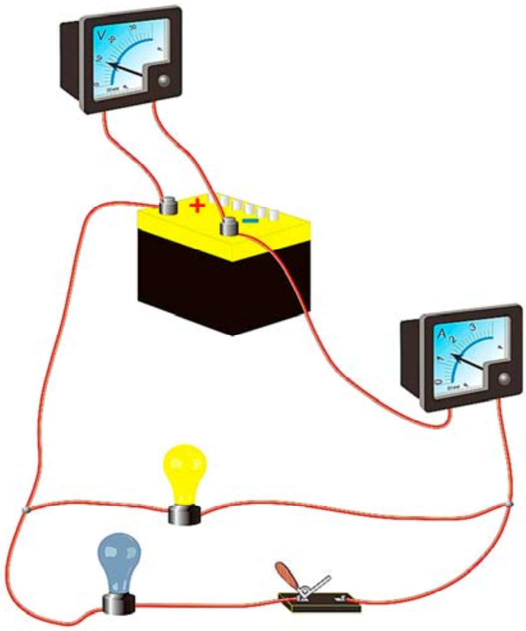
Н.Е. Чеботарева, В.А. Федорихин, А.И. Бурханов

ОСНОВЫ МЕХАНИКИ, МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ, ТЕРМОДИНАМИКИ И ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

Учебно-практическое пособие



Волгоград
ВолгГАСУ
2012

Министерство образования и науки Российской Федерации
Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

Н.Е. Чеботарева, В.А. Федорихин, А.И. Бурханов

ОСНОВЫ МЕХАНИКИ, МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ, ТЕРМОДИНАМИКИ И ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

Учебно-практическое пособие

Волгоград
ВолгГАСУ
2012

УДК 53(075.8)
ББК 22.3я73
Ч 343

Р е ц е н з е н т ы :
кандидат физико-математических наук *Р.А. Лалетин*,
доцент кафедры физики Волгоградского государственного
архитектурно-строительного университета;
кандидат физико-математических наук *С.В. Медников*,
доцент кафедры физики Волгоградского государственного
политехнического университета

Чеботарева, Н.Е.

Ч 343 Основы механики, молекулярной физики, термодинамики и электромагнетизма [Электронный ресурс] : учебно-практическое пособие / Н.Е. Чеботарева, В.А. Федорихин, А.И. Бурханов ; М-во образования и науки Росс. Федерации, Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т. — Электрон. текстовые дан. (2,3 Мб). — Волгоград : ВолгГАСУ, 2012. — Учебное электронное издание комбинированного распространения: 1 DVD-диск. — Систем. требования: PC 486 DX-33; Microsoft Windows XP; 2-скоростной дисковод DVD-ROM; Adobe Reader 6.0. — Официальный сайт Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Режим доступа: http://www.vgasu.ru/ publishing/on-line/ — Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-98276-510-9

Соответствует требованиям государственных образовательных стандартов третьего поколения, определяющих содержание примерных программ дисциплины «Физика» федерального компонента цикла общих математических и естественно-научных дисциплин, и соответствующих рабочих программ подготовки бакалавров строительного направления, утвержденных методическими советами ВолгГАСУ.

Содержит материалы для проведения лекций, практических (семинарских) занятий и лабораторного (натурного или виртуального) практикума. После лекции приведены вопросы для самостоятельного рассмотрения, каждое практическое занятие содержит перечень соответствующих основных законов и формул и подробный разбор типовых задач. В приложениях даны варианты тестовых заданий различных уровней сложности для проведения итогового контроля и календарные планы всех видов учебных занятий с указанием точек текущего контроля.

Для бакалавров всех профилей строительного направления дневной формы обучения, изучающих физику, и преподавателей физики.

Для удобства работы с изданием рекомендуется пользоваться функцией Bookmarks (Закладки) в боковом меню программы Adobe Reader.

УДК 53(075.8)
ББК 22.3я73

ISBN 978-5-98276-510-9

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лекция 1
КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО И ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЙ

1.1. Кинематика поступательного движения

Материальная точка — тело, обладающее массой, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.

Положение материальной точки определяется по отношению к какому-либо другому телу, называемому телом отсчета. Выбранное при этом тело условно считается неподвижным, а связанная с ним система координат называется системой отсчета — СО. В декартовой системе координат положение точки определяется в данный момент времени тремя координатами или радиусом-вектором $\vec{r}$, проведенным из начала координат в данную точку (рис. 1.1).

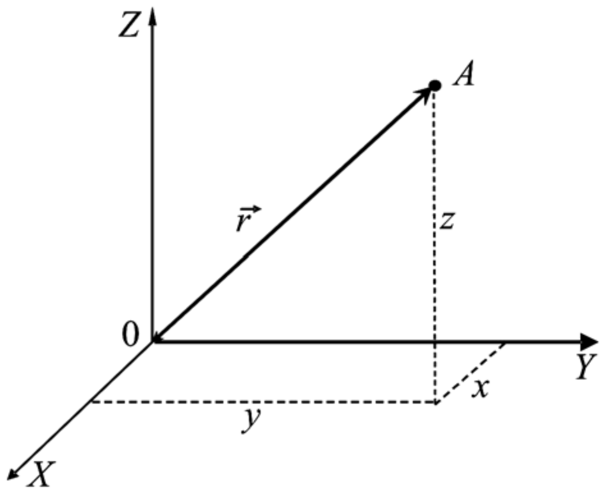


Рис. 1.1

При движении материальной точки ее координата изменяется. В общем случае можно записать

$$x = x(t);\quad y = y(t);\quad z = z(t). \tag{1.1}$$

Эта запись эквивалентна уравнению

$$\vec{r} = \vec{r}(t). \tag{1.2}$$

Число степеней свободы — число независимых координат, определяющих положение точки в пространстве. Если точка движется в пространстве, она обладает тремя степенями свободы, по поверхности — двумя, по прямой — одной.

Исключая время из (1.1) и (1.2) , получим уравнение траектории.

Траектория — линия, описываемая движущейся точкой в пространстве.

Различают две основные траектории: прямолинейную и криволинейную.

Рассмотрим движение материальной точки вдоль произвольной траектории (рис. 1.2).

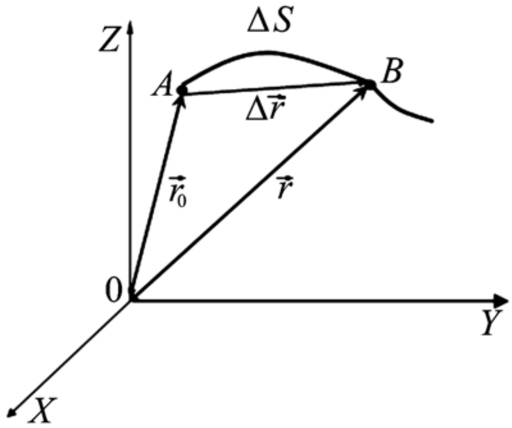


Рис. 1.2

В момент времени $t = 0$ точка находилась в положении A. Длина участка AB, пройденного точкой, называется длиной пути и является скалярной функцией времени

$$\Delta S = \Delta S(t).$$

Перемещение $\Delta\vec{r}$ — вектор, проведенный из начальной в конечную точку движения

$$\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0. \tag{1.3}$$

При прямолинейном движении

$$\Delta\vec{r} = \Delta S.$$

Введем кинематическую характеристику движения — среднюю скорость по перемещению $\vec{V}_{\text{ср}}$:

$$\vec{V}_{\text{ср}} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}. \tag{1.4}$$

Векторы $\vec{V}_{\text{ср}}$ и $\Delta\vec{r}$ сонаправлены.

Для получения мгновенной скорости необходимо перейти к пределу при $\Delta t \to 0$:

$$\vec{V} = \lim \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}. \qquad (1.5)$$

Мгновенная скорость — векторная величина, равная первой производной радиуса-вектора движущейся точки по времени. Вектор $\vec{V}$ всегда направлен по касательной к траектории.

При $\Delta t \to 0$ путь $\Delta S \to |\Delta \vec{r}|$, поэтому

$$V = |\vec{V}| = \left|\lim \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}\right| = \lim \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t} = \lim \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{dS}{dt}.$$

Численное значение мгновенной скорости равно

$$V = \frac{dS}{dt}. \qquad (1.6)$$

Проинтегрируем выражение $dS = Vdt$ в пределах от t до $t + \Delta t$

$$S = \int\limits_{t}^{t+\Delta t} Vdt. \qquad (1.7)$$

Для равномерного движения получим

$$S = V \int\limits_{t}^{t+\Delta t} dt = V\Delta t. \qquad (1.8)$$

Для переменного движения

$$S = \int\limits_{t_1}^{t_2} V(t)dt. \qquad (1.9)$$

В случае неравномерного движения важно знать, как быстро меняется скорость.

Ускорение — физическая величина, характеризующая быстроту изменения скорости по модулю и направлению.

Если в точке A тело имело скорость $\vec{V}$, через время Δt в точке B — скорость $\vec{V}_1 = \vec{V} + \Delta \vec{V}$ (рис. 1.3), то среднее ускорение $\vec{a}_{\text{ср}}$ равно

$$\vec{a}_{\text{ср}} = \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t}. \qquad (1.10)$$

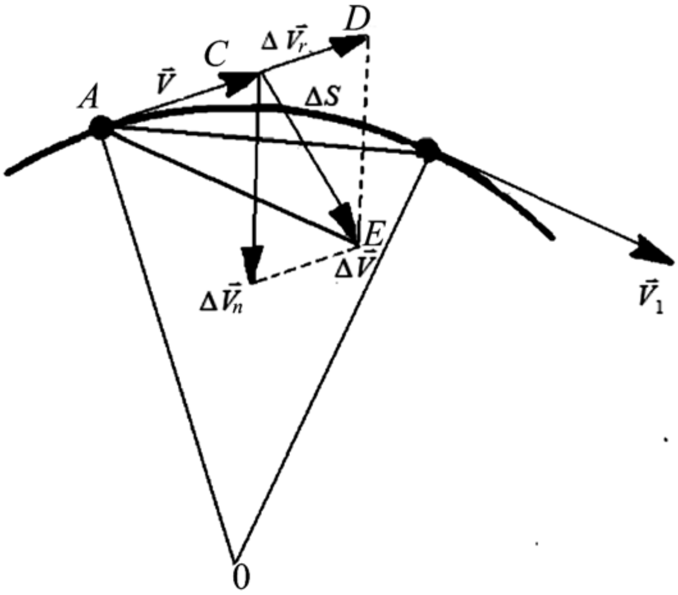


Рис. 1.3

Мгновенное ускорение — предел среднего ускорения при $\Delta t \to 0$

$$\vec{a} = \lim \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{V}}{dt}. \tag{1.11}$$

Мгновенное ускорение — первая производная скорости по времени.

Разложим $\Delta\vec{V}$ на две составляющие — тангенциальную (касательную) τ и нормальную (центростремительную) *n*:

$$AD = \left|\vec{V}_1\right|;\ CD = \left|\Delta\vec{V}_\tau\right|;\ DE = \left|\Delta\vec{V}_n\right|,$$

где $\Delta\vec{V}_\tau = V_1 - V$ характеризует изменение скорости по модулю, а $\Delta\vec{V}_n$ — по направлению.

Тангенциальное (касательное) ускорение определяется как

$$a_\tau = \lim \frac{\Delta V_\tau}{\Delta t} = \lim \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{dV}{dt}. \tag{1.12}$$

Пусть точки *B* и *A* расположены близко, тогда из треугольника *AOB*

$$\frac{\Delta V_n}{AB} = \frac{V_1}{r};$$

$$AB = V\Delta t.$$

В пределе при $\Delta t \to 0$ $\vec{V}_1 \to \vec{V}$, $\angle EAD \to 0^\circ$, а ΔEAD — равнобедренный, то $\angle ADE \to 90^\circ$. Поэтому векторы $\Delta\vec{V}_n$ и $\vec{V}$ взаимно перпендикулярны.

Так как вектор скорости направлен по касательной к траектории, то $\Delta\vec{V}_n$ перпендикулярен скорости и направлен к центру круга с радиусом кривизны r.

Нормальное (центростремительное) ускорение

$$a_n = \lim \frac{\Delta V_n}{\Delta t} = \frac{V^2}{r}. \tag{1.13}$$

Связь полного $\vec{a}$, нормального $\vec{a}_n$ и тангенциального $\vec{a}_\tau$ ускорений

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau. \tag{1.14}$$

Классификация движения с учетом нормального и тангенциального ускорений приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Вид движения	Условия, налагаемые на ускорения
Прямолинейное равномерное	$a_\tau = 0;\ a_n = 0$
Прямолинейное равнопеременное	$a_\tau = a = \text{const};\ a_n = 0$
Прямолинейное с переменным ускорением	$a_\tau = f(t);\ a_n = 0$
Равномерное по окружности	$a_\tau = 0;\ a_n = \text{const}$
Равномерное криволинейное	$a_\tau = 0;\ a_n \neq \text{const}$
Криволинейное равнопеременное	$a_\tau = \text{const};\ a_n \neq 0$
Криволинейное с переменным ускорением	$a_\tau = f(t);\ a_n \neq 0$

Решим основную задачу кинематики на примере прямолинейного равнопеременного движения.

Имели

$$a_\tau = a = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1}.$$

Если начальный момент времени $t_1 = 0$, а начальная скорость $V_1 = V_0$, то, обозначив $t_2 = t$ и $V_2 = V$, получим

$$a_\tau = \frac{V - V_0}{t},$$

откуда

$$V = V_0 + at.$$

Проинтегрировав эту формулу в пределах от 0 до t, получим кинематическое уравнение прямолинейного равнопеременного движения

$$S = \int_0^t V dt = \int_0^t \left(V_0 + at\right) dt = V_0 t + \frac{at^2}{2}. \qquad (1.15)$$

Основная задача кинематики: по известным в начальный момент времени положению, скорости и ускорению тела определить положение, скорость и ускорение тела в произвольный момент времени.

1.2. Динамика поступательного движения

Импульс тела (материальной точки) $\vec{p}$ — векторная величина, характеризующая движущиеся тела, равная произведению массы тела на его скорость

$$\vec{p} = m\vec{V}. \qquad (1.16)$$

Направление импульса совпадает с направлением скорости тела.

Единица измерения импульса в СИ: $\left[p\right] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$.

Пользуясь понятием импульса тела и импульса силы, можно привести новую формулировку второго закона Ньютона.

Изменение импульса тела равно импульсу силы

$$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}. \qquad (1.17)$$

Система тел — группа тел, рассматриваемых совместно.

Внутренние силы — силы взаимодействия тел системы между собой.

Внешние силы — силы, с которыми тела, не входящие в рассматриваемую систему, действуют на тела системы.

Замкнутая система — система тел, взаимодействующих только между собой и не взаимодействующих с внешними телами.

Центр масс — точка тела, положение которой характеризует распределение масс в теле или механической системе.

Радиус-вектор $\vec{r}_c$, определяющий положение центра масс системы, состоящей из N тел массами m_i, определяется по формуле

$$\vec{r}_c = \frac{1}{M_c}\sum_{i=1}^{n} m_i \vec{r}_i, \tag{1.18}$$

где M_c — масса системы, $M_c = m_1 + m_2 + ... + m_N$; $\vec{r}_i$ — это радиус-вектор, определяющий положение соответствующей массы m_i.

Импульс $\vec{p}_c$ механической системы тел (материальных точек) равен геометрической сумме всех тел, составляющих систему, или произведению массы всей системы M_c на скорость ее центра масс V_c

$$\vec{p}_c = \sum_{i=1}^{n} \vec{p}_i = M_c V_c. \tag{1.19}$$

1.3. Кинематика вращательного движения

Положение тела можно однозначно описать, указав радиус окружности r и угол, образованный осью OX и радиусом, связанным с точкой тела, положение которой описывается (рис. 1.4). Координаты x и y выражаем через r и угол φ

$$x = r\cos\varphi;\ y = r\sin\varphi.$$

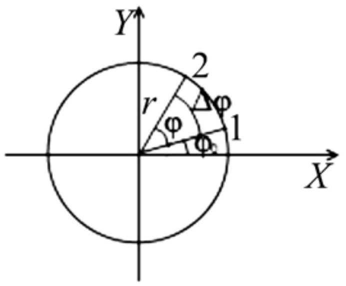


Рис. 1.4

При известном радиусе окружности r можно указать длину дуги l, пройденной точкой за время t. Тогда, зная начальное положение точки и направление вращения, можно определить положение точки в момент времени t.

Изменение положения точки при вращении по окружности можно описать, указав угол поворота $\Delta\varphi$ радиуса, связанного с движущейся точкой. Если угол $\Delta\varphi$ отсчитывается против часовой стрелки, он считается положительным, если по часовой стрелке — отрицательным. Положение точки описывается углом φ

$$\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi.$$

Если угол $\Delta\varphi$ выражен в радианах, то

$$l = r\Delta\varphi.$$

При равномерном вращении модуль скорости не изменяется. Он равен отношению длины дуги l, пройденной точкой, к промежутку времени, в течение которого точка прошла это расстояние. При описании движения по окружности эту скорость называют линейной скоростью

$$V = \frac{l}{\Delta t}. \qquad (1.20)$$

Для описания быстроты изменения угла поворота $\Delta\varphi$ радиуса, связанного с движущейся точкой, вводят угловую скорость ω.

Угловая скорость — величина, характеризующая быстроту движения тела по окружности. Она равна первой производной угла поворота по времени

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}. \qquad (1.21)$$

Единица угловой скорости в СИ: радиан в секунду $\left([\omega] = \frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)$.

Так как

$$l = r\Delta\varphi,$$

то

$$\frac{l}{\Delta t} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} r,$$

или

$$V = \omega r. \qquad (1.22)$$

Угловое ускорение — векторная величина, определяемая первой производной угловой скорости по времени (или второй производной угла поворота по времени)

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt},$$

или

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d^2\vec{\varphi}}{dt^2}. \qquad (1.23)$$

Подставив в (1.13) V из (1.22), получим

$$|a_n| = \omega^2 r. \qquad (1.24)$$

Дифференцируя (1.22) по времени, получим

$$a_\tau = r\varepsilon. \tag{1.25}$$

Следовательно, полное ускорение точки

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2} = r\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}. \tag{1.26}$$

Направление угловой скорости (аксиальный вектор) определяется по правилу правого винта (рис. 1.5).

Вектор углового ускорения направлен вдоль оси вращения в сторону вектора элементарного приращения угловой скорости: при ускоренном движении векторы $\vec{\varepsilon}$ и $\vec{\omega}$ сонаправлены, при замедленном — противоположны (пунктирная прямая).

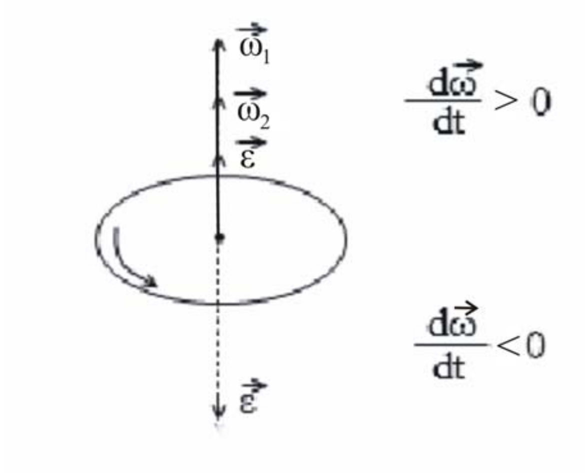


Рис. 1.5

Период T — величина, равная промежутку времени, через которое движение полностью повторяется

$$T = \frac{\Delta t}{N}, \tag{1.27}$$

где N — число оборотов за время Δt.

Единица измерения периода в СИ: секунда $\left([T] = \text{с}\right)$.

Частота — величина, равная количеству оборотов за единицу времени

$$n = \frac{N}{\Delta t}. \tag{1.28}$$

Единица измерения частоты в СИ: секунда в минус первой степени или Герц ($[n] = \text{с}^{-1}$; Гц).

1.4. Динамика вращательного движения

Силу $\vec{F}$, действующую на тело при равноускоренном вращении, можно представить в виде суммы двух составляющих: тангенциальной $\vec{F}_\tau$ и нормальной $\vec{F}_n$. Модуль тангенциальной составляющей равен проекции силы $\vec{F}$ на касательную, модуль нормальной составляющей равен проекции силы $\vec{F}$ на перпендикуляр к касательной — радиус окружности R.

Имели

$$\vec{F}_n = m\vec{a}_n; \qquad (1.29)$$

$$\vec{F}_\tau = m\vec{a}_\tau, \qquad (1.30)$$

или

$$\vec{F}_\tau = mR\vec{\varepsilon}.$$

Линия действия силы — линия, вдоль которой действует сила.

Плечо силы d — расстояние от оси вращения до линии действия силы.

Учитывая, что $F_\tau = F\sin a$ и $d = \dfrac{R}{\sin a}$, умножив на R левую и правую части уравнения для F_τ, получим $Fd = nR^2\varepsilon$.

Момент силы относительно оси M — скалярная величина, характеризующая вращательное действие силы.

Момент силы, вызывающий вращение тела вокруг данной оси по часовой стрелке, считают отрицательным.

Если на тело действует несколько сил, то суммарный момент этих сил равен алгебраической сумме моментов всех сил относительно данной оси и называется вращательным моментом

$$M = \sum_{i=1}^{n} M_i.$$

Момент силы относительно точки O равен векторному произведению радиуса-вектора $\vec{r}$, проведенного из точки O в точку C приложения силы, на силу (рис. 1.6)

$$\vec{M} = \left[\vec{r}\vec{F}\right]. \qquad (1.31)$$

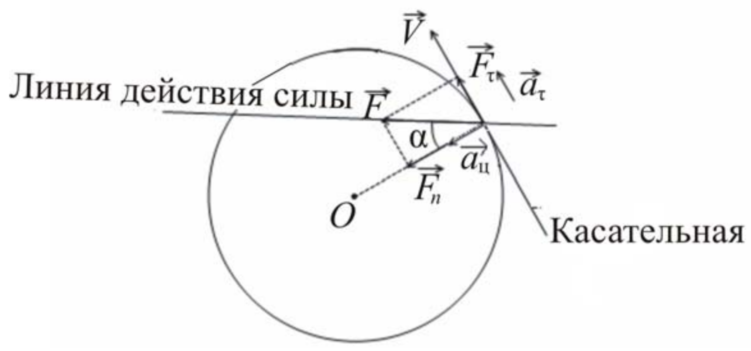


Рис. 1.6

Направление $\vec{M}$ совпадает с направлением поступательного движения правого винта при его вращении по кратчайшему пути от $\vec{r}$ к $\vec{F}$. Модуль момента силы

$$M = Fr\sin\alpha = Fd.$$

Момент силы относительно неподвижно оси *OZ*; *MZ* — скалярная величина, равная проекции на эту ось вектора $\vec{M}$, определенного относительно произвольной точки *C* оси *OZ* (рис. 1.7).

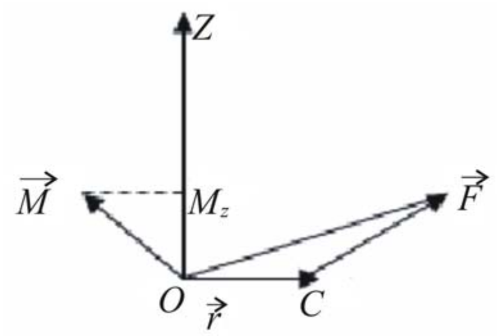


Рис. 1.7

Единица измерения момента силы в СИ: ньютон-метр ([*M*] = Н·м).

Момент инерции материальной точки I_i — скалярная величина, характеризующая инертность вращающейся материальной точки относительно оси вращения

$$I_i = m_i r_i^2. \tag{1.32}$$

Момент инерции системы материальных точек равен сумме произведений масс *n* точек системы на квадраты их расстояний до оси вращения

$$I_c = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2. \tag{1.33}$$

В случае непрерывного распределения масс — абсолютно твердое тело, где интегрирование производится по всему объему тела

$$I = \int r_2 dm. \tag{1.34}$$

Теорема Штейнера применяется для определения момента инерции относительно произвольной оси вращения момент инерции тела относительно любой оси вращения равен моменту его инерции I_c относительно параллельной оси, проходящей через центр масс тела C, сложенному с произведением массы тела на квадрат расстояния a между осями

$$I = I_c + ma^2. \tag{1.35}$$

Значения момента инерции для некоторых однородных тел, где m — масса тела, приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Тело	Положение оси вращения	Момент инерции
Полый тонкостенный цилиндр или обруч радиусом R	Ось симметрии	mR^2
Сплошной цилиндр или диск радиусом R	Ось симметрии	$\frac{1}{2}mR^2$
Прямой тонкий стержень длиной l	Ось перпендикулярна стержню и проходит через его середину	$\frac{1}{12}ml^2$
Прямой тонкий стержень длиной l	Ось перпендикулярна стержню и проходит через его конец	$\frac{1}{3}ml^2$
Шар радиусом R	Ось проходит через центр	$\frac{2}{5}mR^2$

Для дальнейшего описания вращательного движения необходим момент импульса.

Момент импульса материальной точки относительно оси $\vec{L}_i$ — векторное произведение

$$\vec{L}_i = [\vec{r}_i \vec{p}_i], \tag{1.36}$$

где $\vec{r}_i$ — радиус-вектор, проведенный из точки O в точку C (см. рис. 1.7); $\vec{p}_i = m_i \vec{V}_i$ — импульс материальной точки.

Направление $\vec{L}$ определяется по правилу правого винта.

Относительно неподвижной оси *OZ* момент импульса — скалярная величина, равная проекции на эту ось вектора момента инерции, определенного относительно произвольной точки оси, причем значение L_z не зависит от положения этой точки на оси.

Для абсолютно твердого тела момент импульса равен сумме моментов импульса *n* отдельных частей тела

$$L_z = \sum_{i=1}^{n} m_i V_i r_i = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2 \omega = \omega \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2 = J_z \omega.$$

Окончательно

$$L_z = J_z \omega. \tag{1.37}$$

Продифференцируем уравнение (1.37) по времени

$$\frac{dL_z}{dt} = J_z \frac{d\omega}{dt} = J_z \varepsilon = M_z$$

и получим основное уравнение динамики вращательного движения тела относительно неподвижной оси

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}. \tag{1.38}$$

Уравнение (1.38) в скалярной форме можно привести к виду:

$$M = \frac{J d\omega}{dt} = J\varepsilon. \tag{1.39}$$

Вопросы для самостоятельного рассмотрения

1. Постройте графики зависимостей $s(t)$, $V(t)$ и $a(t)$ для равномерного и равноускоренного движений. Определите пройденный путь и среднюю скорость за заданный интервал времени по графику $V(t)$.

