутся они или неподвижны. Электрическое поле неподвижных заряженных частиц или тел называется *электростатическим полем*. Электростатическое поле является *стационарным*, не меняющимся во времени электрическим полем.

Для обнаружения и опытного исследования электростатического поля используется *пробный точечный положительный заряд* – такой заряд, который не искажает исследуемое поле (не вызывает перераспределения зарядов, создающих поле).

Если в поле, созданное зарядом q , поместить *пробный заряд* q_0 , то на него действует сила \vec{F} , которая согласно закону Кулона пропорциональна пробному заряду q_0 . Отношение \vec{F}/q_0 не зависит от q_0 и характеризует электростатическое поле в точке, где находится пробный заряд.

Напряжённость электрического поля в данной точке есть физическая величина, определяемая силой, действующей на пробный единичный положительный заряд, помещённый в эту точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \quad (3.6)$$

Напряжённость поля точечного заряда в вакууме

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (3.7)$$

Напряжённость поля является *силовой характеристикой* электрического поля. Направление вектора \vec{E} совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд. Если поле создаётся положительным зарядом, то вектор \vec{E} направлен от заряда во внешнее пространство (отталкивание пробного положительного заряда); если поле создаётся отрицательным зарядом, то вектор \vec{E} направлен к заряду (рис. 3.2).

Из формулы (3.6) следует, что единица напряжённости электростатического поля – *ньютон на кулон* (Н/Кл): 1 Н/Кл – напряжённость такого поля, которое на точечный заряд 1 Кл действует с силой в 1 Н; 1 Н/Кл = 1 В/м, где В (вольт) – единица потенциала электростатического поля.

Графически электростатическое поле изображают с помощью *линий напряжённости (силовых линий)* – линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора \vec{E} (рис. 3.3). Им приписывается направление, совпадающее с направлением вектора \vec{E} в рассматриваемой точке линии. Так как в каждой данной точке пространства вектор



Рис. 3.2

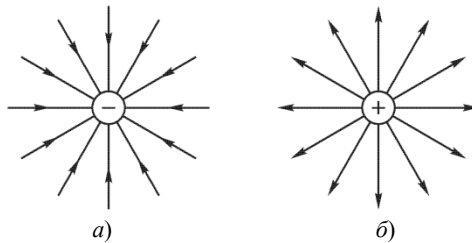


Рис. 3.3

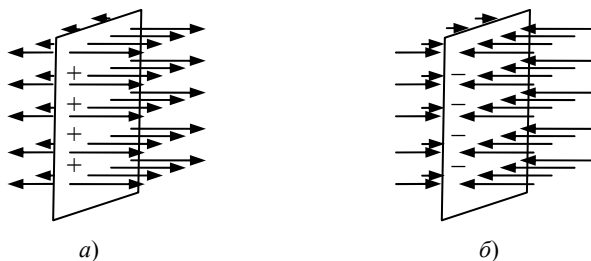


Рис. 3.4

напряженности имеет лишь одно направление, то линии напряженности никогда не пересекаются. На рисунке 3.3 изображены силовые линии (электростатические поля) уединённых точечных зарядов: отрицательного (а) и положительного (б).

Электрическое поле называется *однородным*, если вектор напряжённости \vec{E} одинаков во всех точках поля. Примерами таких полей являются электростатические поля (рис. 3.4) равномерно заряженной бесконечной плоскости (а – положительной, б – отрицательной) и плоского конденсатора вдали от краёв его обкладок.

Если положительный электрический заряд движется в однородном электрическом поле и его начальная скорость направлена вдоль силовой линии, то траектория движения заряда совпадает с силовой линией.

Если электрическое поле создаётся несколькими точечными зарядами, то напряжённость результирующего поля можно определить на основе *принципа суперпозиции электрических полей*: напряжённость электрического поля системы N зарядов равна векторной сумме напряжённостей полей, создаваемых каждым из них в отдельности

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_N = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i . \quad (3.8)$$

На рисунке 3.5 изображены электростатические поля двух разноимённых (а) и одноимённых (б) зарядов равных величин.

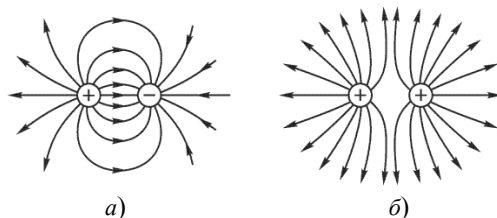


Рис. 3.5

Электростатическое поле вне заряженного шара совпадает с полем точечного заряда, равного заряду шара, помещённого в центр шара. Напряжённость электростатического поля внутри шара равна нулю.

Электрическое поле	Электростатическое поле
Пробный точечный положительный заряд	
Напряжённость	Линии напряжённости
Принцип суперпозиции электрических полей	

Вопросы для повторения

- Что такое электрическое поле?
- Какая физическая величина характеризует действие электростатического поля на заряды? Это скалярная или векторная величина?
- Запишите формулу напряжённости электростатического поля точечного заряда на расстоянии r от него.
- Что называется линией напряжённости электростатического поля?
- Как с помощью силовых линий изображаются поля уединённых точечных зарядов, бесконечных плоскостей?
- Сформулируйте принцип суперпозиции электрических полей.
- Какой вид имеют электростатические поля двух зарядов?

3.3. ПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Проводники – это вещества, в которых может происходить упорядоченное перемещение электрических зарядов, т.е. возникает электрический ток. Такие заряды в проводнике называются *свободными зарядами*.

Проводники делятся на две группы: 1) проводники первого рода (металлы) – перенос в них зарядов (свободных электронов) не сопровождается химическими превращениями; 2) проводники второго рода (например, расплавленные соли, растворы кислот) – перенос в них зарядов (положительных и отрицательных ионов) ведёт к химическим изменениям.

В металле валентные электроны, взаимодействующих друг с другом атомов, отщепляются и становятся свободными электронами (*электрономии проводимости*).

Если металлический проводник поместить во внешнее однородное электрическое поле с напряжённостью \vec{E} , то под действием этого поля на тепловое хаотическое движение электронов наложится их упорядоченное движение, и они будут перемещаться в направлении, противоположном напряжённости поля (рис. 3.6). На поверхности AB проводника появится избыточный отрицательный заряд, на поверхности CD – избыточный положительный заряд.

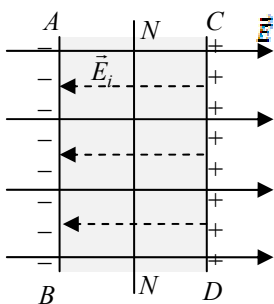


Рис. 3.6

Заряды, появляющиеся на поверхностях проводников, создают внутри него внутреннее электрическое поле с напряжённостью \vec{E}_i , вектор напряжённости которого направлен противоположно вектору напряжённости внешнего поля. Результирующее электрическое поле в проводнике равно сумме полей, которое будет уменьшаться в процессе перераспределения электронов. Перераспределение электронов будет происходить до тех пор, пока внутри проводника есть поле и прекратится, когда поле внутри проводника станет равным нулю.

Явление перераспределения зарядов в проводнике во внешнем электростатическом поле называется *электростатической индукцией*.

Диэлектриками называются вещества, в которых валентные электроны и ядра в нейтральных атомах связаны друг с другом. Упорядоченное движение электрических зарядов в обычных условиях невозможно.

К диэлектрикам относятся некоторые твёрдые вещества (стекло, фарфор и др.), жидкости (H_2O и др.) и газы (H_2 , N_2 , O_2 , CO_2 и др.).

В зависимости от строения молекул различаются *полярные* и *неполярные диэлектрики*.

В полярных диэлектриках в отсутствие внешнего электрического поля центры масс положительных и отрицательных зарядов совпадают (атом водорода), в неполярных – не совпадают (молекула H_2O). В неполярных диэлектриках молекулы ведут себя как *диполи*, обладающие электрическим моментом. *Электрическим диполем* называется совокупность двух равных по величине и противоположных по знаку точечных зарядов $+q$ и $-q$, расположенных на расстоянии l друг от друга. *Электрический момент* \vec{p}_e диполя равен произведению заряда на расстояние между ними.

При внесении диэлектрика в электрическое поле происходит его поляризация. *Поляризацией диэлектрика* называется переход его в состояние, когда внутри малого объёма вещества геометрическая сумма векторов дипольных моментов молекул отлична от нуля.

Если однородный *неполярный* диэлектрик внесён в однородное электрическое поле с напряжённостью \vec{E} , то в молекулах диэлектрика произойдёт смещение положительных и отрицательных зарядов (рис. 3.7).

На каждый из зарядов диполя *полярного* диэлектрика, внесённого в однородное электрическое поле с напряжённостью \vec{E} , будут действовать равные по модулю и противоположно направленные силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 (рис. 3.8). Они создадут момент силы, стремящийся повернуть диполь.

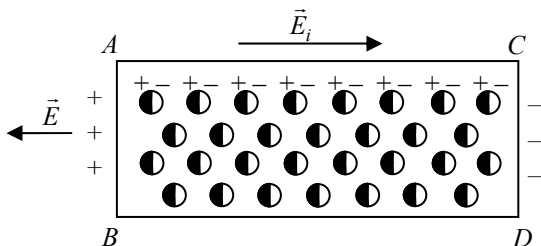


Рис. 3.7

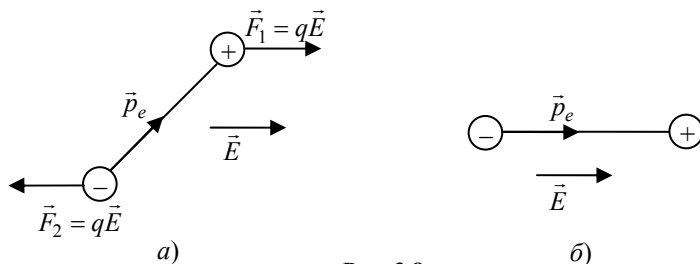


Рис. 3.8

В твёрдых кристаллических диэлектриках типа NaCl возможна *ионная поляризация*. Особую группу кристаллических диэлектриков составляют *сегнетоэлектрики* (типа сегнетовой соли). Сегнетоэлектрики обладают огромными значениями относительной диэлектрической проницаемости ϵ , зависящей от напряжённости \vec{E} электрического поля, в котором находится вещество.

Проводники	Свободные заряды
Диэлектрики	Полярные диэлектрики
Неполярные диэлектрики	Электрические диполи
Электрический момент	Поляризация диэлектрика

Вопросы для повторения

- Какие вещества называются проводниками?
- Какие заряды называются свободными зарядами?
- Что происходит с зарядами проводника под действием внешнего электрического поля?
 - Какие вещества называются диэлектриками?
 - Что происходит в неполярном диэлектрике, помещённом во внешнее электрическое поле?
 - Что происходит в полярном диэлектрике, помещённом во внешнее электрическое поле?

3.4. РАБОТА СИЛ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Работа сил электростатического поля

В электростатическом поле с напряжённостью \vec{E} на заряд q_0 действует сила \vec{F} (рис. 3.9)

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

Работа ΔA силы \vec{F} при перемещении заряда q_0 на $\Delta \vec{l}$

$$\Delta A = F \Delta l \cos \alpha = q_0 E \Delta l \cos \alpha, \quad (3.9)$$

где Δl – модуль вектора перемещения; α – угол между направлениями векторов \vec{E} и $\Delta \vec{l}$.

Работа A , совершаемая однородным полем с напряжённостью \vec{E} при перемещении положительного заряда q_0 из точки 1 в точку 2 (рис. 3.10):

$$A = q_0 E \Delta l, \quad (3.10)$$

где $\Delta l = l_1 - l_2$.

Работа, совершаемая полем точечного заряда q , при перемещении заряда q_0 из точки B в точку C (рис. 3.11):

$$A = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2} \right). \quad (3.11)$$

Эта работа не зависит от формы траектории, а зависит только от начального и конечного положений заряда. Это означает, что электростатическое поле является *потенциальным*, а силы электростатического поля являются *консервативными*. Работа при перемещении заряда по траектории 1–2 равна работе по траекториям 1–3, 1–2–3 (рис. 3.10).

Работа, совершаемая электростатическими силами при перемещении заряда по замкнутой траектории (1–2–3–1) в электрическом поле, равна нулю.

Электрическое поле при перемещении заряда совершает положительную работу. При движении положительно заряженной частицы в направлении, противоположном вектору напряжённости поля \vec{E} , – работа отрицательная.

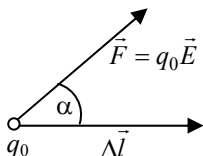


Рис. 3.9

Работа, которая совершается электростатическими силами при перемещении электрического заряда в электрическом поле, равна убыли потенциальной энергии этого заряда

$$A = -\Delta W = -(W_2 - W_1) = W_1 - W_2, \quad (3.12)$$

где W_1 и W_2 – потенциальная энергия в начальной и конечной точках траектории перемещения заряда.

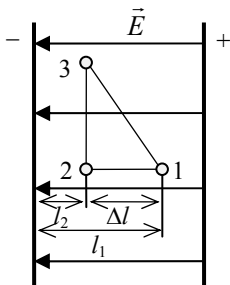


Рис. 3.10

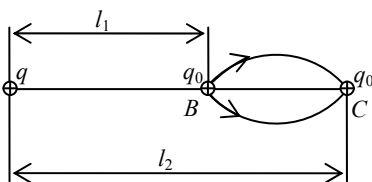


Рис. 3.11

Сравнивая (3.12) и (3.10), получаем (считаем, что в точке 2 потенциальная энергия равна нулю), что потенциальная энергия заряда q_0 в однородном электростатическом поле с напряжённостью \vec{E} (см. рис. 3.10)

$$W = q_0 E l. \quad (3.13)$$

Формула (3.13) подобна формуле $W = mgh$ для потенциальной энергии тела. Но заряд может быть как положительным, так и отрицательным. Работа электростатических сил отталкивания одноимённых зарядов положительна, если заряды удаляются друг от друга, и отрицательна, если заряды сближаются. Работа электростатических сил притяжения разноимённых зарядов положительна, если заряды сближаются, и отрицательна, если заряды удаляются друг от друга.

Потенциальная энергия заряда q_0 в поле, созданным точечным зарядом q , на расстоянии l от него

$$W = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 l}. \quad (3.14)$$

Считается, что $W \rightarrow 0$ при $l \rightarrow \infty$.

Потенциальная энергия отталкивания одноимённых зарядов положительна и увеличивается, если заряды приближаются друг к другу. Потенциальная энергия притяжения разноимённых зарядов отрицательна и возрастает до нуля, если один из зарядов удаляется от другого на достаточно большое расстояние.

Потенциал электростатического поля. Отношение потенциальной энергии заряда W к величине этого заряда не зависит от помещённого в поле заряда. Это позволяет ввести новую количественную характеристику поля – потенциал, не зависящую от заряда, помещённого в поле. Для определения значения потенциальной энергии необходимо выбрать нулевой уровень её отсчёта. При определении потенциала поля, созданного системой зарядов, предполагается, что потенциал в бесконечно удалённой точке поля равен нулю.

Потенциалом поля в данной точке называется скалярная величина, численно равная потенциальной энергии W единичного положительного заряда, помещённого в эту точку:

$$\varphi = \frac{W}{q_0}. \quad (3.15)$$

Потенциал является *энергетической характеристикой* электростатического поля.

Потенциал электростатического поля численно равен работе, которую совершают электростатические силы при перемещении единичного положительного заряда из данной точки поля в бесконечность.

Потенциал также численно равен работе, которую совершают внешние силы против сил электростатического поля при перемещении единичного положительного заряда из бесконечности в данную точку поля.