2. Определите физический смысл механического принципа относительности Галилея. Установите, при каких условиях преобразования Галилея справедливы.

3. Сформулируйте закон Паскаля для определения давления жидкости.

4. Напишите уравнение Бернулли и сформулируйте основные следствия из него.

5. Перечислите основные закономерности ламинарного и турбулентного течений жидкости.

6. Сформулируйте постулаты Эйнштейна. Чему равна скорость света в вакууме?

7. Напишите преобразования Лоренца. При каких условиях преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея? Дайте понятие о четырехмерном пространстве.

8. Будут ли одновременными во всех инерциальных системах отсчета два события, происходящие в одной системе в одной точке пространства в одно и то же время? В разных точках пространства в одно и то же время?

9. Одинакова ли длительность одного и того же события в разных системах отсчета? Перечислите условия, при которых этим различием можно пренебречь.

10. Определите изменение длины тела при релятивистском движении. При каких условиях изменением длины можно пренебречь?

11. Сравните классический и релятивистский законы сложения скоростей. При каких условиях релятивистский закон сложения скоростей переходит в классический?

Практическое занятие 1
КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Основные законы и формулы

1. Средняя скорость по перемещению

$$\vec{V}_{\text{ср}} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t},$$

где $\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$; $\Delta t = t_2 - t_1$.

2. Средняя скорость по пройденному пути ΔS

$$V_{\text{ср}} = \frac{\Delta S}{\Delta t}.$$

3. Мгновенная скорость

$$\vec{V} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

4. Среднее ускорение

$$\vec{a}_{\text{ср}} = \frac{\Delta\vec{V}}{\Delta t},$$

где $\Delta\vec{V} = \vec{V}_2 - \vec{V}_1$.

5. Мгновенное ускорение

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt},$$

или

$$\vec{a} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}.$$

6. Тангенциальная или касательная составляющая ускорения

$$a_\tau = \frac{dV}{dt}.$$

7. Нормальная или центростремительная составляющая ускорения

$$a = \frac{V^2}{r}.$$

8. Полное ускорение

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

или

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

9. Кинематическое уравнение равнопеременного поступательного движения

$$S = V_0 t \pm \frac{at^2}{2},$$

где $V = V_0 \pm at$.

10. Второй закон Ньютона

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = m\vec{a},$$

или

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = \frac{d\vec{p}}{dt}.$$

11. Сила трения скольжения

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где μ — коэффициент трения скольжения; N — сила нормального давления.

12. Закон всемирного тяготения

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

где G — гравитационная const.

13. Сила тяжести

$$\vec{F}_{\text{т}} = m\vec{g}.$$

14. Сила упругости, закон Гука

$$F_{\text{упр}} = -k\Delta x,$$

или

$$\delta_n = E\varepsilon,$$

где k — коэффициент упругости (для пружины — жесткость); Δx — абсолютная; E — модуль Юнга для деформация растяжения—сжатия; ε — относительная деформации.

Примеры решения задач

Задача 1.1

Самолет совершает перелет из пункта A в пункт B, а затем обратно. В безветренную погоду скорость самолета — V, скорость ветра — U. Найдите отношение средних скоростей всего перелета, когда дует ветер: 1) по курсу самолета — вдоль линии AB; 2) перпендикулярно курсу.

Дано:
V — скорость самолета
U — скорость ветра

$\dfrac{V_{\text{ср}1}}{V_{\text{ср}2}}$ — ?

Р е ш е н и е

Случай 1

Время всего полета

$$t_1 = \frac{l}{V-U} + \frac{l}{V+U},$$

где l — расстояние между A и B.

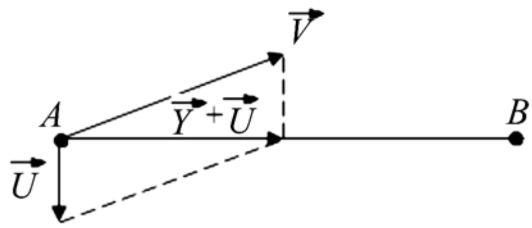
Отсюда

$$V_{\text{ср}1} = \frac{2l}{\dfrac{l}{V+U} + \dfrac{l}{V-U}} = \frac{V^2-U^2}{V}.$$

Ответ: $V_{\text{ср}1} = \dfrac{V^2-U^2}{V}$.

Случай 2

Скорость самолета относительно ветра направлена под углом к линии AB так, чтобы скомпенсировать снос (рис.).



Скорость перелета в этом случае постоянна и равна

$$V_{\text{ср}2} = \sqrt{V^2-U^2},$$

так как время перелета

$$t_2 = \frac{2l}{\sqrt{\left(V^2-U^2\right)}},$$

окончательно

$$\frac{V_{\text{ср}1}}{V_{\text{ср}2}} = \frac{\dfrac{V^2-U^2}{V}}{\sqrt{V^2-U^2}} = \frac{\sqrt{\left(V^2-U^2\right)^2}}{V\sqrt{V^2-U^2}} = \frac{1}{V}\sqrt{\frac{\left(V^2-U^2\right)^2}{V^2-U^2}} = \frac{\sqrt{V^2-U^2}}{V}.$$

Ответ: $\dfrac{V_{\text{ср}1}}{V_{\text{ср}2}} = \dfrac{\sqrt{V^2-U^2}}{V}$.

Задача 1.2

Первый вагон поезда прошел мимо наблюдателя, стоящего на платформе, за 1 с, а второй — за 1,5 с. Длина вагона равна 12 м. Считая движение поезда равнопеременным, определите его ускорение и скорость в начале наблюдения.

Дано:
$t_1 = 1$ с
$t_2 = 1$ с $+ 1,5$ с $= 2,5$ с
$S = 12$ м

a; V_0 — ?

Р е ш е н и е

Для первого вагона запишем кинематическое уравнение

$$S = V_0 t_1 - \frac{a t_1^2}{2}. \tag{1}$$

Запишем кинематическое уравнение для второго вагона

$$2S = V_0 t_2 - \frac{a t_2^2}{2}. \tag{2}$$

Из уравнения (1) выразим V_0, подставим в уравнение (2) и найдем V_0 и a.

$$V_0 = \frac{2S - a t_1^2}{2t_1};$$

$$2S = \frac{\left(2S - a t_1^2\right) t_2}{2t_1} + \frac{a t_2^2}{2};$$

$$a = \frac{2S\left(2t_1 - t_2\right)}{t_2^2 t_1 - t_1^2 t_2}.$$

Значение ускорения $a = –3,2$ м/с^2, а начальной скорости $V_0 =$ $= 13,6$ м/с.

Знак « – » означает, что движение поезда равнозамедленное.

Ответ: $a = –3,2$ м/с^2; $V_0 = 13,6$ м/с.

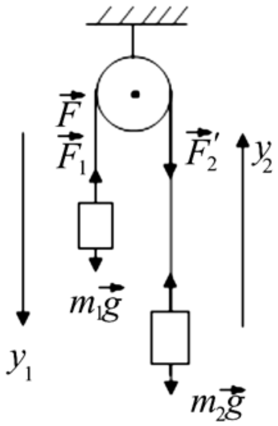
Задача 1.3

К концам троса, перекинутого через блок, подвешены грузы m_1 и m_2. Пренебрегая трением и считая шнур и блок невесомыми, а шнур нерастяжимым, определите ускорение, с которым будут двигаться грузы, силу натяжения шнура и показания динамометра, на котором висит блок.

Дано:
m_1 — масса первого груза
m_2 — масса второго груза
a; F; $F_д$ — ?

Р е ш е н и е

Для решения этой и подобных задач изобразим на рисунке силы, действующие на груз.



Запишем уравнения движения грузов

$$m_1\vec{a}_1 = m_1\vec{g} + \vec{F}_1; \qquad (1)$$

$$m_2\vec{a}_2 = m_2\vec{g} + \vec{F}_2. \qquad (2)$$

Ускорения $\vec{a}_1$ и $\vec{a}_2$ численно равны, так как нить нерастяжима и перемещения грузов всегда одинаковы. В общем случае $\vec{F}_1'$ и $\vec{F}_2'$, приложенные к концам нити, численно равны силам $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, не равны между собой, т.е. разность этих сил сообщает ускорение нити и угловое ускорение блоку. Если массой нити и блока пренебречь, то $\vec{F}_1'$, $\vec{F}_2'$ и соответствующие силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, приложенные к грузам, можно считать равными друг другу.

Спроецировав векторы, входящие в уравнения (1) и (2) на направления y_1 и y_2, совпадающие с ускорениями каждого из грузов (считаем, что $m_1 > m_2$), получим систему уравнений

$$m_1 a = m_1 g - F;$$

$$m_2 a = F - m_2 g.$$

Отсюда

$$F_д = \frac{4m_1 m_2}{m_1 + m_2} g;$$

$$a = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} g;$$

$$F = \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} g\,.$$

Показания динамометра равно сумме сил натяжения нитей

$$F_\text{д} = 2F = \frac{4m_1 m_2}{m_1 + m_2} g.$$

Если $m_1 < m_2$, то $a < 0$, т.е. грузы будут двигаться в противоположную сторону.

Ответ: $a = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} g$; $F = \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} g$; $F_\text{д} = \frac{4m_1 m_2}{m_1 + m_2} g$.

Задачи для самостоятельного решения

1.11; 1.19; 1.21; 1.28; 2.5; 2.30 (а, б).

Примечание. Здесь и далее задачи для самостоятельного решения см. *Волькенштейн, В.С.* Сборник задач по общему курсу физики. Изд. 3-е, испр. и доп. — СПб : Книжный мир, 2005. — 328 с.

Лекция 2
ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

2.1. Закон сохранения импульса

Законы сохранения свидетельствуют о постоянстве трех важнейших интегралах движения: импульса, момента импульса и энергии. Их постоянство имеет глубокое происхождение, связанное со свойствами основных форм материи — пространства и времени.

Изменение импульса системы происходит только под действием внешних сил. Для замкнутой системы справедлив закон сохранения импульса.

В замкнутой системе геометрическая сумма импульсов тел, составляющих систему, не изменяется при любых движениях и взаимодействиях тел системы:

$$\sum_{i=1}^{n} m_i V_i = \text{const.} \tag{2.1}$$

Закон сохранения импульса следует из однородности пространства: параллельный перенос в пространстве замкнутой механической системы как целого не изменяет механических свойств системы.

Закон сохранения импульса объясняет, например, такие явления, как реактивное движение, отдачу (или откат) при выстреле.

2.2. Закон сохранения момента импульса

Аналогично рассматривая замкнутые системы для вращательного движения тел (см. лекцию 1), можно получить закон сохранения момента импульса.

Момент внешних сил для замкнутой системы $\vec{M} = 0$, поэтому

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = 0 \text{ и } \vec{L} = \text{const.} \tag{2.2}$$

Уравнение (2.2) — математическая запись закона сохранения момента импульса.

В замкнутой системе тел полный (суммарный) момент импульса не изменяется:

$$\vec{L} = \text{const}.$$

Закон сохранения момента импульса следует из изотропности пространства: поворот в пространстве замкнутой механической системы как целого не изменяет механических свойств системы.

Из этого закона при неизменности момента инерции твердого тела, вращающегося вокруг определенной оси, следует постоянство угловой скорости.

2.3. Работа и мощность

Энергия является универсальной мерой различных форм движения и взаимодействия, с которыми связывают соответствующие формы энергии: механическую, тепловую, электромагнитную, ядерную и др.

Изменение механического движения тела вызывается силами, действующими на него со стороны других тел. Чтобы количественно охарактеризовать процесс обмена энергией между взаимодействующими телами, в механике вводят понятие работы силы.

Механическая работа — величина, характеризующая действие силы на тело, приводящее к изменению модуля скорости тела

$$A = F_s S = FS\cos\alpha, \qquad (2.3)$$

где F_s — проекция силы F на направление перемещения S; α — угол между векторами силы и перемещения.

Единица измерения работы в СИ: джоуль ([A] = Дж).

Механическая работа равна скалярному произведению векторов силы и перемещения

$$A = \left(\vec{F}\vec{S}\right). \qquad (2.4)$$

В самом общем виде можно определить работу при различных углах α.

1. Если $\alpha = 0°$, т.е. направление силы и перемещения совпадают, то

$$A = FS.$$

2. Если $\alpha < 90°$, то $A > 0$. В этом случае тело движется ускоренно и сила совершает работу, которая приводит к увеличению кинетической энергии.

3. Если $\alpha = 90°$, то $A = 0$, т.е. при движении тела сила, направленная перпендикулярно его перемещению, работу не совершает.

4. Если $90° < \alpha \le 180°$, то $A < 0$. В таком случае работа совершается против действия силы, при этом увеличивается потенциальная или внутренняя энергия тела.

Если на тело действует несколько сил, то полная работа (работа всех сил) равна работе равнодействующей сил.

Работа силы на участке траектории от точки 1 до точки 2 равна алгебраической сумме элементарных работ на отдельных бесконечно малых участках пути (рис. 2.1).

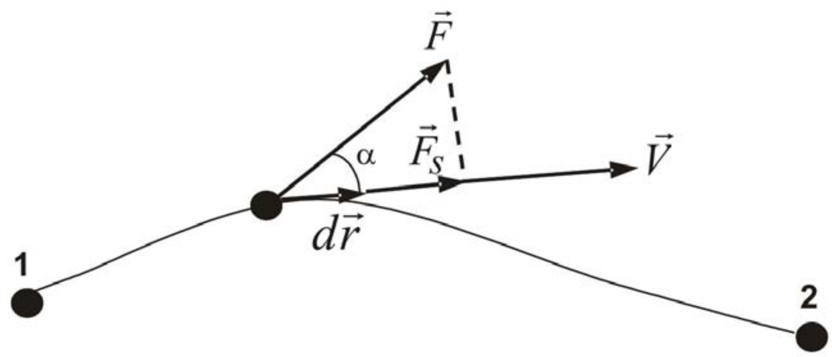


Рис. 2.1

Для конечных перемещений необходимо использовать интеграл

$$A = \int_1^2 F dS \cos\alpha = \int_1^2 F_s dS. \qquad (2.5)$$

Чтобы охарактеризовать скорость совершения работы, вводят понятие мощности

$$N = \frac{dA}{dt}. \qquad (2.6)$$

За время dt сила $\vec{F}$ совершает работу $\vec{F}d\vec{r}$ и мощность, развиваемая этой силой, в данный момент времени

$$N = \frac{\vec{F}d\vec{r}}{dt},$$

или (2.7)

$$N = \left(\vec{F}\vec{V}\right),$$

т.е. равна скалярному произведению вектора силы на вектор скорости, с которой движется точка приложения этой силы.

Единица измерения мощности в СИ: ватт ([N] = Вт).

Внесистемная единица измерения мощности — лошадиная сила: 1 л. с. ≈ 735 Вт.

2.4. Два вида механической энергии: кинетическая и потенциальная. Закон сохранения механической энергии

Кинетическая энергия механической системы — энергия механического движения этой системы, равная

$$E_к = \frac{1}{2}mV^2 = \frac{1}{2m}p^2. \quad (2.8)$$

Кинетическая энергия всегда положительна, является функцией состояния системы и зависит от выбора системы отсчета.

Единица измерения кинетической энергии в СИ — джоуль ($[E_к] =$ = Дж).

Изменение кинетической энергии тела во времени равна работе, совершенной за это время силой (или равнодействующей сил), действующей на тело

$$A = E_{к2} - E_{к1} = \Delta E_к. \quad (2.9)$$

Кинетическая энергия системы тел равна сумме кинетических энергий отдельных тел, входящих в эту систему.

Кинетическая энергия материальной точки, вращающейся вокруг неподвижной оси вращения, равна

$$E_{к.вр\,i} = \frac{1}{2}m_i V_i^2.$$

Для системы материальных точек

$$E_{к.вр} = \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i V_i^2}{2},$$

где m_i — масса i-й точки.

Так как

$$\omega = \frac{V_i}{r_i},$$

где r_i и V_i — расстояние от оси и скорость точки с массой m_i, то

$$E_{т.квр} = \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i \omega^2 r_i^2}{2} = \frac{J\omega^2}{2}, \quad (2.10)$$

или

$$E_{\text{к.вр}} = \frac{L^2}{2I}. \tag{2.11}$$

Увеличение кинетической энергии обусловлено работой, совершаемой вращающимся телом

$$dA = dE_{\text{к. вр}}. \tag{2.12}$$

Потенциальная энергия — характеристика тела, участвующего во взаимодействии. Изменение потенциальной энергии системы определяется работой потенциальных (или консервативных) сил, характеризующих взаимодействие между частями системы.

Работа потенциальных сил равна уменьшению потенциальной энергии

$$A = -(E_{\text{п}2} - E_{\text{п}1}) = -\Delta E_{\text{п}}. \tag{2.13}$$

Значение потенциальной энергии зависит от выбора нулевого уровня — состояния тела или системы, в котором потенциальной энергии приписывают нулевое значение. Выбор нулевого уровня определяется исключительно соображениями удобства при решении конкретной задачи.

Значение потенциальной энергии численно равно работе потенциальных сил по перемещению тела или системы на нулевой уровень.

Физический смысл имеет изменение потенциальной энергии, так как оно связано с совершенной работой. Потенциальная энергия зависит только от расстояния между телами, поэтому при выбранном нулевом уровне ее значение не зависит от выбора системы отсчета.

Потенциальная энергия тела массой m, поднятого на высоту h над поверхностью земли равна

$$E_{\text{п}} = mgh. \tag{2.14}$$

Потенциальная энергия упругодеформированного тела равна

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}, \tag{2.15}$$

где k — коэффициент квазиупругости тела.

В замкнутой системе тел, в которой действуют только потенциальные силы, положительная работа внутренних сил увеличивает кинетическую энергию тел системы и уменьшает потенциальную

$$A = \Delta E_{\text{к}} = -\Delta E_{\text{п}}.$$

Так как $\Delta E_к = -\Delta E_п$, из этого следует, что $\Delta E_п + \Delta E_к = 0$ или

$$\Delta(E_п + E_к) = \Delta E_{мех} = 0.$$

Полная механическая энергия системы $E_{мех}$ — величина, равная сумме кинетической и потенциальной энергий тел системы

$$E_{мех} = \sum E_к + \sum E_п. \qquad (2.16)$$

Закон сохранения полной механической энергии: в замкнутой системе, в которой действуют консервативные силы, полная механическая энергия сохраняется

$$E_{мех} = \text{const}. \qquad (2.17)$$

Закон сохранения энергии следует из однородности времени, т.е. независимости законов движения замкнутой системы от выбора начала отсчета времени.

Изменение полной механической энергии замкнутой системы равно работе внешних сил

$$\Delta(E_к + E_п) = \Delta\, E_{мех} = A_{внеш}. \qquad (2.18)$$

Поэтому более общая формулировка закона сохранения энергии в механике следующая: изменение полной механической энергии системы при переходе из одного состояния в другое равно работе, совершенной при этом внешними силами

$$\int_1^2 d\left(E_к + E_п\right) = A_{12}. \qquad (2.19)$$

Вопросы для самостоятельного рассмотрения

1. Сформулируйте первый закон Ньютона. Дайте определение понятия «инерциальная система отсчета».

2. Сформулируйте третий закон Ньютона.

3. Определите кинетическую энергию тела, совершающего сложное поступательно-вращательное движение.

4. Дайте определение понятия «релятивистский импульс». Сформулируйте основной закон релятивистской динамики.

5. Определите взаимосвязь энергии и массы в релятивистской динамике.

6. Как определить кинетическую энергию тела в релятивистской динамике?

7. Определите взаимосвязь релятивистского импульса, энергии покоя и полной энергии.

Практическое занятие 2
КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Основные законы и формулы

1. Мгновенная угловая скорость

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

где $d\vec{\varphi}$ — бесконечно малый угол поворота; аксиальный, или псевдовектор.

2. Мгновенное угловое ускорение

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}.$$

3. Кинематическое уравнение равнопеременного вращательного движения

$$\varphi = \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2},$$

где $\omega = \omega_0 \pm \varepsilon t$.

4. Связь между линейными и угловыми кинематическими характеристиками

$$S = R\varphi;\ V = \omega R;\ a_\tau = \varepsilon R;\ a_n = \omega^2 R.$$

5. Момент инерции системы n тел

$$J_\text{c} = \sum_{i=1}^{n} m_i R_i^2 .$$

6. Моменты инерции тонкостенного полого (обод) и сплошного цилиндра (или диска) относительно оси симметрии — главные моменты инерции, соответственно

$$J = mR^2;$$

$$J = \frac{1}{2} mR^2 .$$

7. Момент инерции шара относительно оси, проходящей через его центр

$$J = \frac{2}{5} mR^2.$$

8. Момент инерции тонкого стержня длиной l относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его середину

$$J = \frac{1}{12} ml^2.$$

9. Момент инерции тонкого стержня длиной l относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через любой его торец, равен

$$J = \frac{1}{3} ml^2.$$

10. Теорема Штейнера

$$J = J_{\text{с}} + md^2,$$

где J и $J_{\text{с}}$ — дополнительный и главный моменты инерции, соответственно; d — кратчайшее расстояние между параллельными осями вращения.

11. Кинетическая энергия тела относительно неподвижной оси вращения

$$E_{\text{вр}} = \frac{J\omega^2}{2},$$

или

$$E_{\text{вр}} = \frac{L^2}{2I},$$

где L — момент импульса тела.

12. Кинетическая энергия сложного поступательно-вращательного движения тела

$$E = \frac{mV^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}.$$

13. Момент силы относительно неподвижной точки

$$\vec{M} = \left[\vec{r}\vec{F}\right],$$

где $\left[\vec{r}\vec{F}\right]$ — векторное произведение $\vec{r}$ и $\vec{F}$.

14. Момент импульса твердого тела относительно неподвижной точки

$$\vec{L} = \left[\vec{r}\vec{p}\right] = \left[\vec{r}m\vec{V}\right],$$

где $\left[\vec{r}\vec{p}\right]$ — векторное произведение $\vec{r}$ и $\vec{p}$.

15. Момент импульса системы тел относительно неподвижной оси

$$L_{\text{с}} = \sum_{i=1}^{n} m_i V_i r_i = J_{\text{с}}\omega.$$

16. Основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси — второй закон Ньютона

$$\vec{M} = J\vec{\varepsilon},$$

или

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}.$$

17. Закон сохранения момента импульса замкнутой системы тел

$$\vec{L} = \text{const},$$

или

$$I_{\vec{\omega}} = \text{const}.$$

Примеры решения задач

Задача 2.1

Зависимость угловой скорости диска радиусом R от времени задается уравнением $\omega = at + 3bt^4$. Определите для точек на ободе диска полное ускорение и число оборотов, сделанных диском к концу первой секунды после начала движения.

Дано:
R
$\omega = at + 3bt^4$

a; N — ?

Р е ш е н и е

Вычислим полное ускорение, используя формулу для его вычисления

$$\varepsilon = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2} = \sqrt{(\varepsilon R)^2 + \left(\omega^2 R\right)^2}\ ;$$

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \left(at + 3bt^4\right)' = a + 12bt^3;$$

$$a = \sqrt{\left(a + 12bt^3\right)^2 R^2 + \left(at + 3bt^4\right)^2 R^2} = R\sqrt{\left(a + 12bt^3\right)^2 + \left(at + 3bt^4\right)^2}\ ;$$

при $t = 1$с

$$a = R\sqrt{(a + 12b)^2 + (a + 3b)^2}\ .$$

Число оборотов, сделанных диском,

$$N = \frac{\varphi}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\int_0^t \omega dt = \frac{1}{2\pi}\int_0^t \left(at + 3bt^4\right)dt = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{at^2}{2} + \frac{3bt^5}{5}\right);$$

при $t = 1$с

$$N = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{a}{2} + \frac{3b}{5}\right).$$

Ответ: $a = R\sqrt{(a + 12b)^2 + (a + 3b)^2}$; $N = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{a}{2} + \frac{3b}{5}\right)$.

Задача 2.2

Минутная стрелка часов в 3 раза длиннее секундной. Определите соотношение между линейными скоростями концов этих стрелок.

Дано:
$R_1 = R$
$R_2 = 3R$

$\frac{V_{\text{с}}}{V_{\text{мин}}}$ — ?

Р е ш е н и е

Линейная скорость конца секундной стрелки, совершающей $n = 1\frac{\text{об}}{\text{мин}}$, равна

$$V_{\text{с}} = \omega_{\text{с}} R = 2\pi n R\,.$$

Линейная скорость конца минутной стрелки, имеющей в три раза больший радиус и совершающей $n_1 = \frac{1}{60}\frac{\text{об}}{\text{мин}}$, равна

$$V_{\text{мин}} = 2\pi 3 R n_1\,.$$

Соотношение линейных скоростей концов этих стрелок равно

$$\frac{V_{\text{с}}}{V_{\text{мин}}} = \frac{2\pi R n}{6\pi R n_1} = \frac{n}{3n_1} = \frac{60}{3} = 20\,.$$

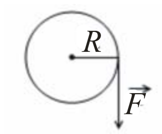
Ответ: $\frac{V_{\text{с}}}{V_{\text{мин}}} = 20$.

Задача 2.3

К ободу однородного сплошного диска радиусом R = 0,5 м приложена постоянная касательная сила F =100 Н (рис.). При вращении диска на него действует момент сил трения, равный по модулю $M_{\text{тр}}$= 2Н·м. Определите массу m диска, если известно, что его угловое ускорение ε постоянно и равно 12 рад/с^2.

Дано:
R = 0,5 м
F = 100 Н
$|M_{\text{тр}}|$ = 2 Н·м
ε =12 рад/с^2

m — ?



Р е ш е н и е

Запишем основное уравнение динамики для данного случая, учитывая, что момент силы трения препятствует вращению диска

$$M - M_{\text{тр}} = J\varepsilon.$$

Момент силы, раскручивающей диск, равен

$$M = FR.$$

Момент инерции диска

$$J = \frac{MR^2}{2}.$$

Запишем основное уравнение динамики для данного случая

$$FR - M_{\text{тр}} = \frac{mR^2}{2}\varepsilon.$$

Определим массу m груза

$$m = \frac{2\left(FR - M_{\text{тр}}\right)}{R^2\varepsilon}.$$

Подставив значения, получим

$$m = \frac{2\left(100 \cdot 0{,}5 - 2\right)}{0{,}5^2 \cdot 12} = 32 \text{ (кг)}.$$

Ответ: m = 32 кг.

Задачи для самостоятельного решения

1.45; 2.66; 2.115; 2.132; 3.1; 3.16.

Лекция 3
ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

3.1. Понятие идеального газа. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории

Молекулярная физика — раздел физики, в котором изучаются физические свойства тел в различных агрегатных состояниях на основе рассмотрения их молекулярного строения, сил взаимодействия между частицами, образующими тела, и характера теплового движения этих частиц.

Молекулярно-кинетическая теория объясняет строение и свойства тел движением и взаимодействием атомов, молекул, ионов, из которых состоит тело.

В основе молекулярно-кинетической теории лежат следующие три положения, которые являются обобщением экспериментальных данных:

1. Все тела состоят из частиц — атомов, молекул, ионов.
2. Эти частицы находятся в непрерывном хаотическом (беспорядочном) движении.
3. Частицы взаимодействуют между собой силами притяжения и отталкивания.

Эти положения экспериментально подтверждаются явлениями диффузии, броуновского движения, особенностями строения жидкостей и твердых тел и исследованиями в области физики элементарных частиц.

Молекулярно-кинетическая теория построена для объектов, состоящих из очень большого количества молекул. Молекулярная физика, используя молекулярно-кинетическую теорию и различные опыты, изучает именно такие объекты, используя модель идеального газа.

Идеальный газ — идеализированная физическая модель реальных газов.

Идеальным называют газ, между молекулами которого отсутствуют силы взаимного притяжения и отталкивания. Предполагается, что при соударениях между собой и со стенками сосуда молекулы идеального газа ведут себя подобно абсолютно упругим шарикам, размерами которых можно пренебречь, рассматривая их как материальные точки.

При определенных условиях — малых давлениях и не слишком низких температурах — реальные газы по своим свойствам близки к идеальным. Газ характеризуется объемом, давлением, температурой и средней скоростью молекул. Все они связаны между собой и эта связь определена основным уравнением молекулярно-кинетической теории

$$p = \frac{1}{3} m_0 n V_{\text{кв}}^2, \tag{3.1}$$

где m_0 — масса молекулы газа; n — концентрация молекул; $V_{\text{кв}}$ — средняя квадратичная скорость.

Учитывая, что $n = \frac{N}{V}$, получим

$$pV = \frac{1}{3} N m_0 V_{\text{кв}}^2,$$

или (3.2)

$$pV = \frac{2}{3} N \frac{m_0 V_{\text{кв}}^2}{2} = \frac{2}{3} E,$$

где E — суммарная кинетическая энергия поступательного движения молекул газа.

Из уравнения состояния идеального газа $pV = RT$ и уравнения (3.2) получаем

$$E = \frac{3}{2} RT, \tag{3.3}$$

где R — универсальная газовая постоянная.

Разделив почленно уравнение (3.3) на число молекул получим энергию, приходящуюся в среднем на одну молекулу, — уравнение Больцмана

$$\varepsilon = \frac{3}{2} kT, \tag{3.4}$$

где k — постоянная Больцмана, $k = \frac{R}{N_A}$; $R \approx 8{,}31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$; N_A — число Авогадро; $N_A \approx 6{,}02 \cdot 10^{23}$ 1/моль; $k \approx 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$.

Физический смысл уравнения Больцмана: средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа прямо пропорциональна термодинамической температуре.

3.2. Распределения Максвелла и Больцмана

При соударениях друг с другом и стенками сосуда появляются молекулы с разными скоростями.

Плотность состояний числа молекул газа — функция $n(V)$, описывающая распределение числа молекул в зависимости от их скорости. Если N — полное число молекул в объеме, а скорости частиц лежат в интервале от V_1 до V_2, то число частиц с любыми скоростями в пределах этого интервала определяется как

$$\Delta N = \int_{V_1}^{V_2} n(V)dV ,$$

а полное число

$$N = \int_{0_1}^{\infty} n(V)dV .$$

Вид функции $n(V)$ был получен Максвеллом, а найденная им зависимость получила название распределения Максвелла:

$$n(V) = 4\pi N V^2 \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{mV^2}{2kT} \right). \tag{3.5}$$

График функции распределения Максвелла приведен на рис. 3.1.

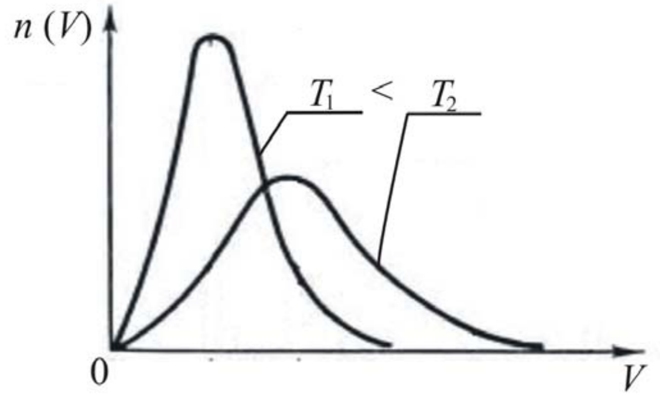


Рис. 3.1

Из графика видно, что молекул с большими и малыми скоростями мало, а большинство молекул имеют скорости, близкие к наиболее вероятной $V_в$. Наиболее вероятная скорость движения молекул рассчитывается из формулы

$$V_в = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}, \tag{3.6}$$

где μ — молярная масса газа.

Кривая распределения Максвелла асимметрична, причем асимметрия увеличивается с ростом температуры.

При изменении температуры газа изменяется скорость молекул, понижение температуры приводит к росту максимума и его смещению влево, но площадь под кривой для любой температуры не изменяется, поскольку общее число молекул газа не зависит от температуры.

Исследуя распределение идеального газа по скоростям, Максвелл предположил отсутствие силовых полей, действующих на газ. Однако газ постоянно находится в гравитационном поле, которое стремится переместить молекулы в области минимальной потенциальной энергии. В результате этого возникает новое состояние газа, его можно представить в виде уравнения:

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{E_п}{kT}\right), \tag{3.7}$$

где n_0 — концентрация молекул при минимальном значении потенциальной энергии $E_п$.

Распределение (3.7) называется распределением Больцмана, имеющего следующий физический смысл: при постоянной температуре плотность газа больше там, где меньше потенциальная энергия молекул.

3.3. Явления переноса в газах

Длина свободного пробега молекулы равна пути, проходимому ею между двумя последовательными столкновениями. Обычно говорят о средней длине свободного пробега

$$\bar{l} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n}, \tag{3.8}$$

где σ — эффективный диаметр молекулы, т.е. то минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул.

Поскольку величина n пропорциональна давлению газа p, а давление пропорционально плотности газа ρ, то

$$\frac{\bar{l}_1}{\bar{l}_2} = \frac{p_1}{p_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}. \tag{3.9}$$

Представим, что в двух достаточно близких объемах газа возникли различные концентрации молекул или различные температуры. Такое неравномерное состояние будет стремиться к равновесному переносом определенного свойства. Таким свойством могут быть: масса, энергия, внутреннее трение. В первом случае происходит явление диффузии, во втором — теплопроводности, в третьем — перенос внутреннего трения.

3.3.1. Диффузия

Явление диффузии при постоянной температуре и отсутствии внешних сил для химически однородного газа подчиняется закону Фика:

$$j_m = -D\frac{d\rho}{dx}, \tag{3.10}$$

где $j_m = \dfrac{dm}{dSdt}$ — плотность потока массы, т.е. величина, определяемая массой вещества, диффундирующего в единицу времени через единичную площадь, перпендикулярную оси ОX; D — коэффициент диффузии; $\dfrac{d\rho}{dx}$ — градиент плотности, равный скорости изменения плотности на единицу длины ОX в направлении нормали к этой площади. Знак «минус» показывает, что перенос массы происходит в направлении убывания плотности.

Согласно кинетической теории газов

$$D = \frac{1}{3}\overline{V}\bar{l}, \tag{3.11}$$

где $\overline{V}$ — средняя арифметическая скорость теплового движения молекул.

В случае диффузии происходит самопроизвольное проникновение и перемешивание частиц двух соприкасающихся газов, жидкостей и твердых тел; диффузия сводится к обмену масс частиц этих тел, возникает и продолжается, пока существует градиент плотности.

В СИ коэффициент диффузии имеет размерность $[D] = \text{м}^2/\text{с}$.

3.3.2. Теплопроводность

Перенос энергии в форме теплоты, не сопровождающийся перемещением массы, описывается законом Фурье:

$$j_E = -\lambda \frac{dT}{dx}, \tag{3.12}$$

где $j_E = \dfrac{dQ}{dSdt}$ — плотность теплового потока, т.е. величина, определяемая энергией, переносимой в форме теплоты в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную оси OX; λ — коэффициент теплопроводности; $\dfrac{dT}{dx}$ — градиент температуры, равный скорости изменения температуры на единицу длины OX в направлении нормали к этой площади.

Знак «минус» показывает, что энергия переносится в направлении убывания температуры.

Средняя длина свободного пробега молекулы определяется так:

$$\lambda = \frac{1}{3}\bar{V}\bar{l}\rho c_V, \tag{3.13}$$

где c_V — удельная теплоемкость газа при постоянном объеме.

В СИ коэффициент теплопроводности имеет размерность $[\lambda] = \text{Дж/мс} \cdot \text{К} = \text{Вт/м} \cdot \text{К}$.

3.3.3. Внутреннее трение

Хаотическое тепловое движение молекул приводит к обмену молекулами между слоями, импульс слоя, движущегося быстрее, уменьшается, медленнее — увеличивается. Это и есть процесс передачи импульса от одного слоя к другому. Согласно закону Ньютона

$$j_\rho = -\eta \frac{dV}{dx}, \tag{3.14}$$

где $j_\rho = \dfrac{dp}{dSdt}$ — плотность потока импульса, т.е. величина, которая определяется импульсом, переносимым в единицу времени в положительном направлении оси OX; η — коэффициент вязкости; $\frac{dV}{dx}$ — градиент скорости.

Знак «минус» указывает, что импульс переносится в направлении убывания скорости.

Динамическая вязкость

$$\eta = \frac{1}{3}\rho\overline{V}\overline{l}. \quad (3.15)$$

В СИ размерность динамической вязкости $[\eta] = \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$.

Удобно свести все три перечисленные явления переноса в газах в таблицу (табл. 3).

Таблица 1.3

Явление переноса	«Переносимая» физическая величина	Уравнение переноса	Коэффициент переноса	Размерность коэффициента переноса	Связь между коэффициентами
Диффузия	Масса	$dM = -D\frac{d\rho}{dx}dSdt$	$D = \frac{1}{3}\overline{V}\overline{l}$	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$D = \frac{\lambda}{\rho c_V}$
Теплопроводность	Внутренняя энергия в форме теплоты	$dQ = -\lambda\frac{dT}{dx}dSdt$	$\lambda = \frac{1}{3}\overline{V}\overline{l}\rho c_V$	$\frac{\text{Дж}}{\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К}}$	$\lambda = \eta c_V$
Внутреннее трение	Импульс направленного движения	$dp = -\eta\frac{dV}{dx}dSdt$	$\eta = \frac{1}{3}\overline{V}\rho\overline{l}$	$\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$	$\eta = \rho D$

3.4. Реальные газы

Молекулы взаимодействуют между собой силами притяжения и отталкивания. Межмолекулярное взаимодействие определяет существование жидких и твердых тел, отличия реальных газов от идеальных. Силы межмолекулярного взаимодействия — короткодействующие. Силы притяжения проявляются на расстоянии порядка 10^{-9} м между центрами молекул и быстро убывают с увеличением расстояния между молекулами. На расстояниях порядка 10^{-10} м, сравнимых с линейными размерами молекул, проявляют себя силы отталкивания. Силы отталкивания убывают с увеличением расстояния быстрее, чем силы притяжения. Существует расстояние r_0, на котором силы уравновешивают друг друга. Этому соответствует наиболее устойчивое взаимное расположение молекул. На рис. 3.2, *а* изображены силы, действующие на одну молекулу со стороны другой молекулы. На рис. 3.2, *б* приведен график потенциальной энергии межмолекулярных взаимодействий.

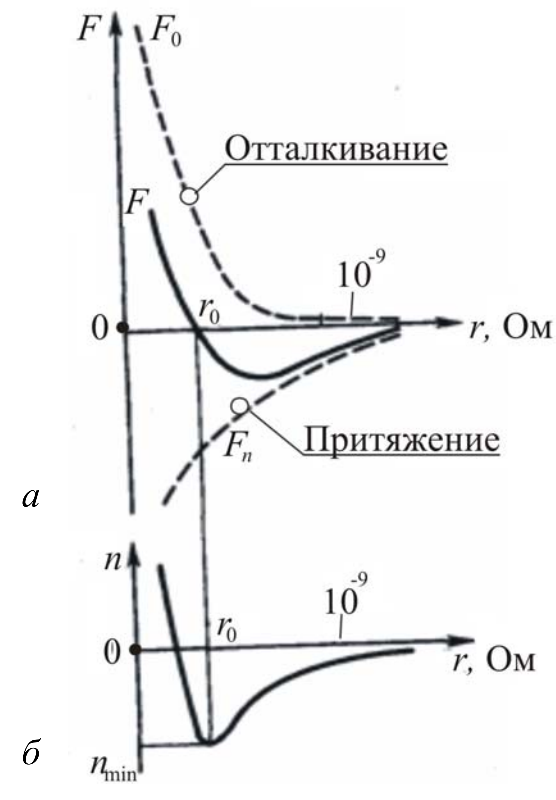


Рис. 3.2: *а* — силы, действующие на одну молекулу со стороны другой молекулы; *б* — график потенциальной энергии межмолекулярных взаимодействий

Минимум функции определяет положение устойчивого равновесия, справа от минимума — область притяжения, слева — отталкивания; kT — мера средней кинетической энергии. При соотношении $kT \gg п_{min}$

вещество находится в газообразном состоянии. Действие сил притяжения между молекулами в газе приводит к появлению дополнительного давления на газ — «внутреннее давление» a. Таким образом, уравнение состояния, называемое уравнением Ван-дер-Ваальса для реального газа, можно записать в общем виде для одного моля

$$\left(p_\mu + a\right)\left(V_\mu - b\right) = RT; \tag{3.16}$$

для произвольного количества молей

$$\left(p + \frac{\nu^2 a}{V^2}\right)\left(V - \nu b\right) = \nu RT. \tag{3.17}$$

На рис. 3.3 приведены изотермы реального газа для различных температур $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$.

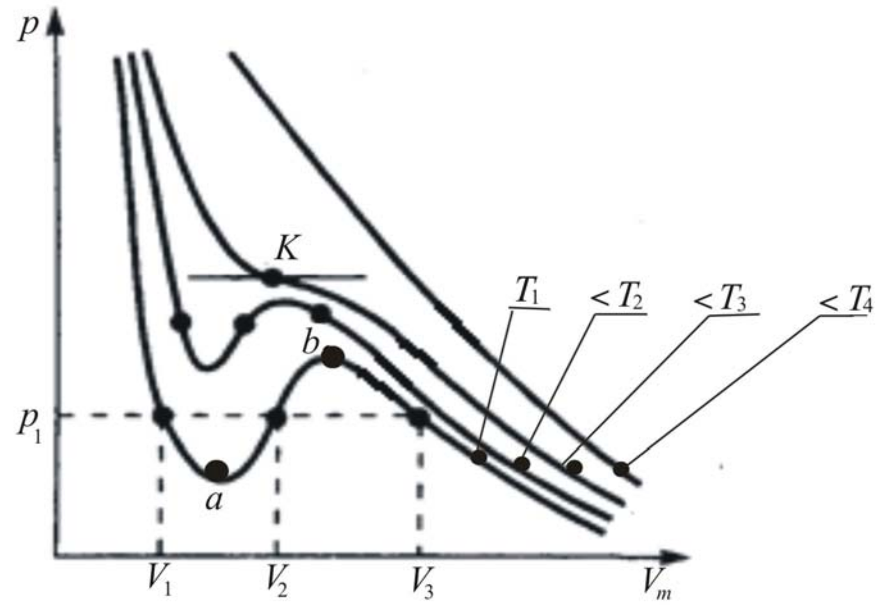


Рис. 3.3

При снижении температур на кривой появляются небольшие изгибы, с некоторой критической температуры образуется небольшой участок, где изотерма станет параллельной оси абсцисс.

Точку K называют критической, ее параметры $T_{кр}$, $V_{кр}$ и $p_{кр}$ — критическими.

Критические параметры связаны с величинами a и b следующими уравнениями:

$$T_{кр} = \frac{8a}{27bR};\ V_{кр} = 3b;\ p_{кр} = \frac{a}{27b^2}. \tag{3.18}$$

Если экспериментально проверить ход изотермы для $T < T_{кр}$, то результаты измерений покажут следующее. Вместо волнообразных участков появятся отрезки прямых, причем, достигнув этих участков, обнаруживаются капли жидкости, газ переходит в жидкость и давление на этом участке не меняется. Если бы, например, изотерма, соответствующая температуре T_1, имела участок между точками a и b, то это привело бы к парадоксальному факту: при сжатии газа его давление также уменьшается — такие состояния в природе не наблюдаются.

Проведя через крайние точки горизонтальных участков семейства изотерм линию (рис. 3.4), получим область двухфазного состояния вещество — жидкость и насыщенный пар.

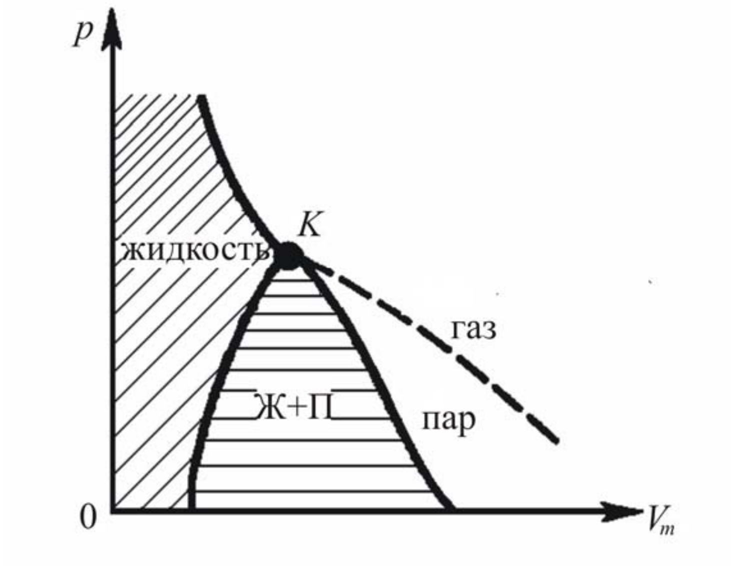


Рис. 3.4

Пар — состояние вещества, находящегося в газообразном состоянии при температуре ниже критической.

Различие между паром и газом заключается в том, что пар при изотермическом сжатии можно подвергнуть ожижению, газ при температуре выше критической не может быть ожижен ни при каком давлении.

Вопросы для самостоятельного рассмотрения

1. Дайте определения изотермических, изохорических и изобарических процессов. Изобразите графики этих изопроцессов в координатах $p(V)$, $V(T)$, $p(T)$.

2. Давление смеси химически невзаимодействующих газов. Закон Дальтона.

3. Что такое дальний и ближний порядок в расположении частиц?

4. Что называют сферой молекулярного действия? Объясните возникновение внутреннего (молекулярного) давления жидкости.

5. Что такое поверхностная энергия жидкости, от чего она зависит? Физическая причина возникновения поверхностного натяжения жидкости.

6. Определите направление силы поверхностного натяжения. Приведите единицы измерения коэффициента поверхностного натяжения.

7. От чего зависит, смачивает жидкость твердую поверхность или нет?

8. Как зависит давление жидкости от формы ее поверхности? Напишите формулу Лапласа для определения добавочного давления под искривленной поверхностью жидкости.

9. Опишите поведение жидкости в капиллярах. От чего зависит высота поднятия или опускания жидкости в капиллярах?

Практическое занятие 3
ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

Основное законы и формулы

1. Импульс (количество движения)

$$\vec{p} = m\vec{V}.$$

2. Закон сохранения импульса замкнутой системы тел

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^{n} m_i \vec{V}_i = \text{const}.$$

3. Работа переменной силы на участке траектории 1—2

$$A = \int_1^2 F \cdot \cos\alpha \cdot dS,$$

где α — угол между векторами F и dS.

4. Мгновенная мощность

$$N = \frac{dA}{dt}, \text{ или } N = \vec{F}\vec{V}.$$

5. Кинетическая энергия поступательного движения тела

$$E_{\text{к}} = \frac{mV^2}{2}, \text{ или } E_{\text{к}} = \frac{\rho^2}{2m}.$$

6. Потенциальная энергия тела, поднятого над поверхностью Земли

$$E_{\text{п}} = mgh.$$

7. Кинетическая энергия упруго деформированного тела

$$E_{\text{к}} = \frac{kx^2}{2}.$$

8. Полная механическая энергия системы тел

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}}.$$

9. Закон сохранения механической энергии при действии только консервативных сил

$$E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = E = \text{const}.$$

10. Скорости шаров массами m_1 и m_2 после абсолютно упругого центрального удара

$$V_1' = \frac{(m_1 - m_2)V_1 + 2m_2V_2}{m_1 + m_2};$$

$$V_2' = \frac{(m_2 - m_1)V_2 + 2m_1V_1}{m_1 + m_2}.$$

11. Скорость шаров после абсолютно неупругого центрального удара

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

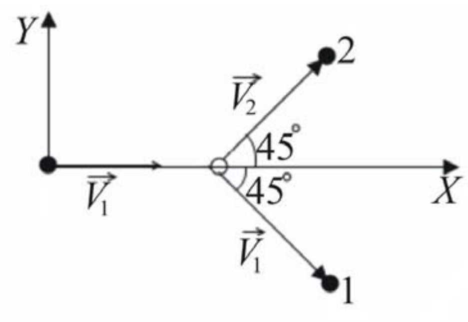
Примеры решения задач

Задача 3.1

Бильярдный шар 1, движущийся со скоростью 10 м/с, ударился о покоящийся шар 2 такой же массы. После удара шары разлетелись так, как показано на рис. Определите скорости шаров после удара.

Дано:
$V_1 = 10$ м/с
$V_2 = 0$ м/с
$m_1 = m_2 = m$
$\alpha = 45°$

V_1'; V_2' — ?



Р е ш е н и е

Закон сохранения импульса для данного случая имеет вид

$$m\vec{V}_1 = m\vec{V}_1' + m\vec{V}_2', \tag{1}$$

или

$$\vec{V}_1 = \vec{V}_1' + \vec{V}_2' .$$

В проекции на оси координат OX, OY соответственно получим

$$\begin{gathered} V_1 = V_1' \cos\alpha + V_2' \cos\alpha; \\ 0 = V_2' \sin\alpha - V_1' \sin\alpha . \end{gathered} \tag{2}$$

Из уравнения (2) находим, что

$$V_1' = V_2',$$

тогда

$$V_2' = \frac{V_1}{\sqrt{2}} = \frac{10}{1{,}5} = 7{,}1 \text{ (м/с)}.$$

Ответ: $V_1' = V_2' = 7{,}1$ м/с.

Задача 3.2

Груз подбрасывается пружиной вертикально вверх. Масса груза — m, жесткость пружины — k, сжатие — x. Определите скорость вылета груза.

Дано:
m; k; x
V — ?

Р е ш е н и е

По определению потенциальная энергия пружины

$$E_п = \frac{kx^2}{2}.$$

Эта энергия была израсходована на преодоление силы тяжести груза и сообщение ему кинетической энергии

$$\frac{kx^2}{2} = mgx + \frac{mV^2}{2}.$$

Из этого уравнения определим скорость

$$V = \sqrt{\frac{x(kx - 2mg)}{m}}.$$

Ответ: $V = \sqrt{\frac{x(kx - 2mg)}{m}}$.

Задача 3.3

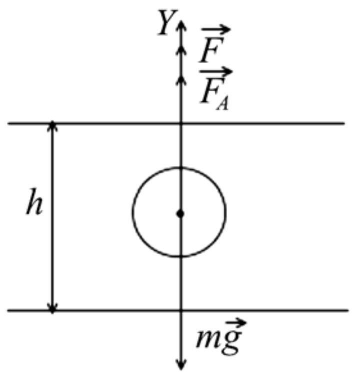
В воде с глубины 5 м поднимают до поверхности камень объемом 0,6 м^3. Плотность камня равна $2{,}5 \cdot 10^3$ кг/м^3. Определите работу по подъему камня.

Дано:
$h = 5$ м
$V = 0{,}6$ м^3
$\rho_к = 2{,}5 \cdot 10^3$ кг/м^3
$\rho_0 = 10^3$ кг/м^3

A — ?

Решение

Для вычисления работы по подъему камня необходимо предварительно вычислить силу, приложенную к нему. Укажем направления сил (рис.).



Считая подъем равномерным, запишем уравнение равновесия сил в виде:

$$\vec{F} + \vec{F}_A + m\vec{g} = 0,$$

где F — сила тяги; F_A — сила Архимеда; mg — сила тяжести.

Выбрав направление проекции — ось OY, получим

$$F + F_A - mg = 0,$$

или

$$F = mg - F_A,$$

где

$$F_A = \rho_0 g V,$$

а масса камня

$$m = \rho_к V,$$

тогда

$$F = Vg\left(\rho_к - \rho_0\right).$$

Поэтому работа по подъему камня с глубины *h* определяется как

$$A = Fh = Vgh\left(\rho_к - \rho_0\right).$$

$$A = 0{,}6 \cdot 9{,}8 \cdot 5 \cdot \left(2{,}5 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^3\right) = 45000 \text{ (Дж).}$$

Ответ: A= 45 кДж.

Задачи для самостоятельного решения

2.26; 2.39;2.58; 2.60; 2.69; 2.73.

Лекция 4
ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

4.1. Понятие внутренней энергии и работы в термодинамике

Термодинамика — раздел физики, в котором изучаются наиболее общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между этими состояниями.

В основе термодинамики лежат принципы, которые являются обобщением экспериментальных данных, выполняются независимо от природы тел, образующих систему, и принимаются без доказательства как аксиомы. В термодинамике устанавливаются закономерности и связи между физическими величинами, измеряемыми опытным путем в макроскопических системах.