Разность потенциалов электростатического поля

Работа по перемещению заряда q_0 из точки 1 в точку 2 (3.12)

$$A = W_1 - W_2 = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = q_0U. \quad (3.16)$$

Здесь

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (3.17)$$

– разность потенциалов, т.е. разность значений потенциалов поля в начальной и конечной точках траектории движения заряда. Разность потенциалов также называют *напряжением*.

Согласно формулам (3.16) и (3.17) разность потенциалов U между двумя точками поля

$$U = \frac{A}{q_0}. \quad (3.18)$$

Разность потенциалов (напряжение) между двумя точками равна отношению работы поля при перемещении положительного заряда q_0 из начальной точки в конечную точку к величине этого заряда.

Единица разности потенциалов (потенциала) – *вольт*, $[U] = 1 \text{ В}$ ($1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/1 Кл}$). Разность потенциалов между двумя точками равна 1 вольту, если для перемещения заряда величиной 1 кулон из одной точки в другую над ним надо совершить работу величиной 1 джоуль. **Алессандро Джузеппе Антонио Анастасио Джероламо Умберто Вольта** (итал. Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Gerolamo Umberto Volta (1745 – 1827)) – итальянский физик, химик и физиолог.

В электрическом поле с разностью потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ электрически заряженная частица q_0 движется с ускорением. Частица приобретает кинетическую энергию

$$\frac{mv^2}{2} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2)$$

и скорость

$$v = \sqrt{\frac{2q_0(\varphi_1 - \varphi_2)}{m}}.$$

Потенциал электростатического поля точечного заряда q в точке, удалённой на расстояние l от заряда:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l} . \quad (3.19)$$

Потенциал электростатического поля шара с радиусом R и зарядом q , равномерно распределённым по его поверхности, совпадает вне шара с потенциалом поля точечного заряда q , помещённого в центре шара. Внутри шара имеется постоянный потенциал поля:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R'} . \quad (3.20)$$

хотя напряжённость поля внутри шара равна нулю.

Связь между напряжённостью и разностью потенциалов электростатического поля

Потенциал и напряжённость – это две характеристики электрического поля. Напряжённость поля векторная величина, потенциал – скалярная величина.

Напряжённость в произвольной точке электростатического поля численно равна изменению потенциала, приходящемуся на единицу длины силовой линии (рис. 3.12):

$$E_l = -\frac{U}{\Delta l} , \quad (3.21)$$

где Δl – модуль вектора $\vec{\Delta l}$; $E_l = E \cos \alpha$ – проекция вектора \vec{E} на направление $\vec{\Delta l}$.

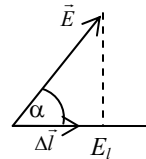


Рис. 3.12

Эквипотенциальные поверхности. Электростатическое поле графически изображают не только при помощи силовых линий, но и при помощи эквипотенциальных поверхностей.

Геометрическое место точек электростатического поля с одинаковыми потенциалами называется *эквипотенциальной поверхностью*.

На рисунке 3.13 изображены плоские сечения электростатического поля положительного точечного заряда (а) и диполя (б).

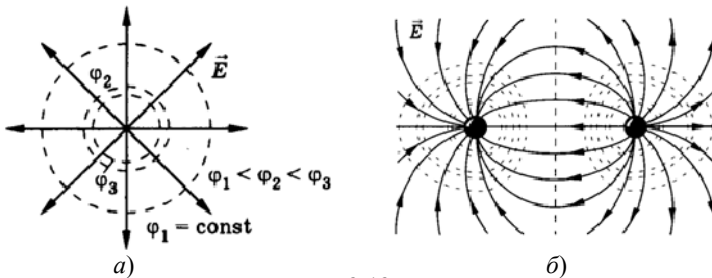


Рис. 3.13

Потенциал
Потенциал поля
Эквипотенциальные поверхности

Потенциальная энергия заряда
Разность потенциалов поля

Вопросы для повторения

- От чего зависит работа электрического поля при перемещении заряда в этом поле?
- Как вычислить потенциальную энергию заряда в однородном электростатическом поле?
- Что такое потенциал поля в данной точке?
- Чему равна разность потенциалов? Назовите единицу разности потенциалов.
- Что такое эквипотенциальные поверхности?

3.5. ЭЛЕКТРОЁМКОСТЬ. КОНДЕНСАТОРЫ. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Электроёмкость. При любом способе электризации тел с помощью трения, электростатической машины, гальванического элемента и т.д. — первоначально нейтральные тела заряжаются вследствие того, что некоторая часть заряженных частиц переходит от одного тела к другому. Обычно этими частицами являются электроны.

Когда на проводнике увеличивается заряд q , то прямо пропорционально заряду возрастает потенциал проводника ϕ . Это справедливо для проводников любой формы. Отношение заряда проводника к его потенциалу не зависит от величины заряда проводника и определяется свойствами самого проводника, а также среды, в которой он находится. Это отношение называется *электроёмкостью* (электрической ёмкостью, ёмкостью) проводника и обозначается C .

Электроёмкость проводника, который находится вдали от заряженных тел и других проводников (*уединённый* проводник):

$$C = \frac{q}{\phi}. \quad (3.22)$$

Единица электроёмкости — *фарад*, $[C] = 1 \text{ Ф} (1 \text{ F}) = 1 \text{ Кл/В}$. Электроёмкость численно равна заряду q , который необходимо сообщить уединённому телу, для изменения его потенциала ϕ на единицу. **Майкл Фарадэй** (англ. Michael Faraday (1791 – 1867)) — английский физик-экспериментатор и химик.

Ёмкость 1 Ф оказывается очень большой. Поэтому на практике часто используют доли этой единицы: микрофарад (мкФ) — 10^{-6} Ф и пикофарад (пФ) — 10^{-12} Ф.

Електроёмкость проводника зависит от его линейных размеров и геометрической формы, но не зависит от материала проводника и его агрегатного состояния.

Електроёмкость уединённого шара

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R, \quad (3.23)$$

где R – радиус шара; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится шар.

Електроёмкость Земли $C \approx 0,7$ мФ.

Конденсаторы. В практически интересном случае двух проводящих тел электроёмкость численно равна заряду q , который нужно перенести с одного тела на другое, с тем, чтобы изменить разность потенциалов $\phi_1 - \phi_2$ на единицу:

$$C = \frac{q}{\phi_1 - \phi_2}. \quad (3.24)$$

В данном случае электроёмкость называется *взаимной электроёмкостью*.

Устройство, предназначенное для получения нужных величин электроёмкости и способное накапливать и отдавать (перераспределять) электрические заряды, называется *конденсатором*.

Конденсатор состоит из двух и более проводников, разделённых диэлектриком. Проводники конденсатора называются *обкладками*. Как правило, расстояние между обкладками, равное толщине диэлектрика, мало по сравнению с линейными размерами обкладок. Поэтому электрическое поле, возникающее при подключении обкладок к источнику напряжения, практически полностью сосредоточено между обкладками.

Плоский конденсатор состоит из двух параллельных плоских пластин (рис. 3.14). Пластины заряжены одинаковыми по абсолютному значению и разноимёнными зарядами.

Ёмкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}, \quad (3.25)$$

где S – площадь каждой из обкладок или меньшей из них; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость вещества, находящегося между обкладками.

Если конденсатор состоит из n пластин, то площадь обкладок в формуле (3.25) равна $S(n - 1)$.

На рисунке 3.15 изображены условные обозначения конденсатора постоянной ёмкости (а) и переменной ёмкости (б).