В термодинамике используются понятия термодинамических систем, параметров, процессов термодинамического равновесия.

Термодинамическая система — совокупность макроскопических тел, взаимодействующих и обменивающихся энергией между собой и с другими телами (внешней средой).

Термодинамические системы, не обменивающиеся с внешней средой ни энергией, ни веществом, называются замкнутыми.

Термодинамические параметры — совокупность физических величин, характеризующих свойства термодинамической системы (температура, давление, объем).

Термодинамический процесс — любое изменение в термодинамической системе, связанное с изменением хотя бы одного из ее термодинамических параметров.

Состояние термодинамического равновесия — состояние термодинамической системы, при которой параметры состояния остаются постоянными по времени.

Равновесный процесс — термодинамический процесс, представляющий собой непрерывную последовательность равновесных состояний.

Всякий равновесный процесс является обратимым процессом, и, наоборот, все реальные процессы не являются равновесными, так как происходят с конечной скоростью. Однако они тем ближе к равновесным, чем медленнее протекают.

Важнейшей характеристикой термодинамической системы является ее внутренняя энергия. Внутренней называется энергия физической системы, зависящая только от ее внутреннего состояния. Внутренняя энергия состоит из энергии беспорядочного (теплового) движения атомов, молекул или других частиц и энергии межмолекулярных и внутриатомных движений.

В термодинамике рассматривают не саму внутреннюю энергию, а ее изменение при изменении состояния системы.

Внутренняя энергия одноатомного идеального газа равна кинетической энергии теплового движения его атомов

$$U = \frac{3}{2}\nu RT,$$

где ν — количество вещества.

А изменение внутренней энергии равно

$$\Delta U = \frac{3}{2}\nu R\Delta T,$$

где ΔT — изменение температуры газа.

Молекулы могут быть и двухатомными, имеющими 3 поступательные и 2 вращательные степени свободы — всего 5, а также трехатомными (многоатомными), у которых 3 вращательные степени свободы и 3 поступательные — всего 6.

Согласно теореме Больцмана, в состоянии термодинамического равновесия на каждую поступательную и вращательную степень свободы приходится в среднем кинетическая энергия, равная $\frac{1}{2}kT$. На каждую колебательную степень свободы приходится уже kT — эта энергия складывается из одинаковых величин кинетической и потенциальной энергий. Поэтому средняя энергия молекул равна

$$E = \frac{i}{2}kT,$$

где $i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вр}} + 2i_{\text{кол}}$.

В общем случае внутренняя энергия идеального газа определяется выражением

$$U = \nu \frac{i}{2} RT. \tag{4.1}$$

Не менее важной характеристикой в термодинамике является работа.

Работа в термодинамической системе определяется следующим образом:

1. Способ (форма) изменения внутренней энергии термодинамической системы, при которой энергия передается в процессе силового взаимодействия макроскопических тел и происходит изменение внешних параметров состояния системы.

2. Количество энергии, переданное термодинамической системе при совершении работы, т.е. в процессе силового воздействия на внешние тела.

Различают работу A, которая совершается системой над внешними телами (при этом система отдает часть своей энергии), и работу A', которая совершается внешними телами над системой (системе передается энергия). Работы A и A' равны по абсолютному значению и противоположны по знаку:

$$A = A'.$$

Работа, совершаемая идеальным газом при его расширении при постоянном внешнем давлении p:

$$\delta A = pdV,$$

где dV — изменение объема.

Работу можно представить графически в системе координат $p(V)$. При любом процессе работа измеряется площадью, ограниченной кривой процесса (рис. 4.1).

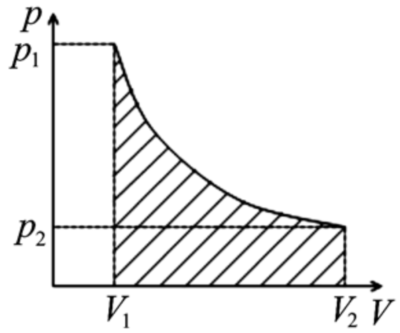


Рис. 4.1

В общем виде работу можно определить так:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} pdV. \tag{4.2}$$

Количество теплоты Q — энергия, переданная системе внешними телами в процессе теплообмена. Количество теплоты всегда передается от более нагретого тела, при этом не происходит переноса вещества и не совершается работа.

Если тело поглощает энергию, то $Q > 0$; если передается энергия, то $Q < 0$.

Теплоемкость C — величина, равная отношению количества теплоты δQ, сообщенного телу, к изменению температуры dT, произошедшему при сообщении этого количества теплоты:

$$C = \frac{\delta Q}{dT}. \tag{4.3}$$

Удельная теплоемкость вещества c — величина, определяемая количеством теплоты, необходимым для нагревания 1 кг вещества на 1 К

$$c = \frac{\delta Q}{m dT}. \tag{4.4}$$

Молярная теплоемкость — произведение удельной теплоемкости на молярную массу вещества

$$C_\mu = c\mu = \frac{\delta Q}{\nu dT}. \tag{4.5}$$

Теплоемкость тела зависит от условий его нагревания: при нагревании при постоянном давлении требуется большее количество теплоты, чем при нагревании при постоянном объеме.

Единица измерения удельной теплоемкости в СИ: $\left[c\right] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; молярной теплоемкости — $\left[c_\mu\right] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.

4.2. Первое начало термодинамики. Теплоемкость

Первое начало термодинамики — один из основных законов термодинамики, частный случай закона сохранения энергии.

Теплота, сообщаемая системе, расходуется на изменение ее внутренней энергии и на совершение ею работы против внешних сил

$$\delta Q = dU + \delta A. \tag{4.6}$$

Из первого начала термодинамики вытекает невозможность создания вечного двигателя первого рода, т.е. устройства, способного как угодно долго совершать работу, не получая энергию.

Две формы передачи энергии: теплота и работа не являются равноценными. Работа может пойти на увеличение любого вида энергии. Теплота же, непосредственно без предварительного превращения в работу, приводит лишь к увеличению внутренней энергии системы. Такая «неравноправность» превращения теплоты в работу по сравнению с превращением работы в теплоту имеет принципиальное значение в природе. Все естественные процессы являются односторонними: самопроизвольные процессы в замкнутой системе идут в направлении исчезновения потенциально возможной работы. При тепловом контакте двух тел всегда наблюдается переход теплоты от горячего тела.

Используем первое начало термодинамики для определения теплоемкости при постоянном объеме C_V^{μ} и постоянном давлении C_p^{μ}.

При постоянном объеме V = const работа внешними силами не совершается и сообщаемая газу извне теплота идет только на увеличение его внутренней энергии

$$C_V^{\mu} = \frac{dU_{\mu}}{dT},$$

т.е. C_V^{μ} равна изменению внутренней энергии 1 моля газа при повышении его температуры на 1 К

$$dU_{\mu} = \frac{i}{2} RdT,$$

тогда

$$C_V^{\mu} = \frac{i}{2} R.$$

При нагревании газа при p = const

$$C_p^{\mu} = \frac{dU_{\mu}}{dT} + \frac{pdA_{\mu}}{dT}. \quad (4.7)$$

Преобразование данного уравнения позволяет определить C_p^{μ}:

$$C_p^{\mu} = \frac{i+2}{2} R. \quad (4.8)$$

Связь между теплоемкостями C_p^{μ} и C_V^{μ} определяется уравнением Майера

$$C_p^{\mu} = C_V^{\mu} + R. \qquad (4.9)$$

Адиабатический процесс — такой термодинамический процесс, при котором отсутствует теплообмен между рассматриваемой системой и окружающей средой, а изменение внутренней энергии термодинамической системы происходит за счет совершения системой (или над системой) работы

$$\delta A = -dU. \qquad (4.10)$$

Уравнение адиабаты идеального газа неизменной массы (уравнение Пуассона) имеет вид:

$$pV^{\gamma} = \text{const}, \qquad (4.11)$$

где γ — показатель адиабаты (коэффициент Пуассона).

$$\gamma = \frac{C_p^{\mu}}{C_V^{\mu}} = \frac{i+2}{i}.$$

Все известные четыре процесса можно свести в таблицу, записав основные характеристики этих процессов (табл. 4).

Таблица 1.4

Название процесса	Условие прохождения	Уравнение процесса	Работа в процессе	Количество теплоты, сообщенное в процессе	Изменение внутренней энергии
Изохорный	$V =$ const	$\frac{p}{T} = \text{const}$	$\delta A = 0$	$\delta Q = dU$	$dU = \frac{m}{\mu} C_V^{\mu} dT$
Изобарный	p = const	$\frac{V}{T} = \text{const}$	$\delta A = pdV$	$\delta Q = dU + \delta A$ $\delta Q = \frac{m}{\mu} C_p^{\mu} dT$	$dU = \frac{m}{\mu} C_p^{\mu} dT$
Изотермический	$T =$ = const	$pV = \text{const}$	$\delta A =$ $= pdV$	$\delta Q = \delta A$	$dU = 0$
Адиабатический	$\delta Q = 0$	$pV^{\gamma} = \text{const}$	$\delta A = -dU$	$\delta Q = 0$	$dU = \frac{m}{\mu} C_V^{\mu} dT$

Термодинамический цикл (круговой процесс) — процесс, в результате совершения которого термодинамическая система возвращается в исходное состояние.

Различают прямой и обратный циклы.

Прямой цикл — круговой процесс, в котором система совершает положительную работу за счет сообщенного ей количества теплоты. На диаграмме состояния $p(V)$ прямой цикл изображается замкнутой кривой a, которая обходится по часовой стрелке (рис. 4.2).

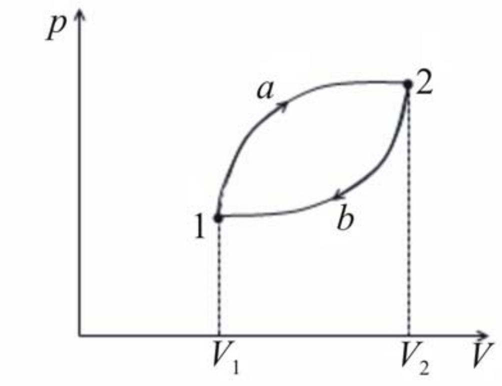


Рис. 4.2

Обратный цикл — круговой процесс, в котором над системой совершается работа и от системы отводится количество теплоты. На диаграмме $p(V)$ обратный цикл изображается замкнутой кривой b, которая обходится против часовой стрелки (рис. 4.2). При прямом цикле работа за цикл $A > 0$, при обратном $A < 0$.

Первое начало термодинамики утверждает, что работа совершается либо за счет изменения внутренней энергии, либо за счет сообщения системе количества теплоты. При круговом процессе $U_2 - U_1 = 0$ и $A = Q$. Следовательно, работа в таком цикле может совершаться только за счет получения системой теплоты от внешних тел.

Для кругового цикла термический КПД равен

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}, \qquad (4.12)$$

где Q_1 и Q_2 — количество теплоты, полученное и отданное системой, соответственно.

Обратимый процесс — процесс перехода системы из состояния 1 в состояние 2, если обратный переход не связан с нескомпенсированным превращением теплоты в работу.

Обратимым является всякий равновесный процесс. При таком процессе состояние системы в каждый момент времени определяется внешними параметрами и температурой. При равновесных изменениях этих характеристик в обратном порядке система снова пройдет все состоянии и не вызовет изменений в окружающих телах.

4.3. Второе начало термодинамики. Энтропия

В 1865 г. Р. Клаузиус ввел понятие энтропии. Для выяснения физического содержания этого понятия рассмотрим отношение теплоты Q, полученной телом в изотермическом процессе, к температуре T теплоотдающего тела, называемое приведенным количеством теплоты.

Приведенное количество, сообщаемое телу на бесконечно малом участке процесса, равно $\frac{\delta Q}{T}$. Можно показать, что приведенное количество теплоты, сообщаемое телу в любом обратимом круговом процессе, равно нулю

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0. \tag{4.13}$$

Из (4.13) следует, что подынтегральное выражение $\frac{\delta Q}{T}$ есть полный дифференциал некоторой функции, которая определяется только состоянием системы и не зависит от способа, каким система пришла в это состояние. Таким образом

$$\frac{\delta Q}{T} = dS. \tag{4.14}$$

Энтропия S — функция состояния, дифференциалом которой является $\frac{\delta Q}{T}$.

Из (4.13) и (4.14) следует, что для обратимых процессов энтропия постоянна или

$$\Delta S = 0. \tag{4.15}$$

В термодинамике доказывается, что энтропия системы, совершающей необратимый цикл, возрастает

$$\Delta S > 0. \tag{4.16}$$

Объединяя (4.15) и (4.16), получаем

$$\Delta S \geq 0, \tag{4.17}$$

т.е. энтропия замкнутой системы может или увеличиваться — в случае необратимых процессов, или оставаться постоянной — в случае обратимых.

Например, при любом адиабатическом процессе: $\delta Q = 0$, $\delta S = 0$, т.е. $S = \text{const}$.

Возрастание энтропии при совершающихся без внешних воздействий необратимых процессах отражает стремление системы самопроизвольно переходить из более упорядоченных состояний к менее упорядоченным.

С точки зрения термодинамики, такое утверждение означает, что все реальные процессы необратимы. Термодинамические процессы протекают в направлении увеличения беспорядка.

Больцман показал, что

$$S = k \ln W, \tag{4.18}$$

где W — **термодинамическая вероятность** — число микроскопических способов, которыми может быть реализовано данное состояние макроскопической системы, или число микросостояний, осуществляющих данное макросостояние.

Чем больше число микросостояний, реализующих данное микросостояние, тем больше энтропия. Наиболее вероятным состоянием системы является равновесное состояние, в котором число микросостояний и энтропия максимальны.

Можно утверждать, что энтропия является мерой неупорядоченности системы. Тогда второе начало термодинамики формулируются так: возможны лишь такие процессы, которые ведут к увеличению энтропии изолированной системы.

В неизолированных системах, имеющих контакт с внешней средой, при определенных условиях может наблюдаться уменьшение энтропии.

Второе начало термодинамики, в отличие от первого, указывает направление термодинамических процессов. Чтобы понять это утверждение, дадим определение вечного двигателя второго рода.

Вечный двигатель второго рода — устройство, которое периодически без компенсации полностью превращало бы в работу теплоту любого тела.

Изначальная формулировка второго закона термодинамики: невозможен вечный двигатель второго рода.

Исходя из этого можно привести следующие эквивалентные формулировки второго начала термодинамики.

Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является превращение теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную ей работу — формулировка Кельвина.

Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является передача теплоты от менее нагретого к более нагретому телу — формулировка Клаузиуса.

4.4. Тепловые двигатели. Цикл Карно

Исторически второе начало термодинамики возникло из анализа работы тепловых двигателей. Тепловой двигатель — любое устройство, которое преобразует внутреннюю энергию топлива в механическую работу. Тепловой двигатель состоит из трех частей: рабочего тела, нагревателя и холодильника (рис. 4.3).

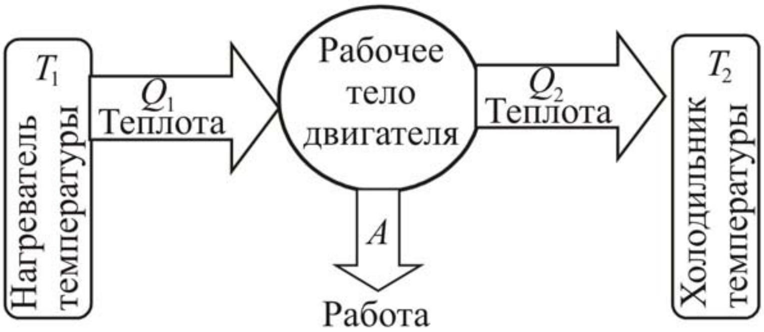


Рис. 4.3

Рабочее тело — газ или пар, получающий от нагревателя некоторое количество теплоты Q_1, расширяется и совершает работу A. Температура нагревателя T_1 поддерживается постоянной за счет сгорания топлива. При сжатии рабочее тело передает количество теплоты $Q_2 < Q_1$ холодильнику — телу, имеющему температуру $T_2 < T_1$. Это необходимо для периодической работы двигателя: давление газа (пара) при сжатии ниже, чем при расширении, что обеспечивает полезную работу двигателя.

Цикл Карно — обратимый круговой процесс, состоящий из последовательно чередующихся двух изотермических (AB и CD) и двух адиабатических (BC и DA) процессов, осуществляемых с рабочим телом. Это идеальный рабочий цикл теплового двигателя, совершающего работу за счет теплоты, подводимой к рабочему телу в изотермическом процессе (рис. 4.4).

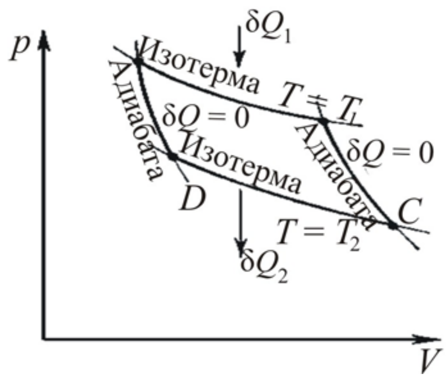


Рис. 4.4

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

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} 100\ \%. \tag{4.19}$$

Для повышения КПД необходимо увеличить разность температур нагревателя и холодильника. КПД любого реального теплового двигателя из-за трения и неизбежных тепловых потерь гораздо меньше вычисленного для цикла Карно.

Вопросы для самостоятельного рассмотрения

1. Всегда ли выполняется второй закон термодинамики? Дайте определение понятия «флуктуация». Приведите примеры флуктуаций.

2. Дайте определение понятия «фаза вещества». Всегда ли совпадают понятия «фаза» и «агрегатное состояние вещества»? Определите условия, при которых они совпадают.

3. Что называют фазовым переходом первого рода? Приведите примеры и перечислите основные особенности фазовых переходов первого рода.

4. Что называют фазовым переходом второго рода? Приведите примеры и перечислите основные особенности фазовых переходов второго рода.

5. Рассмотрите диаграмму состояния — фазовую диаграмму. Опишите характерные кривые фазовых переходов. Определите, в каком состоянии находится вещество в различных точках фазовой диаграммы.

6. Дайте определение понятия «тройная точка».

Практическое занятие 4
ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

Основные законы и формулы

1. Закон Бойля — Мариотта

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

2. Закон Гей — Люссака

$$V = V_0(1+\alpha t) \text{ при } p,\ m = \text{const; или } V/T = \text{const},$$

где V_0 — объем газа при t = 0 ºС; α — температурный коэффициент объемного расширения, $\alpha \approx 1/273{,}15$.

3. Закон Шарля

$$p = p_0(1+\alpha t) \text{ при } V,\ m = \text{const; или } p/T = \text{const},$$

где p_0 — давление газа при t = 0 ºС.

4. Закон Дальтона

$$p = p_1 + p_2 + \ldots + p_n,$$

где p_i — парциальное давление i-го газа, определяемое из уравнения Клапейрона — Менделеева.

5. Уравнение Клапейрона — Менделеева для произвольной массы газа

$$pV = \frac{m}{\mu}RT = \nu RT,$$

где μ — молярная масса; ν — число молей газа.

6. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа

$$p = \frac{1}{3}nm_0V_{\text{кв}}^2,$$

где n_0 — концентрация, $n_0 = N/V$; N — число молекул в объеме V; m_0 — масса одной молекулы.

7. Средняя квадратичная скорость молекулы

$$V_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}},$$

где k — константа Больцмана; R — универсальная газовая константа.

8. Средняя арифметическая скорость молекулы

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}.$$

9. Наиболее вероятная скорость молекулы

$$\bar{V}_{\text{в}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}.$$

10. Барометрическая формула

$$p = p_0 e^{\frac{-\mu g h}{RT}},$$

где p_0 — давление на уровне моря.

11. Средняя арифметическая длина свободного пробега молекулы

$$\bar{l} = \frac{\bar{V}}{\bar{z}} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n},$$

где $\bar{z}$ — среднее число столкновений молекулы за 1с; d — эффективный диаметр молекулы.

12. Среднее число столкновений молекулы за 1с

$$\bar{z} = \sqrt{2}\pi d^2 \bar{V}.$$

13. Закон теплопроводности Фурье

$$j_E = -\lambda \frac{dT}{dx},$$

где j_E — теплота, переносимая за единицу времени через единичную поперечную площадку; λ — коэффициент теплопроводности; $\frac{dT}{dx}$ — градиент температуры.

14. Коэффициент теплопроводности

$$\lambda = \frac{1}{3} c_V \rho \bar{V},$$

где c_V — удельная теплоемкость при постоянном объеме; ρ — плотность газа.

15. Закон диффузии Фика

$$j_m = -D\frac{d\rho}{dx},$$

где j_m — масса, переносимая за единицу времени через единичную поперечную площадку; $\frac{d\rho}{dx}$ — градиент плотности.

16. Коэффициент диффузии

$$D = \frac{1}{3}\overline{V}\overline{l}.$$

17. Закон Ньютона для внутреннего трения (вязкости)

$$j_m = -\eta\frac{dV}{dx},$$

где j_m — импульс направленного движения, переносимый через единичную поперечную площадку; $\frac{dV}{dx}$ — градиент скорости направленного движения.

18. Динамическая вязкость (коэффициент внутреннего трения)

$$\eta = \frac{1}{3}\overline{V}\overline{l}\rho.$$

19. Уравнение Ван-дер-Ваальса для 1 моля реального газа

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)\left(V_m - b\right) = RT,$$

где a и b — поправки на учет сил взаимного притяжения и отталкивания, соответственно.

20. Уравнение Ван-дер-Ваальса для ν молей реального газа

$$\left(p + \nu^2\frac{a}{V_m^2}\right)\left(V_m - \nu b\right) = VRT.$$

Примеры решения задач

Задача 4.1

Труба разделена тремя перегородками, занимающие объемы V_1, V_2 и V_3 при давлении газов в них p_1, p_2 и p_3, соответственно. Определите давление, установившееся в трубе после удаления перегородок, если температура газа при этом остается постоянной.

Дано:
$p_1; p_2; p_3$
$V_1; V_2; V_3$

p — ?

Решение

Обозначим давления трех газов, после снятия перегородок и установления давления через p_1', p_2', p_3'.

Затем используем закон Бойля—Мариотта

$$p_1'(V_1 + V_2 + V_3) = p_1V_1;$$

$$p_2'(V_1 + V_2 + V_3) = p_2V_2;$$

$$p_3'(V_1 + V_2 + V_3) = p_3V_3.$$

Из этих уравнений определяем давления p_1', p_2' и p_3'.

Теперь используем закон Дальтона

$$p = p_1' + p_2' + p_3',$$

где p — искомое давление.

После преобразований получим

$$p = \frac{p_1V_1 + p_2V_2 + p_3V_3}{V_1 + V_2 + V_3}.$$

Ответ: $p = \dfrac{p_1V_1 + p_2V_2 + p_3V_3}{V_1 + V_2 + V_3}$.

Задача 4.2

Определите концентрацию молекул идеального газа массой m, средняя квадратичная скорость которого при температуре T равна $V_{кв}$.

Дано:
m; T; $V_{кв}$

n — ?

Р е ш е н и е

Запишем основное уравнение молекулярно-кинетической теории

$$p = \frac{1}{3} n m_0 V_{кв}^2,$$

из которого выразим давление

$$p = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m_0 V_{кв}^2,$$

где m_0 — масса одной молекулы; N — их число в объеме V.

Поскольку $m_0 N = m$ — масса газа, то

$$pV = m \frac{V_{кв}^2}{3}.$$

С другой стороны

$$p = nkT = \frac{N}{V} kT,$$

или

$$pV = NkT.$$

Поэтому

$$nkT = m \frac{V_{кв}^2}{3},$$

или

$$n = m \frac{V_{кв}^2}{3kT}.$$

Ответ: $n = m \dfrac{V_{кв}^2}{3kT}$.

Задача 4.3

Коэффициенты диффузии и внутреннего трения при некоторых условиях соответственно равны $1{,}42 \cdot 10^{-4}$ м^2/с и 8,5 мкПа·с. Определите концентрацию молекул воздуха при этих условиях.

Дано:
$D = 1{,}42 \cdot 10^{-4}$ м^2/с
$\eta = 8{,}5$ мкПа·с
$\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль

n — ?

Решение

Запишем формулы для определения коэффициентов диффузии и внутреннего трения

$$D = \frac{1}{3}\overline{V}\,\overline{l};$$

$$\eta = \frac{1}{3}\overline{\rho}\overline{V}\,\overline{l}.$$

Найдем связь между этими коэффициентами

$$\eta = \rho D, \tag{1}$$

где ρ — плотность газа, определяемая как

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

а массу одной молекулы можно вычислить через молярную массу μ и число Авогадро, т. е.

$$m_0 = \frac{\mu}{N_A}. \tag{2}$$

Подставим значение плотности в выражение (1)

$$\mu = \frac{\mu}{N_A} nD.$$

Отсюда и определим концентрацию молекул

$$n = \frac{\eta N_A}{\mu D}.$$

Получим численное значение n:

$$n = \frac{8{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}}{29 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}42 \cdot 10^{-4}} = 1{,}25 \cdot 10^{24} \left(\text{м}^{-3}\right).$$

Ответ: $1{,}25 \cdot 10^{24}$ м$^{-3}$.

Задача 4.4

Число молей реального газа ν объемом V_1 расширяется до объема V_2, при этом против межмолекулярных сил совершается работа A. Определите поправку a, входящую в уравнение Ван-дер-Ваальса.

Дано:
$V_1; V_2; A$

a — ?

Р е ш е н и е

По определению

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

Учитывая

$$p = \frac{\nu^2 a}{V^2},$$

получим

$$A = \nu^2 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^2} = \frac{\nu^2 a (V_2 - V_1)}{V_1 V_2},$$

откуда

$$a = \frac{A V_1 V_2}{\nu^2 (V_2 - V_1)}.$$

Ответ: $a = \dfrac{A V_1 V_2}{\nu^2 (V_2 - V_1)}$.

Задачи для самостоятельного решения

5.11; 5.16; 5.46; 5.49; 5.80; 6.15.

Лекция 5
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ И ВЕЩЕСТВЕ

5.1. Основные понятия электростатики. Закон сохранения электрических зарядов

Электростатика — раздел физики, в котором рассматриваются свойства и взаимодействие неподвижных относительно инерциальных систем отсчета электрически заряженных тел или частиц, обладающих электрическим зарядом.