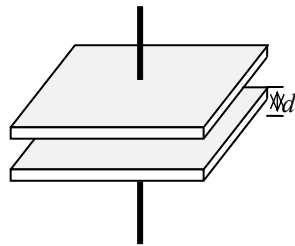


Рис. 3.14

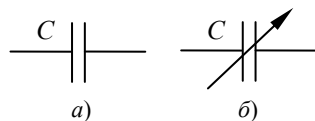


Рис. 3.15

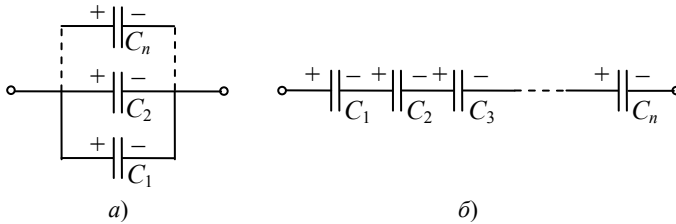


Рис. 3.16

Конденсаторы можно соединять параллельно или последовательно (рис. 3.16, а, б).

При параллельном соединении конденсаторов соединяются их одноимённо заряженные обкладки. Общая ёмкость батареи из n конденсаторов

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (3.26)$$

Параллельное соединение конденсаторов применяется для получения большей ёмкости.

При последовательном соединении конденсаторов соединяются их разноимённые обкладки. Общая ёмкость батареи из n конденсаторов

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (3.27)$$

Общая ёмкость батареи всегда меньше, чем наименьшая ёмкость конденсатора, входящего в батарею.

Энергия электрического поля. Для того чтобы увеличить заряд проводника, необходимо перенести на него некоторое количество зарядов. Для этого необходимо преодолеть силы отталкивания между вновь перенесённым зарядом и уже ранее имевшимися на проводнике зарядами. Увеличение заряда на проводнике и его потенциала связано с работой. Эта работа может служить мерой энергии заряженного проводника.

Если проводник не находится во внешнем поле, то его энергия является собственной и определяется по формуле

$$W = \frac{C\varphi^2}{2}, \quad (3.28)$$

где C , φ – соответственно ёмкость и потенциал проводника.

Энергия заряженного конденсатора является полной энергией системы двух проводников. В плоском конденсаторе эта энергия сосредоточена в пространстве между обкладками и вычисляется по формуле

$$W = \frac{C(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} = \frac{C\Delta\varphi^2}{2}, \quad (3.29)$$

где $\Delta\varphi$ – разность потенциалов между обкладками конденсатора.

Електроёмкость	Уединённый проводник
Конденсатор	Обкладки конденсатора
Плоский конденсатор	Параллельное соединение
Последовательное соединение	

Вопросы для повторения

- Что называется электроёмкостью проводника? Назовите единицы электроёмкости.
- Что называется конденсатором?
- Как соединяют конденсаторы для получения большей (меньшей) ёмкости?

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

3.6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. СИЛА ТОКА. НАПРЯЖЕНИЕ

Электрический ток – это направленное движение носителей электрических зарядов (электронов, ионов, дырок и т.п.). Электрический ток в проводящих средах, где носители зарядов перемещаются сами, передают один другому импульсы, испытывают соударения с частицами среды, называется *током проводимости*. Существуют также конвекционные токи и токи смещения.

Силой тока I называется скалярная физическая величина, равная отношению заряда Δq , которое переносится через поперечное сечение проводника за единицу времени:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (3.30)$$

Ток бывает постоянный и переменный.

Если сила и направление тока не изменяются с течением времени, то ток называется *постоянным током*. За направление тока принято направление движения положительно заряженных частиц.

Электрический ток оказывает магнитное действие. Проводник, по которому течёт ток, нагревается.

Единица силы тока – *ампер*, $[I] = 1 \text{ А}$ (1 А). **Андре́-Мари́ Ампе́р** (фр. André-Marie Ampère (1775 – 1836) – знаменитый французский физик, математик и естествоиспытатель). Эту единицу устанавливают на основе магнитного взаимодействия токов. Измеряют силу тока амперметрами.

Для возникновения и поддержания электрического тока необходимы:

- наличие свободных заряженных частиц;
- сила, действующая на них в определённом направлении.

Для существования постоянного электрического тока проводимости необходимо выполнение следующих условий:

- напряжённость электрического поля в проводнике не должна изменяться с течением времени;

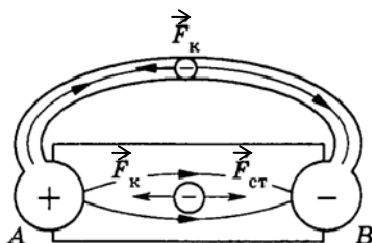


Рис. 3.17



Рис. 3.18

– цепь постоянного тока проводимости должна быть замкнутой;
 – на свободные заряды, помимо кулоновских сил, должны действовать неэлектростатические (сторонние) силы, созданные, например, гальваническими элементами, аккумуляторами, электрическими генераторами (рис. 3.17). Данные устройства называются источниками электродвижущей силы (ЭДС). Под действием создаваемого поля сторонних сил электрические заряды движутся *внутри источника ЭДС против сил электростатического поля*. Физическая величина, определяемая работой A , совершаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда q_0 , называется *электродвижущей силой*

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q_0}. \quad (3.31)$$

Напряжением (падением напряжения) на участке цепи (рис. 3.18) называется физическая величина, которая определяется работой, совершаемой кулоновскими и сторонними силами при перемещении заряда на данном участке цепи:

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q_0} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}. \quad (3.32)$$

Единица ЭДС и напряжения – *вольт* (В).

Электрический ток

Сила тока

Постоянный ток

Электродвижущая сила

Напряжение

Вопросы для повторения

- Что такое электрический ток, сила тока?
- Какие условия необходимы для возникновения и поддержания электрического тока?
- Какие явления сопровождают протекание тока по проводнику?
- Что называется электродвижущей силой и напряжением?

3.7. СОПРОТИВЛЕНИЕ. ЗАКОН ОМА. ЗАКОН ДЖОУЛЯ–ЛЕНЦА

Электрическим сопротивлением (сопротивлением) называется физическая величина, характеризующая противодействие проводника или электрической цепи электрическому току. Сопротивление проводника зависит от материала проводника, его геометрической формы и размеров, а также от температуры:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (3.33)$$

где ρ – удельное сопротивление проводника; l – длина проводника; S – площадь поперечного сечения.

Единица сопротивления – *ом*, $[R] = 1 \text{ Ом}$ (1 Ω). **Георг Симон Ом** (нем. Georg Simon Ohm (1789 – 1854) – знаменитый немецкий физик).

Величина, обратная сопротивлению, называется *электропроводностью (проводимостью)* проводника $G = 1/R$.

Единица проводимости – *сименс*, $[G] = 1 \text{ См}$ (1 S). **Эрнст Вёрнер фон Сименс** (нем. Werner von Siemens, более точный вариант транскрипции фамилии: *Зименс* (1816 – 1892)) – известный немецкий инженер, изобретатель, учёный.

Величина, обратная удельному сопротивлению, называется *удельной электропроводностью (проводимостью)* проводника λ .

Закон Ома для участка цепи (рис. 3.19). Сила тока I в проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению U и обратно пропорциональна сопротивлению проводника R :

$$I = \frac{U}{R}. \quad (3.34)$$

Закон Ома для замкнутой цепи (рис. 3.20). Сила тока I в замкнутой цепи равна отношению ЭДС источника тока \mathcal{E} к полному сопротивлению всей цепи $R + r$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \quad (3.35)$$

где R – сопротивление внешней цепи; r – внутреннее сопротивление источника ЭДС.

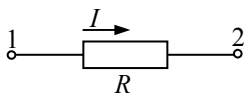


Рис. 3.19

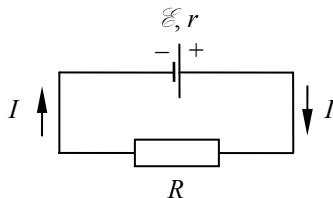


Рис. 3.20

Кулоновские и сторонние силы совершают работу A при перемещении зарядов в электрической цепи. Энергия W , которая преобразуется необратимо в объёме проводника, равна совершённой работе A

$$W = A = IUt = I^2Rt = U^2/Rt. \quad (3.36)$$

В результате столкновений электронов с положительными ионами в узлах решётки, электроны передают ионам энергию. Эта энергия идёт на нагрев проводника.

Количество теплоты, выделяющееся в проводнике за время t :

$$Q = W = A = IUt = I^2Rt = U^2/Rt. \quad (3.37)$$

Формула (3.37) выражает *закон Джоуля–Ленца*. **Эмилий Христианович Ленц** (при рождении **Генрих Фридрих Эмиль Ленц**, нем. Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804–1865)) – российский физик из балтийских немцев, один из основоположников электротехники.

Сопrotивление
Закон Ома

Проводимость
Закон Джоуля–Ленца

Вопросы для повторения

- Что называется электрическим сопротивлением?
- Сформулируйте закон Ома для участка цепи.
- Сформулируйте закон Ома для замкнутой цепи.
- Сформулируйте закон Джоуля–Ленца.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.8. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ВЕКТОР ИНДУКЦИИ. ЗАКОН АМПЕРА

Неподвижные электрические заряды создают вокруг себя электрическое поле. Движущиеся заряды создают, кроме того, магнитное поле.

Магнитное поле – силовое поле, действующее на движущиеся (в системе, в которой рассматривается поле) электрические заряды (токи) и на тела, обладающие магнитным моментом. Магнитное поле вместе с электрическим полем образует единое *электромагнитное поле*. Термин «магнитное поле» введён М. Фарадеем.

Важнейшая особенность магнитного поля состоит в том, что оно действует только на *движущиеся электрические заряды*. Опыт показывает, что характер воздействия магнитного поля на ток различен в зависимости от формы проводника, по которому течёт ток, от расположения проводника и от направления тока.

Магнитное поле создаётся движущимися электрически заряженными частицами и телами, а также намагниченными телами и переменным электрическим полем.

Силовой характеристикой магнитного поля является вектор *индукции магнитного поля* \vec{B} (вектор *магнитной индукции, магнитная индукция*).

Подобно тому, как при изучении электростатического поля использовались точечные заряды, при исследовании магнитного поля пользуются замкнутым плоским контуром с током (рамка с током). *Магнитным моментом замкнутого плоского контура*, по которому протекает ток I , называется вектор \vec{p}_m , равный

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}_0, \quad (3.38)$$

где S – площадь поверхности, охватываемой контуром; \vec{n}_0 – вектор с модулем, равным единице, направленный перпендикулярно к плоскости контура (рис. 3.21). Направление вектора \vec{n}_0 определяется правилом правого винта.

За направление вектора \vec{B} в данной точке магнитного поля выбирается направление векторов \vec{n}_0 и магнитного момента \vec{p}_m малых размеров.

Направление вектора \vec{B} совпадает с направлением прямой, проведённой через центр магнитной стрелки от её южного S полюса к северному N полюсу, если эта стрелка помещена в магнитное поле (рис. 3.22).

Магнитное поле называется однородным, если векторы \vec{B} во всех его точках одинаковы.

Рамка с током испытывает ориентирующее действие магнитного поля, на неё действует момент сил \vec{M} , модуль которого равен

$$M = p_m B \sin \alpha,$$

где α – угол между векторами \vec{p}_m и \vec{B} (рис. 3.23).

Графически магнитное поле изображают с помощью *линий магнитной индукции* – линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора \vec{B} . Линии магнитной индукции замкнуты. В отличие от электростатического поля, магнитное поле является непотенциальным. Непотенциальное поле называется *вихревым полем*.

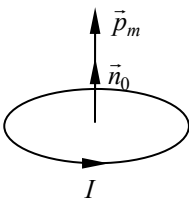


Рис. 3.21

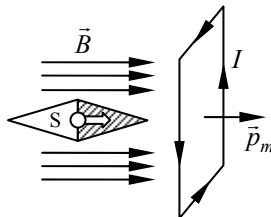


Рис. 3.22

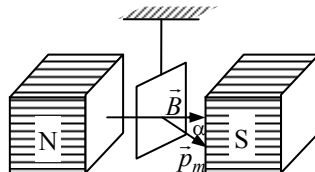
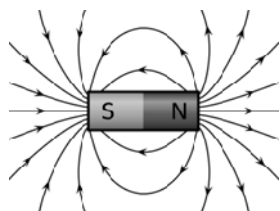
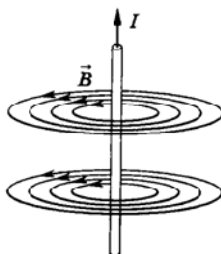


Рис. 3.23



а)



б)

Рис. 3.24

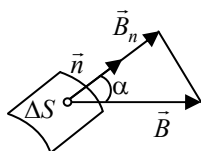


Рис. 3.25

На рисунке 3.24, а изображены линии магнитной индукции магнитного поля постоянного магнита, а на рис. 3.24, б – линии магнитной индукции магнитного поля прямолинейного проводника с током.

Картину линий магнитной индукции можно сделать видимой, воспользовавшись мелкими железными опилками.

Энергетической характеристикой магнитного поля служит магнитный поток (или поток магнитной индукции). *Потоком магнитной индукции (магнитным потоком)* $\Delta\Phi$ сквозь участок поверхности с площадью ΔS называется скалярная величина, равная

$$\Delta\Phi = B\Delta S \cos \alpha = B_n \Delta S, \quad (3.39)$$

где $B_n = B \cos \alpha$ – проекция вектора \vec{B} магнитной индукции на нормаль к площадке (рис. 3.25). Магнитный поток Φ сквозь поверхность с площадью S находится алгебраическим суммированием потоков $\Delta\Phi$ сквозь участки поверхности.

Единица магнитного потока – *вебер*, $[\Phi] = 1 \text{ Вб} (1 \text{ Wb}) = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$. **Вильгельм Эдуард Вебер** (нем. Wilhelm Eduard Weber (1804 – 1891)) – немецкий физик.

Магнитный поток в 1 Вб создаётся однородным магнитным полем с индукцией 1 Тл через поверхность площадью 1 м^2 , расположенную перпендикулярно вектору магнитной индукции.

Магнитное поле	Магнитная индукция
Линии магнитной индукции	Магнитный момент

Вопросы для повторения

- Что называется магнитным полем?
- От чего зависит характер воздействия магнитного поля на ток?
- Что такое магнитная индукция?
- Какое магнитное поле называется однородным?
- Что называется линиями магнитной индукции?
- Назовите единицу магнитного потока.

3.9. ЗАКОН АМПЕРА. СИЛА ЛОРЕНЦА

На проводник с током, помещённый в магнитное поле, действует *сила Ампера*. Величину этой силы определяют *законом Ампера*: на малый отрезок проводника с током силы I и длиной Δl , помещённого в однородное магнитное поле с индукцией \vec{B} , действует сила $\Delta\vec{F}$, модуль которой равен

$$\Delta F = I\Delta l B \sin \alpha = I\Delta l B_{\perp}, \quad (3.40)$$

где α – угол между вектором \vec{B} и проводником с током (рис. 3.26, а).

Вектор $\Delta\vec{F}$ перпендикулярен к проводнику с током и вектору \vec{B} . Направление силы $\Delta\vec{F}$ определяется *правилом левой руки* (рис. 3.26, б).

Закон Ампера позволяет определить модуль вектора магнитной индукции

$$B = \frac{\Delta F_{\max}}{I\Delta l}. \quad (3.41)$$

Магнитная индукция поля в точке пространства, созданного двумя и более токами, равна векторной сумме магнитных индукций полей, создаваемых каждым током. Для магнитного поля, как и для электрического поля, выполняется *принцип суперпозиции*.

Единица магнитной индукции – *тесла*, $[B] = 1 \text{ Тл} (1 \text{ Т}) = 1 \text{ Н}/(\text{А}\cdot\text{м})$. **Никола Тесла** (серб. Никола Тесла, англ. Nikola Tesla; (1856 – 1943)) – изобретатель в области электротехники и радиотехники, инженер, физик.