Электрический заряд (количество электричества) q — величина, характеризующая свойства тел или частиц вступать в электромагнитное взаимодействие и определяющая значение сил и энергий при таких взаимодействиях.

Единица электрического заряда: кулон $\left(|q|^{\text{СИ}} = \text{Кл}\right)$.

Различают два вида электрических зарядов, условно названных положительными и отрицательными. Положительный заряд возникает, например, на стекле, натертом кожей или бумагой, отрицательный — на янтаре или пластмассе, натертых шерстью. Тело является электрически нейтральным, если суммарный заряд отрицательно заряженных частиц, входящих в состав тела, равен суммарному заряду положительно заряженных частиц.

Стабильными носителями электрических зарядов являются элементарные частицы и античастицы. Например, носители положительного заряда — протон и позитрон, а отрицательного — электрон и антипротон.

Электрический заряд дискретен: существует минимальный элементарный электрический заряд, которому кратны все электрические заряды тел. Элементарный электрический заряд равен $e \approx 1{,}6\cdot 10^{-19}$ Кл.

Электрический заряд инвариантен — его величина не зависит от системы отсчета и от того, покоится он или движется.

Фундаментальным законом природы является закон сохранения заряда.

Закон сохранения заряда: в замкнутой (электрически изолированной) системе полный электрический заряд остается неизменным, какие бы процессы не происходили внутри этой системы

$$\sum_{i=1}^{n} q_i = \text{const}. \tag{5.1}$$

5.2. Электризация. Закон Кулона. Напряженность — силовая характеристика электростатического поля

Электризация — процесс, в результате которого тела приобретают способность участвовать в электромагнитных взаимодействиях, так как приобретают электрический заряд.

Электризация тел — процесс перераспределения электрических зарядов, имеющихся в телах, в результате чего тела приобретают заряды противоположного знака. При электризации заряды не появляются, а всего лишь разделяются и перераспределяются между телами, при этом выполняется закон сохранения электрического заряда.

Различают следующие виды электризации:

1. Электризация за счет электропроводности. При соприкосновении двух металлических тел (заряженного и нейтрального) происходит переход некоторого количества свободных электронов с заряженного тела на нейтральное, если заряд тела был отрицательным, и наоборот, если заряд тела положительный. В результате этого нейтральное тело приобретает заряд — отрицательный в первом случае, положительный — во втором.

2. Электризация трением. В результате соприкосновения при трении некоторых нейтральных тел электроны переходят от одного тела к другому. В каждом из них нарушается расстановка сумм положительных и отрицательных зарядов, вследствие чего тела заряжаются противоположными по знаку и равными по модулю зарядами.

3. Электризация через влияние. При поднесении заряженного тела к концу нейтрального металлического стержня в стержне происходит нарушение равномерного распределения положительных и отрицательных зарядов. Они перераспределяются так, что в одной части стержня возникает избыточный отрицательный заряд, а в другой — положительный. Эти заряды называются индуцированными. Их появление объясняется движением свободных электронов под действием электрического поля поднесенного к нему заряженного тела.

В качестве физической абстракции в электростатике вводится понятие точечного заряда.

Точечный заряд — заряженное тело, размеры которого пренебрежительно малы по сравнению с расстояниями до других взаимодействующих с ним тел.

Взаимодействие между покоящимися точечными зарядами подчиняется закону Кулона.

Закон Кулона: модуль силы F взаимодействия двух точечных неподвижных зарядов q_1 и q_2 в вакууме прямо пропорционален произведению величин зарядов и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними

$$F = k\frac{|q_1||q_2|}{r^2}, \tag{5.2}$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц, в СИ $k = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}$, где ε_0 — электрическая постоянная; $\varepsilon_0 \approx 8{,}85 \cdot 10^{-12} \dfrac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$; $k \approx 9 \cdot 10^9 \dfrac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$.

Силы взаимодействия направлены вдоль прямой, соединяющей заряды.

Электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждый из них создает в окружающем пространстве электрическое поле. Поле одного заряда действует на другой заряд и наоборот. По мере удаления от заряда поле ослабевает.

Электрическое поле неподвижных зарядов называется электростатическим.

Напряженность электростатического поля $\vec{E}$ — векторная величина, характеризующая электростатическое поле в данной точке.

Напряженность поля в данной точке равна отношению силы $\vec{F}$, действующей на точечный (пробный) заряд, помещенный в данную точку поля, к величине q_0 этого заряда

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \tag{5.3}$$

Направление вектора напряженности совпадает с направлением силы, действующей на пробный (единичный) положительный заряд, помещенный в данную точку поля. В векторной форме напряженность поля точечного заряда в вакууме определяется

$$\vec{E} = k\frac{q}{r^2}\frac{\vec{r}}{r}. \tag{5.4}$$

где $\vec{r}$ — радиус-вектор, соединяющий данную точку поля с зарядом.

В скалярной форме

$$E = k\frac{q}{r^2}. \qquad (5.5)$$

Напряженность является силовой характеристикой электростатического поля, она позволяет рассчитать силу, действующую на этот заряд

$$\vec{F} = q_0\vec{E}. \qquad (5.6)$$

Единица напряженности — Вольт на метр $\left([E] = \frac{\text{В}}{\text{м}}\right)$ или $\left([E] = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}\right)$.

Однородным называют электрическое поле, напряженность которого во всех точках одинакова. Линии напряженности — воображаемые кривые, которые используют для графического изображения электростатических полей. Линии напряженности проводят так, чтобы касательная к ним в каждой точке пространства совпадала по направлению с вектором напряженности поля в данной точке.

Через каждую точку поля можно провести только одну линию напряженности, т.е. линии напряженности не пересекаются.

Линии напряженности однородного поля параллельны и их густота постоянна. В противном случае поле является неоднородным.

Силовые линии электростатического поля начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных. Густота силовых линий характеризует значение вектора напряженности электростатического поля (рис. 5.1).

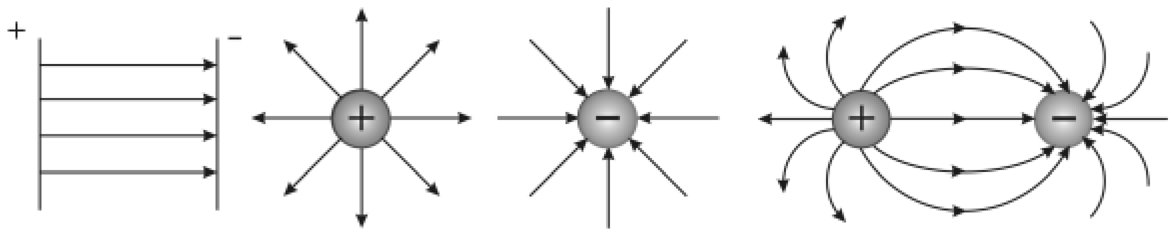


Рис. 5.1

Если электростатическое поле создается несколькими зарядами, то результирующая напряженность определяется по принципу суперпозиции полей.

Принцип суперпозиции полей: напряженность поля нескольких зарядов равна векторной сумме напряженностей полей каждого из них

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^{n} \vec{E}_i. \qquad (5.7)$$

Число линий напряженности через элементарную площадку dS равно

$$EdS\cos\alpha = E_n dS,$$

где E_n — проекция $\vec{E}$ на внешнюю единичную нормаль $\vec{n}$ к площадке dS.

Величину $E_n Ds = d\Phi_E$ называют бесконечно малым потоком $\vec{E}$ через dS. Поток $\vec{E}$ через замкнутую поверхность S

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \oint_S \vec{E} d\vec{S},$$

где $d\vec{S} = dS\vec{n}$.

Для расчета полей более сложных конфигураций необходимо применить теорему Гаусса.

Теорема Гаусса: поток вектора напряженности электростатического поля в вакууме через произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности зарядов, деленных на ε_0

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum_{i=1}^{n} q_i. \qquad (5.8)$$

5.3. Работа в электростатическом поле. Потенциал — энергетическая характеристика электростатического поля

На всякий заряд, помещенный в электрическое поле, действует сила, которая может перемещать заряд, т.е. совершать работу. Пусть отрицательный заряд q притягивает точечный положительный заряд, перемещая его из точки 1 в точку 2. В точке 1 расстояние между зарядами r_1, а в точке 2 — r_2. Из определения работы

$$A = -\int_{r_1}^{r_2} F dr,$$

а сила Кулона

$$F = \frac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0 r^2}.$$

Знак «минус» перед интегралом поставлен из-за того, что для сближающихся зарядов величина dr отрицательна, а величина A положительна, так как перемещение заряда происходит в направлении действия силы F.

Подставив F под знак интеграла и проинтегрировав, получим

$$A = kqq_0 \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = kqq_0 \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right). \tag{5.9}$$

Работа кулоновских сил по замкнутому контуру равна нулю

$$\oint_L dA = 0,$$

т.е. перемещение заряда не зависит от траектории, а определяется только положениями начальной и конечной точек.

Это означает, что электростатическое поле является потенциальным, а электростатические силы — консервативными.

Изменение энергии равно работе, которую может совершить система, переходя из одного состояния в другое. Поэтому величина $-\dfrac{qq_0k}{r}$ равна потенциальной энергии заряда $\vec{E}$ в данной точке электрического поля, а знак «минус» показывает, что при перемещении заряда силой F его потенциальная энергия, переходя в работу, уменьшается.

Величина потенциальной энергии точечного заряда

$$E_{\text{п}} = \frac{kq}{r}.$$

Потенциал электростатического поля φ — величина, характеризующая электростатическое поле в данной точке. Он равен отношению потенциальной энергии взаимодействия $E_{\text{п}}$ заряда с полем к величине единичного (пробного) заряда q, помещенного в данную точку поля

$$\varphi = \frac{E_{\text{п}}}{q_0}. \tag{5.10}$$

Потенциал является энергетической характеристикой электростатического поля.

Физический смысл имеет не сам потенциал, а разность потенциалов.

Единица измерения потенциала — Вольт $\left([\varphi]^{\text{СИ}} = \text{В}\right)$.

Потенциал поля точечного заряда q в точке, находящейся на расстоянии r от заряда, равен

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r}. \qquad (5.11)$$

При $q > 0$ $\varphi > 0$; при $q < 0$ и $\varphi < 0$.

В соответствии с принципом суперпозиции полей, если электростатическое поле создается несколькими зарядами, то его потенциал φ в данной точке пространства определяется как алгебраическая сумма потенциалов φ_1, φ_2, φ_3 … φ_n полей, создаваемых точечными зарядами

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \ldots + \varphi_n = \sum_{i=1}^{n} \varphi_i. \qquad (5.12)$$

5.4. Разность потенциалов. Связь между напряженностью и разностью потенциалов

Разность потенциалов между двумя точками электрического поля — величина, равная отношению работы A электростатических сил по перемещению положительного заряда q из начальной точки в конечную, к этому заряду

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q},$$

или

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E dl,$$

где интегрирование ведется вдоль любой линии, так как работа сил электростатического поля не зависит от траектории перемещения.

Для электростатических полей разность потенциалов совпадает с напряжением U.

Единица разности потенциалов (напряжения) — Вольт $\left([\text{U}]^{\text{СИ}} = \text{В}\right)$.

Эквипотенциальные поверхности — геометрическое место точек электростатического поля, в которых значения потенциалов одинаковы.

В каждой точке эквипотенциальной поверхности вектор напряженности электрического поля перпендикулярен ей и направлен в сторону убывания потенциала. Работа, совершаемая силами электростатического поля при перемещении электрического заряда по эквипотенциальной поверхности, равна нулю. Эквипотенциальные поверхности строят так, чтобы разность потенциалов между соседними поверхностями были одинаковы. Зная расположение этих поверхностей, можно построить силовые линии и найти значение напряженности поля и наоборот (рис. 5.2).

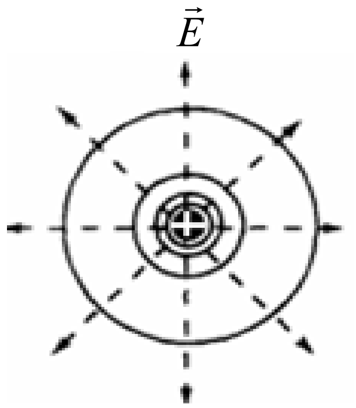


Рис. 5.2

Эквипотенциальные поверхности не пересекаются. На рис. 5.2 пунктирными линиями изображены эквипотенциальные поверхности.

При перемещении единичного точечного положительного заряда (q = +1) вдоль оси ОX из точки x_2 в точку x_1, расположенные бесконечно близко друг к другу — dx, совершается работа, равная $E_x dx$.

Для единичного точечного положительного заряда эта же работа равна — $d\varphi$. Приравняв оба выражения, получаем

$$E_x = -\frac{d\varphi}{dx}, \tag{5.13}$$

где знак «минус» показывает, что вектор $\vec{E}$ направлен в точку убывания потенциала.

Проведя аналогичные рассуждения для осей OY и OZ, получаем

$$\vec{E} = -\mathrm{grad}\varphi;$$
$$\mathrm{grad}\varphi = \vec{i}\,\frac{d\varphi}{dx} + \vec{j}\,\frac{d\varphi}{dy} + \vec{k}\,\frac{d\varphi}{dz}, \tag{5.14}$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ — единичные векторы соответствующих осей OX, OY и OZ.

5.5. Диэлектрики в электрическом поле

Диэлектрики — тела, в которых заряды не могут перемещаться от одной части тела к другой — связанные заряды. Связанными являются заряды, входящие в состав атомов и молекул диэлектрика, заряды ионов в кристаллах с ионной решеткой.

Различают три вида диэлектриков.

1) полярные, состоящие из молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают (электрические диполи, например, спирт и вода);

2) неполярные, в молекулах и атомах которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов совпадают, например, газы, водород и бензол;

3) ионные кристаллы (пространственные решетки с чередованием ионов разных зарядов), например, NaCl и KCl.

При помещении диэлектриков в электрическое поле происходит процесс поляризации.

Электрический диполь — совокупность двух равных по модулю разноименных точечных зарядов ($+q$ и $-q$), находящихся на расстоянии l друг от друга.

Дипольный электрический момент $\vec{p}$ — векторная физическая величина, являющаяся основной характеристикой диполя. Электрический момент диполя равен произведению модуля заряда q на расстояние $\vec{l}$ — плечо диполя

$$\vec{p}_i = |q|\vec{l}_i. \tag{5.15}$$

Направлен дипольный момент по оси диполя от его отрицательного заряда к положительному (рис. 5.3).

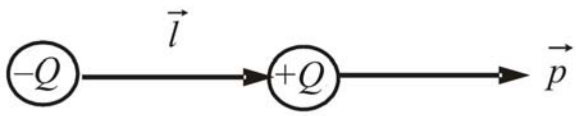


Рис. 5.3

Единица дипольного момента — Кулон·метр $\left([p_i]^{\text{СИ}} = \text{Кл} \cdot \text{м}\right)$.

Поляризация диэлектриков — процесс переориентации диполей или появление под воздействием внешнего электрического поля ориентированных по полю диполей.

Количественная характеристика поляризации — вектор поляризации, определяемый дипольным моментом единицы объема диэлектрика

$$\vec{p} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \vec{p}_i}{V}. \qquad (5.16)$$

Для изотропного диэлектрика

$$\vec{p} = \chi \varepsilon_0 \vec{E}, \qquad (5.17)$$

где χ — относительная диэлектрическая восприимчивость диэлектрика.

Если поместить полярный диэлектрик во внешнее однородное электрическое поле, то под его действием каждая молекула диэлектрика будет ориентироваться так, чтобы ее дипольный момент был сонаправлен с напряженностью поля. Строгой ориентации дипольных молекул препятствует их тепловое хаотичное движение. Так происходит дипольная или ориентационная поляризация.

Если во внешнее поле поместить неполярный диэлектрик, то в его молекулах под действием поля произойдет смещение отрицательных и положительных зарядов относительно друг друга. Молекулы становятся диполями, оси которых ориентированы вдоль поля, — электронная поляризация.

Если во внешнее поле поместить ионный диэлектрик, то под действием поля произойдет смещение ионов, приводящее к возникновению дипольных моментов, — ионная поляризация.

Некоторые кристаллы, например кварц, поляризуются при механической деформации, внутри кристалла возникает электрическое поле. Такое явление получило название пьезоэлектрический эффект, а обратный эффект — электрострикция, когда во внешнем электрическом поле пластинка пьезоэлектрика деформируется.

Для установления количественных закономерностей поля в диэлектрике в однородное внешнее электрическое поле напряженностью $\vec{E}_0$ необходимо внести пластинку из однородного диэлектрика.

Под действием поля диэлектрик поляризуется, т.е. происходит смещение зарядов: положительные смещаются по полю, отрицательные — против поля. В результате этого на правой грани диэлектрика образуется избыток положительных, на левой — отрицательных зарядов. Эти нескомпенсированные заряды, появляющиеся в результате поляризации диэлектрика, называются связанными (рис. 5.4).

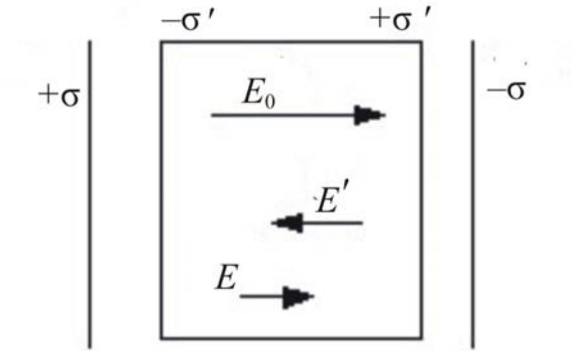


Рис. 5.4

Связанные заряды образуют электрическое поле, вектор напряженности E' которого направлен в сторону, противоположную направлению внешнего электрического поля $\left(\vec{E}_0\right)$. Поэтому результирующее поле в диэлектрике имеет напряженность $\vec{E}$ меньшую, чем в вакууме

$$E = E_0 - E'.$$

Диэлектрическая проницаемость ε — величина, равная отношению модуля напряженности E_0 электрического поля в вакууме к модулю напряженности E этого поля внутри однородного диэлектрика

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}. \tag{5.18}$$

Величины ε и χ связаны между собой отношением

$$\varepsilon = 1 + \chi. \tag{5.19}$$

Если взаимодействующие заряды находятся в однородном диэлектрике с диэлектрической проницаемостью ε, то сила взаимодействия по закону Кулона уменьшается в ε раз:

$$F = k\frac{|q_1 q_2|}{\varepsilon r^2}. \tag{5.20}$$

Для описания электростатического поля, создаваемого свободными зарядами, вводят векторную величину $\vec{D}$, называемую электрическим смещением или электрической индукцией.

Величина $\vec{D}$ характеризует электростатическое поле свободных зарядов, но при таком их распределении в пространстве, которое возникает в присутствии диэлектрика. Для изотропного диэлектрика

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}. \qquad (5.21)$$

В единицах СИ электрическое смещение имеет размерность $\frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}\left([D] = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}\right)$.

В отличие от напряженности $\vec{E}$ электрическое смещение $\vec{D}$ постоянно во всех диэлектриках. Поэтому электрическое поле в неоднородной диэлектрической среде удобнее характеризовать величиной $\vec{D}$. Аналогично вводят понятие линий электрического смещения и потока вектора электрического смещения.

Теорема Гаусса для электрического поля в диэлектрике: поток вектора смещения электрического поля в диэлектрике через произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности свободных электрических зарядов

$$\varphi_D = \oint_{\varepsilon} \vec{D} d\vec{S} = \oint_{\varepsilon} D_n dS = \sum_{n-1}^{n} q_i. \qquad (5.22)$$

5.6. Проводники в электрическом поле

Проводники — тела, в которых электрические заряды могут свободно перемещаться на значительное расстояние.

При помещении во внешнее электрическое поле проводника свободные электроны проводника начнут перемещаться против поля. Левая часть проводника (рис. 5.5) зарядится отрицательно, правая — положительно. Такое явление перераспределения зарядов на поверхности во внешнем поле называется электростатической индукцией.

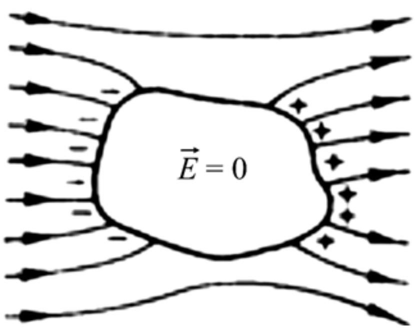


Рис. 5.5

Перераспределения зарядов в проводнике будут происходить, пока внешнее поле внутри проводника не компенсируется собственным полем зарядов. Напряженность поля станет равной нулю — и перераспределение зарядов прекратится.

Следовательно, если поля внутри проводника нет, то все точки его имеют одинаковый потенциал и поверхность проводника является эквипотенциальной. Силовые линии поля вне проводника расположатся перпендикулярно к его поверхности, проводник внесет искажения в поле.

Если внутри проводника имеется полость, то в этой полости напряженность поля равна нулю независимо от того, какое поле имеется вне проводника и как он заряжен. На этом основана электростатическая защита: если прибор окружен замкнутой металлической оболочкой (или сеткой), то никакие внешние электростатические поля на этот прибор действовать не будут.

Поскольку поверхность проводника является эквипотенциальной, то заряженный проводник характеризуется определенным потенциалом, поэтому, увеличивая заряд на его поверхности, будем увеличивать потенциал проводника. Отношение заряда к потенциалу проводника остается при этом постоянным — эту величину называют электроемкостью.

5.7. Электроемкость. Конденсаторы

Электрическая емкость — величина, характеризующая электрические свойства проводника, количественная мера его способности удерживать электрический заряд.

Электрическая емкость C уединенного проводника равна отношению заряда dq проводника к его потенциалу $d\varphi$, при этом предполагается, что потенциал поля проводника принят равным 0 в бесконечно удаленной точке

$$C = \frac{dq}{d\varphi}. \tag{5.23}$$

Электрическая емкость определяется геометрическими размерами проводника, его формой и диэлектрическими свойствами окружающей среды. Электрическая емкость уединенного проводящего шара (или сферы) радиуса R равна

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon. \tag{5.24}$$

Понятие электрической емкости относится также и к системе проводников, в частности, двух проводников, разделенных тонким слоем диэлектрика — конденсатору.

Конденсатор — система их двух проводников, разноименно заряженных равными по абсолютной величине, противоположными по знаку зарядами, при этом форма и расположение проводников таковы, что создаваемое ими электрическое поле локализовано в ограниченной области пространства.

Сами проводники называются в этом случае обкладками конденсатора. В зависимости от конфигурации и расположения обкладок различают плоские, сферические и цилиндрические конденсаторы.

Электроемкость конденсатора равна

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{\Delta\varphi}, \tag{5.25}$$

где q — заряд одной из обкладок конденсатора; $\Delta\varphi$ — разность потенциалов между обкладками.

Электрическая емкость плоского конденсатора, состоящего из двух металлических пластин площадью S каждая, расположенных на расстоянии d друг от друга ($d \ll \sqrt{S}$), рассчитывается по формуле

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}. \tag{5.26}$$

Единица электроемкости — фарад ($[C]^{\text{СИ}} = \text{Ф}$).

Энергия E заряженного конденсатора определяется по формуле

$$E = \frac{q^2}{2C} = \frac{C(\Delta\varphi)^2}{2} = \frac{q\Delta\varphi}{2}. \tag{5.27}$$

Подставив в (5.27) $C = \dfrac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$ и $\Delta\varphi = Ed$, получим

$$E = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} Sd = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} V,$$

где $V = Sd$ — объем конденсатора.

Поэтому объемная плотность энергии определяется как

$$\omega_{\text{эл}} = \frac{E}{V} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} = \frac{ED}{2}. \tag{5.28}$$

Для того чтобы обеспечить требуемую емкость при заданном напряжении, конденсаторы соединяют в батареи.

При параллельном соединении конденсаторов емкостью C_1, C_2, $C_3,\ldots$, C_n емкость батареи определяют по формуле

$$C = C_1 + C_2 + \ldots + C_n. \qquad (5.29)$$

При последовательном соединении конденсаторов емкость батареи определяют из соотношения

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots \frac{1}{C_n}. \qquad (5.30)$$

Вопросы для самостоятельного рассмотрения

1. Определите связь между векторами напряженности, электрического смещения и поляризации.
2. Напишите формулы для определения электроемкости сферического и цилиндрического конденсаторов.
3. Напишите формулу для расчета емкости батареи одинаковых по электроемкости конденсаторов при последовательном и параллельном соединениях.
4. Одинаковы ли заряды конденсаторов в батарее при последовательном и параллельном соединениях?
5. Одинаковы ли напряжения на конденсаторах в батарее при последовательном и параллельном соединениях?
6. Перечислите основные особенности поведения сегнетоэлектриков.

Практическое занятие 5
ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Основные законы и формулы

1. Средняя энергия молекул идеального газа

$$\varepsilon = \frac{i}{2}kT,$$

где i — число степеней свободы.

2. Внутренняя энергия произвольной массы газа

$$U = \nu\frac{i}{2}RT = \frac{m}{\mu}\frac{i}{2}RT.$$

3. Первое начало (закон) термодинамики

$$\delta Q = dU + \delta A,$$

где dU — бесконечно малое изменение внутренней энергии.

4. Молярная теплоемкость газа при постоянном объеме

$$c_V^{\mu} = \frac{i}{2}R.$$

5. Молярная теплоемкость при постоянном давлении

$$c_p^{\mu} = \frac{i+2}{2}R.$$

6. Бесконечно малая работа газа

$$\delta A = pdV.$$

7. Работа газа при изобарном расширении

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

8. Работа газа при изотермическом расширении

$$A = Q = \frac{m}{\mu}RT\ln\frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu}RT\ln\frac{p_1}{p_2}.$$

9. Уравнение адиабатического процесса (уравнение Пуассона)

$$pV^{\gamma} = \text{const}; \; TV^{\gamma-1} = \text{const}; \; T^{\gamma}p^{1-\gamma} = \text{const},$$

где γ — показатель адиабаты, или коэффициент Пуассона; $\gamma = \dfrac{c_p}{C_V}$, или $\gamma = (i+2)/i$.

10. Работа при адиабатическом расширении

$$A = \frac{m}{\mu}c_V^{\mu}(T_1 - T_2) = \frac{p_1V_1}{\gamma-1}\left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}\right).$$

11. Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}100\ \%,$$

где Q_1 и Q_2 — теплота, полученная от нагревателя и переданная холодильнику, соответственно.