Электрический ток, протекающий по проводнику, создаёт в пространстве, окружающем проводник, магнитное поле (рис. 3.24, б). Вектор магнитной индукции \vec{B} в данной точке изотропной среды зависит от *относительной магнитной проницаемости среды* μ ($\mu \geq 1$)

$$\vec{B} = \mu\vec{B}_0, \quad (3.42)$$

где \vec{B}_0 – вектор магнитной индукции поля в вакууме.

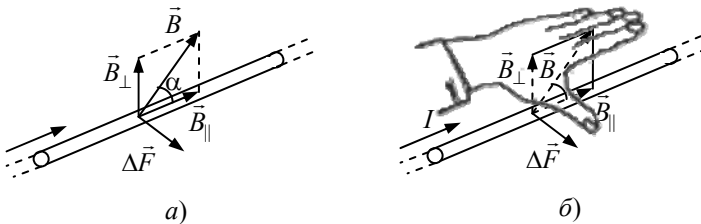


Рис. 3.26

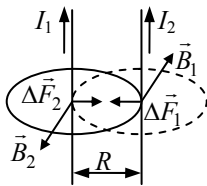


Рис. 3.27

Модуль магнитной индукции магнитного поля проводника с током I на расстоянии R от проводника равен

$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2\pi R}, \quad (3.43)$$

где $\mu_0 = 1,25663706 \cdot 10^{-6} \text{ Н/А}^2$ – магнитная постоянная.

Между двумя параллельными бесконечно длинными проводниками, по которым протекают постоянные токи, возникают силы взаимодействия. Проводники с одинаково направленными токами притягиваются, с противоположно направленными токами – отталкиваются (рис. 3.27).

Модуль силы взаимодействия F

$$F = \mu_0 \mu \frac{I_1 I_2}{2\pi R}. \quad (3.44)$$

Формула (3.44) позволяет ввести единицу силы тока – ампер. 1 А (ампер) – сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, создаёт между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

На электрический заряд, движущийся в магнитном поле, действует сила Лоренца, модуль которой равен

$$F_{\text{Л}} = qvB \sin \alpha = qv_{\perp} B, \quad (3.45)$$

где q – абсолютное значение движущегося заряда ($q < 0$ для отрицательного заряда, $q > 0$ для положительного заряда); v – скорость заряда; α – угол между векторами \vec{B} и \vec{v} .

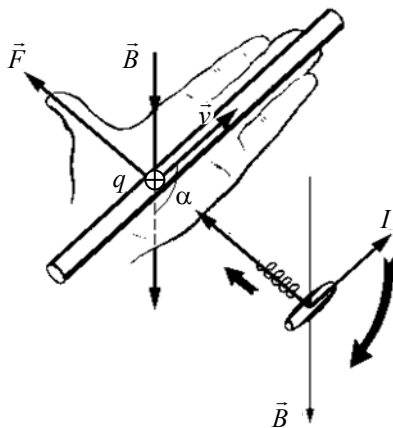


Рис. 3.28

Хендрик (часто пишется **Гендрик**) **Антон Лоренц** (нидерл. Hendrik Antoon Lorentz (1853 – 1928)) – нидерландский физик-теоретик.

Направление силы Лоренца определяется по правилу левой руки (рис. 3.28).

Сила Лоренца не совершает работу. Под действием силы Лоренца меняется направление скорости заряда.

Сила Ампера Закон Ампера
Сила Лоренца

Вопросы для повторения

- Сформулируйте закон Ампера.
- Как определить направление силы, которая действует на помещённый в магнитное поле проводник с током?
 - Назовите единицу магнитной индукции.
 - Дайте определение единицы силы тока 1 ампер.
 - Какая сила действует на движущийся электрический заряд в магнитном поле? Какое она имеет направление?

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

3.10. ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ (ЗАКОН ФАРАДЕЯ)

Явление электромагнитной индукции было обнаружено Фарадеем опытным путём. В замкнутом контуре с помощью магнитного поля удалось возбудить ток, получивший название *индукционного*. Индукционный ток возникает всегда, когда происходит изменение сцепленного с контуром потока магнитной индукции (контур находится в *переменном магнитном поле*). Сила индукционного тока не зависит от способа изменения потока магнитной индукции, а определяется лишь скоростью его изменения. *Индукция* – от лат. *inductio* «выведение, наведение».

Явление электромагнитной индукции заключается в том, что в замкнутом проводящем контуре, при изменении потока магнитной индукции, охватываемого этим контуром, возникает электрический ток (рис. 3.29).

Магнитный поток, пронизывающий площадь поверхности контура, может изменяться с течением времени благодаря деформации или перемещению контура, а также при изменении индукции магнитного поля.

Возникновение индукционного тока указывает на наличие в цепи электродвижущей силы, называемой *электродвижущей силой электромагнитной индукции*.

Закон электромагнитной индукции Фарадея: ЭДС электромагнитной индукции \mathcal{E}_i в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь площадь поверхности, ограниченной этим контуром

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (3.46)$$

Сила индукционного тока I_i в замкнутом проводящем контуре с сопротивлением R

$$I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R}. \quad (3.47)$$

ЭДС \mathcal{E}_i может быть положительной и отрицательной. На рисунке 3.30 изображены случаи положительной (*a*) и отрицательной (*b*) \mathcal{E}_i .

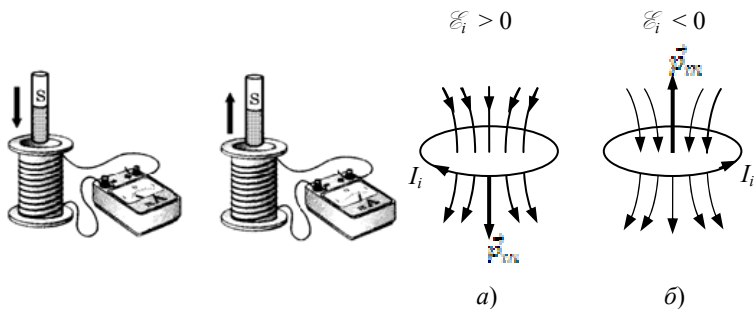


Рис. 3.29

Рис. 3.30

Знак «минус» в законе Фарадея выражает *правило Ленца*: индукционный ток в замкнутом контуре имеет всегда такое направление, чтобы магнитный поток поля, созданного этим током, сквозь поверхность, ограниченную контуром, уменьшал бы те изменения поля, которые вызвали появление индукционного тока.

Применять правило Ленца для нахождения направления индукционного тока в контуре надо так:

- определить направление линий магнитной индукции \vec{B} внешнего магнитного поля;
- выяснить, увеличивается ли поток вектора магнитной индукции этого поля через поверхность, ограниченную контуром ($\Delta\Phi > 0$), или уменьшается ($\Delta\Phi < 0$) (рис. 3.31);
- установить направление линий магнитной индукции \vec{B}_i магнитного поля индукционного тока. Эти линии должны быть в соответствии с правилом Ленца направлены противоположно линиям магнитной индукции \vec{B} при $\Delta\Phi > 0$ и иметь одинаковое с ними направление при $\Delta\Phi < 0$;
- зная направление линий магнитной индукции \vec{B}_i , найти направление индукционного тока, пользуясь правилом правого винта.

На рисунке 3.32 указаны направления индукционных токов в катушке, вызванных перемещением магнита.

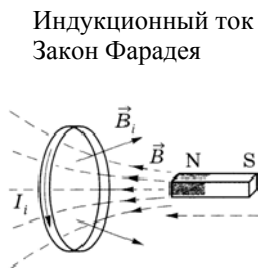


Рис. 3.31

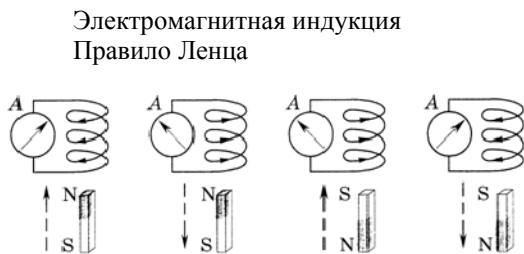


Рис. 3.32

Вопросы для повторения

- Какое явление называется электромагнитной индукцией?
- При каких условиях возникает индукционный электрический ток?
- Как определяется направление индукционного тока?

3.11. ЭДС ИНДУКЦИИ В ДВИЖУЩИХСЯ ПРОВОДНИКАХ. САМОИНДУКЦИЯ

При движении проводника его свободные заряды движутся вместе с ним. Если проводник движется в магнитном поле, то со стороны магнитного поля на заряды действует сила Лоренца. Она и вызывает перемещение зарядов внутри проводника. Возникает *ЭДС электромагнитной индукции*.

При движении проводника длиной l в стационарном однородном магнитном поле ЭДС электромагнитной индукции

$$\mathcal{E}_i = Blv \sin \alpha = Blv_{\perp}, \quad (3.48)$$

где B – модуль вектора электромагнитной индукции; α – угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

В проводнике происходит разделение зарядов, которые накапливаются на противоположных концах проводника. Эти заряды создают внутри проводника кулоновское поле (рис. 3.33).

Электрическое поле, характеристикой которой является ЭДС индукции, является сторонним электрическим полем. Модуль напряжённости этого поля

$$E_{\text{ст}} = \frac{F_{\text{Л}}}{q} = Bv_{\perp}. \quad (3.49)$$

Направление напряжённости $E_{\text{ст}}$ в прямолинейном проводнике, движущемся в магнитном поле, определяется правилом *правой руки* (рис. 3.34): если ладонь правой руки расположить так, чтобы вектор

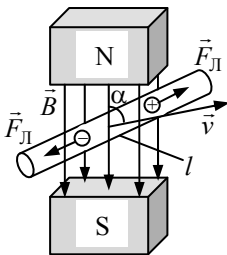


Рис. 3.33

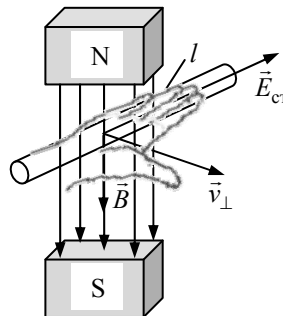


Рис. 3.34

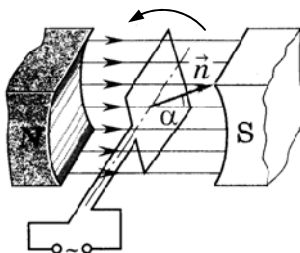


Рис. 3.35

магнитной индукции \vec{B} входил в ладонь, а отставленный на 90° большой палец совпадал с направлением перпендикулярной к проводнику составляющей его скорости, то вытянутые четыре пальца укажут направление напряжённости стороннего электрического поля электромагнитной индукции, возникающего в проводнике.

Явление электромагнитной индукции применяется для преобразования механической энергии в энергию электрического тока. Для этой цели используются *генераторы*, принцип действия которых можно рассмотреть на примере плоской рамки, вращающейся в однородном магнитном поле (рис. 3.35).

Пусть рамка вращается в однородном магнитном поле ($B = \text{const}$) равномерно с угловой скоростью $\omega = \text{const}$. Магнитный поток, сцепленный с рамкой площадью S , в любой момент времени t согласно (3.39) равен

$$\Phi = B_n S = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t, \quad (3.50)$$

где $\alpha = \omega t$ – угол поворота рамки в момент времени t (начало отсчёта выбрано так, чтобы при $t = 0$ $\alpha = 0$).

При вращении рамки в ней будет возникать переменная ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = BS\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t, \quad (3.51)$$

изменяющаяся во времени по гармоническому закону.

Таким образом, если в однородном магнитном поле равномерно вращается рамка, то в ней возникает переменная ЭДС, изменяющаяся по гармоническому закону.

Изменение \mathcal{E}_{\max} возможно путём изменения величин B , S и ω . Для увеличения B применяют мощные постоянные магниты или в электромагнитах пропускают значительный ток, а также внутрь электромагнита помещают сердечники из материалов с большой магнитной проницаемостью μ . Если вращать не один, а ряд витков, соединённых последовательно, то тем самым увеличивается S . Переменное напряжение снимается с вращающихся витков с помощью щёточно-коллекторного узла.

Процесс превращения механической энергии в электрическую энергию обратим. Если по рамке, помещённой в магнитное поле, пропускать ток, то на неё будет действовать вращающий момент и рамка начнёт вращаться. На этом принципе основана работа *электродвигателей*, предназначенных для превращения электрической энергии в механическую энергию.

Самоиндукция. Одним из случаев проявления электромагнитной индукции является *самоиндукция*. Электрический ток I , текущий в замкнутом контуре, создаёт вокруг себя магнитное поле, индукция которого пропорциональна току. Поэтому сцепленный с контуром магнитный поток Φ пропорционален току в контуре

$$\Phi = LI, \quad (3.52)$$

где L – коэффициент пропорциональности, *индуктивность контура*.

При изменении силы тока в контуре будет изменяться также и сцепленный с ним магнитный поток; следовательно, в контуре будет индуцироваться ЭДС. *Явлением самоиндукции* называется возникновение индуцированного поля в цепи в результате *изменения тока* в этой цепи.

Собственное магнитное поле тока в контуре создаёт магнитный поток. Этот магнитный поток $\Phi = \Phi_s$ – *поток самоиндукции контура*.

По закону электромагнитной индукции Фарадея ЭДС самоиндукции

$$\mathcal{E}_{is} = -\frac{\Delta\Phi_s}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (3.35)$$

Индуктивность является количественной мерой эффекта самоиндукции.

Значение L зависит от размеров контура, его геометрической формы и относительной магнитной проницаемости среды, в которой находится контур.

Единица индуктивности – *генри*, $[L] = 1 \text{ Гн} (1 \text{ Н}) = 1 \text{ Вб/А}$. 1 Гн – индуктивность такого контура, магнитный поток самоиндукции которого при токе 1 А равен 1 Вб. **Джозеф Генри** (англ. Joseph Henry (1797 – 1878)) – американский физик.

Если контур не деформируется и магнитная проницаемость среды не меняется, то $L = \text{const}$. Наличие индуктивности в контуре приводит к *замедлению изменения тока* в контуре (знак минус). Индуктивность контура является мерой его «инертности» по отношению к изменению тока в контуре. В электродинамике L играет такую же роль, как и масса m тел в механике.

Взаимная индукция. *Явление взаимной индукции* состоит в возникновении индуцированного поля в проводниках, находящихся поблизости от других проводников с токами (рис. 3.36), изменяющимися с течением времени. ЭДС взаимной индукции \mathcal{E}_{i21} , характеризующая индуцированное поле во втором контуре при изменении силы тока в первом контуре:

$$\mathcal{E}_{i21} = -\frac{\Delta\Phi_{21}}{\Delta t}, \quad (3.54)$$

где Φ_{21} – поток магнитной индукции, который создаётся магнитным полем тока первого контура и пронизывает площадь поверхности, охватываемый вторым контуром.

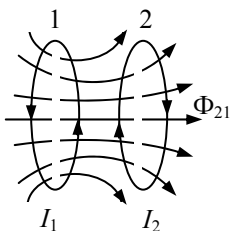


Рис. 3.36

Магнитный поток

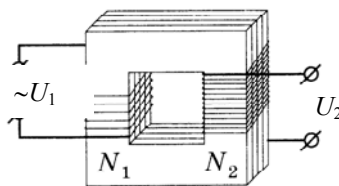


Рис. 3.37

$$\Phi_{21} = M_{21}I_1, \quad (3.55)$$

где M_{21} – коэффициент, *взаимная индуктивность* второго и первого контуров. M_{21} зависит от размеров, геометрической формы и взаимного расположения контуров, от относительной магнитной проницаемости среды, в которой находятся контуры.