12. Термический коэффициент полезного действия цикла Карно

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} 100\ \%,$$

где T_1 и T_2 — абсолютная температура нагревателя и холодильника, соответственно.

13. Изменение энтропии при изотермическом процессе

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

14. Изменение энтропии при изохорном процессе

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} c_V^{\mu} \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

15. Изменение энтропии при изобарном процессе

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} \left(c_V^{\mu} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right).$$

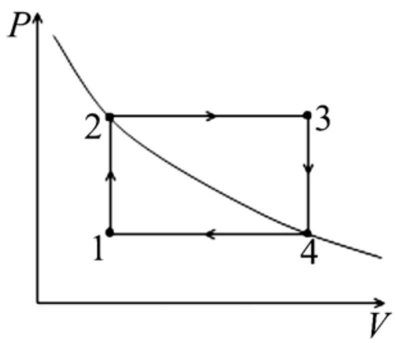
Примеры решения задач

Задача 5.1

Над молем идеального газа совершают замкнутый процесс, состоящий из двух изохор и двух изобар. Температуры в точках 1 и 3 (*см.* рис.) равны соответственно T_1 и T_3. Определите работу, совершенную газом за цикл, если точки 2 и 4 лежат на одной изотерме.

Дано:
T_1; T_3
$\nu = 1$ моль

A — ?



Р е ш е н и е

Работа газа равна площади цикла

$$A = (p_2 - p_1)(V_4 - V_1) = S.$$

$$A = p_2 V_4 - p_1 V_4 - p_2 V_1 - p_1 V_1.$$

Запишем затем уравнение состояния $pV = RT$ для каждой из точек 1, 2, 3, 4, учитывая, что $p_3 = p_2$; $p_4 = p_1$; $V_1 = V_2$; $V_3 = V_4$, а также $T_2 = T_4 = T$, то $\frac{T}{T_1} = \frac{T_2}{T}$.

Так как $\frac{p_1 T}{T_1} = \frac{p_4 T_3}{T}$, получим

$$A = R\left(T_1 - 2\sqrt{T_1 T_3} + T_3\right) = R\left(\sqrt{T_1} - \sqrt{T_3}\right)^2.$$

Ответ: $A = R\left(\sqrt{T_1} - \sqrt{T_3}\right)^2$.

Задача 5.2

Нагреватель тепловой машины, работающий по идеальному циклу Карно, получает Q_1 Дж и 70 % из них передает холодильнику. Определите КПД цикла и работу, совершенную машиной.

Дано:
Q_1
$Q_2 = 0{,}7\, Q_1$

η; A — ?

Решение

Запишем формулу для определения термического КПД

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} 100\ \% = \frac{Q_1 - 0{,}7 Q_1}{Q_1} 100\ \% = 30\ \%.$$

$$A = \eta Q_1 = 0{,}3 Q_1.$$

Ответы: $\eta = 30\ \%$; $A = 0{,}3 Q_1$.

Задача 5.3

Определите изменение энтропии при изотермическом расширении газа массой m, если давление уменьшится от p_1 до p_2.

Дано:
m; p_1; p_2

ΔS — ?

Р е ш е н и е

При изотермическом процессе

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}.$$

Согласно первому началу термодинамики $\Delta Q = A$ — для изотермического процесса, поэтому

$$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Из приведенных формул получаем

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} R \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Ответ: $\Delta S = \dfrac{m}{\mu} R \ln \dfrac{p_1}{p_2}.$

Задача 5.4

Масса m идеального газа, находящегося при температуре T, охлаждается изохорически так, что давление падает в n раз. Затем газ расширяется при постоянном давлении. В конечном состоянии его температура равна первоначальной. Определите совершенную газом работу. Молярная масса газа — μ.

Дано:

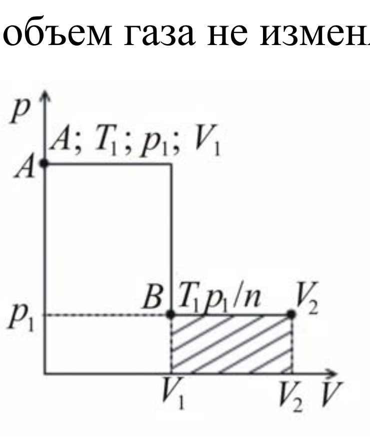
$p_2 = \dfrac{p_1}{n}$

μ

A — ?

Р е ш е н и е

При переходе A — B объем газа не изменяется (см. рис.).



В процессе B — C — объем растет при постоянном давлении, работу можно вычислить

$$A = p\Delta V.$$

Объемы V_1 и V_2 можно определить из уравнения Менделеева — Клапейрона $V_1 = \frac{mRT}{\mu p_1}$, учитывая, что давление газа уменьшилось в n раз, $V_2 = \frac{m}{\mu}\frac{RT_1 n}{p_1}$, тогда работа

$$A = \frac{p_1}{n}(V_2 - V_1), \text{ или } A = \frac{m}{\mu}\frac{RT_1}{n}(n-1).$$

Ответ: $A = \frac{m}{\mu}\frac{RT_1}{n}(n-1)$.

Задачи для самостоятельного решения

5.152; 5.161; 5.177; 5.180; 5.197; 5.203.

Лекция 6
ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

6.1. Основные определения. Законы Ома

Электрический ток — упорядоченное (направленное) движение электрически заряженных частиц.

Направление протекания электрического тока — направление, в котором движутся положительно заряженные частицы.

О наличии электрического тока можно судить по действиям, которые он производит: тепловому — нагревание проводников; химическому — изменение химического состава проводника; магнитному — силовое действие на соседние токи и намагничивание тел.

Для возникновения и существования электрического тока необходимо наличие свободных заряженных частиц — носителей тока и силы, создающей и поддерживающей их упорядоченное движение со стороны электрического поля внутри проводника.

Различают постоянный и переменный токи.

Постоянный ток — электрический ток, не меняющийся с течением времени ни по величине, ни по направлению. Он может существовать только в замкнутой цепи. Количественной характеристикой электрического тока является сила тока I.

Сила тока — характеристика электрического тока, равная отношению электрического заряда dq, переносимому через сечение проводника за промежуток времени dt

$$I = \frac{dq}{dt}. \tag{6.1}$$

Единица измерения силы тока в СИ: Ампер ([I] = [A]).

Плотность тока равна силе тока, проходящего через единицу площади поперечного сечения проводника, перпендикулярного направлению тока

$$j = \frac{dI}{ds}. \tag{6.2}$$

Так как $dq = ne\bar{V}sdt$, то $I = ne\bar{V}s$, а $j = ne\bar{V}$, где n — концентрация зарядов; e — модуль заряда электрона, $\bar{V}$ — средняя скорость движения зарядов.

В СИ размерность плотности тока — $[j] = \left[\frac{\text{А}}{\text{м}^2}\right]$.

Плотность тока — вектор, его направление совпадает с направлением движения положительных зарядов

$$\vec{j} = ne\vec{V}. \qquad (6.3)$$

Электрическое напряжение — величина, равная отношению работы A электрического поля по перемещению положительного электрического заряда q вдоль цепи из одной точки в другую к величине этого заряда

$$U = \frac{A}{q}. \qquad (6.4)$$

Единица измерения электрического напряжения в СИ: Вольт ($[U]$ = [В]).

Электрическое кулоновское поле не может создать постоянного электрического тока, так как действие электростатического поля всегда приводит к соединению разноименных зарядов, т.е. к уменьшению разности потенциалов.

Сторонние силы — неэлектростатические силы, действие которых на свободные заряженные частицы вызывает их упорядоченное движение и поддерживает электрический ток в цепи. Действие сторонних сил приводит к разделению разноименных зарядов, т.е. поддерживает разность потенциалов в цепи.

Источники тока — устройства, преобразующие различные виды энергии в электрическую.

Во всех источниках тока совершается работа сторонних сил по разделению положительно и отрицательно заряженных частиц. Различают химические (аккумуляторы, гальванические элементы) и физические источники (термоэлементы, солнечные батареи, генераторы).

Электродвижущая сила (ЭДС) ε — это величина, характеризующая действие сторонних сил, энергетическая характеристика источника тока. В замкнутом контуре ЭДС равна отношению работы $A_{ст}$ сторонних сил по перемещению положительного заряда q вдоль замкнутого контура к этому заряду

$$\varepsilon = \frac{A_{ст}}{q}. \qquad (6.5)$$

Единица измерения ЭДС в СИ: Вольт ([ε] = [В]).

ЭДС источника тока равна электрическому напряжению на его зажимах при разомкнутой цепи. Способность вещества пропускать электрический ток характеризуется электрическим сопротивлением R или электрической проводимостью G.

Электрическое сопротивление — величина, характеризующая противодействие проводника (или электрической цепи) установленного в нем электрического тока.

Электрическое сопротивление R проводника численно равно отношению напряжения и на его концах U к силе тока I в нем:

$$R = \frac{U}{I}. \tag{6.6}$$

Единица измерения сопротивления в СИ: Ом ([R] = [Ом]).

Электрическое сопротивление зависит от геометрической формы, размеров и материала проводника. Для проводника длиной l и поперечным сечением S сопротивление определяется по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}, \tag{6.7}$$

где ρ — удельное сопротивление, характеризующее материал проводника.

Удельное сопротивление ρ — величина, равная электрическому сопротивлению цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади поперечного сечения.

Единица измерения удельного сопротивления в СИ: $\text{Ом} \cdot \text{м} \left(\left[\rho \right] = \left[\text{Ом} \cdot \text{м} \right] \right)$.

Удельное сопротивление проводника зависит от температуры

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t), \tag{6.8}$$

где ρ_0 — удельное сопротивление проводника при температуре 0 ºС; ρ — удельное сопротивление проводника при произвольной температуре t, ºС; α — температурный коэффициент сопротивления, численно равный относительному изменению удельного сопротивления при изменении температуры на 1 ºС.

Электрическая проводимость — величина, характеризующая способность вещества проводить электрический ток, т.е. величина, обратная электрическому сопротивлению

$$G = \frac{1}{R}. \tag{6.9}$$

Единица измерения электрической проводимости в СИ: сименс $\left([G]=[\text{См}]\right)$.

Закон Ома для однородного участка цепи: сила тока I на участке цепи сопротивлением R прямо пропорциональна напряжению U на этом участке и обратно пропорциональна сопротивлению:

$$I=\frac{U}{R}. \tag{6.10}$$

Закон Ома записывается и в дифференциальной форме:

$$\vec{j}=\gamma\vec{E}, \tag{6.11}$$

где $\gamma=\dfrac{1}{\rho}$ — удельная проводимость.

Закон Ома для полной цепи: сила тока I в неразветвленной замкнутой цепи, содержащей источник тока, прямо пропорциональна ЭДС этого источника и обратно пропорциональна сумме внешнего R и внутреннего r сопротивлений данной цепи

$$I=\frac{\varepsilon}{R+r} \tag{6.12}$$

Если в цепи последовательно включено несколько источников тока, то полная ЭДС равна алгебраической сумме ЭДС отдельных источников с учетом следующего правила.

Если при обходе цепи в выбранном направлении ток внутри источника идет в направлении обхода, то электродвижущая сила этого источника считается положительной; если при обходе цепи в выбранном направлении ток внутри источника идет в противоположном направлении, то ЭДС этого источника считается отрицательной.

6.2. Соединение проводников в электрических цепях. Правила Кирхгофа

Последовательное соединение — соединение проводников, при котором конец одного проводника служит началом другого. Электрическая цепь при таком соединении не содержит разветвлений (рис. 6.1).

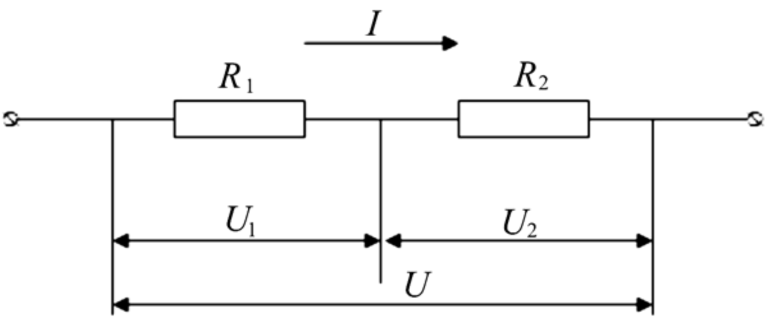


Рис. 6.1

При последовательном соединении проводников выполняются следующие условия:

1) сила тока в проводниках одинакова: $I_1 = I_2 = I = \text{const}$;

2) напряжение на концах рассматриваемого участка цепи равно сумме напряжений на каждом из проводников: $U = U_1 + U_2$;

3) отношение напряжений на отдельных проводниках равно отношению сопротивлений этих проводников: $\dfrac{U_1}{U_2} = \dfrac{R_1}{R_2}$;

4) сопротивление R всего участка цепи равно сумме сопротивлений проводников: $R = R_1 + R_2$.

Параллельное соединение — соединение проводников, при котором начала всех проводников соединены между собой в одной точке (узле) и концы их тоже соединены между собой в одной точке (рис. 6.2).

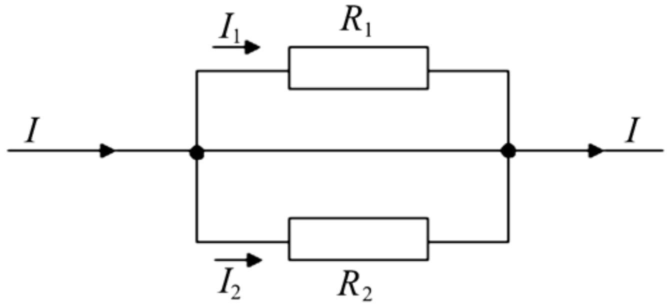


Рис. 6.2

При параллельном соединении проводников выполняются следующие условия:

1) напряжение на всех проводниках одинаково: $U_1 = U_2 = U = \text{const}$;

2) сила тока I в неразветвленном участке цепи равна сумме сил токов в разветвлениях: $I = I_1 + I_2$;

3) отношение сил токов в отдельных разветвлениях равно отношению сопротивлений проводников:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1}{R_2};$$

4) величина, обратная сопротивлению R всего участка цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям проводников

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

При расчете сложных цепей используют правила Кирхгофа.

Любая точка разветвленной цепи, в которой сходятся не менее трех токов, называется узлом электрической цепи. Токи, входящие в узел, считаются положительными, выходящие — отрицательными.

Первое правило Кирхгофа: алгебраическая сумма сил токов в узле равна нулю

$$\sum_{i=1}^{n} I_i = 0. \qquad (6.13)$$

Второе правило Кирхгофа: в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов I_i на сопротивление R_i соответствующих участков этого контура, равна алгебраической сумме ЭДС $\varepsilon_к$, встречающихся в этом контуре

$$\sum_{i=1}^{n} I_i R_i = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_к. \qquad (6.14)$$

Для применения правил Кирхгофа необходимо выполнить следующее:

1) выбрать направление протекания токов на всех участках цепи;

2) выбрать направление обхода контура, при этом произведение IR положительно, если ток совпадает с направлением обхода. ЭДС по выбранному обходу считается положительной, против — отрицательной;

3) составить уравнения, в которые должны входить все ЭДС и сопротивления цепи.

6.3. Работа и мощность тока. Тепловое действие тока. Законы Джоуля — Ленца

Электрическое поле при перемещении заряда q по участку цепи совершает работу, равную произведению заряда на напряжение U на концах этого участка цепи

$$dA = Udq = IUdt = \frac{U^2}{R}dt. \qquad (6.15)$$

Эту величину называют работой тока.

Мощность тока P — величина, характеризующая быстроту совершения полем работы по перемещению заряженных частиц по проводнику, равная отношению работы dA, совершенной за время dt, к этому интервалу времени

$$P = \frac{dA}{dt} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \qquad (6.16)$$

Наличие у проводника электрического сопротивления приводит к рассеянию электрической энергии — переходу ее во внутреннюю энергию проводника.

Закон Джоуля — Ленца: количество теплоты dQ, выделяемое проводником с током, равно произведению квадрата силы тока I, сопротивления проводника R и времени dt прохождения тока

$$dQ = I^2 Rdt. \qquad (6.17)$$

Элементарный электрический объем проводника: $dV = dSdt$, сопротивление — $R = \rho\frac{dl}{dS}$ (по проводнику течет ток вдоль его оси). Тогда теплота, выделяющаяся в объеме dV за время dt

$$dQ = I^2 Rdt = \frac{dl}{dS}\left(jdS\right)^2 dt = \rho j^2 dVdt.$$

Если обозначить величину $\frac{dQ}{dVdt}$ через ω — удельную тепловую мощность тока, то используя закон Ома в виде $j = \gamma E$, получим

$$\omega = \rho p j^2, \text{ или } \omega = \gamma E^2. \qquad (6.18)$$

Данное выражение представляет закон Джоуля — Ленца в дифференциальной форме.

6.4. Основы классической электронной теории проводимости металлов Лоренца — Друде

Носителями тока в металлах являются электроны проводимости — свободные электроны, образовавшиеся из валентных электронов атомов металла, не принадлежащих определенному атому, т.е. коллективных, или обобществленных. Концентрация электронов проводимости имеет величины порядка $10^{28} \div 10^{29}$ м$^{-3}$. В классической теории Лоренца — Друде эти электроны рассматриваются как идеальный одноатомный электронный газ.

Электроны проводимости в отсутствие электрического тока внутри металла хаотически движутся и сталкиваются с ионами кристаллической решетки металла. Средняя скорость теплового движения электронов при $T \approx 273$ К составляет $\approx 10^{-4}\,\dfrac{\text{м}}{\text{с}}$ — так называемая скорость дрейфа $\bar{V}_{\text{др}}$.

При нагревании металлов их сопротивление увеличивается, так как с повышением температуры атомы движутся быстрее, их расположение становится менее упорядоченным и они сильнее мешают направленному движению свободных электронов. При очень низких температурах электрическое сопротивление некоторых металлов резко падает до нуля, наблюдается явление сверхпроводимости.

Определим в общем виде величину скорости дрейфа. Пусть проводник имеет цилиндрическую форму площадью поперечного сечения S, в нем создано электрическое поле напряженностью E, под действием которого свободные электроны движутся против поля, создавая ток силой I. За время $t = \dfrac{l}{\bar{V}_{\text{др}}}$ свободные электроны пройдут участок проводника длиной l. Суммарный переносимый ими заряд равен

$$q = e n_e S \bar{V}_{\text{др}} t,$$

где e — модуль заряда электрона; n_e — концентрация свободных электронов.

Так как по определению

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

то

$$I = en_e V_{\text{др}} S,$$

откуда

$$\overline{V}_{\text{др}} = \frac{I}{en_e S} = \frac{j}{en_e}.$$

Металлы обладают как большой электропроводимостью, так и высокой теплопроводностью. Это объясняется тем, что носителями тока и теплоты в металлах являются одни и те же частицы — свободные электроны, которые перемещаются в металле, перенося не только электрический заряд, но и присущую им энергию хаотического движения, т.е. осуществляя перенос теплоты.

Видеманом и Францем был экспериментально установлен закон, согласно которому отношение теплопроводности λ к удельной проводимости γ для всех металлов при одной и той же температуре одинаково и увеличивается пропорционально термодинамической температуре:

$$\frac{\lambda}{\gamma} = \beta T, \tag{6.19}$$

где β — постоянная, не зависящая от рода металла.

Элементарная классическая теория электропроводности металлов позволила найти β:

$$\beta = \left(\frac{3k}{e}\right)^2,$$

где k — постоянная Больцмана.

Теория Лоренца—Друде позволяет объяснить основные явления, происходящие при прохождении электрического тока через металлические проводники, но имеет ряд недостатков:

1) полученная теоретическая температурная зависимость величины удельного сопротивления ρ противоречит экспериментальным данным:

$$\rho_{\text{теор}} \sim \sqrt{T}; \rho_{\text{эксп}} \sim T;$$

2) вопреки электронной теории электронный газ не обладает теплоемкостью;

3) с позиции классической электронной теории необъяснимо состояние сверхпроводимости, возникающее у некоторых металлов при температуре, близкой к абсолютному нулю.

Перечисленные трудности классической электронной теории были сняты применением квантовых представлений.

Вопросы для самостоятельного рассмотрения

1. В чем заключается явление сверхпроводимости и как можно использовать его в технике?
2. Принцип работы термометра сопротивления.
3. Запишите закон Ома для неоднородного участка цепи электрического тока.
4. Как рассчитать сопротивление при последовательном и параллельном соединении одинаковых по сопротивлению проводников?
5. Проанализируйте зависимость количества теплоты от сопротивления при различных способах соединения проводников.

Практическое занятие 6
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ И ВЕЩЕСТВЕ

Основные законы и формулы

1. Закон Кулона

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{|q_1|\cdot|q_2|}{r^2}, \text{или } F = \frac{k}{\varepsilon}\frac{|q_1|\cdot|q_2|}{r^2},$$

где ε_0 — электрическая постоянная, $\varepsilon_0 \approx 8{,}85\cdot10^{-12}$ Кл^2 /Н·м^2; ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды; $k \approx$ $\approx 9\cdot10^9$ Н·м^2/ Кл^2.

2. Напряженность электростатического поля

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

3. Поток вектора напряженности электростатического поля сквозь замкнутую поверхность S

$$\varphi_E = \oint_S \vec{E}d\vec{S} = \oint_S E_n dS.$$

4. Принцип суперпозиции электростатических полей

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

5. Электрический момент диполя

$$\vec{p}_i = |q|\vec{l}_i.$$

6. Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме

$$\oint_S \vec{E}d\vec{S} = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{n} q_i = \frac{1}{\varepsilon_0}\oint_S \rho dV.$$

7. Объемная, поверхностная и линейная плотности заряда

$$\rho = \frac{dq}{dV}; \sigma = \frac{dq}{dS}; \tau = \frac{dq}{dl}.$$

8. Напряженность поля, создаваемого равномерно заряженной бесконечной плоскостью

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

9. Напряженность поля, создаваемого двумя бесконечными параллельными и разноименно заряженными плоскостями (плоскопараллельный конденсатор)

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

10. Напряженность поля, создаваемого равномерно заряженной сферической поверхностью

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\ (r \geq R);\ E = 0\ (r < R).$$

11. Напряженность поля, создаваемого объемно заряженным шаром

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\ (r \geq R);\ E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{R^2}r'\ (r' \leq R).$$

12. Напряженность поля, создаваемого равномерно заряженным бесконечным цилиндром

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\tau}{r}\ (r \geq R);\ E = 0\ (r < R).$$

13. Циркуляция вектора напряженности электростатического поля вдоль замкнутого контура L

$$\oint_L \vec{E}d\vec{l} = \oint_L E_l dl = 0.$$

14. Потенциал электростатического поля

$$\varphi = \frac{E_n}{q_0} = \frac{A_\infty}{q_0}.$$

15. Связь между потенциалом электростатического поля и его напряженностью

$$E = -\mathrm{grad}\varphi, \text{ или } E = -\Delta\varphi.$$

16. Вектор поляризации

$$\vec{P} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \vec{p}_i}{V}.$$

17. Связь между векторами $\vec{P}$ и $\vec{E}$

$$\vec{P} = \chi\varepsilon_0\vec{E},$$

где χ — относительная диэлектрическая восприимчивость среды.

18. Связь между диэлектрической проницаемостью ε и диэлектрической восприимчивостью χ среды

$$\varepsilon = 1 + \chi.$$

19. Связь между векторами электрического смещения $\vec{D}$ и напряженностью электростатического поля

$$\vec{D} = \varepsilon_0\varepsilon\vec{E}.$$

20. Теорема Гаусса для электростатического поля в диэлектрике

$$\oint_S \vec{D}d\vec{S} = \oint_S D_n dS = \sum_{i=1}^{n} q_i,$$

где $\sum_{i=1}^{n} q_i$ — алгебраическая сумма свободных электрических зарядов, заключенных внутри поверхности S.

21. Электроемкость уединенного проводника

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

22. Электроемкость шара

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R.$$

23. Электроемкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d},$$

где S и d — площадь обкладки конденсатора и расстояние между ними, соответственно.

24. Электроемкость цилиндрического конденсатора

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0 l}{\ln\frac{r_2}{r_1}},$$

где l — длина; r_1 и r_2 — внутренний и внешний радиусы цилиндров.

25. Электроемкость сферического конденсатора

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon\frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1},$$

где r_1 и r_2 — внутренний и внешний радиусы сфер.

26. Электроемкость параллельно соединенных конденсаторов

$$C = \sum_{i=1}^{n} C_i,$$

27. Электроемкость последовательно соединенных конденсаторов

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^{n}\frac{1}{C_i}.$$

28. Энергия заряженного уединенного проводника

$$W_{\text{эл}} = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{q\varphi}{2} = \frac{q^2}{2C}.$$

29. Энергия заряженного конденсатора

$$W_{\text{эл}} = \frac{C\Delta\varphi^2}{2} = \frac{q\Delta\varphi}{2} = \frac{q^2}{2C}.$$

30. Объемная плотность энергии электростатического поля

$$\omega = \frac{W_{\text{эл}}}{V} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon E^2}{2} = \frac{ED}{2}.$$

Примеры решения задач

Задача 6.1

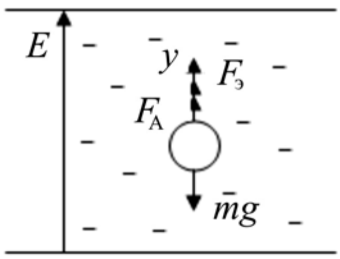
Капелька воды диаметром d находится во взвешенном состоянии в масле при напряженности электрического поля E. Поле это однородное и его напряженность направлена вертикально вверх. Определите количество элементарных зарядов, находящихся на капле.

Дано:
d; E

n — ?

Р е ш е н и е

Капля висит в масле, следовательно уравновешены силы, действующие на нее.



Запишем условие равновесия капли

$$m\vec{g} + \vec{F}_А + \vec{F}_э = 0,$$

или

$$-mg + F_А + F_э = 0.$$

Выталкивающая сила (сила Архимеда) $F_А = \rho_m gV$, где V — объем капли и $V = \frac{4}{3}\pi r^3$, так как $r = \frac{d}{2}$, то $V = \frac{\pi d^3}{6}$, или $V = \frac{\pi d^3}{6}\rho_m g$, где ρ_m — плотность масла; m — масса капли и $m = \rho_в V = \rho_в \frac{\pi d^3}{6}$.

Сила, действующая на каплю со стороны электростатического поля

$$F_э = qE,$$

где $q = |e|n$, $|e|$ — элементарный заряд; n — число элементарных зарядов.

Тогда

$$F_э = |e|nE.$$

Подставляем все формулы в условие равновесия

$$\frac{\pi d^3}{6}\rho_m g - \frac{\pi d^3}{6}\rho_в g + |e|nE = 0.$$

Преобразуя данное уравнение, найдем число элементарных зарядов

$$n = \frac{\pi d^3\left(\rho_в - \rho_m\right)}{6|e|E}.$$

Ответ: $n = \dfrac{\pi d^3\left(\rho_в - \rho_m\right)}{6|e|E}$.

Задача 6.2

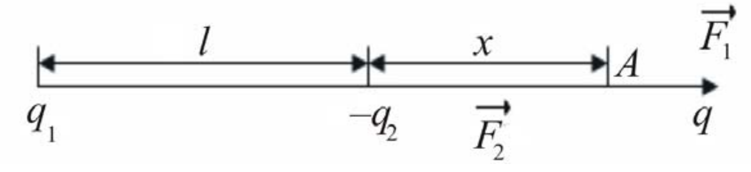
Заряды 40 нКл и –10нКл расположены на расстоянии 10 см друг от друга. Определите величину третьего заряда и его расположение, чтобы равнодействующая сила со стороны двух других зарядов, была бы равна нулю.

Дано:
$q_1 = 40 \cdot 10^{-9}$Кл
$q_2 = -10 \cdot 10^{-9}$Кл
$l = 0{,}1$ м

q, x — ?

Решение

Укажем расположение зарядов и направление сил, действующих на заряд q



Выразим силу $F_1 = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q_1 \cdot |q|}{\left(l + x^2\right)}$ и силу $F_2 = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{|q_2| \cdot |q|}{x^2}$.

Запишем условие равновесия заряда q

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0, \text{ или } F_1 + F_2 = 0,$$

тогда

$$F_1 = F_2, \text{или } \frac{|q_2|}{x^2} = \frac{q_1}{\left(l + x^2\right)}.$$

Откуда

$$x = \frac{l}{\sqrt{\frac{q_1}{|q_2|}} - 1}.$$

Точка A находится ближе к меньшему по модулю заряду, поэтому

$$x = \frac{0{,}1}{\sqrt{\frac{40}{10}} - 1} = 0{,}1(\text{м}).$$

Заряд может быть любым, так как он не входит в расчет.

Ответ: $x = 0{,}1$ м.

Задача 6.3

Разность потенциалов между двумя точками, лежащими на одной линии напряженности однородного поля, равна 2 кВ. Расстояние между этими точками — 10 см. Определите напряженность этого поля.

Дано:

$\Delta\varphi = 2 \cdot 10^{-3}$ В

$d = 0{,}1$ м

E — ?

Решение

Разность потенциалов $\Delta\varphi$ между точками 1 и 2 с потенциалами φ_1 и φ_2 связана с напряженностью электрического поля

$$\Delta\varphi = Ed,$$

где d — расстояние между точками.

Поле E в промежутке 1—2 считается постоянным. Таким образом

$$E = \frac{\Delta\varphi}{d};$$

$$E = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{0{,}1} = 20 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{В}}{\text{м}}\right).$$

Ответ: $E = 20\,\text{кВ/м}$.

Задача 6.4

Электроемкость одного конденсатора в 9 раз больше электроемкости другого. Определите, на какой из конденсаторов надо подать большее напряжение (и во сколько раз), чтобы их энергия была одинаковой.

Дано:

$C_2 = 9C_1$

$E_{\text{эл}1} = E_{\text{эл}2}$

$C_1 U_1^2 = C_2 U_2^2$

$\frac{U_2}{U_1}$ — ?

Решение

Энергия конденсатора

$$E_{\text{эл}} = \frac{C\Delta\varphi^2}{2} = \frac{CU^2}{2},$$

где C — емкость конденсатора; $U = \Delta\varphi$ — разность потенциалов, равная напряжению.

Если конденсаторы имеют одинаковую энергию, то

Поэтому

$$\frac{U_2}{U_1} = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} = 3.$$

Ответ: на конденсатор меньшей емкости надо подать напряжение в 3 раза большее, чем на первый.

Задачи для самостоятельного решения

9.15; 9.18; 9.40; 9.76; 9.84; 9.117.

Лекция 7
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ И ВЕЩЕСТВЕ. ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

7.1. Магнитное поле и его характеристики

В пространстве, окружающем токи и постоянные магниты, возникают силовые поля, которые называются магнитными.

Магнитное поле — одна из форм проявления электромагнитного поля, особенность которого состоит в том, что это поле действует только на движущиеся частицы и тела, обладающие электрическим зарядом, а также на намагниченные тела независимо от состояния их движения.

Магнетик — термин, применяемый к веществам при рассмотрении их магнитных свойств.

Все тела при внесении в магнитное поле создают собственное магнитное поле — намагничиваются. Магнитные свойства вещества определяются магнитными свойствами его частиц. Все магнетики разделяют на три группы: диа- , пара- и ферромагнетики.

Гипотеза Ампера состоит в том, что магнитные свойства постоянных магнитов обусловлены круговыми токами в них. Позже с развитием атомной физики было показано, что природа таких круговых токов объясняется вращением электронов вокруг собственной оси и вокруг ядра.

При исследовании магнитных полей используют замкнутый плоский контур с током — рамка с током (рис. 7.1).

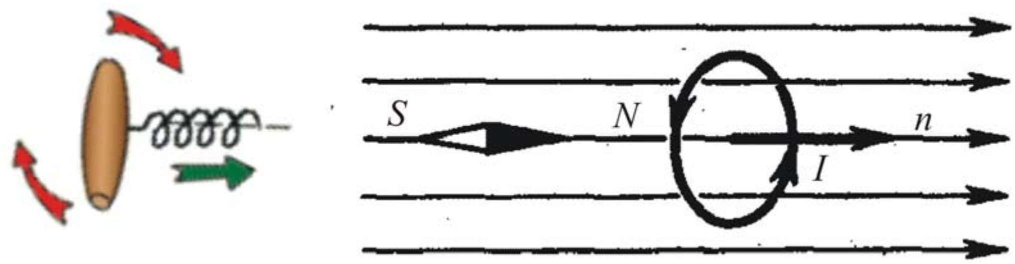


Рис. 7.1

Размеры такой рамки с током много меньше расстояния до токов, образующих магнитное поле. Нормаль к рамке с током характеризует ориентацию рамки в пространстве. Положительное направление нормали связано с направлением тока правилом правого винта или буравчика, положительное направление нормали — направление поступательного движения винта, вращающегося в направлении тока, текущего в рамке. За направление магнитного поля принимается положительная нормаль, направление которой совпадает с направлением силы, действующей на северный полюс магнитной стрелки.

Подобно электростатическому магнитное поле описывается рядом величин.

Аналогом напряженности электрического поля $\vec{E}$ является магнитная индукция $\vec{B}$, аналогом электрического смещения $\vec{D}$ напряженность магнитного поля $\vec{H}$. Магнитная индукция $\vec{B}$, характеризующая результирующее магнитное поле в веществе, зависит от макроскопических токов в проводниках, создающих это поле, так и от микроскопических токов — молекулярно-атомных токов в веществе. Поэтому величина $\vec{B}$ различна в разных веществах. Напряженность поля $\vec{H}$ зависит только от макроскопических токов.

Модуль вектора магнитной индукции равен отношению максимального момента сил $M_{\max}$, действующих на контур с током, к произведению силы тока J на площадь контура S:

$$B = \frac{M_{\max}}{JS}. \tag{7.1}$$

Единица магнитной индукции — Тесла ($[\mathrm{B}]^{\text{СИ}} = \text{Тл}$).

Магнитное поле подчиняется принципу суперпозиции.

Если в данной точке пространства n различных источников создают магнитные поля, индукции которых $\vec{B}_1$, $\vec{B}_2, \ldots, \vec{B}_n$, то результирующая индукция в этой точке равна

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \ldots + \vec{B}_n = \sum_{i=1}^{n} \vec{B}_i. \tag{7.2}$$

Магнитное поле называется однородным в некоторой области пространства, если векторы магнитной индукции во всех точках этой области одинаковы по величине и направлению.

Если направление поступательного движения правого винта совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращательного движения винта в каждой точке совпадает с направлением вектора магнитной индукции.

Линии магнитной индукции — линии, касательные к которым направлены так же, как и вектор $\vec{B}$ данной точки (рис. 7.2).

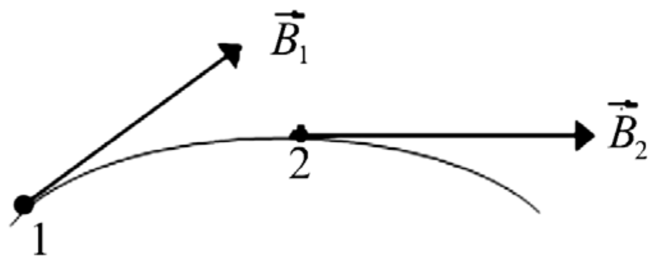


Рис. 7.2

Линии магнитной индукции всегда замкнуты, что характеризует вихревое соленоидальное поле — поле с замкнутыми силовыми линиями. Для полей с замкнутыми силовыми линиями, т.е. для магнитного поля, выполняется теорема Гаусса, устанавливающая факт отсутствия магнитных зарядов

$$\oint_S \vec{B}d\vec{S} = 0; \quad \oint_L \vec{B}d\vec{l} \neq 0 \tag{7.3}$$

Относительная магнитная проницаемость μ — величина, характеризующая магнитные свойства вещества, равная отношению модуля вектора магнитной индукции B в среде к модулю вектора индукции B_0 в той же точке пространства в вакууме

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

Для вакуума $\mu = 1$, у диамагнетиков $\mu < 1$, у парамагнетиков $\mu > 1$.

Запишем формулу, выражающую связь величин $\vec{B}$ и $\vec{H}$

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \tag{7.4}$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ — магнитная постоянная; Гн — единица измерения индуктивности.

Бесконечно малый магнитный поток (поток магнитной индукции) $d\Phi$ через поверхность — скалярное произведение $\vec{B}$ на $d\vec{S}$

$$d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{S} = B_n \cdot dS = B \cdot \cos\alpha \cdot dS,$$

где $\vec{n}$ — внешняя нормаль к dS; α — угол между $\vec{B}$ и $\vec{n}$; B_n — проекция $\vec{B}$ на $\vec{n}$ (рис. 7.3).

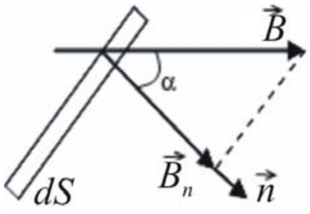


Рис. 7.3

Магнитный поток через произвольную поверхность

$$\Phi = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \oint_S B_n \cdot dS. \qquad (7.5)$$

Единица измерения магнитного потока — вебер ($[\Phi]^{\text{СИ}}$ = Вб).

7.2. Закон Ампера. Взаимодействие параллельных токов

Закон Ампера: бесконечно малая сила $d\vec{F}$, с которой магнитное поле действует на элемент проводника $d\vec{l}$ с током J, равна

$$d\vec{F} = J\left[\vec{dl} \cdot \vec{B}\right], \qquad (7.6)$$

где $\left[d\vec{l} \cdot \vec{B}\right]$ — векторное произведение.

Если α — угол между $d\vec{l}$ и $\vec{B}$, то

$$dF = J \cdot B \cdot dl \cdot \sin\alpha. \qquad (7.7)$$

Направление силы Ампера определяется по правилу левой руки.

Если ладонь левой руки расположить так, чтобы вектор $\vec{B}$ входил в нее, четыре вытянутых пальца направить вдоль тока в проводнике, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы Ампера.

Закон Ампера позволяет объяснить, почему проводники с током одинакового направления притягиваются, а разного направления — отталкиваются. Направление силы $d\vec{F}_1$ (рис. 7.4), с которой магнитное поле $\vec{B}$ действует на участок $d\vec{l}$ второго тока, как и направление силы $d\vec{F}_2$ определяется по правилу левой руки.

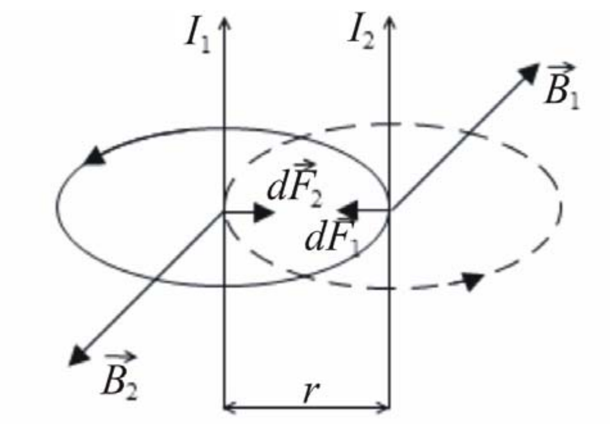


Рис. 7.4

Для токов, текущих в одном направлении, силы $d\vec{F}$ направлены в противоположные стороны — происходит отталкивание

$$dF = \mu\mu_0 \frac{J_1 J_2}{2\pi r} dl, \tag{7.8}$$

где r — кратчайшее расстояние между проводниками.

7.3. Закон Био — Савара — Лапласа

Элемент проводника $d\vec{l}$ с током J создает в точке A индукцию поля $d\vec{B}$ (рис. 7.5)

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{J\left[d\vec{l} \cdot \vec{r}\right]}{r^3}, \tag{7.9}$$

где $\vec{r}$ — радиус-вектор, проведенный из элемента $d\vec{l}$ в точку A; $\left[d\vec{l} \cdot \vec{r}\right]$ — векторное произведение $d\vec{l}$ и $\vec{r}$.

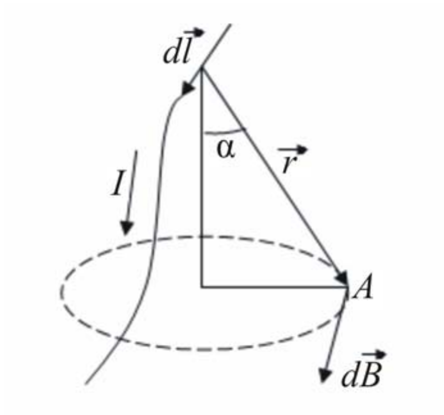


Рис. 7.5

Если α — угол между $d\vec{l}$ и $\vec{r}$, то можно записать

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{J \cdot dl \cdot \sin\alpha}{r^2}, \tag{7.10}$$

или

$$B = \oint_L dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \oint_L \frac{J \sin\alpha}{r^2} dl .$$

Закон Био — Савара — Лапласа (7.10): величина магнитной индукции зависит только от элемента тока Jdl, создающего магнитное поле, и от положения рассматриваемой точки в этом поле.

Используя закон Био — Савара — Лапласа можно определить индукцию поля, созданного бесконечно длинным проводником на расстоянии r от него

$$B = \mu\mu_0 \frac{J}{2\pi R};$$

от соленоида

$$B = \mu\mu_0 J \cdot n,$$

где $n = \dfrac{N}{l}$ — число витков, приходящихся на единицу длины.

Сила Ампера может совершать работу. Пусть проводник длиной l свободно перемещается в однородном магнитном поле. По проводнику течет ток J. Сила Ампера $F = J \cdot B \cdot l$. Проводник перемещается на dx и работа, совершаемая магнитным полем, равна

$$dA = F \cdot dx = J \cdot B \cdot l \cdot dx = J \cdot B \cdot dS = J \cdot d\Phi. \qquad (7.11)$$

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле равна произведению силы тока на изменение магнитного потока.

Каждый проводник с током создает в окружающем пространстве магнитное поле. Электрический же ток представляет собой упорядоченное движение электрических зарядов. Поэтому можно сказать, что любой движущийся в вакууме или среде заряд образует вокруг себя магнитное поле

$$\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{q \cdot \left[\vec{V}\vec{r}\right]}{r^3}, \qquad (7.12)$$

где $\vec{r}$ — радиус-вектор, проведенный от заряда q к точке наблюдения M (рис. 7.6).

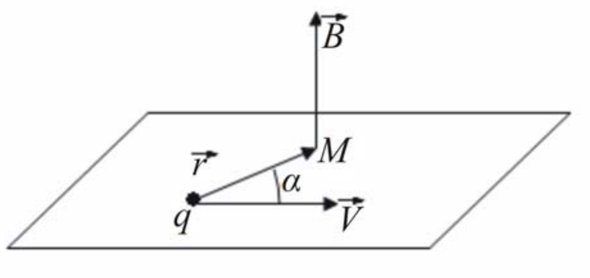


Рис. 7.6

Согласно (7.12) $\vec{B}$ направлен перпендикулярно плоскости, в которой расположены векторы $\vec{V}$ и $\vec{r}$, его направление совпадает с направлением поступательного движения правого винта при его кратчайшем повороте от $\vec{V}$ к $\vec{r}$.

Модуль магнитной индукции можно вычислить по формуле:

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{qV}{r^2}\sin\alpha, \tag{7.13}$$

где α — угол между $\vec{V}$ и $\vec{r}$.

7.4. Сила Лоренца

Магнитное поле действует не только на проводники с током, но и на отдельные заряды, движущиеся в магнитном поле. Сила, действующая на электрический заряд q, движущийся в магнитном поле со скоростью $\vec{V}$, называется силой Лоренца и выражается формулой

$$\vec{F}_{\text{Л}} = q\left[\vec{V}\cdot\vec{B}\right], \tag{7.14}$$

где $\vec{B}$ — индукция магнитного поля.

Модуль силы Лоренца равен

$$F_{\text{Л}} = q\cdot B\cdot V\cdot\sin\alpha, \tag{7.15}$$

где α — угол между $\vec{V}$ и $\vec{B}$.

Направление силы Лоренца для положительного заряда определяется по правилу левой руки, аналогично определению направления силы Ампера.

Сила Лоренца не совершает работу, так как постоянное магнитное поле не изменяет кинетической энергии, т.е. скорости частицы, изменяя только ее направление.

Если заряженная частица движется в электрическом и магнитном полях, то сила, действующая на частицу, определяется как сумма сил, действующих на нее со стороны этих полей

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\left[\vec{V}\cdot\vec{B}\right]. \tag{7.16}$$

Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях используется для работы разнообразных приборов и устройств. Среди них: электронно-лучевые трубки, масс-спектроскопы для определения массы ионов, электронные микроскопы, ускорители заряженных частиц, магнитогидродинамические генераторы и многие другие.

7.5. Явление электромагнитной индукции. Закон Фарадея

В замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции, охватываемого этим контуром, возникает электрический ток, получивший название индукционного.

Обобщая результаты многочисленных опытов, Фарадей пришел к выводу, что индукционный ток возникает всегда, когда происходит изменение сцепленного с контуром потока магнитной индукции. Причем значение индукционного тока совершенно не зависит от способа изменения потока магнитной индукции, а определяется лишь скоростью его изменения.

Закон электромагнитной индукции (Фарадея): ЭДС индукции в замкнутом контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \tag{7.17}$$

Знак «минус» показывает, что увеличение потока $\left(\frac{d\Phi}{dt} > 0\right)$ вызывает ЭДС $\varepsilon_i < 0$, т.е. поле индукционного тока направлено навстречу потоку; уменьшение потока $\left(\frac{d\Phi}{dt} < 0\right)$вызывает $\varepsilon_i > 0$, т.е. направление потока и поля индукционного тока совпадают. Знак «минус» в (7.17) определяется правилом Ленца — общим правилом для нахождения направления индукционного тока.

Правило Ленца: индукционный ток, возникающий в замкнутом контуре, всегда имеет такое направление, что созданный им магнитный поток через площадь, ограниченную контуром, стремится компенсировать то изменение внешнего магнитного поля, которое вызвало этот ток.

Изменяясь во времени, магнитное поле порождает электрическое поле, имеющее другую структуру. Оно не связано непосредственно с электрическими зарядами, а линии напряженности электрического поля представляют собой замкнутые линии. Такое электрическое поле называется вихревым или соленоидальным и порождает магнитное.

Работа вихревого электрического поля при перемещении единичного положительного заряда вдоль замкнутого неподвижного проводника численно равна ЭДС индукции в этом проводнике.

В движущемся в постоянном магнитном поле проводнике ЭДС индукции обусловлена не вихревым электрическим полем, а силой Лоренца

$$\varepsilon_i = B \cdot l \cdot V \cdot \sin\alpha. \qquad (7.18)$$

Токи Фуко — индукционные токи, возникающие в массивных проводниках из-за того, что их сопротивление мало.

Электрический ток, текущий в замкнутом контуре, создает вокруг себя магнитное поле, индукция которого по закону Био — Савара — Лапласа, пропорциональна току. Поэтому сцепленный с контуром магнитный поток Ф пропорционален току в контуре

$$\Phi = LJ, \qquad (7.19)$$

где L — коэффициент пропорциональности, который называется **индуктивностью контура.**

7.6. Явление самоиндукции. Индуктивность

При изменении силы тока в контуре будет изменяться и сцепленный с ним магнитный поток, следовательно, в контуре будет индуцироваться ЭДС.

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

Единица индуктивности — генри ($[L]^{\text{СИ}}$ = Гн).

Для бесконечно длинного соленоида индуктивность рассчитывается по формуле

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l}, \qquad (7.20)$$

где μ — относительная магнитная проницаемость вещества, из которого изготовлен сердечник; N — число витков соленоида; S — площадь; l — длина соленоида.

Если контур не деформируется и магнитная проницаемость среды не изменяется, т.е. L = const, то

$$\varepsilon_S = -L\frac{dJ}{dt}, \qquad (7.21)$$

где знак «минус», обусловленный правилом Ленца, показывает, что наличие индуктивности в контуре приводит к замедлению изменения силы тока в нем.

Если ток со временем увеличивается, то $\frac{dJ}{dt} > 0$ и $\varepsilon_S > 0$, т.е. индукционный ток имеет такое же направление, как и убывающий ток в контуре, и замедляет его убывание. Таким образом, контур, обладая определенной индуктивностью, приобретает электрическую инертность, заключающуюся в том, что любое изменение тока тормозится тем сильнее, чем больше индуктивность контура.

7.7. Энергия магнитного поля

Проводник, по которому протекает электрический ток, всегда окружен магнитным полем, причем магнитное поле появляется и исчезает вместе с появлением и исчезновением тока. Магнитное поле, подобно электрическому, является носителем энергии

$$E_{\text{м}} = \frac{LJ^2}{2}. \tag{7.22}$$

Исследование свойств переменных магнитных полей, в частности распространение электромагнитных волн, явилось доказательством того, что энергия магнитного поля локализована в пространстве.

Энергию магнитного поля можно представить как функцию величин, характеризующих это поле в окружающем пространстве. Для частного случая — однородного магнитного поля внутри длинного соленоида — можно записать

$$E_{\text{м}} = \frac{1}{2}\mu_0\mu\frac{N^2 I}{l}S, \tag{7.23}$$

или

$$E_{\text{м}} = \frac{B^2}{2\mu_0\mu}V = \frac{BH}{2}V, \tag{7.24}$$

где V — объем соленоида.

Магнитное поле соленоида однородно и сосредоточено внутри его, поэтому энергия, заключенная в объеме соленоида, называется объемной плотностью энергии

$$\omega_{\text{м}} = \frac{E_{\text{м}}}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} = \frac{\mu_0\mu H^2}{2} = \frac{BH}{2}. \tag{7.25}$$

Вопросы для самостоятельного рассмотрения

1. Физическая природа диамагнетизма.
2. Физическая природа парамагнетизма.
3. Физическая природа ферромагнетизма.
4. Запишите формулы, определяющие временные зависимости экстратоков замыкания и размыкания и приведите соответствующие им графики.
5. Что такое явление взаимной индукции? Закон Фарадея, определение коэффициентов взаимной индукции.
6. Принцип работы, устройство и основные характеристики трансформатора
7. Перечислите, от чего зависят вихревые токи. Приведите примеры их использования и устранения их вредных воздействий.
8. Что такое ток и плотность тока смешения?
9. Запишите полную систему уравнений Максвелла для электромагнитного поля в интегральной форме и определите физический смысл каждого уравнения.
10. Запишите полную систему уравнений Максвелла для электромагнитного поля в дифференциальной форме и определите физический смысл каждого уравнения.

Практическое занятие 7
ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Основные законы и формулы

1. Сила тока

$$I = \frac{dq}{dt};\ I = \frac{\Delta q}{\Delta t},$$

где Δq — заряд, переносимый через произвольное сечение проводника за время Δt.

2. Плотность тока

$$\vec{j} = \frac{di}{dS}\vec{n}; j = \frac{di}{dS}; j = \frac{I}{S},$$

где $\vec{n}$ — единичный вектор, определяющий скорость направленного движения положительных зарядов; S — площадь поперечного сечения проводника.

3. Электродвижущая сила (ЭДС), действующая в цепи

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q_0}; \varepsilon = \oint E_{\text{ст}} dl,$$

где $A_{\text{ст}}$ и $E_{\text{ст}}$ — работа и напряженность сторонних (неэлектростатических) полей соответственно.

4. Закон Ома для однородного участка цепи

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

где U — напряжение на участке цепи; R — сопротивление участка цепи.

5. Зависимость сопротивления проводника от его геометрических размеров

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

где ρ — удельное сопротивление проводника; l и S — его длина и площадь поперечного сечения, соответственно.

6. Закон Ома в дифференциальной форме

$$\vec{j} = \gamma \vec{E},$$

где γ — удельная проводимость проводника.

7. Зависимость сопротивления проводника от температуры

$$R = R_0(1 + \alpha t),$$

где R_0 — сопротивление при $t = 0$ °C; α — температурный коэффициент сопротивления.

8. Мощность тока

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

9. Закон Джоуля — Ленца в интегральной форме

$$dQ = IUdt = I^2 Rdt = \frac{U^2}{R} dt.$$

10. Закон Джоуля — Ленца в дифференциальной форме

$$\omega = jE = \gamma E^2.$$

11. Закон Ома для неоднородного участка цепи (обобщенный закон Ома)

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}}{R},$$

где φ_1 и φ_2 — потенциалы точек 1 и 2 участка цепи.

12. Первое правило Кирхгофа

$$\sum_i I_i = 0.$$

13. Второе правило Кирхгофа

$$\sum_i I_i R_i = \sum_k \varepsilon.$$

Примеры решения задач

Задача 7.1

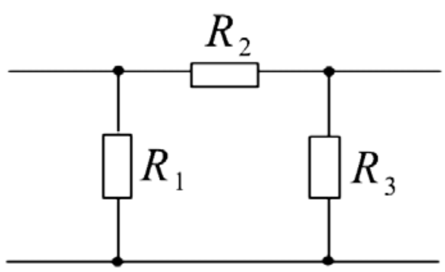
На вход электрической цепи подано напряжение U_1 = 100 В. Напряжение на выходе U_3 = 40 В. Через сопротивление R_2 (*см.* рис.) проходит ток I = 1 А. Если на выход цепи подать напряжение U_3' = 60 В, то на входе напряжение будет U_1 = 15 В. Определите сопротивления R_1, R_2, R_3.

Дано:
U_1 = 100 В; I_2 = 1 А.
U_3 = 40В; U_3' = 60 В.
U_1 = 15 В.

R_1; R_2; R_3 — ?

Решение

В первом случае падение напряжения на сопротивлении R_2 равно $U_2 = U_1 - U_3 = 100 - 40 = 60$ (В).



Это означает, что $R_2 = \dfrac{U_2}{I_2} = \dfrac{60}{1} = 60$ (Ом). Так как через сопротивление R_3 в первом случае идет такой же ток, что и через сопротивление R_2, то $R_3 = \dfrac{U_3}{I_2} = \dfrac{40}{1} = 40$ (Ом).

Если на выход цепи подано напряжение U_3', то падение напряжения на сопротивлении R_2 равно $U_2' = U_3' - U_1' = 60 - 15 = 45$ (В). При этом $\frac{U_2'}{U_1} = \frac{R_2}{R_1}$ и $R_1 = \frac{U_1 R_2}{U_2} = \frac{100 \cdot 60}{25} = 20$ (Ом).

Ответ: $R_1 = 20$ Ом; $R_2 = 60$ Ом; $R_3 = 40$ Ом.

Задача 7.2

Гальванический элемент дает на внешнее сопротивление R_1 ток I_1, а на сопротивление R_2 — ток I_2. Определите ток короткого замыкания.

Дано:
I_1; R_1; I_2; R_2

$I_{к.з}$ — ?

Решение

Сила тока короткого замыкания определяется так: $I_{к.з} = \frac{\varepsilon}{r}$, где ε и r — ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока соответственно.

По закону Ома для замкнутой цепи $I_1 = \frac{\varepsilon}{R_1 + r}$ и $I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2 + r}$.

Решая два последних уравнения относительно ε и r, получаем

$$\varepsilon = \frac{I_1 I_2 (R_2 - R_1)}{I_2 - I_1}; \; r = \frac{I_2 R_2 - I_1 R_1}{I_2 - I_1}.$$

$$I_{к.з} = \frac{\varepsilon}{r} = \frac{I_1 I_2 (R_2 - R_1)}{I_2 R_2 - I_1 R_1}.$$

Ответ: $I_{к.з} = \frac{\varepsilon}{r} = \frac{I_1 I_2 (R_2 - R_1)}{I_2 R_2 - I_1 R_1}$.

Задача 7.3

Определите длину проводника l, имеющего площадь поперечного сечения S для изготовления нагревателя, который за время τ может нагреть массу воды m от начальной t_1 до конечной температуры t_2. Напряжение в сети — U, КПД кипятильника — η, удельное сопротивление проводника — ρ, удельная теплоемкость воды — c.

Дано:
S; τ; t_1; t_2; η, ρ

l — ?

Р е ш е н и е

Необходимое для нагревания воды количество теплоты

$$Q_1 = cm(t_2 - t_1).$$

Мощность нагревателя

$$P = \frac{Q_2}{t} = \frac{U^2}{R}, \text{ или } Q_2 = \frac{U^2}{R}\tau.$$

Определим КПД кипятильника

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_2}, \text{ или } \eta = \frac{cm(t_2 - t_1)R}{U^2\tau}.$$

Далее определим сопротивление проводника

$$R = \frac{\eta U^2 \tau}{cm(t_2 - t_1)}.$$

Из определения сопротивления проводника $R = \frac{\rho l}{S}$ выразим его длину $l = \frac{RS}{\rho}$ или окончательно

$$l = \frac{\eta U^2 \tau S}{cm\rho(t_2 - t_1)}.$$

Ответ: $l = \frac{\eta U^2 \tau S}{cm\rho(t_2 - t_1)}$.

Задачи для самостоятельного решения

10.17; 10.26; 10.30; 10.33; 10.36; 10.37; 10.48; 10.53; 10.60; 10.62;10.82; 10.86.

Практическое занятие 8
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Основные законы и формулы

1. Магнитный момент рамки с током

$$\vec{P}_m = IS\vec{n},$$

где S — площадь рамки; $\vec{n}$ — вектор единичной внешней нормали.

2. Вращательный момент, действующий на рамку с током в магнитном поле

$$\vec{M} = \left[\vec{P}_m\vec{B}\right].$$

3. Связь между индукцией и напряженностью магнитного поля

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H},$$

где μ и μ_0 — относительная магнитная проницаемость среды и магнитная const, соответственно.

4. Закон Био — Савара — Лапласа для элемента проводника с током

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0\mu}{4\pi} I \frac{\left[d\vec{l} \cdot \vec{r}\right]}{r^3} \text{ — векторная форма;}$$

$$dB = \frac{\mu_0\mu I dl \sin\alpha}{4\pi r^2} \text{ — скалярная форма.}$$

5. Магнитная индукция поля «прямого» тока

$$B = \frac{\mu_0\mu I}{2\pi R}.$$

6. Магнитная индукция поля в центре кругового проводника с током

$$B = \mu\mu_0\frac{I}{2R}.$$

7. Магнитная индукция поля на оси соленоида

$$B = \mu\mu_0 In.$$

8. Закон Ампера

$$d\vec{F} = I\left[d\vec{l} \cdot \vec{B}\right] \text{ — векторная форма;}$$

$$dF = IBdl\sin\alpha \text{ — скалярная форма.}$$

9. Магнитное поле свободно движущегося заряда

$$B=\frac{\mu\mu_0 q\left[\vec{V}\vec{r}\right]}{4\pi r^3}\text{ — векторная форма;}$$

$$B=\frac{\mu\mu_0 qV\sin\alpha}{4\pi r^2}\text{ — скалярная форма.}$$

10. Сила Лоренца

$$\vec{F}=q\left[\vec{V}\vec{B}\right]\text{ — векторная форма;}$$

$$F=qBV\sin\alpha\text{ — скалярная форма.}$$

11. Закон полного тока для магнитного поля в вакууме (теорема о циркуляции вектора $\vec{B}$)

$$\oint_L \vec{B}d\vec{l}=\oint_L B_l dS=\mu_0\sum_{i=1}^{n} I_i.$$

12. Поток вектора магнитной индукции (магнитный поток) сквозь произвольную поверхность

$$\Phi_B=\int_S \vec{B}d\vec{S}=\int_S B_n dS.$$

13. Теорема Гаусса для поля с магнитной индукцией B

$$\oint_S \vec{B}d\vec{S}=\oint_S B_n dS=0.$$

14. Работа по перемещению замкнутого контура в магнитное поле

$$dA=Id\Phi.$$

15. Закон Фарадея

$$\varepsilon_i=-\frac{d\Phi}{dt}.$$

16. ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_S=-L\frac{dI}{dt}.$$

17. Индуктивность бесконечного длинного соленоида, имеющего N витков

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

18. Энергия магнитного поля

$$E_m = \frac{LI^2}{2}.$$

19. Объемная плотность энергии магнитного поля

$$\omega = \frac{E_m}{V} = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{BH}{2}.$$

Примеры решения задач

Задача 8.1

Проволочный виток с диаметром 20 см помещен в однородное магнитное поле, индукция которого равна 10^{-2} Тл. При пропускании по витку тока в 2 А он повернулся на 90º. Определите, какой момент сил подействовал на виток.

Дано:
$B = 10^{-2}$ Тл
$I = 2$ А
$d = 0{,}2$ м
$\alpha = 90^\circ$

M — ?

Р е ш е н и е

Модуль момента сил, действующих на виток с током в магнитном поле, $M = P_m BS \sin\alpha$, где $P_m = IS$ — магнитный момент витка; S — площадь витка; α — угол между векторами $\vec{P}_m$ и $\vec{B}$.

Так как $\alpha = 90^\circ$, а площадь контура $S = \frac{\pi d^2}{4}$, то модуль момента сил

$$M = \frac{I\pi d^2}{4} B; \; M = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}2^2 \cdot 10^{-2}}{4} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ (Н·м)}$$

Ответ: $M = 6 \cdot 10^{-5}$ Н·м.

Задача 8.2

Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией $B = 4$ мТл. Найдите период T обращения электрона.

Дано:
$|e| = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл
$m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг
$B = 4 \cdot 10^{-3}$ Тл

T — ?

Р е ш е н и е

Период обращения электрона, движущегося по окружности под действием силы Лоренца, связан с угловой скоростью выражением $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

Учитывая, что линейная скорость $V = \omega R$, а сила Лоренца является центростремительной силой: $F_л = m\alpha_ц$,
можно записать

$$|e| BV = \frac{mV^2}{R}.$$

Далее определяем скорость

$$V = \frac{|e| BR}{m}.$$

Получим выражение для периода

$$T = \frac{2\pi m}{|e| B}.$$

$$T = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31}}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 4 \cdot 10^{-3}} = 8{,}9 \cdot 10^{-9} \text{ (с)}$$

Ответ: $T = 8{,}9$ нс.

Задача 8.3

Магнитный поток через контур из проволоки с сопротивление 1 Ом равномерно увеличивается от 0 до 10^{-4} Вб. Какой заряд при этом прошел через поперечное сечение проводника?

Дано:
$R = 1$ Ом
$\Phi_2 = 10^{-4}$ Вб

Δq — ?

Р е ш е н и е

При равномерном увеличении магнитного потока через $\Phi_1 = 0$ Вб контур и сила тока в цепи постоянны, в этом случае электрический заряд $\Delta q = I\Delta t$.

Следовательно, нужно найти силу тока в цепи.

По закону электромагнитной индукции модуль ЭДС определяется как

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

где Δt — время изменения магнитного потока.

По закону Ома для замкнутой цепи сила тока

$$I = \frac{\varepsilon_i}{R},$$

где R — полное сопротивление цепи.

Окончательно

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\Delta\Phi}{R\Delta t};\ \ \Delta q = I\Delta t = \frac{\Delta\Phi}{R};$$

$$\Delta q = \frac{10^{-4}}{1} = 10^{-4}\ (\text{Кл}).$$

Ответ: $\Delta q = 10^{-4}$ Кл.

Задача 8.4

Найдите энергию магнитного поля соленоида, в котором при силе тока 10 А возникает магнитный поток 0,5 Вб.

Дано:
$I = 10$ А
$\Phi = 0{,}5$ Вб

E_m — ?

Р е ш е н и е

Зная силу тока I и магнитный поток Φ, можно найти индуктивность соленоида

$$L = \frac{\Phi}{l}.$$

Подставляя это выражение в формулу для энергии магнитного поля тока, находим энергию магнитного поля соленоида

$$E_m = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi I}{2}.$$

$$E_m = \frac{0{,}5 \cdot 10}{2} = 2{,}5 \text{ (Дж)}.$$

Ответ: $E_m = 2{,}5$ Дж.

Задачи для самостоятельного решения

11.19; 11.34; 11.35; 11.41; 11.51; 11.53; 11.58; 11.59; 11.62; 11.66; 11.67; 11.80; 11.81; 11.82; 11.92; 11.93; 11.94; 11.96.

Список рекомендуемой литературы

1. *Бабаев, В.С.* Корректируюший курс физики : учебное пособие / В.С. Бабаев, Ф.Ф. Легуша. — СПб : Лань, 2011. — 160 с.

2. *Бухман, Н.С.* Упражнения по физике : учебное пособие. — 2-е изд., испр. — СПб : Лань, 2008. — 96 с.

3. *Калашников, Н.П.* Физика. Интернет-тестирование базовых знаний : учебное пособие. — 2-е изд., стер. / Н.П. Калашников, Н.М. Кожевников. — СПб : Лань, 2010. — 160 с.

4. *Калашников, Н.П.* Графические методы решения задач по молекулярно-кинетической теории идеальных газов : учебное пособие. — 2-е изд., испр. / Н.П. Калашников, В.П. Красин. СПб : Лань, 2011. — 192 с.

5. *Оселедчик, Ю.С.* Физика. Модульный курс (для технических вузов) : учебное пособие для вузов / Ю.С. Оселедчик, П.И. Самойленко, Т.Н. Точилина. — М. : Юрайт, 2010. — 526 с.

6. *Тополов, В.Ю.* Анализ ответов при решении задач по общей физике : учебное пособие / В.Ю. Тополов, А.С. Богатин. — СПб : Лань, 2011. — 80 с.

7. *Трофимова, Т.И.* Краткий курс физики с примерами решения задач. — М. : КноРус, 2010. — 280 с.

8. *Трофимова, Т.И.* Физика : учебник для образовательных учреждений высшего профессионального образования. — М. : Академия, 2012. — 320 с.

9. *Трофимова, Т.И.* Физика в таблицах и формулах : учебное пособие для вузов по техническим специальностям. — М. : Академия, 2010. — 325 с.

10. *Фирганг, Е.В.* Руководство к решению задач по курсу общей физики : учебное пособие. — 4-е изд., испр. СПб : Лань, 2009. — 352 с.

Приложение 1

Контрольное задание по теме «Физические основы механики. Молекулярная физика и термодинамика идеальных и реальных газов. Электричество и магнетизм»

№ варианта	§ 1	§ 2	§ 3	§ 4	§ 5	§ 6	§ 9	§ 10	§ 11	§ 17
1	2 (а, б)	23 (а, б)	11	1	20	5 (а, б)	20	3	18	10
2	43	2	20	4	31	6	21	13	2	7 (в)
3	9	97	21	20	38	7	63	8	7	3
4	4 (а, б)	32	9	6	21	24	23	20	30	11
5	16	100	5	15	35	9	74 (а)	5	10	5
6	17	130	37	8	48	19 (а)	64	15	6	22
7	41	95	13	16	9	11	29	11	14	7 (д)
8	5 (а, б)	22	38	10	27	23 (а)	35 (а)	25	21	9 (а)
9	42	127	28	22	2	14	39	2	8	1
10	48 (а, б)	78	15	5	26	6	57 (а)	16	33	12
11	10	101	22	13	4	17	59	21	12	18
12	6 (а)	38	17	7	12	5 (д—ж)	61	12	5	7 (г)
13	8	40	18	10	45	27	56	7	15 (б)	20
14	44	21 (а, б)	19	17	14	8	38	27	1	21
15	2 (а, б)	17	35	7	15	25	55	10	20	6
16	41	102	39	4	44	10	62	24	46	23
17	5 (а, б)	133	12	9	22	14	35 (в)	4	11	24
18	43	98	33	1	28	9	50	23	3	7 (б)
19	46 (а, б)	62	10	18	42	21	87	11	15 (а)	2
20	33	3	14	6	8	16	58	19	36	9 (б)
21	47	20	36	14	47	12	37	6	29	4
22	45	99	32	8	7	26	57 (б)	22	9	13
23	4 (а, б)	1	5	12	36	8	40	9	13	7 (е)
24	42	96	7 (а, б)	5	10	5 (в, г)	54	14	17	8
25	6 (а)	129	8	19	43	22	35 (б)	1	4	9 (в)

Примечание. Задание см. *Волькенштейн, В.С.* Сборник задач по общему курсу физики. Изд. 3-е, испр. и доп. — СПб : Книжный мир, 2005. — 328 с.

Приложение 2

Вариант тестовых заданий коллоквиума «Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Электродинамика»

Задание 1 (1,5 балла)

Однородный диск массой 1 кг и радиусом 0,2 м вращается с частотой 5 об/с. Определите, какую работу необходимо совершить для увеличения частоты вращения диска до 10 об/с.

I. 1,5 π^2 Дж; II. 3π^2 Дж; III. 13,5π^2 Дж; IV. 27π^2 Дж.

Задание 2 (1 балл)

Определите, в каком промежутке времени движение тела, заданное уравнением $x = 4t - t^2$ (все величины выражены в СИ), равнозамедленное.

I. От 0 до 4 с; II. От 0 до 8 с; III. От 2 до 8 с; IV. От 0 до 2 с.

Задание 3 (1 балл)

Гиря массой 1 кг поднята над землей на высоту 3 м. Определите потенциальную энергию гири, если потенциальная энергия на высоте 10 м принята за 0 Дж. Ускорение свободного падения принять равным 10 м/с^2.

I. –30 Дж; II. 80 Дж; III. 100 Дж; IV. –70 Дж.

Задание 4 (0,5 балла)

Закон сохранения импульса выполняется в …

I. Инерциальных системах; II. Неинерциальных системах; III. Системах, движущихся с постоянным по направлению и модулю ускорением; IV. Замкнутых системах.

Задание 5 (1 балл)

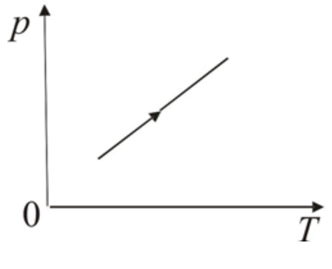
Масса движущегося электрона вдвое больше его массы покоя. Определите кинетическую энергию электрона и его импульс. Масса покоя электрона $m_0 \approx 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг; скорость света в вакууме $\approx 3 \cdot 10^8$ м/с.

I. $\approx 8{,}2 \cdot 10^{-14}$ Дж; $4{,}7 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$. II. $8{,}2 \cdot 10^{-14}$ Дж; $5{,}2 \cdot 10^{-31} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$.

III. $\approx 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж; $3{,}2 \cdot 10^{-19} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$. IV. $\approx 4{,}1 \cdot 10^{-15}$ Дж; $3{,}8 \cdot 10^{-18} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$.

Задание 6 (1,5 балла)

Показана зависимость давления идеального газа от абсолютной температуры. Изменяется ли при этом объем газа?



I. Не изменяется;
II. Уменьшается;
III. Увеличивается;
IV. Необходимо знать масштаб по осям p и T.

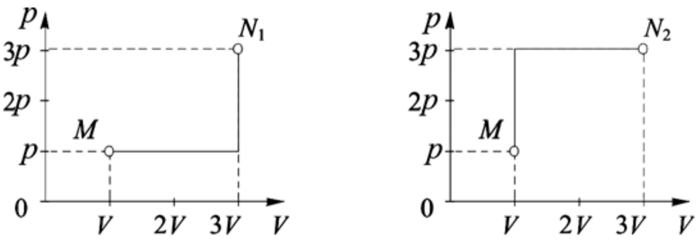
Задание 7 (1 балл)

Температуры кислорода и водорода, содержащихся в воздухе, одинаковы. Сравните средние квадратичные скорости движения молекул этих газов, т.е. $V_к$ и $V_в$.

I. $V_в > V_к$; II. $V_в < V_к$; III. $V_в = V_к$; IV. Необходимо знать температуру воздуха.

Задание 8 (1 балл)

Представлены процессы изменения состояния идеального газа. Внутренняя энергия газа в исходном состоянии M в обоих случаях одинакова. Определите соотношение между значениями внутренней энергии газа U_1 и U_2 в состояниях, отмеченных точками N_1 и N_2.



I. $U_1 = U_2$; II. $U_1 = 2U_2$; III. $U_1 = 0,5U_2$; IV. $U_1 = 4U_2$.

Задание 9 (1 балл)

Определите удельные теплоемкости газа если известно, что коэффициент Пуассона — показатель адиабаты — равен 1,67.

I. $C_V = \frac{3}{2}\frac{R}{\mu}$; $C_m = \frac{7}{2}\frac{R}{\mu}$. II. $C_V = \frac{5}{2}\frac{R}{\mu}$; $C_m = \frac{3}{2}\frac{R}{\mu}$.

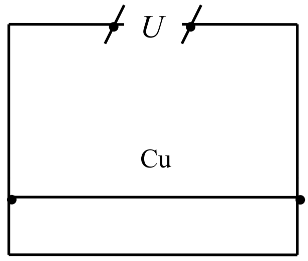
III. $C_V = \frac{3}{2}\frac{R}{\mu}$; $C_m = \frac{5}{2}\frac{R}{\mu}$. IV. $C_V = \frac{5}{2}\frac{R}{\mu}$; $C_m = \frac{7}{2}\frac{R}{\mu}$.

Задание 10 (0,5 балла)

В уравнении Ван-дер-Ваальса поправка «*b*» характеризует:

I. Объем, занимаемый самими молекулами; II. Силы межмолекулярного притяжения; III. Линейные размеры самих молекул; IV. Объем сосуда, в котором находится газ.

Задание 11 (1,5 балла)



Медный и железный проводники одинаковой длины и поперечного сечения включены в цепь. Сравните количества теплоты, выделенные в этих проводниках за одно и то же время. Удельное сопротивление меди меньше, чем железа.

I. $Q_м = Q_ж$; II. $Q_м > Q_ж$; III. $Q_ж > Q_м$; IV. Необходимо знать численное значение напряжения U.

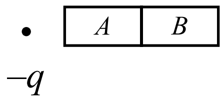
Задание 12 (1 балл)

Как изменится энергия электрического поля плоского воздушного конденсатора, если расстояние между его пластинами уменьшить в 2 раза? Конденсатор отключен от источника тока.

I. Увеличится в 4 раза; II. Увеличится в 2 раза; III. Уменьшится в 4 раза; IV. Уменьшится в 2 раза.

Задание 13 (0,5 балла)

Незаряженное тело, сделанное из диэлектрика, внесено в электрическое поле отрицательного заряда, а затем разделено на две части. Какими электрическими зарядами обладают части тела A и B после разделения?



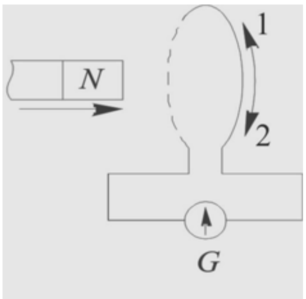
I. A и B — нейтральны; II. A и B — отрицательными; III. A и B — положительными; IV. A — отрицательным, B — положительным.

Задание 14 (1 балл)

Заряженная частица движется со скоростью V в вакууме в однородном магнитном поле с индукцией B по окружности радиусом R. Чему будет равен радиус окружности при скорости частицы $2V$ и индукции поля $B/2$?

I. $4R$; II. $R/4$; III. $2R$; IV. $R/2$.

Задание 15 (1 балл)



Используя правило Ленца, определите направление индукционного тока, возникающего в замкнутом проводящем кольце при внесении постоянного магнита (рис.).

I. $J = 0$; II. 2; III. 1; IV. Если магнит перемещать очень быстро, ток течет по направлению 2; если очень медленно — по направлению 1.

Приложение 3

Календарные планы проведения всех видов учебных занятий с указанием точек текущего и итогового контроля

1 учебная неделя. Лекция 1. Кинематика и динамика поступательного и вращательного движений.

1-е занятие натурного лабораторного практикума в лаборатории В 401 «Механика. Молекулярная физика и термодинамика».

График выполнения работ лабораторного практикума в лаборатории В 401

$2 \to 10 \to 5 \to 8 \to 12 \to 11 \to 6 \to 9 \to 4$

2 учебная неделя. 1-е занятие виртуального лабораторного практикума в дисплейном классе «STRATUM-2000»: «Введение в лабораторный практикум».

3 учебная неделя. Лекция 2. Законы сохранения в механике.

Практическое занятие 1. Кинематика и динамика поступательного движения.

4 учебная неделя. Практическое занятие 2. Кинематика и динамика вращательного движения.

5 учебная неделя. Лекция 3. Основы молекулярной физики.

2-е занятие натурного лабораторного практикума в лаборатории В 401 «Механика. Молекулярная физика и термодинамика».

6 учебная неделя. Практическое занятие 3. Законы сохранения в механике.

7 учебная неделя. Лекция 4. Основы термодинамики.

2-е занятие виртуального лабораторного практикума в дисплейном классе «Открытая физика 1.1». Л. р. 1.6 «Законы сохранения в механике».

8 учебная неделя. Практическое занятие 4. Основы молекулярной физики.

9 учебная неделя. Лекция 5. Электростатическое поле в вакууме и веществе.

Практическое занятие 5. Основы термодинамики.

10 учебная неделя. Практическое занятие 6. Электростатическое поле в вакууме и веществе.

11 учебная неделя. Лекция 6. Постоянный электрический ток.

3-е занятие натурного лабораторного практикума в лаборатории В 401 «Механика. Молекулярная физика и термодинамика» — отчетное, 1-я точка текущего контроля.

12 учебная неделя. Практическое занятие 7. Законы постоянного электрического тока.

13 учебная неделя. Лекция 7. Магнитное поле в вакууме и веществе. Явление электромагнитной индукции.

Практическое занятие 8. Магнитное поле.

14 учебная неделя. 3-е занятие виртуального лабораторного практикума в дисплейном классе «Открытая физика 1.1». Л. р. 4.5.

15 учебная неделя. 4-е занятие натурного лабораторного практикума в лаборатории В 402 «Электродинамика».

График выполнения работ лабораторного практикума в лаборатории В 402

$21 \to 34 \to 23 \to 31 \to 25 \to 32 \to 22 \to 26 \to 28 \to 24$

16 учебная неделя. Практическое занятие 9. Электромагнитная индукция.

17 учебная неделя. Практическое занятие 10. Сдача контрольного задания «Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Электромагнетизм». 2-я точка текущего контроля.

18 учебная неделя. 5-е занятие натурного лабораторного практикума в лаборатории В 402 «Электродинамика» — отчетное, 3-я точка текущего контроля.

Практическое занятие 11. Коллоквиум «Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Электромагнетизм» — точка итогового контроля.

Учебное издание

Чеботарева Надежда Евгеньевна
Федорихин Владимир Анатольевич
Бурханов Анвер Идрисович

ОСНОВЫ МЕХАНИКИ, МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ, ТЕРМОДИНАМИКИ И ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

Учебно-практическое пособие

Начальник РИО *М. Л. Песчаная*
Редактор *О. А. Шипунова*
Компьютерная правка и верстка *Н. А. Дерина*

Подписано в свет 26.06.2012
Гарнитура «Таймс». Уч.-изд. л. 5,9. Объем данных 2,3 Мб

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет»
Редакционно-издательский отдел
400074, Волгоград, ул. Академическая, 1
http://www.vgasu.ru, info@vgasu.ru