На явлении взаимной индукции основано действие *трансформатора*. Трансформаторы (рис. 3.37) применяются для повышения (понижения) напряжения переменного тока.

На сердечнике, состоящем из отдельных пластин, собранных в замкнутую раму, находятся две обмотки – первичная и вторичная. Число витков соответственно N_1 и N_2 . Переменный ток I_1 создаёт в первичной обмотке переменное магнитное поле, которое и является причиной ЭДС взаимной индукции во вторичной обмотке. Отношение U_2 к U_1 называется *коэффициентом трансформации* k :

$$\left| \frac{U_2}{U_1} \right| = \frac{N_2}{N_1} = k. \quad (3.56)$$

Для создания тока I в контуре с индуктивностью L необходимо совершить работу по преодолению ЭДС самоиндукции. *Собственной энергией* W тока силой I называется величина, численно равная этой работе:

$$W = \frac{LI^2}{2}, \quad (3.57)$$

W – это энергия магнитного поля. Энергия магнитного поля распределена по всему пространству, где имеется магнитное поле. Энергия магнитного поля трансформатора сосредоточена в основном в объёме сердечника.

ЭДС самоиндукции
 Электродвигатель
 Индуктивность
 Трансформатор

Генератор
 Самоиндукция
 Взаимная индукция

Вопросы для повторения

- Что происходит с зарядами проводника, если проводник движется в магнитном поле?
- По какому правилу можно определить направление вектора напряжённости стороннего электрического поля в прямолинейном проводнике?
 - Для чего используются генераторы (электродвигатели)?
 - Что такое самоиндукция?
 - Что такое индуктивность?
 - Назовите единицу индуктивности.
 - В чём заключается явление взаимной индукции?
 - Что такое коэффициент трансформации трансформатора?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие, предназначенное для студентов-иностранцев, проходящих довузовскую подготовку, охватывает вопросы, изучаемые в основном курсе физики по программе технического профиля.

В настоящем пособии в логической последовательности рассматриваются основные понятия механики, молекулярной физики и термодинамики, электродинамики. Материал пособия дополнен необходимыми иллюстрациями, краткими сведениями о выдающихся учёных-физиках, что способствует расширению кругозора обучаемых.

Систематическая вдумчивая работа с использованием настоящего пособия позволит читателю научиться понимать и грамотно использовать научную физическую терминологию, анализировать процессы и явления окружающего мира с точки зрения физики на всём протяжении его обучения в университете.

Авторы выражают надежду, что данное пособие станет помощником будущим специалистам на их пути освоения русского языка, научного стиля речи и физики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Физика**. Кн. 1. Учебник для иностранных студентов / Д. Г. Арсеньев, М. М. Козлов и др.; под ред. д.т.н., проф. Д. Г. Арсеньева. – Санкт-Петербург : Полторак, 2011. – 350 с., ил.
2. **Мякишев, Г. Я.** Физика : учеб. для 10 кл. общеобразоват. учреждений: базовый и профил. уровни / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, Н. Н. Сотский; под ред. В. И. Николаева, Н. А. Парфентьевой. – 17-е изд., перераб. и доп. – Москва : Просвещение, 2008. – 366 с., ил.
3. **Мякишев, Г. Я.** Физика. 11 класс : учеб. для общеобразоват. учреждений: базовый и профил. уровни / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, В. М. Чаругин; под ред. В. И. Николаева, Н. А. Парфентьевой. – 17-е изд., перераб. и доп. – Москва : Просвещение, 2008. – 399 с., ил.
4. **Механика** : учеб. пособие по физике для студентов-иностранцев подготовительных факультетов / Авт. кол. – Москва : РУДН, 2008. – 219 с., ил.
5. **Трофимова Т. И.** Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 11-е изд., стер. – Москва : Издательский центр «Академия», 2006. – 560 с.
6. **Мякишев, Г. Я.** Физика. Электродинамика. 10–11 классы : учеб. для углуб. изуч. физики / Г. Я. Мякишев, А. З. Синяков, Б. А. Слободсков. – Москва : Дрофа, 2005. – 380 с., ил.
7. **Трофимова, Т. И.** Физика. Законы, формулы, определения : учеб. пособие для сузов / Т. И. Трофимова, А. В. Фирсов. – Москва : Дрофа, 2004. – 304 с., ил.
8. **Физика** : лекции к курсу / Ю. Ю. Громов, О. Г. Иванова, А. В. Лагутин, С. В. Чупрунов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. – 96 с.
9. **Яворский, Б. М.** Справочное руководство по физике для поступающих в вузы и для самообразования / Б. М. Яворский, Ю. А. Селезнёв. – 4-е изд., испр. – Москва : Наука. – Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 576 с, ил.
10. **Физическая энциклопедия** / гл. ред. А. М. Прохоров. Ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. – Москва : Сов. энциклопедия, Большая Российская энциклопедия, Т 1 – Т 5, 1988 – 1998.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
Часть 1. МЕХАНИКА	4
ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ КИНЕМАТИКИ	4
1.1. Механическое движение. Вектор перемещения. Путь	4
1.2. Скорость. Равномерное прямолинейное движение. Графики пути и скорости. Сложение скоростей	6
1.3. Ускорение. Равноускоренное прямолинейное движение. Свободное падение тел. Ускорение свободного падения.....	8
1.4. Равномерное движение по окружности. Ускорение при равномерном движении тела по окружности (центростремительное ускорение).....	11
ОСНОВЫ ДИНАМИКИ	13
1.5. Первый закон Ньютона. Инерциальная система отсчёта. Третий закон Ньютона.....	13
1.6. Сила. Масса. Второй закон Ньютона.....	14
1.7. Силы упругости. Закон Гука. Силы трения.....	17
1.8. Силы тяготения. Неинерциальные системы отсчёта. Сила тяжести	20
1.9. Импульс материальной точки. Закон сохранения импульса ...	24
1.10. Энергия. Работа. Мощность	25
1.11. Кинетическая и потенциальная энергии. Закон сохранения механической энергии	28
Часть 2. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ	32
2.1. Основные положения молекулярно-кинетической теории строения вещества.....	34
2.2. Молекулярно-кинетическая теория идеальных газов	39
2.3. Законы идеальных газов	42
2.4. Основы термодинамики	46
2.5. Законы термодинамики	51
2.6. Парообразование и конденсация.....	53
2.7. Плавление, кристаллизация и сублимация твёрдых тел	57
2.8. Фазовые переходы I и II рода	59

Часть 3. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ.....	61
ЭЛЕКТРОСТАТИКА	61
3.1. Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда. Закон Кулона.....	61
3.2. Электрическое поле. Напряжённость электрического поля. Принцип суперпозиции электрических полей	64
3.3. Проводники и диэлектрики в электростатическом поле	67
3.4. Работа сил электростатического поля. Потенциал электростатического поля.....	70
3.5. Электроёмкость. Конденсаторы. Энергия электрического поля	74
ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК	77
3.6. Электрический ток. Сила тока. Напряжение	77
3.7. Сопротивление. Закон Ома. Закон Джоуля–Ленца	79
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА	80
3.8. Магнитное поле. Вектор индукции. Закон Ампера.....	80
3.9. Закон Ампера. Сила Лоренца.....	83
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ	85
3.10. Явление электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции (закон Фарадея)	85
3.11. ЭДС индукции в движущихся проводниках. Самоиндукция.....	87
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	92
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	93

Учебное издание

СТЕПАНЕНКО Игорь Тимофеевич,
СТЕПАНЕНКО Елена Викторовна

ФИЗИКА. ОСНОВНОЙ КУРС

Учебное пособие

Редактор Л. В. Комбарова

Инженер по компьютерному макетированию И. В. Евсева

ISBN 978-5-8265-1346-0



Подписано в печать 24.11.2014.
Формат 60 × 84 / 16. 5,58 усл. печ. л.
Тираж 100 экз. Заказ № 550

Издательско-полиграфический центр
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Тел. 8(4752) 63-81-08;
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru