

Рекомендовано Министерством образования и науки
Республики Казахстан

Н.А. Закирова
Р. Р. Аширов

ФИЗИКА

Учебник для 10 класса
общественно-гуманитарного направления
общеобразовательной школы

10



УДК 373.167.1

ББК 22.3я 72

3-16

- 3-16 Закирова Н.А., Аширов Р.Р.
Физика: учеб. для 10 кл. общеобразоват. шк. общественно-гуманитарное направление / Н.А. Закирова, Р.Р. Аширов. – Нур-Султан: Издательство «Арман-ПВ», 2019. – 240 с.

ISBN 978-601-318-243-8

Учебник по физике для 10 класса разработан в соответствии с Типовой учебной программой по предмету «Физика» для 10 класса уровня общего среднего образования по обновленному содержанию.

В изложении материала учтены возрастные особенности учащихся, соблюдены принципы научности и доступности, раскрытия учебного материала.

УДК 373. 167. 1

ББК 22.3я 72

ISBN 978-601-318-243-8

© Закирова Н.А.,
Аширов Р.Р., 2019

© Издательство «Арман-ПВ», 2019

Репродуцирование (воспроизведение) любым способом данного издания без договора с издательством

Условные обозначения

Определения, которые нужно запомнить

Контрольные вопросы

Вопросы для самоконтроля теоретического материала



Упражнение

1

Задания для выполнения в классе

Экспериментальные задания

Задания для исследовательской работы

Творческие задания

Задания на реализацию творческих способностей



Ответьте на вопросы

- Вопросы, требующие пояснения
- сущности физического явления



Интересно знать!

Научно-познавательные факты



Задание

- Задания для выполнения
- в классе



Кусочки науки

- Дополнительная информация,
- относящаяся к содержанию темы



Эксперимент

- Экспериментальные задания для
- выполнения в классе



Вспомните!

- Сведения для повторения
- изученного материала



Запомните!

- Информация, которую нужно
- выучить



Обратите внимание!

- Учебный материал, вызывающий
- затруднение при выполнении упражнений



Возьмите на заметку

Памятка для учащихся



Внимание

При необходимости вы всегда сможете найти содержание CD с электронным приложением на сайте artan-pv.kz и загрузить его на свой компьютер для дальнейшей работы

Предисловие

Заставить человека думать – это значит сделать для него значительно больше, чем снабдить его определенным количеством инструкций.

Ч. Бэббидж

Ребята, физика – одна из самых интересных наук о природе, знание ее законов необходимо каждому человеку в повседневной жизни. Это наука, которая поможет понять роль и место человека в природе, а также может научить понимать тех людей, которым физика интересна.

В современном мире в практической деятельности специалистов-гуманитариев необходимо применение естественно-научных методов познания. Основное отличие предлагаемого учебника заключается в том, что при раскрытии природных явлений в нем используется подход, основанный на научном методе познания. Кроме того, изучаемые законы, явления, теории рассматриваются не только качественно, но и количественно, что позволит специалистам гуманитарных профессий свободнее ориентироваться в окружающем технологическом мире.

Содержание учебника составлено таким образом, чтобы заинтересовать физикой будущих филологов и историков, при этом оно не уходит от основной задачи: изучения программного материала.

Большое внимание уделяется лабораторным наблюдениям, демонстрационным экспериментам и решению качественных задач, которые помогут разобраться во многих явлениях, происходящих вокруг нас.

Выполняя творческие задания, обратите внимание на то, какие физические открытия были сделаны на протяжении нескольких десятилетий, столетий, какова была историческая обстановка в тех странах, где ученые делали свои открытия, кто из известных писателей, поэтов, музыкантов, композиторов, художников и политических деятелей были их современниками. Так можно воссоздать «кусочек эпохи». Эта работа достаточно увлекательна, по ее итогам создается «историко-физическая картина мира».

В конце курса предполагается защита курсовой работы, которую вы, основываясь на научных методах познания, будете выполнять в течение всего года. Подборка материала, его сравнительный анализ, умозаключение и презентация работы потребуют от вас достаточно много времени. В результате такой деятельности у вас может появиться авторский коллектив.

Желаем вам творческих успехов в изучении физики!

Авторы

Механика (μηχανική) в переводе с древнегреч. означает «искусство построения машин». Механика как раздел физики имеет более широкое значение.

Механика – это наука о механическом движении материальных тел и взаимодействиях, происходящих между ними.

В данном разделе учебника будет рассмотрен ряд вопросов из таких разделов механики, как кинематика, динамика, статика, аэродинамика и гидродинамика, а также законы сохранения.

ГЛАВА 1

КИНЕМАТИКА

Кинематика (от древнегреч. κινεῖν) – раздел механики, изучающий движения тел без учета их масс и действующих на них сил.

В зависимости от свойств тела, кинематику разделяют на кинематику точки, кинематику твердого тела и кинематику непрерывной изменяемой среды: деформируемого твердого тела, жидкости, газа. В кинематике производится классификация движений, деление их на виды по определенным признакам.

Изучив главу, вы сможете:

- применять кинематические уравнения при решении задач, анализировать графики движения;
- приводить примеры классического закона сложения скоростей и перемещений из повседневной жизни;
- определять величины, характеризующие криволинейное движение.

§1. Основные понятия и уравнения кинематики равноускоренного движения тела

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять кинематические уравнения при решении задач, анализировать графики движения.



Ответьте на вопрос

Почему при изучении движения тела в кинематике используют как скорость движения, так и путевую скорость?

I. Основная задача кинематики

Для описания движения тел в кинематике используют следующие величины: ускорение, скорость перемещения, скорость путевая, перемещение, пройденный путь, координата тела, время. Для указания положения тела необходимы также физические понятия: система отсчета, тело отсчета, система координат, траектория, относительность движения, механическое движение. Движения тел отличаются друг от друга: траектория может быть прямолинейной и криволинейной, скорость движения одних тел постоянная, других – переменная.

Основная задача кинематики – установление способов задания движения материальных точек или тел и определение соответствующих кинематических характеристик этих движений.

II. Координатный метод решения задач

Ускорение, скорость, перемещение – векторные величины. Решение задач кинематики координатным методом предполагает переход от действий с векторами к действиям со скалярными величинами. Из курса физики 9 класса вам известно, что соотношения векторных величин и их проекций не отличаются друг от друга.

Например, формулу расчета ускорения в векторном виде: $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}$ можно записать через проекции векторов $a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{\Delta t}$, при этом равенство не нарушится. Проекции векторов являются скалярными величинами, следовательно, сложение, вычитание, умножение и деление производится с ними как с обычными числами.

Последовательность действий при координатном методе решения задач следующая: выбирают оси координат, находят проекции заданных векторов; выполняя действия над ними, определяют проекции неизвестной векторной величины на выбранные оси.

При известном значении проекций вектора на координатные оси можно определить его модуль. Например, если вектор ускорения параллелен оси Ox , то его модуль равен проекции на эту ось (рис. 1, а):

$$a = a_x.$$

В случае, когда рассматриваемый вектор имеет проекции на оси Ox и Oy (рис. 1, б) его модуль определяют по теореме Пифагора:

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}.$$



Рис. 1. Проекции вектора на выбранные оси

III. Формулы кинематики для прямолинейного равнопеременного движения

В таблице 1 представлены формулы расчета величин, характеризующих прямолинейное равнопеременное движение тела: ускорения a_x , скорости перемещения v_x , перемещения s_x и координаты тела x . Свободное падение тел является частным случаем прямолинейного равнопеременного движения, в этом случае тело движется с ускорением, равным $g = 9,8 \frac{M}{c^2}$.

? **Ответьте на вопрос**
 Почему значение средней скорости справедливо только для определенного участка пути?

Таблица 1. Формулы кинематики

Физические величины	Вид движения	
	Прямолинейное равнопеременное	Свободное падение
Ускорение	$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{\Delta t}$	$g = 9,8 \frac{M}{c^2}$
Средняя скорость	$v_{cp} = \frac{v_0 + v}{2}$	$v_{cp} = \frac{v_0 + v}{2}$
Мгновенная скорость	$v_x = v_{0x} + a_x t$	$v_y = v_{0y} + g_y t$
Перемещение	$s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$	$h_y = v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}$
	$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}; s_x = \frac{v_0 + v}{2} t$	$h_y = \frac{v_y^2 - v_{0y}^2}{2g_y}; h_y = \frac{v_0 + v}{2} t$
Координата тела	$x(t) = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$	$y(t) = y_0 + v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}$

Уравнение зависимости координаты тела от времени движения называют *законом движения*. Формулы равномерного прямолинейного движения можно получить из формул равнопеременного, учитывая, что $a = 0$.

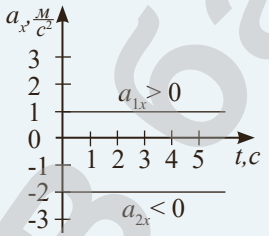
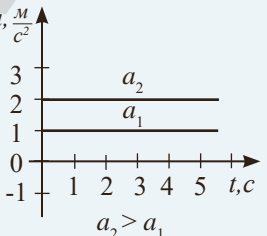
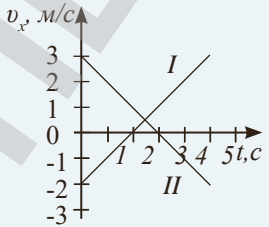
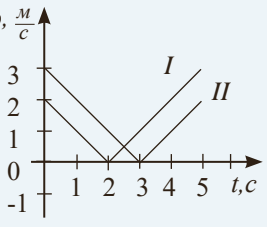
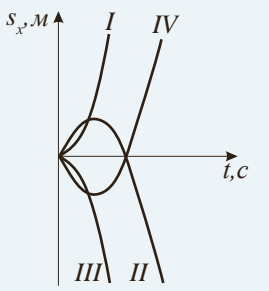
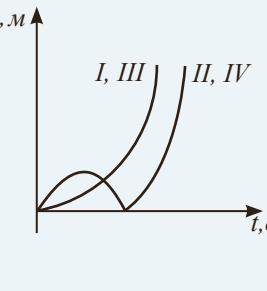
IV. Графики зависимости величин, характеризующих прямолинейное равнопеременное движение тел, от времени

При построении графиков зависимости физических величин используются математические методы. Для построения графика с линейной зависимостью величин достаточно двух точек. График квадратичной зависимости величин представляет собой параболу, он требует расчета и построения большего числа точек (таблица 2).

Модули величин не имеют отрицательных значений, график зависимости модуля величины получается из графика зависимости проекции зеркальным отражением относительно оси времени.

Не сложно доказать, что площадь фигуры под графиком зависимости скорости от времени численно равна перемещению тела.

Таблица 2. Графики зависимости кинематических величин от времени

Физическая величина	Уравнение зависимости от времени, вид зависимости	График зависимости проекции величины от времени	График зависимости модуля величины от времени
Ускорение	$a_x = const$ Ускорение не зависит от времени		
Мгновенная скорость	$v_x = v_{0x} + a_x t$ Скорость зависит от времени прямо пропорционально	 $I: a_x > 0$ $II: a_x < 0$	
Перемещение	$s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ Зависимость перемещения от времени представляет собой квадратичную функцию.	 $I: v_{0x} > 0, a_x > 0$ $II: v_{0x} > 0, a_x < 0$ $III: v_{0x} < 0, a_x < 0$ $IV: v_{0x} < 0, a_x > 0$	

Физическая величина	Уравнение зависимости от времени, вид зависимости	График зависимости проекции величины от времени
Координата	$x(t) = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$ <p>Координата тела – квадратичная функция времени</p>	<p> I: $x_1 < 0, v_{0x} > 0, a_x > 0$ II: $x_2 > 0, v_{0x} > 0, a_x < 0$ </p>

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Определите высоту, с которой упало тело, если время его падения составило 5 с. Какое расстояние оно проходит за каждую очередную секунду?

Дано:

$$t = 5 \text{ с}$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

$$v_0 = 0$$

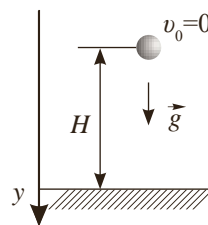
$H = ?$

$h_1 = ? h_2 = ?$

$h_3 = ? h_4 = ? h_5 = ?$

Решение:

Изобразим на рисунке тело, направление вектора ускорения свободного падения \vec{g} , ось Oy . Совместим начальное положение тела с нулевым уровнем высоты. Обозначим высоту полета буквой H . Координата тела при свободном падении меняется по закону:



$$y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}. \quad (1)$$

Начальная координата тела $y_0 = 0$, конечная координата $y = H$, проекция вектора ускорения на ось Oy имеет положительное значение $g_y = g$. Начальная скорость равна нулю $v_0 = 0$.

Формула (1) примет вид: $H = \frac{gt^2}{2}$.

$$H = \frac{9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 25 \text{ с}^2}{2} \approx 125 \text{ м}.$$

За первую секунду тело переместилось на расстояние: $h_1 = \frac{gt_1^2}{2}$

$$h_1 = \frac{9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 1 \text{ с}^2}{2} \approx 5 \text{ м}.$$

Отношение перемещений за каждую очередную секунду определяется отношением ряда нечетных чисел:

$$h_1 : h_2 : h_3 : h_4 : h_5 = 1 : 3 : 5 : 7 : 9. \quad (2)$$

Следовательно: $\frac{h_1}{h_2} = \frac{1}{3}$ или $h_2 = 3h_1$, таким образом: $h_2 = 15$ м.

Из (2) следует, что $\frac{h_1}{h_3} = \frac{1}{5}$ или $h_3 = 5h_1$, подставив значение h_1 получим $h_3 = 25$ м.

Аналогично определим h_4 : $\frac{h_1}{h_4} = \frac{1}{7}$ или $h_4 = 7h_1$, $h_4 = 35$ м и h_5 : $\frac{h_1}{h_5} = \frac{1}{9}$ или

$h_5 = 9h_1$, $h_5 = 45$ м.

Сложим полученные результаты:

$$H = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 = 5 \text{ м} + 15 \text{ м} + 25 \text{ м} + 35 \text{ м} + 45 \text{ м} = 125 \text{ м}.$$

Ответ: $H = 125$ м; $h_1 = 5$ м; $h_2 = 15$ м; $h_3 = 25$ м; $h_4 = 35$ м; $h_5 = 45$ м.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается основная задача кинематики?
2. Назовите величины, характеризующие движение тел, дайте им определения.
3. Какая из величин, характеризующих движение тел, определяет вид движения?

★ Упражнение

1

1. В конце склона горы длиной 100 м лыжник развил скорость 8 м/с. Определите начальную скорость и ускорение, с которым он двигался, если спуск длился 20 с.
2. С высоты 10 м над землей падает камень. Одновременно с высоты 8 м вертикально вверх бросают другой камень. С какой начальной скоростью был брошен второй камень, если камни столкнулись на высоте 5 м над землей? Сопротивление воздуха не учитывать, ускорение свободного падения принять равным 10 м/с^2 .

3. На *рисунке 2* изображен график зависимости скорости движения тела от времени на прямолинейном участке пути.

а) Определите ускорение, с которым тело двигалось на каждом участке пути. Какой путь пройден телом? Каково его перемещение?

б) Напишите закон движения тела для первого участка пути.

в) Изобразите графики зависимости перемещения и координаты тела от времени для этого участка, если начальная координата тела равна $x_0 = 5$ м.

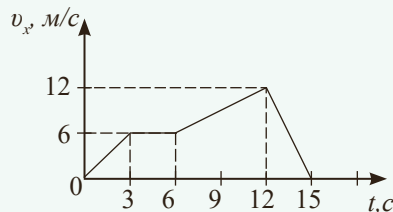


Рис. 2. К упражнению 1.3

4. Нырять в воду за рыбой, пеликаны совершают свободное падение (рис. 3). На какой высоте рыба должна заметить пеликана, чтобы сманеврировать и уклониться от нападения, если для этого необходимо $0,15$ с? Предположим, что падение пеликана происходит с высоты 5 м, а рыба находится у поверхности воды.



Рис. 3. К упражнению 1.4

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Способы уменьшения тормозного пути различных видов транспорта».
2. «Как рассчитывают взлетно-посадочную полосу для летательных аппаратов».

§2. Относительное движение

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- приводить примеры классического закона сложения скоростей и перемещений из повседневной жизни.



Задание

Приведите примеры, в которых траектория движения одного и того же тела для нескольких наблюдателей отличается.



Ответьте на вопросы

1. Будут ли отличаться перемещения и скорости тел в приведенных вами примерах?
2. В чем различие инерциальных систем отсчета от неинерциальных?
3. Относительно каких систем отсчета вы рассмотрели движение тел?

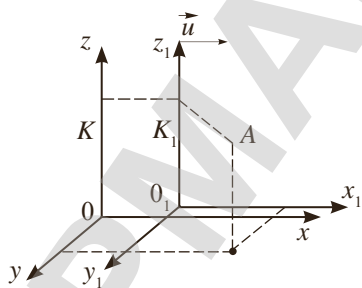


Рис. 4. K – неподвижная относительно наблюдателя система отсчета, K_1 – подвижная система отсчета

I. Относительность механического движения. Инвариантные и относительные величины

Кинематические понятия, характеризующие механическое движение, траектория, координата, перемещение, скорость, ускорение – при переходе из одной системы отсчета в другую могут изменяться. В этом состоит относительность механического движения. Если при переходе из одной системы отсчета в другую величина меняется, то ее называют *относительной*. Если величина остается неизменной, то она является *инвариантной*.

Важным вопросом кинематики является установление связи между кинематическими величинами, характеризующими механическое движение в различных системах координат, движущихся относительно друг друга.

II. Преобразования Галилея

Определим положение материальной точки в декартовых системах координат, принятых в системах отсчета K и K_1 , движущихся относительно друг друга со скоростью \vec{u} (рис. 4). В системе отсчета K_1 координаты точки A имеют значения x_1, y_1, z_1 . В неподвижной системе отсчета координата x точки A отличается от координаты x_1 на значение $u_x t$, так как за время t подвижная система отсчета переместилась вдоль оси Ox относительно неподвижной системы на расстояние $00_1 = u_x t$. Координаты y, z и y_1, z_1 одинаковы в обеих системах отсчета. Время в рассматриваемых системах отсчета течет одинаково. Преобразования координат при переходе из системы K_1 в систему K , установленные Галилеем, имеют вид:

$$\begin{aligned} x &= x_1 + ut \\ y &= y_1 \\ z &= z_1 \\ t &= t_1. \end{aligned} \quad (1)$$

Координаты тела являются относительными величинами, время для тел, движущихся с малыми скоростями, инвариантно.

III. Правило сложения перемещений

Рассмотрим движение тела по плоскости, в этом случае его местоположение определяется двумя координатами. Выберем системы координат, одна из которых связана с покоящимся телом, другая – с движущимся телом. Пусть в начальный момент

времени точки O_1 и O совпадают с положением рассматриваемого тела. Через некоторое время t тело переместится в точку A . Точка O_1 подвижной системы отсчета (ПСО), двигаясь со скоростью \vec{u} относительно точки O , переместится на $\vec{s}_2 = \vec{u}t$ (рис. 5).

Перемещение рассматриваемого тела относительно неподвижной системы отсчета (НСО) обозначим \vec{s} , относительно подвижной системы отсчета (ПСО) – \vec{s}_1 .

По правилу сложения векторов следует:

$$\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2. \quad (2)$$

Перемещение тела относительно НСО равно геометрической сумме перемещений тела относительно ПСО и перемещения ПСО относительно НСО. Перемещение – относительная величина.

В проекциях на оси Ox и Oy формула сложения перемещений примет вид:

$$\begin{aligned} s_x &= s_{1x} + s_{2x}; \\ s_y &= s_{1y} + s_{2y}. \end{aligned}$$

Поскольку $s_x = x, s_{1x} = x_1, s_y = y, s_{1y} = y_1$ (рис. 5), то формулы в проекциях на выбранные оси можно записать в виде:

$$\begin{aligned} x &= x_1 + s_{2x} \\ y &= y_1 + s_{2y}. \end{aligned}$$

Если ПСО движется со скоростью u_x по оси Ox и u_y по оси Oy относительно НСО, то записанные выше уравнения примут вид:

$$\begin{aligned} x &= x_1 + u_x t \\ y &= y_1 + u_y t. \end{aligned}$$

В результате сложения перемещений мы получили преобразования Галилея для тела, движущегося по плоскости.

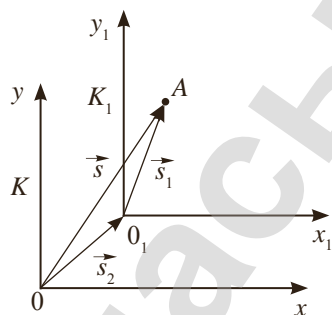


Рис. 5. Перемещение точки A для наблюдателей, находящихся в различных системах отсчета

Эксперимент

Определите перемещение двух учащихся относительно точки начала движения и относительно друг друга в случаях, когда они движутся:

- 1) вдоль одной прямой в одном направлении с различными скоростями;
- 2) вдоль одной прямой в противоположных направлениях;
- 3) по двум взаимно перпендикулярным направлениям;
- 4) назовите НСО, ПСО и движущееся тело в поставленном эксперименте.

Изобразите перемещение учащихся относительно точки начала движения и относительно друг друга в тетрадах в выбранном вами масштабе.

Ответьте на вопросы

1. Можно ли принять за НСО одного из учащихся?
2. Влияет ли выбор точки отсчета на перемещение учащихся относительно друг друга?

IV. Правило сложения скоростей

Учтем, что $\vec{s}_1 = \vec{v}_1 t$, $\vec{s}_2 = \vec{u}t$, $\vec{s} = \vec{v}t$, тогда выражение (1) примет вид $\vec{v}t = \vec{v}_1 t + \vec{u}t$ или $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{u}$.

Скорость тела относительно НСО равна геометрической сумме скорости тела относительно ПСО и скорости ПСО относительно НСО.

Для большей наглядности и удобства расчета скоростей используют понятия абсолютной, относительной и переносной скорости.

Относительная скорость – это скорость тела относительно подвижной системы отсчета;
Переносная скорость – это скорость подвижной системы отсчета относительно неподвижной.

Например, пловец движется относительно воды с относительной скоростью $\vec{v}_{отн} = \vec{v}_1$ (рис. 6), течение относит его с переносной скоростью $\vec{v}_n = \vec{u}$ относительно берега. Пловец движется относительно берега со скоростью \vec{v} . Таким образом, формула сложения скоростей примет вид:

$$\vec{v} = \vec{v}_{отн} + \vec{v}_n.$$

Скорость тела – величина относительная.

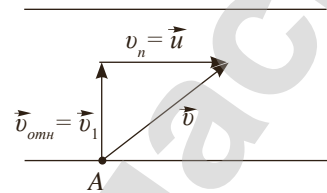


Рис. 6. Направление скорости пловца относительно воды $\vec{v}_{отн}$ и наблюдателя А – \vec{v} .

V. Относительная скорость двух тел

Пусть два тела А и В движутся со скоростями \vec{v}_A и \vec{v}_B относительно земли (рис. 7, а). Определим скорость тела В относительно тела А. Для этого необходимо принять тело А за НСО, т.е. мысленно переместившись на это тело, рассмотреть движение окружающих тел. Все тела вместе с землей будут перемещаться в пространстве со скоростью, равной по модулю скорости точки А, но направленной в противоположную сторону (рис. 7, б). Таким образом, для определения скорости движения точки В относительно А, необходимо воспользоваться формулой сложения векторов:

$$\vec{v} = \vec{v}_B + \vec{v}_n$$

с учетом соотношения $\vec{v}_n = -\vec{v}_A$ получим:

$$\vec{v} = \vec{v}_B - \vec{v}_A.$$

Относительная скорость двух тел определяется как разность векторов их скоростей.

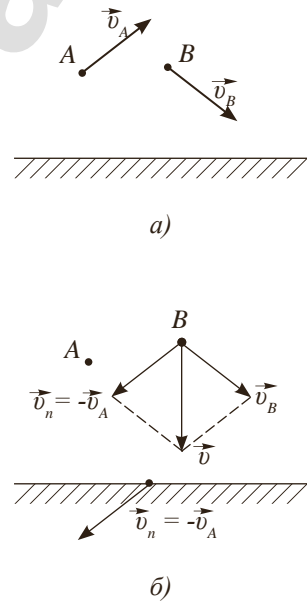


Рис. 7. Нахождение направления скорости точки В относительно точки А

? Ответьте на вопрос

Почему, выбрав движущееся относительно земли тело за НСО, мы должны мысленно переместиться на это тело и рассмотреть движение окружающих тел относительно него?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Капли дождя падают отвесно относительно земли со скоростью $v_1 = 20 \text{ м/с}$. С какой наименьшей скоростью v_2 относительно земли должен двигаться автомобиль, чтобы на заднем смотровом стекле, наклоненном под углом 45° к горизонту, не оставалось следов капель? Чему равна скорость капель относительно автомобиля?

Дано:

$$v_1 = 20 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 45^\circ$$

$$v = ? \quad v_2 = ?$$

Решение:

Капли дождя не будут задевать стекла автомобиля, если вектор скорости капель относительно автомобиля направлен параллельно стеклу. Этим определяется минимальная скорость автомобиля.

Чтобы найти ее, воспользуемся законом сложения скоростей:

$$\vec{v} = \vec{v}_{\text{отн}} + \vec{v}_n$$

Неподвижную систему координат свяжем с землей.

Движущуюся систему свяжем с автомобилем. Обозначим скорость капель относительно автомобиля через \vec{v} . Тогда:

$\vec{v} = \vec{v}_1$, $\vec{v}_{\text{отн}} = \vec{v}$, $\vec{v}_n = \vec{v}_2$. Следовательно, закон сложения скоростей запишется так: $\vec{v}_1 = \vec{v} + \vec{v}_2$.

Отсюда: $\vec{v} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2$.

Вычитание векторов показано на рисунке. Поскольку треу-

гольник прямоугольный, то $v = \frac{v_1}{\sin \alpha}$

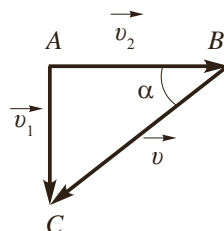
$$\text{и } v_2 = v_1 \operatorname{ctg} \alpha.$$

Выполним расчеты:

$$v = \frac{20 \text{ м/с}}{\sin 45^\circ} = 28 \text{ м/с}$$

$$\text{и } v_2 = v_1 = 20 \text{ м/с}.$$

Ответ: $v = 28 \text{ м/с}$, $v_2 = 20 \text{ м/с}$.



Контрольные вопросы

1. В чем заключается относительность движения тел?
2. Какие величины связывают преобразования Галилея?
3. Какие следствия преобразований Галилея вам известны?
4. Влияет ли выбор системы координат на расстояние между телами?
5. Как определяется относительная скорость двух тел?

★ Упражнение

2

1. Два автобуса движутся в одном направлении. Модули их скоростей равны 90 км/ч и 60 км/ч. соответственно. Чему равна скорость первого автобуса относительно второго?
2. По двум параллельным железнодорожным путям навстречу друг другу движутся два поезда со скоростями 72 км/ч и 108 км/ч. Длина первого поезда 800 м, а второго 200 м. В течение какого времени один поезд проходит мимо другого?
3. Какую скорость относительно воды должен сообщить мотор катеру, чтобы при скорости течения реки, равной 2 м/с, катер двигался перпендикулярно берегу со скоростью 3,5 м/с относительно берега?
4. Эскалатор метро спускает идущего по нему вниз человека за 1 мин. Если человек будет идти вдвое быстрее, то он спустится за 45 с. Сколько времени будет спускаться человек, стоящий на эскалаторе? Какова длина эскалатора, если скорость эскалатора 0,9 м/с? Сколько времени спускает пассажиров эскалатор на станции «Жибек Жолы» (рис. 8), если его длина составляет 104 м?

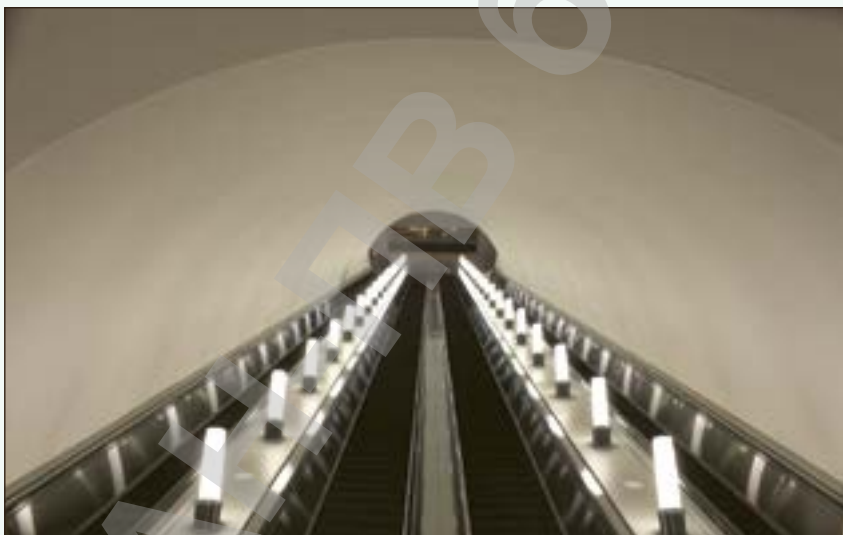


Рис. 8. Станция «Жибек Жолы» Алматинского метрополитена

Творческое задание

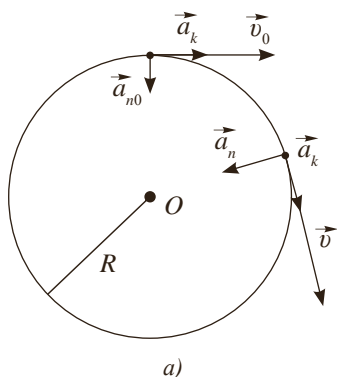
1. Подготовьте сообщение на тему: «Использование относительности движения в различных сферах деятельности: промышленности, цирковых аттракционах, авиации, различных видах спорта и т.п.»
2. Приведите строчки из литературных произведений, в которых авторы описывают относительность движения.

§3. Кинематика криволинейного движения

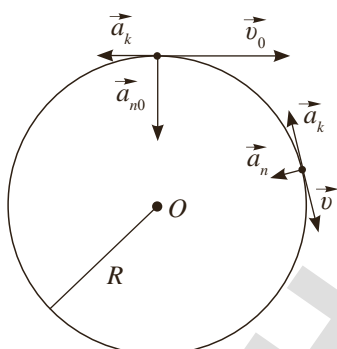
Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- определять величины, характеризующие криволинейное движение.



а)



б)

Рис. 9. Равнопеременное движение материальной точки по окружности

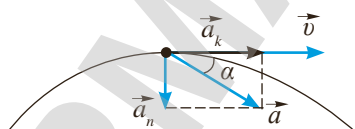


Рис. 10. Полное ускорение и его составляющие: касательное и нормальное ускорения

При изучении движения тела, движущегося по любой кривой линии, его траекторию можно представить как сочетание прямолинейных участков и дуг окружностей соответствующего радиуса. Рассмотрим движение тела по окружности.

I. Линейные величины, характеризующие равнопеременное движение тела по окружности

При равнопеременном движении тела по окружности его линейная скорость изменяется на одно и то же значение за любые равные промежутки времени. При равноускоренном движении (рис. 9, а):

$$v = v_0 + a_k t \quad (1)$$

при равнозамедленном (рис. 9, б):

$$v = v_0 - a_k t. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) ускорение $a_k = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ называют *касательным*, или *тангенциальным*. Оно направлено вдоль касательной к траектории по направлению линейной скорости или в сторону противоположную ей. Если радиус окружности R остается постоянной величиной, то в результате изменения линейной скорости центростремительное ускорение становится переменной величиной $a_n = \frac{v^2}{R}$.

Определим полное ускорение тела, движущегося равнопеременно по окружности (рис. 10):

$$\vec{a} = \vec{a}_k + \vec{a}_n.$$

Составляющие полного ускорения \vec{a}_k и \vec{a}_n взаимно перпендикулярны, так как касательная к окружности перпендикулярна радиусу. Согласно теореме Пифагора полное ускорение равно:

$$a = \sqrt{a_k^2 + a_n^2}. \quad (3)$$

При известном значении угла между скоростью и полным ускорением нормальное и касательное ускорение можно связать формулой: $\operatorname{tg} \alpha = \frac{a_n}{a_k}$ или

$$a_k = \frac{a_n}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

При равнопеременном движении по окружности вектор ускорения направлен внутрь окружности. Тангенциальная (касательная) составляющая этого

вектора характеризует изменение скорости по модулю, а нормальная (центростремительная) составляющая – по направлению.

II. Угловые величины, характеризующие движение тела по окружности

Более удобными для изучения движения по окружности являются угловые величины. При равнопеременном движении кроме угловой скорости ω и углового перемещения φ необходимо ввести понятие углового ускорения ε .

Угловое ускорение – это физическая величина, характеризующая быстроту изменения угловой скорости.

$$\varepsilon = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta t} \text{ для равноускоренного движения, (4)}$$

$$\varepsilon = \frac{\omega_0 - \omega}{\Delta t} \text{ для равнозамедленного движения, (5)}$$

Единица измерения углового ускорения $[\varepsilon] - 1 \text{ рад/с}^2$, угловой скорости $[\omega] - 1 \text{ рад/с}$.

Из формул (4), (5) выразим мгновенное значение угловой скорости:

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

Полученная формула аналогична формулам для расчета линейной скорости при равнопеременном движении. Следовательно, формулы углового перемещения будут иметь такой же вид, как и формулы для расчета линейного перемещения. Для равноускоренного движения по окружности:

$$\varphi = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}, \quad \varphi = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\varepsilon},$$

для равнозамедленного движения по окружности:

$$\varphi = \omega_0 t - \frac{\varepsilon t^2}{2}, \quad \varphi = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\varepsilon}.$$

Введем среднее значение угловой скорости $\omega_{cp} = \frac{\omega_0 + \omega}{2}$, тогда угловое перемещение можно определить по формуле:

$$\varphi = \frac{\omega_0 + \omega}{2} t.$$

Ответьте на вопросы

1. Почему касательное ускорение называют тангенциальным?
2. Почему полное ускорение равнопеременного движения по окружности постоянного радиуса определяют по теореме Пифагора?

Ответьте на вопрос

Почему угловые величины более удобны для описания движения тела по окружности?

Вспомните!

Соотношение линейных величин с угловыми:

$$l = \varphi R;$$

$$v = \omega R;$$

$$a_n = \omega^2 R.$$

Запомните!

$$a_k = \varepsilon R$$

$$a = R\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}.$$

Задание

Укажите сходства и различия формул расчета линейных и угловых величин.

Таблица 3. Сравнительная таблица линейных и угловых кинематических величин

Угловые величины	Линейные величины
$\omega = \omega_0 + \varepsilon t$	$v = v_0 + at$
$\omega = \omega_0 - \varepsilon t$	$v = v_0 - at$
$\varphi = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}$; $\varphi = \omega_0 t - \frac{\varepsilon t^2}{2}$	$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}$; $s = v_0 t - \frac{at^2}{2}$
$\varphi = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\varepsilon}$ при $\omega > \omega_0$	$s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$ при $a_x > 0$
$\varphi = \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{2\varepsilon}$ при $\omega_0 > \omega$	$s = \frac{v_0^2 - v^2}{2a}$ при $a_x < 0$
$\omega_{cp} = \frac{\omega_0 + \omega}{2}$	$v_{cp} = \frac{v_0 + v}{2}$

III. Связь линейных и угловых величин

Из курса физики 9 класса вам известны соотношения между пройденным путем и угловым перемещением, линейной и угловой скоростью, нормальным ускорением и угловой скоростью. Установим связь между ускорениями. В формуле (4) заменим

угловую скорость на линейную $\varepsilon = \frac{\frac{v - v_0}{t}}{R} = \frac{v - v_0}{tR} = \frac{a_k}{R}$. Таким образом, угловое ускорение связано с касательным, или тангенциальным, ускорением соотношением: $a_k = \varepsilon R$. (6)

Получим соотношение полного ускорения с угловыми величинами, используя формулы (3) и (6):

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_k^2} = \sqrt{\omega^4 R^2 + \varepsilon^2 R^2} = R\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}$$

$$a = R\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}.$$

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Колесо радиусом 10 см вращается с постоянным угловым ускорением 3,14 рад/с². Определите к концу первой секунды после начала движения: 1) угловую скорость, 2) линейную скорость, 3) тангенциальное ускорение, 4) нормальное ускорение, 5) полное ускорение.

Дано:

$$R = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$$\varepsilon = 3,14 \text{ рад/с}^2$$

$$v_0 = 0, \quad \omega_0 = 0$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$\omega - ? \quad v - ? \quad a_k - ?$$

$$a_n - ? \quad a - ?$$

Решение:

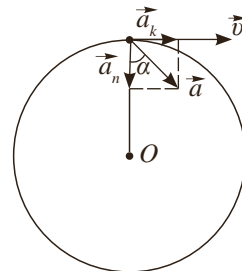
1) При равноускоренном движении тела по окружности его угловая скорость равна:

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon t.$$

$$\omega_0 = 0 \text{ и тогда } \omega = \varepsilon t.$$

К концу первой секунды

$$\omega = 3,14 \text{ рад/с}.$$



- 2) Линейная скорость связана с угловой скоростью, формула связи: $v = \omega R$. К концу первой секунды $v = 3,14 \text{ м/с}$.
- 3) Тангенциальное ускорение не зависит от времени, оно постоянно и равно $a_k = \varepsilon R = 0,314 \text{ м/с}^2$.
- 4) Нормальное ускорение растет пропорционально квадрату времени $a_n = \omega^2 R = \varepsilon^2 t^2 R$, к концу первой секунды оно равно: $a_n = 0,986 \text{ м/с}^2$.
- 5) Полное ускорение определим по теореме Пифагора: $a = \sqrt{a_n^2 + a_k^2}$. При $t = 1 \text{ с}$, $a = 1,03 \text{ м/с}^2$.

Ответ: $\omega = 3,14 \text{ рад/с}$, $v = 3,14 \text{ м/с}$, $a_k = 0,314 \text{ м/с}^2$, $a_n = 0,986 \text{ м/с}^2$, $a = 1,03 \text{ м/с}^2$.

Контрольные вопросы

1. Какая составляющая полного ускорения характеризует быстроту изменения модуля линейной скорости? Направления скорости?
2. При каком условии траектория тела, движущегося криволинейно, станет прямолинейной?
3. Какую величину называют угловым ускорением? Как она связана с касательным ускорением? С полным ускорением?

★ Упражнение

3

1. Точка, начиная двигаться равноускоренно по окружности радиусом 1 м, проходит путь 50 м за 10 с. Чему равно нормальное ускорение точки через 5 с после начала движения?
2. Поезд въезжает на закругленный участок пути с начальной скоростью 54 км/ч и проходит путь 600 м за 30 с. Радиус закругления равен 1 км. Определите модуль скорости и полное ускорение поезда в конце этого пути, считая тангенциальное ускорение постоянным по модулю.
3. Маховик приобрел начальную угловую скорость $\omega_0 = 2\pi \text{ рад/с}$. Сделав 10 оборотов, он остановился вследствие трения в подшипниках. Найдите угловое ускорение маховика, считая его постоянным.
4. Высота нового колеса обозрения, находящегося возле развлекательного центра «Думан» г. Нур-Султан составляет 65 метров (рис. 11). Определите линейную и угловую скорости, нормальное и угловое ускорение точек крепления кабинок колеса в рабочем состоянии, если период вращения составляет порядка 7 минут.



Рис. 11. Второе по высоте колесо обозрения в странах СНГ, г. Нур-Султан

Творческое задание

Подготовьте сообщение по теме: «Кинематические характеристики экстремальных аттракционов в парках мира. Техника безопасности при их эксплуатации».

Итоги главы 1

Преобразования Галилея		Следствия из преобразований Галилея		
$x = x_1 + ut$ $y = y_1$ $z = z_1$ $t = t_1$		$\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$ $\vec{v} = \vec{v}_{отн} + \vec{v}_n$		
Равнопе-ременное движение по окружности	Ускорение	Угловое ускорение	Связь ускорений	
	$a = \sqrt{a_n^2 + a_k^2}$	$\varepsilon = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta t}$ $\varepsilon = \frac{\omega_0 - \omega}{\Delta t}$	$a_k = \varepsilon R$	
	Угловая скорость	Угловое перемещение	Связь ускорений и угловой скорости	
	$\omega = \omega_0 \pm \varepsilon t$ $\omega_{cp} = \frac{\omega_0 + \omega}{2}$	$\varphi = \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2}$ $\varphi = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\varepsilon}$ $\varphi = \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{2\varepsilon}$	$a_n = \omega^2 R$ $a = R\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}$	

Глоссарий

Закон движения – зависимость координаты тела x от времени t .

Центростремительное ускорение – физическая величина, характеризующая изменение линейной скорости по направлению.

Кинематика – раздел *механики*, посвященный изучению движения тел без учета их масс и действующих на них сил.

Механика – наука о механическом движении материальных тел и взаимодействиях, происходящих между ними.

Угловое ускорение – физическая величина, характеризующая быстроту изменения угловой

скорости $\varepsilon = \frac{|\Delta\omega|}{\Delta t}$.

ДИНАМИКА

Причину возникновения определенного вида движения тел рассматривают в разделе механики – динамике.

Динамика (от древнегреч. δύναμις – сила) – это раздел механики, изучающий движения тел под действием приложенных к ним сил.

В основе раздела лежат три закона Ньютона, следствием которых являются все уравнения и теоремы, необходимые для решения задач динамики.

Изучив главу, вы сможете:

- понимать законы Ньютона и определять равнодействующую силу;
- понимать закон всемирного тяготения и описывать движение космических аппаратов;
- описывать изменения физических величин при движении тела, брошенного под углом к горизонту и вертикально.

§4. Силы. Сложение сил. Законы Ньютона

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- понимать законы Ньютона и определять равнодействующую силу.

I. Силы в природе

Окружающие нас тела в результате взаимодействия меняют свое положение в пространстве или деформируются. *Мерой воздействия на тело других тел или полей является сила – физическая величина, имеющая направление.* Результат действия силы зависит от ее числового значения, от точки приложения и направления. Сила является причиной изменения скорости движения тела.

По природе своего происхождения различают четыре вида сил: гравитационные, электромагнитные, сильные (ядерные), слабые.

К гравитационным силам относятся силы всемирного тяготения и сила тяжести. Примерами электромагнитных сил молекулярного происхождения являются сила упругости, сила трения, вес тела, сила реакции опоры, сила Архимеда. В механике рассматривают движение тел под действием гравитационных и электромагнитных сил молекулярного происхождения. Сильные и слабые силы будут изучены в ядерной физике и физике элементарных частиц.

II. Сложение сил

Существуют два способа определения равнодействующей всех сил, действующих на тело: *геометрический* и *аналитический*. Геометрический способ основан на сложении векторов по правилам параллелограмма или треугольника. Равнодействующую определяют путем

последовательного сложения сил с построением промежуточных равнодействующих сил (рис. 12, а) или построением силового многоугольника (рис. 12, б). При графическом способе определения равнодействующей векторы сил можно вычерчивать в любом порядке, величина и направление равнодействующей при этом не изменятся. Вектор равнодействующей направлен от начала первого вектора к концу последнего вектора.

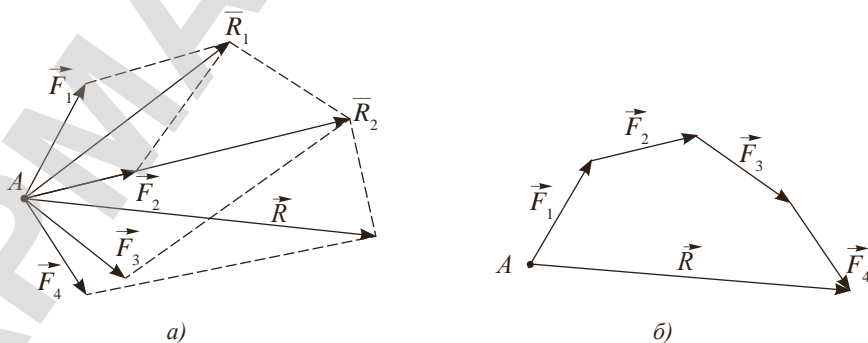


Рис. 12. Геометрический способ определения равнодействующей силы

Аналитический, или координатный, метод заключается в определении суммы проекций всех действующих сил на две взаимно перпендикулярные оси Ox и Oy :

$$\begin{aligned} F_{Rx} &= F_{1x} + F_{2x} + \dots + F_{nx} \\ F_{Ry} &= F_{1y} + F_{2y} + \dots + F_{ny} \end{aligned}$$

Полученные результаты используют для определения модуля равнодействующей силы по теореме Пифагора:

$$F_R = \sqrt{F_{Rx}^2 + F_{Ry}^2}.$$

III. Основные законы динамики

Обобщив знания о видах движения тел и вызывающих их причинах, И. Ньютон сформулировал три закона.

I закон Ньютона:
Существуют инерциальные системы отсчета, относительно которых тело движется прямолинейно и равномерно или находится в покое, если на тело не действуют силы или действие сил скомпенсировано.

Если на тело действуют силы, равнодействующая которых равна нулю, то первый закон Ньютона примет вид:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0, \quad a = 0, \quad v = \text{const}$$

или $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0$.

Первый закон Ньютона определяет условие, при котором тело движется прямолинейно и равномерно. Системы отсчета, для которых выполняется первый закон Ньютона, называют *инерциальными системами отсчета* (ИСО), а сам закон – *законом инерции*.

Для описания механических явлений на нашей планете за ИСО принимают землю, покоящиеся тела и тела, движущиеся с постоянной скоростью относительно земли.

Относительно тел, движущихся с ускорением, первый закон Ньютона не выполняется. Системы, связанные с телами, движущимися с ускорением, называют *неинерциальными* (НСО).

II закон Ньютона:
Ускорение, с которым движется тело, прямо пропорционально равнодействующей сил, действующих на него и обратно пропорционально его массе.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n}{m}.$$

Алгоритм построения силового многоугольника

1. Выбираем точку А на плоскости, или центр масс тела.
2. Помещаем в выбранную точку начало первого вектора \vec{F}_1 , переместив его параллельно самому себе и сохранив его величину.
3. Помещаем в конец первого вектора начало второго \vec{F}_2 . Вычерчиваем один за другим в аналогичном порядке векторы остальных сил \vec{F}_3 и \vec{F}_4 .
4. Вектор равнодействующей силы замыкает полученную ломаную линию, он соединяет начало первого вектора с концом последнего и направлен ему навстречу.

Направление ускорения совпадает с направлением равнодействующей всех сил, приложенных к телу $\vec{a} \uparrow \vec{F}_R$. Тело движется равнопеременно, т. е. с постоянным ускорением, если величина равнодействующей силы не меняется $\vec{a} = const$, при $\vec{F}_R = const$. Второй закон Ньютона определяет условие, при котором тело движется неравномерно или равнопеременно. Второй закон Ньютона, справедлив для ИСО.

III закон Ньютона:

Тела взаимодействуют силами равными по модулю, противоположными по направлению. Они являются силами одной природы, приложены к разным телам, действуют вдоль одной прямой.

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

В решении задач динамики используют алгоритм, знание которого позволяет справиться со стандартными задачами.

Алгоритм решения задач по динамике

1. На рисунке показать силы, действующие на тело, и направление ускорения (рис. 13).

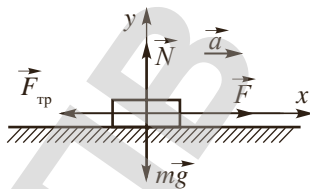


Рис. 13. Под действием четырех сил тело движется с ускорением \vec{a} по горизонтальной плоскости

2. Записать основной закон движения в векторном виде:

$$m\vec{a} = \vec{F} + m\vec{g} + \vec{F}_{mp} + \vec{N}.$$
3. Выбрать удобные для решения оси Ox и Oy , направив одну из них по направлению движения тела.

4. Записать основной закон в проекции на выбранные оси:

$$\begin{aligned} ma_x &= F_x + mg_x + F_{mp,x} + N_x \\ ma_y &= F_y + mg_y + F_{mp,y} + N_y. \end{aligned}$$

5. Выразить проекции векторов через модули с учетом знаков:

$$\begin{aligned} ma &= F - F_{mp} \\ 0 &= -mg + N. \end{aligned}$$

6. Записать при необходимости формулы расчета сил и кинематических величин, например:

$$F_{mp} = \mu N; \quad a = \frac{v^2 - v_0^2}{2s}.$$

7. Решить систему уравнений относительно неизвестной величины, например, конечной скорости.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Три одинаковых кубика, связанные невесомыми нитями, движутся по гладкому горизонтальному столу под действием горизонтальной силы $F = 12$ Н, приложенной к первому кубику. Чему равна сила натяжения нити F_n , связывающая второй и третий кубики (см. рис.)?



Дано:

$$F = 12 \text{ Н}$$

$$m_1 = m_2 = m_3 = m$$

$$F_n = ?$$

Решение:

Запишем второй закон Ньютона для системы трех одинаковых кубиков массой m каждый:

$$3ma = F \quad (1)$$

и для третьего тела, движущегося под действием натяжения нити:

$$ma = F_n \quad (2)$$

Так как ускорение кубиков одинаково (нерастяжимые нити), то из уравнений (1) и (2) получим:

$$F_n = \frac{F}{3}$$

$$F_n = 4 \text{ Н.}$$

Ответ: $F_n = 4$ Н.



Ответьте на вопрос

По III закону Ньютона силы взаимодействия лошади и саней одинаковы (рис. 14). Почему лошадь везет сани, а не наоборот?



Рис. 14. Силы взаимодействия равны по III закону Ньютона

Контрольные вопросы

1. Как определяют равнодействующую сил?
2. Сформулируйте законы Ньютона.
3. Какие виды сил по природе своего происхождения вам известны?



Упражнение

4

1. Какую силу нужно приложить, чтобы магнит массой 50 г, прилипший к стальной вертикальной плите, равномерно переместить вертикально вверх? Для равномерного движения магнита ($a = 0$) вертикально вниз прикладывают силу 1,5 Н. Решите задачу по алгоритму.

2. Скорость меч-рыбы при нападении достигает 140 км/ч (рис. 15). Она, не пострадав, может пробить обшивку судна: в ее голове у основания «меча» есть гидравлический амортизатор – небольшие полости, заполненные жиром, которые смягчают удар. Хрящевые прокладки между позвонками уменьшают силу удара. Определите силу сопротивления обшивки судна толщиной 20 см, если рыба массой 10 кг пробивает ее за 0,5 с.



Рис. 15. Меч-рыба представляет опасность для судов

Творческое задание

Составьте кластер: «Силы в природе», указав их основные характеристики и взаимосвязи.

§5. Закон всемирного тяготения

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- понимать закон всемирного тяготения и описывать движение космических аппаратов.

I. Закон всемирного тяготения в применении к материальным точкам

Закон всемирного тяготения был сформулирован И. Ньютоном в 1667 г.

Сила всемирного притяжения двух тел прямо пропорциональна произведению масс этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

$$F = \frac{Gm_1m_2}{R^2}, \quad (1)$$

где $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{Н \cdot м^2}{кг^2}$ – гравитационная постоянная.

Сила тяготения для тел малой массы ничтожно мала. Она значительна для небесных тел, которые имеют, в основном, шарообразную форму. Силы гравитационного взаимодействия направлены вдоль прямой, соединяющей центры тяжести тел, они являются *центральными* (рис. 16).

II. Орбиты спутников. Первая космическая скорость

Ньютон считал, что движение планет и их спутников подчиняется одним и тем же законам, что они основаны на законе всемирного тяготения, законе сохранения энергии и основных законах динамики. Определим значение первой космической скорости из второго закона Ньютона:

$$ma_n = F. \quad (2)$$

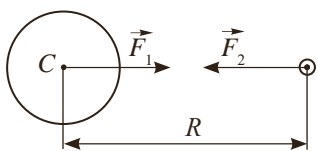
Используя закон всемирного тяготения и формулу, связывающую центростремительное ускорение с линейной скоростью спутника, формулу (2) запишем в виде:

$$\frac{mv^2}{R} = \frac{GMm}{R^2}, \quad (3)$$

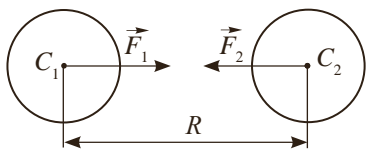
где M – масса Земли.

Из соотношения (3) выразим скорость спутника:

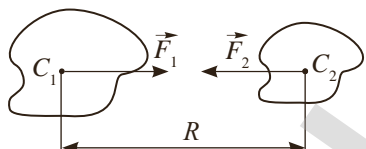
$$v_I = \sqrt{\frac{GM}{R}}. \quad (4)$$



а)



б)



в)

Рис. 16. Силы всемирного тяготения центральные



Ответьте на вопрос

Почему при определении силы тяготения между телами больших объемов необходимо знать расположение их центра тяжести?

Для искусственных спутников Земли первая космическая скорость равна 7,9 км/с. Тело, запущенное вблизи поверхности Земли горизонтально со скоростью 7,9 км/с, становится спутником. Из-за кривизны поверхности нашей планеты оно не может упасть на Землю.



Запомните!

Если запуск спутника совершают с межконтинентальной станции, то первая космическая скорость меньше:

$$v_{1h} = \sqrt{\frac{GM}{R_3 + h}}$$

На высоте равной радиусу

Земли: $v_{1h} = 5,6 \frac{км}{с}$.

Чем больше радиус орбиты тела, тем меньше ее орбитальная скорость.



Возьмите на заметку!

Используя закон сохранения энергии не сложно рассчитать скорость, при которой спутник преодолет силу тяготения Земли и станет спутником Солнца. Эту скорость называют *второй космической*. Вторая космическая скорость для Земли равна 11,2 км/с.



Интересно знать!

4 октября 1957 г. у нашей планеты появился первый искусственный спутник (рис. 17). Советский Союз запустил на околоземную орбиту «Спутник-1», который со скоростью 24500 км/ч вращался вокруг планеты 92 суток, после чего вошел в атмосферу и сгорел.



Рис. 17. Первый ИСЗ



Возьмите на заметку

Скорость движения спутника рассчитывается таким образом, чтобы ускорение свободного падения стало центростремительным, а радиус Земли вместе с высотой полета – радиусом окружности, по которой будет двигаться искусственный спутник Земли (ИСЗ).

III. Параметры орбит спутников

Расстояние орбит от поверхности Земли колеблется от 100 км до 40 тыс. км. Радиус Земли, для сравнения, составляет около 6400 км. Вывод ИСЗ на низкую околоземную орбиту более экономичный, но из-за притяжения Земли и трения о верхние слои атмосферы время работы таких аппаратов непродолжительно.

Чтобы увеличить срок эксплуатации таких спутников, нужно увеличить их скорость вращения вокруг Земли. В таблице даны значения орбитальных скоростей околоземных и геостационарных спутников.

Таблица 4. Значения орбитальных скоростей околоземных и геостационарных спутников

Орбита	Высота над поверхностью Земли	Орбитальная скорость	Орбитальный период
Поверхность Земли, для сравнения	0 км	7,89 км	-
Низкая опорная орбита	200–2000 км	Круговая 6,9–7,8 км/с Эллиптическая 6,5–8,2 км/с	89–128 мин
Геостационарная	35786 км	3,1 км/с	23 ч 56 мин

Орбиту спутника характеризуют *углом наклона плоскости* вращения вокруг Земли к плоскости

экватора (рис. 18). Если орбита спутника полярная (3), то он вращается над полюсами с наклоном 90° к плоскости экватора. Такие спутники могут обследовать всю поверхность планеты, их используют для геодезических исследований. Если орбита спутника экваториальная (1) и высота полета над поверхностью Земли равна 35786 км, то спутник, летящий в сторону направления вращения Земли, будет находиться на геостационарной орбите и вращаться синхронно с Землей, находясь над одной точкой земного экватора. Такой спутник используется для осуществления спутниковой связи. Орбиты с наклоном к плоскости экватора меньшим, чем 90° (2) используют для навигационных ИСЗ.

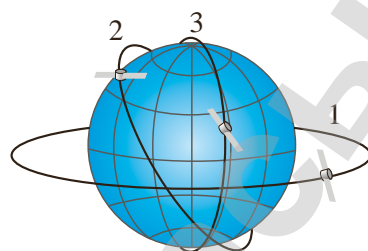


Рис. 18. Виды орбит спутников

IV. Виды спутников

Спутники используются для научных исследований и для решения различных народнохозяйственных задач. Существуют метеорологические, астрономические, исследовательские, геофизические, телекоммуникационные, навигационные спутники Земли.

Метеорологические ИСЗ предназначены для прогнозирования погодных условий. Они постоянно передают данные на наземные станции в виде изображений облачного, снегового и ледового покровов Земли, сведения о температурных составляющих поверхности Земли и различных слоев атмосферы, информацию об атмосферном давлении, химическом составе воздуха. Первым метеорологическим спутником стал TIROS, он был запущен 1 апреля 1960 г. (рис. 19). Современные метеорологические ИСЗ оснащены радиометрами, которые регистрируют все, что видно не только в видимом, но и в инфракрасном спектре.

Астрономические ИСЗ – это спутники, предназначенные для исследования планет, галактик и других космических объектов. Примером таких аппаратов являются орбитальные телескопы, действующие в различных диапазонах электромагнитных волн. На орбиты выведены телескопы ряда стран: итальянский «AGILE», американский «Fermi Gamma-ray Space Telescope»; в инфракрасном диапазоне волн работает японский телескоп «AKARI». Телескоп «Hubble Space Telescope» (США) изучает космические объекты в диапазоне от инфракрасного до ультрафиолетового излучения (рис. 20).



Рис. 19. Первый метеорологический спутник Земли TIROS



Рис. 20. Телескоп «Hubble»

Геофизические ИСЗ – это спутники, которые осуществляют дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ). Диапазон длин волн, принимаемых съемочной аппаратурой, лежит в интервале от ультрафиолетовых до радиоволн. Спутники служат для слежения за состоянием флоры и фауны, морских и воздушных течений, разведки полезных ископаемых. Примером таких аппаратов могут служить спутники серии «Landsat» (рис. 21), «AQUA», «AURA». Первым аппаратом такого типа был «Landsat 1», он был запущен 23 июля 1972 года. Это был первый спутник, который был запущен со специальным заданием изучения и контроля поверхности нашей планеты.

Телекоммуникационные ИСЗ предназначены для организации телефонной связи между континентами, трансляции телевизионных каналов в любые регионы планеты, передачи интернет-данных в любые точки Земли (рис. 22). США начали эксперименты с такими спутниками в 1960 г., Советский Союз – с апреля 1965 г., Казахстан – с 2006 г.

Навигационные ИСЗ предназначены для быстрого и точного определения нахождения объекта на планете с помощью системы GPS (рис. 23). Благодаря сигналам, излучаемым несколькими десятками спутников, содержащим данные об их положении и точном времени, можно рассчитать свое положение на Земле с точностью до нескольких метров. В настоящее время глобальными системами навигации являются GPS и ГЛОНАСС.

Научно-исследовательские ИСЗ применяются для проведения всевозможных научных исследований: биологических, медицинских или инженерных.

V. ИСЗ Казахстана

Первый спутник, разработанный для Казахстана российским государственным космическим научно-производственным центром имени М. Хруничева, был запущен с космодрома Байконур в июне 2006 г. Спутник «KazSat-1» – легкий телекоммуникационный геостационарный спутник. На него были переведены сети телевидения и интернет-коммуникации РК. Спутник «KazSat-1», вследствие произошедшего сбоя в системе управления, с 8 июня 2008 г. находился в режиме неориентированного полета. В период с 6 августа по 13 августа 2009 г. были



Рис. 21. Спутник дистанционного зондирования Земли «Landsat 8»



Рис. 22. Казахстанский телекоммуникационный спутник «KazSat-3»



Рис. 23. Навигационная система GPS

проведены мероприятия по уводу аварийного космического аппарата «KazSat-1» на орбиту захоронения, так как космический аппарат представлял собой угрозу для полета других спутников.

В 2011 г. ракетой-носителем «Протон» на орбиту выведен ИСЗ «KazSat-2», в 2014 г. – «KazSat-3», которые предназначены для обеспечения телевизионного вещания и передачи данных в системе спутниковой связи на территории РК, центральной Азии и центральной части России, а также для удовлетворения потребностей казахстанских операторов спутниковой связи. Очередной спутник «KazSat-4» планируют собирать на заводе сборочно-испытательного комплекса в Нур-Султане.

Первый спутник казахстанской космической системы дистанционного зондирования Земли «KazEOSat-1» запущен ракетой-носителем «Ariane» с космодрома Куру во Французской Гвиане 30 апреля 2014 г. (рис. 24). Запуск КА ДЗЗ среднего разрешения «KazEOSat-2» состоялся 20 июня 2014 г. с российской пусковой базы «Ясный».



Рис. 24. Геофизический ИСЗ РК «KazEOSat-1»

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон всемирного тяготения.
2. К какой точке тела приложена сила тяготения?
3. Как меняется гравитационное поле небесных тел при удалении от них?
4. Что называют искусственным спутником Земли?
5. Какие виды спутников вам известны?

★ Упражнение

5

1. Наибольшее удаление от поверхности Земли космического корабля «Восток», запущенного 12 апреля 1961 г. с первым в мире летчиком-космонавтом Ю.А. Гагариным, составляло 327 км. На сколько процентов сила тяжести, действовавшая на орбите, была меньше силы тяжести, действовавшая на него на Земле? Почему космонавт находился в невесомости?
2. Какую скорость должен иметь искусственный спутник, чтобы обращаться по круговой орбите на высоте 600 км над поверхностью Земли? Каков будет период его обращения?
3. Во сколько раз отличается скорость искусственного спутника, движущегося на высоте 21 600 км над поверхностью Земли, от скорости спутника, движущегося на высоте 600 км над поверхностью? Радиус Земли принять равным 6400 км.
4. С космодрома Байконур 12 сентября 1959 г. стартовала ракета «Восток-Л». Она вывела на траекторию полета к естественному спутнику Земли Луне

автоматическую межпланетную станцию (АМС) «Луна-2», которая на следующий день впервые в мире достигла поверхности Луны и совершила жесткую посадку на ее поверхность (рис. 25). Во сколько раз уменьшилась сила тяготения Земли, действующая на АМС в моменты, когда она удалилась от поверхности планеты на расстояние равное R_3 ? $2R_3$? $3R_3$?



Рис. 25. АМС «Луна-2»

Творческое задание

1. Определите силы притяжения между Солнцем и планетами Солнечной системы. Проанализируйте полученные результаты. Необходимые данные найдите в справочной литературе.
2. Подготовьте сообщение по темам (на выбор):
 1. «Запуск первого ИСЗ».
 2. «Решение проблемы космического мусора».
 3. «Почему возможны столкновения ИСЗ?»
 4. «Орбита захоронения».

§6. Движение тела в гравитационном поле

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать изменения физических величин при движении тела, брошенного под углом к горизонту и вертикально.

I. Ускорение, мгновенная и средняя скорость тела, движущегося вертикально в гравитационном поле

Под действием силы тяготения Земли тело движется с ускорением свободного падения. Движение в этом случае называют *свободным падением*.

Известно, что *ускорение* – это величина, характеризующая быстроту изменения скорости:

$$g_y = \frac{v_y - v_{0y}}{\Delta t}. \quad (1)$$

При известном значении начальной скорости движения можно определить мгновенную скорость движения тела.

Мгновенная скорость тела – это скорость тела в любой момент времени:

$$v_y = v_{0y} + g_y t. \quad (2)$$

Зависимость скорости от времени линейная. Следовательно, среднюю скорость можно определить как среднюю арифметическую величину начальной и конечной скоростей на отдельном участке:

$$v_{cp} = \frac{v_0 + v}{2}. \quad (3)$$

II. Независимость движений

Физики, изучая различные виды движения, обнаружили, что одно и то же тело может участвовать в нескольких движениях, при этом одно движение никаким образом не влияет на другое. Например, движение тела, брошенного под углом к горизонту, рассматривают при отсутствии сопротивления воздуха как сочетание двух прямолинейных движений: свободного падения тела по вертикали и равномерного движения по горизонтали. Каждый вид движения описывают соответствующими законами и уравнениями расчета кинематических величин, которые отличаются друг от друга. Общим в этих движениях является время движения.

III. Траектория движения тела, брошенного под углом к горизонту. Баллистика

Задача «бросить предмет как можно дальше» решается с незапамятных времен. Камень, брошенный рукой или выпущенный из рогатки, стрела, вылетевшая из лука, ружейная пуля, артиллерийский



Вспомните!

- Если ускорение тела сонаправлено со скоростью его движения, то движение равноускоренное.
- Если ускорение тела направлено противоположно скорости его движения, то движение равнозамедленное.



Ответьте на вопросы

- Как движется тела, запущенный вертикально вверх?
- Каким станет его движение при спуске вертикально вниз?



Запомните!

Баллистика – это наука, изучающая движение брошенного тела в атмосфере Земли.

снаряд, баллистическая ракета – вот краткий перечень успехов в этой области.

Проводя баллистическую экспертизу, криминалисты удивительно точно могут рассчитать положение стрелка и траекторию выпущенной им пули. Брошенный под углом к горизонту предмет движется по кривой линии, которую называют параболой. Ее можно построить без труда, пользуясь принципом независимости движения. Начнем с простого случая, когда начальная скорость тела горизонтальна.

Через некоторый промежуток времени t тело переместится по горизонтали на $s_1 = v_0 t$ и вниз на отрезок $h_1 = \frac{gt^2}{2}$ (рис. 26). Через промежуток времени $2t$ горизонтальный отрезок станет равным $s_2 = 2v_0 t$, вертикальный – $h_2 = 4 \frac{gt^2}{2}$. Промежутку $3t$ соответствуют перемещения $s_3 = 3v_0 t$ и $h_3 = 9 \frac{gt^2}{2}$. Соединив полученные точки, получим траекторию движения тела.

Аналогично получим траекторию движения тела, брошенного под углом к горизонту. Для этого предварительно разложим скорость на горизонтальную и вертикальную составляющие. На горизонтальной линии отложим перемещение тела:

$$s_1 = v_{гор} t, \quad s_2 = v_{гор} 2t, \quad s_3 = v_{гор} 3t.$$

По вертикали отрезки:

$$h_1 = v_{верт} t - \frac{gt^2}{2}, \quad h_2 = v_{верт} 2t - \frac{g4t^2}{2}, \quad h_3 = v_{верт} 3t - \frac{g9t^2}{2}.$$

Соединив полученные точки, получим параболу (рис. 27).

IV. Значение угла при максимальной дальности полета

Время максимального подъема тела равно $t = \frac{v_{верт}}{g}$,

время всего полета в 2 раза больше: $t_n = 2t = \frac{2v_{верт}}{g}$.

Определим дальность полета: $l = v_{гор} t = \frac{2v_{гор} v_{верт}}{g}$.

Дальность полета пропорциональна произведению составляющих начальной скорости.

Интересно знать!

Метательные машины – вид военной техники, применявшийся в Средние века. При весе снаряда 22 килограмма дальность его полета обычно составляла около 460 метров. Межконтинентальная баллистическая ракета – боевая баллистическая ракета с дальностью полета свыше 5500 км.

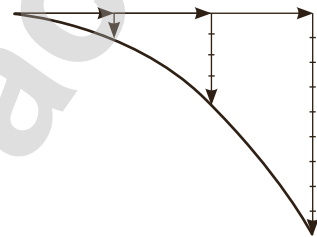


Рис. 26. Траектория движения тела, брошенного горизонтально

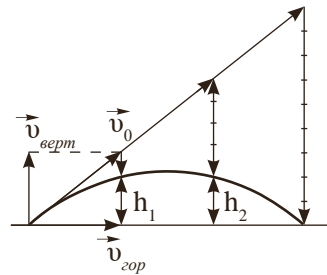


Рис. 27. Траектория движения тела, брошенного под углом к горизонту – парабола

Кусочки науки

Из курса геометрии вам известно, что при известном значении диагонали площадь прямоугольника максимальная в том случае, если стороны прямоугольника равны.

Произведение скоростей $v_{гор} v_{верт}$ равно площади прямоугольника, диагональю которого является начальная скорость (рис. 27). Следовательно, чем больше площадь прямоугольника, тем дальше пролетит тело.

Отсюда следует, что при $v_{гор} = v_{верт}$ вектор начальной скорости составляет с линией горизонта угол 45° . При выполнении этого условия дальность полета максимальная.

V. Метод моделей и реальный мир

Метод моделей является научным методом познания окружающего мира. Особенностью этого метода является введение упрощенных представлений об изучаемом объекте, что создает приближенный характер результатам исследования и теории, построенной на моделях. Поэтому необходимо указывать границы применимости теории на практике.

Используя метод моделей, мы определили угол, при котором дальность полета тела, брошенного под углом к горизонту, будет максимальной. Нами была смоделирована ситуация, когда сопротивление среды отсутствует. Полученные результаты будут близки к траектории движения тела, брошенного на Луне, а не на Земле. Сопротивление воздуха искажает траекторию движения, значительно уменьшая дальность полета (рис. 28).

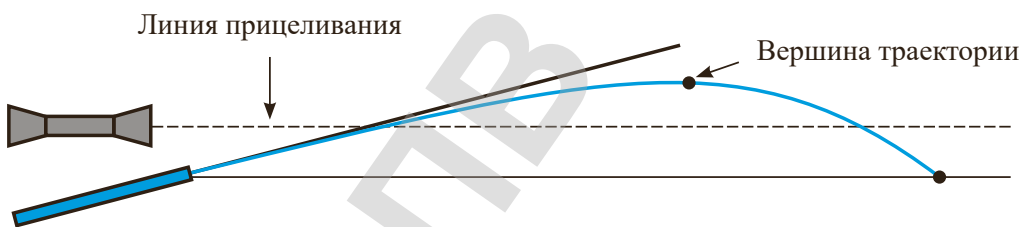


Рис. 28. Под действием силы сопротивления воздуха правая ветвь параболической траектории искажается



Ответьте на вопросы

1. Во время Первой мировой войны (1918 г.) воздушные налеты немцев на Париж совершались регулярно, но вскоре начали успешно отражаться авиацией противника. Немецкий штаб избрал новую тактику поражения – артиллерийскую. Вдруг обнаружилось, что при значении угла стрельбы 52° удается бомбить Париж, удаленный более чем на 110 км. Если орудие стреляло под углом 45° , дальность полета снаряда не превышала 1 км. Как вы думаете, почему?
2. С появлением самолетов, оснащенных ракетами, обнаружилась следующая проблема: при выпуске ракет из самолета в направлении, противоположном направлению полета самолета, эти ракеты разворачивались носом к выпустившему их самолету и начинали его преследовать. Объясните причину такого явления.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Тело брошено вертикально вверх со скоростью 16 м/с. На какой высоте скорость тела уменьшится в 4 раза?

Дано:

$$v = v_0/4 = 4 \text{ м/с}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

 $h = ?$ **Решение:**

Запишем уравнения движения $v = v_0 - gt$, (1)

$$h = v_0 t - \frac{gt^2}{2}. \quad (2)$$

Из (1) находим $t = \frac{v_0 - v}{g} = \frac{16 - 4}{10} = 1,2 \text{ с}$.

Подставляя в (2), получим $h = 16 \cdot 1,2 - \frac{10 \cdot 1,2^2}{2} = 12 \text{ м}$.

Ответ: $h = 12 \text{ м}$.**Контрольные вопросы**

1. Какую величину называют ускорением?
2. Какую скорость называют мгновенной?
3. В чем заключается независимость движений?
4. Как движется тело, брошенное под углом к горизонту?
5. При каком условии дальность полета максимальна?
6. Для чего необходим метод моделей в физике?

★ Упражнение**6**

1. Определите составляющие начальной скорости стрелы (рис. 29), выпущенной из лука со скоростью 60 м/с под углом 20° к горизонту ($\sin 20^\circ \approx 0,34$; $\cos 20^\circ \approx 0,94$).



Рис. 29. Тренировка к республиканским соревнованиям по стрельбе из лука. Жамбылская область

2. В Австрии растет маленький полукустарник, носящий название *дорикниум*. Солнечные лучи согревают плоды этого растения, и из соплодий происходят выстрелы их семян. Растения «стреляют» для того, чтобы как можно дальше разбрасывать свои семена. С какой скоростью растение горизонтально «стреляет» своими семенами, если высота кустарника 70 см, а расстояние, на котором обнаружили семена, равно 2 м (рис. 30)?
3. У кенгуру большие, крепкие задние ноги. Поэтому кенгуру перемещается прыжками, удерживая равновесие с помощью жесткого хвоста. Самый длинный прыжок, зарегистрированный учеными, составляет 13 м 63 см. Рекордный прыжок в высоту равен 3 м 20 см. С какой скоростью кенгуру должен отрываться от земли, чтобы достигнуть максимальной высоты? Под каким углом должен прыгнуть кенгуру, чтобы преодолеть расстояние 13 м 63 см (рис. 31)?



Рис. 30. Траектория полета семени – ветвь параболы



Рис. 31. Прыжок кенгуру – пример движение тела, брошенного под углом к горизонту

Экспериментальное задание

Проведите исследование по выяснению степени искажения траектории движения тела, брошенного под углом к горизонту, от скорости движения тела и угла бросания. В исследовании тело можно заменить струей воды.

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Достижение современной баллистики».
2. «Баллиста, ее конструкция и способ применения».
3. «Средневековые метательные машины».

Итоги главы 2

I закон Ньютона	II закон Ньютона	III закон Ньютона
$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0$ $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0,$ $a = 0, v = const$	Для поступательного движения $\vec{F} = m\vec{a},$ $\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$	$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$
Закон всемирного тяготения		
Для тел, удаленных друг от друга $F = \frac{Gm_1m_2}{R^2}$	Для тела, находящегося на поверхности другого $F = mg$	
Ускорение свободного падения		
Для точки пространства, удаленной от поверхности небесного тела на расстояние h : $g = \frac{GM_T}{(R_T + h)^2}$	У поверхности небесного тела $g = \frac{GM_T}{R_T^2}$	

Законы динамики

I закон Ньютона

Существуют инерциальные системы отсчета, относительно которых тело движется прямолинейно и равномерно или находится в покое, если на тело не действуют силы или действие сил скомпенсировано.

II закон Ньютона

Ускорение, с которым движется тело, прямо пропорционально равнодействующей сил, действующих на него, и обратно пропорционально его массе.

III закон Ньютона

Тела взаимодействуют силами, равными по модулю и противоположными по направлению. Они являются силами одной природы, приложены к разным телам, действуют вдоль одной прямой.

Закон всемирного тяготения

Сила всемирного притяжения двух тел прямо пропорциональна произведению масс этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Глоссарий

Динамика – раздел механики, посвященный изучению движения тел под действием приложенных к ним сил.

Мгновенная скорость тела – скорость тела в любой момент времени.

Ускорение – величина, характеризующая быстроту изменения скорости.

СТАТИКА И ГИДРОСТАТИКА

Статика (от древнегреч. $\sigma\tau\alpha\tau\acute{\iota}\varsigma$ – учение о равновесии) – раздел механики, изучающий условия равновесия материальных тел под действием сил.

Изучив главу, вы сможете:

- определять центр масс абсолютно твердого тела и объяснять различные виды равновесия;
- описывать закон Паскаля и его применение;
- объяснять термин гидростатического давления.

§7. Центр масс. Виды равновесия

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- определять центр масс абсолютно твердого тела и объяснять различные виды равновесия.

Эксперимент

Определите центр масс тела неправильной формы (рис. 32).

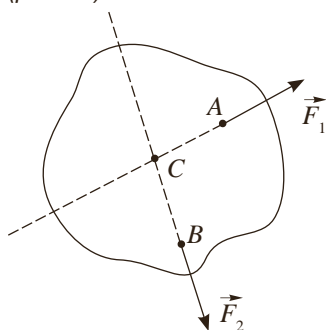


Рис. 32. Определение центра масс тела

Задание 1

Составьте алгоритм решения практической задачи на нахождение координаты центра масс тела.

Эксперимент

Приложите к телу силу, линия которой не проходит через центр масс. Охарактеризуйте вид движения.

I. Центр масс тела

Из курса 7 класса физики вам известны понятия «центр масс» и «центр тяжести».

Центр тяжести – это точка приложения равнодействующей силы тяжести, действующей на тело при любом его положении.

Центр масс – это точка пересечения линий действия сил, приводящих тело в поступательное движение.

Центр тяжести совпадает с центром масс во всех взаимодействиях, происходящих на Земле, так как размеры всех тел значительно меньше Земли.

Центр масс тела правильной формы совпадает с его центром симметрии. Для шара, кольца, диска – это их геометрический центр (рис. 33, а), для цилиндра и трубы – это середина оси (рис. 33, б). Для куба, прямоугольного параллелепипеда – это точка пересечения диагоналей (рис. 33, в).

Изучая поступательное движение тел под действием нескольких сил, мы заменяли их материальной точкой, в которой сосредоточена вся масса тела. Этой точкой является *центр масс*.

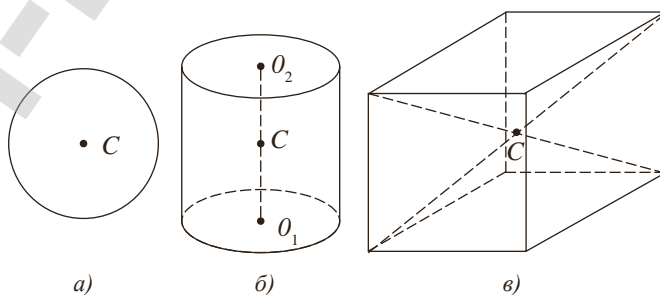


Рис. 33. Центр масс расположен в геометрическом центре фигуры правильной формы

II. Условие вращательного движения абсолютно твердого тела

Окружающие нас тела совершают как поступательное движение, так и вращательное. Нам известно, что движение тела является поступательным в том случае, если линия действия, приложенной к телу

силы или равнодействующей всех сил, проходит через центр масс тела. *Под влиянием сил, линия действия которых не проходит через центр масс, тело совершает вращательное движение.*

Здания, мосты, разнообразные сооружения испытывают действия различных сил, как природных, так и технических, при этом они должны оставаться в покое. О покоящихся телах говорят, что они находятся в равновесии. *Раздел механики, в котором изучают равновесие абсолютно твердых тел, называют статикой.*

III. Условия равновесия абсолютно твердого тела

Тело находится в равновесии при соблюдении двух условий:

1) Сумма внешних сил, приложенных к телу, равна нулю:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0. \quad (1)$$

2) Сумма моментов всех внешних сил, действующих на него относительно любой оси вращения, равна нулю:

$$M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0, \quad (2)$$

$$M = Fd, \quad (3)$$

где M – момент силы, d – плечо силы (рис. 34).

Момент силы, – положительный, если сила вращает тело против часовой стрелки, отрицательный, если – по часовой стрелке.

IV. Виды равновесия

Равновесие – это состояние тела или системы тел, при котором они остаются в покое под действием приложенных сил.

Существует три вида равновесия: *устойчивое, неустойчивое и безразличное (рис. 35).*

Равновесие называют устойчивым, если тело, выведенное из положения равновесия и предоставленное самому себе, возвращается в прежнее положение.

При отклонении тела от положения устойчивого равновесия возникают силы, возвращающие тело в положение равновесия. В устойчивом равновесии



Возьмите на заметку!

Абсолютно твердое тело – это тело, расстояние между частями которого не меняется при действии на него любых сил.

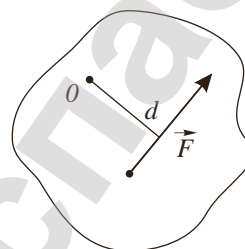


Рис. 34. Плечо образует прямой угол с линией действия силы



Ответьте на вопросы

1. Почему сила, линия действия которой не проходит через центр масс, приводит тело во вращение?
2. Почему длинный стержень легче держать в горизонтальном положении за его середину, чем за один из его концов?

центр тяжести тела занимает самое низкое положение из всех возможных. В положении устойчивого равновесия тело обладает минимальной потенциальной энергией. Устойчивым равновесием обладает, например, кресло-качалка.

Равновесие называют неустойчивым, если тело, выведенное из положения равновесия и предоставленное самому себе, будет еще больше отклоняться от положения равновесия.

При самом незначительном отклонении от положения неустойчивого равновесия равнодействующая сил, действующих на тело, увеличит отклонение тела от положения равновесия. В положении неустойчивого равновесия высота центра тяжести наибольшая, следовательно, потенциальная энергия тела имеет максимальное значение. В состоянии неустойчивого равновесия находится, например, канатоходец (рис. 36).

Равновесие называют безразличным, если тело, выведенное из положения равновесия и предоставленное самому себе, не меняет своего состояния.

При безразличном равновесии потенциальная энергия тела не меняется, так как высота центра тяжести остается на прежнем уровне. Безразличное равновесие характерно шарообразным телам, колесам, катящимся по горизонтальной поверхности.



Рис. 36. Канатоходец в неустойчивом равновесии



Задание 2

Назовите виды равновесия, изображенные на рисунке 35.

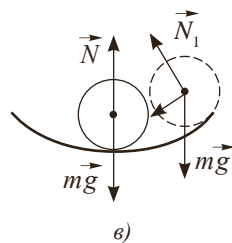
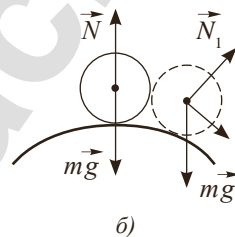
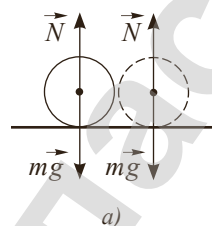


Рис. 35. Виды равновесия



Задание 3

Приведите примеры тел, находящихся в устойчивом, неустойчивом и безразличном равновесии.

Интересно знать!

Уши человека и животных нужны не только для того, чтобы слышать, во внутреннем ухе находится орган, который отвечает за равновесие тела (рис. 37).

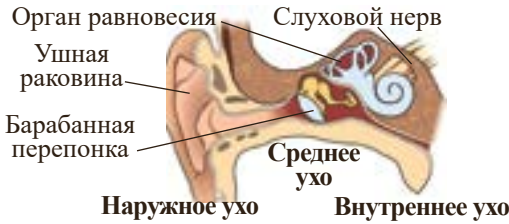


Рис. 37. Строение органов слуха

Интересно знать!

Майкл Грэм – американский художник, который специализируется на создании невероятных по конструкции скульптур из камней (рис. 38). Он выстраивает каменные скульптуры без использования каких-либо подручных скрепляющих материалов.



Рис. 38. Камни в скульптуре находятся в неустойчивом равновесии

V. Устойчивость равновесия тела на опоре. Опрокидывание

Большинство тел вокруг нас: здания, предметы мебели и обихода, машины, качели и карусели, сам человек – покоятся на опорах. Выясним, при каких условиях устойчивость сооружений возрастает. Рассмотрим устойчивость равновесия бруска (рис. 39). Его можно наклонить до некоторого предельного угла, затем он опрокинется. Предельный угол наклона определяют геометрически: $tg\alpha_0 = \frac{L}{H}$ (рис. 39, в). Опытным

путем можно убедиться в том, что тело на опоре можно наклонять до тех пор, пока вертикаль, проведенная через центр тяжести, пересекает площадь опоры (рис. 39, б).

В этом случае тело вращается против часовой стрелки и возвращается в исходное состояние. Как только вертикаль выходит за пределы площади опоры, тело опрокидывается (рис. 39, г). Следовательно, чем больше площадь опоры и ниже тело, тем оно устойчивее.

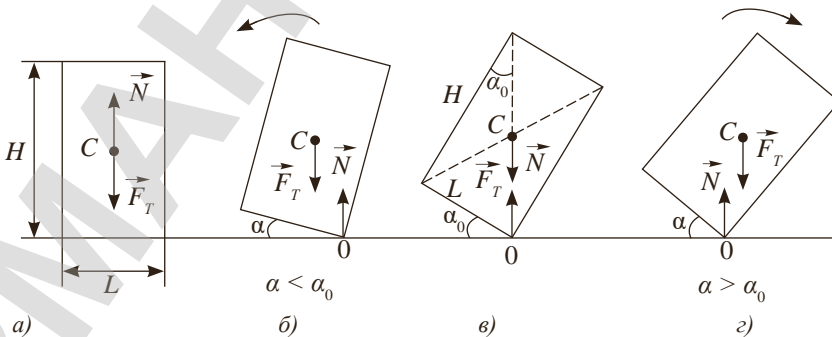


Рис. 39. Условие опрокидывания тела на опоре

Центр масс бруска имеет наименьшую высоту в положении устойчивого равновесия, она равна $H/2$ (рис. 39, а). В положении неустойчивого равновесия высота центра масс повышается до максимального значения (рис. 39, в).

Тело, имеющее площадь опоры, находится в равновесии, если вертикальная прямая, проходящая через центр тяжести тела, не выходит за пределы площади опоры этого тела.

? Ответьте на вопросы

1. Почему небоскребы сужены в верхней части (рис. 40)?
2. Объясните принцип действия игрушки-неваляшки (рис. 41)?
3. Почему груз необходимо загружать не на палубы, а в трюмы кораблей (рис. 42)?



Рис. 40. Небоскреб в Дубае, высота 828 м, 163 этажа

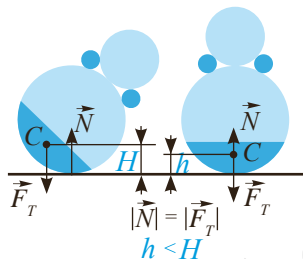


Рис. 41. Игрушка-неваляшка обладает устойчивым равновесием

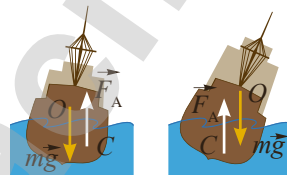


Рис. 42. Устойчивое и неустойчивое равновесие корабля

VI. Устойчивость равновесия тела на подвесе

Тело, имеющее ось вращения, находится в равновесии, если вертикальная прямая, проходящая через центр тяжести тела C , проходит через ось вращения O (рис. 43, а).

Если центр тяжести находится ниже оси вращения, то равновесие устойчивое (рис. 43, б). При любом отклонении потенциальная энергия увеличивается, момент силы тяжести возвращает тело в положение равновесия.

Если центр тяжести и ось вращения совпадают (рис. 43, в), то положение равновесия безразличное.

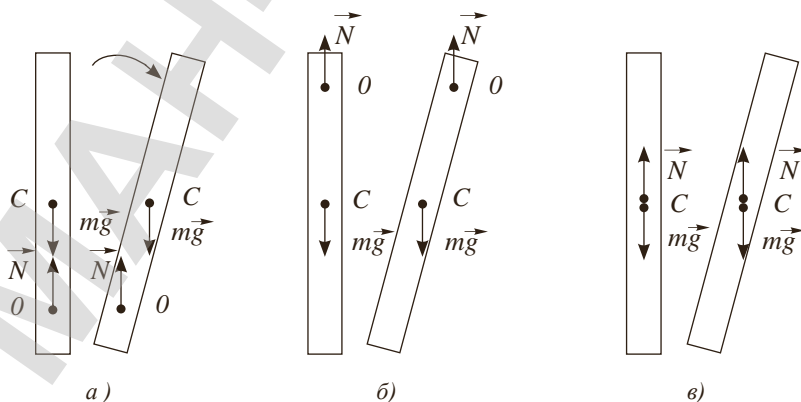


Рис. 43. Равновесие тела на оси вращения

В положении безразличного равновесия находятся морские животные: киты, моржи, тюлени.

В устойчивом равновесии находится маятник механических часов (рис. 44). Для отклонения от положения равновесия к маятнику необходимо приложить силу.

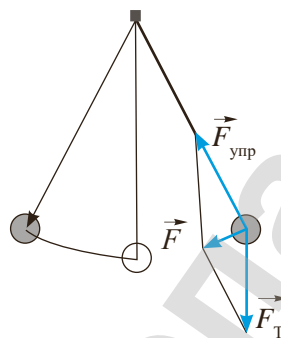
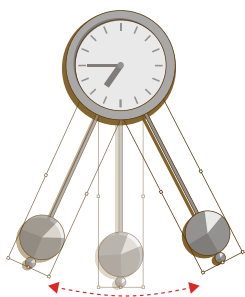


Рис. 44. Маятник часов стремится к положению устойчивого равновесия

Контрольные вопросы

1. При каком условии тело совершает вращательное движение?
2. Что изучает статика?
3. При каких условиях тело остается в равновесии?
4. Какие виды равновесия существуют?
5. При каких условиях тело находится в устойчивом равновесии? Неустойчивом равновесии? Безразличном равновесии?
6. При каком условии тело на опоре опрокидывается?

★ Упражнение

7

1. Бревно длиной 12 м можно уравновесить в горизонтальном положении на подставке, стоящей на расстоянии 3 м от его толстого конца. Если же подставка находится в 6 м от толстого конца, и на тонкий конец сядет рабочий массой 60 кг, то бревно снова будет в равновесии. Определите массу бревна.
2. К концам стержня массой 10 кг и длиной 40 см подвешены грузы массами 40 кг и 10 кг. Где необходимо подпереть стержень, чтобы он находился в равновесии?
3. Одна половина цилиндрического стержня состоит из стали, другая – из алюминия. Определить положение центра тяжести, если длина стержня 30 см.

Творческое задание

1. Изготовьте из подручных материалов куклу-неваляшку.
2. Подготовьте сообщение по темам (на выбор):
 - 1) «Виды равновесия в цирковых трюках».
 - 2) «Роль равновесия в различных видах спорта».

§8. Сообщающиеся сосуды. Применение закона Паскаля

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать закон Паскаля и его применение.



Ответьте на вопросы

1. Как с помощью прозрачной трубки ПВХ (рис. 45), воды и акварельной краски закрепить гардину горизонтально?



Рис. 45. Прозрачная трубка ПВХ

2. Для чего необходим прибор «уровень»? Как им пользоваться (рис. 46)?



Рис. 46. Прибор «уровень»

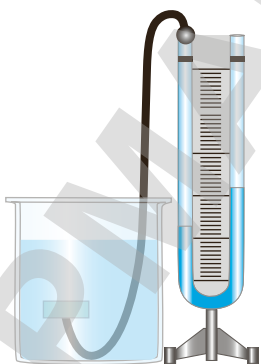


Рис. 49. Измерение давления жидкостным манометром

I. Сообщающиеся сосуды

Из курса физики 7 класса вам известно, что сообщающимися сосудами называют сосуды, соединенные между собой. Они обладают определенными свойствами. Если в сообщающиеся сосуды налить однородную жидкость, то свободная поверхность жидкости в сосудах установится на одном уровне. Давление в жидкости не зависит ни от площади сечения, ни от формы сосуда. Свободная поверхность жидкости устанавливается на одном уровне в сосудах любых размеров и форм (рис. 47).

Если в сосуды налить неоднородные несмешивающиеся жидкости, то их свободные поверхности окажутся на разных уровнях (рис. 48).

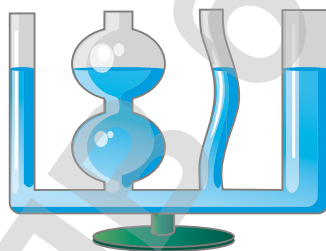


Рис. 47. Уровень однородной жидкости в сообщающихся сосудах не зависит от формы сосуда

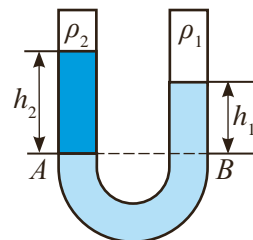


Рис. 48. Для неоднородной жидкости выполняется условие: $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{h_2}{h_1}$



Задание 1

Определите давление в сосуде по показанию водяного манометра (рис. 49), цена деления линейки равна 1 мм.



Ответьте на вопросы

1. Какую величину вы рассчитали, используя формулу $p = \rho gh$?
2. Чему равно давление внутри сосуда, если атмосферное давление равно 101 300 Па?
3. Определите давление в сосуде в том случае, когда атмосферное давление равно 780 мм рт.ст.
4. Можно ли измерить жидкостным манометром давление, меньше атмосферного?



Рис. 50. Артезианская скважина



Рис. 51. Фонтаны Версаля



Рис. 52. Фонтаны Петергофа

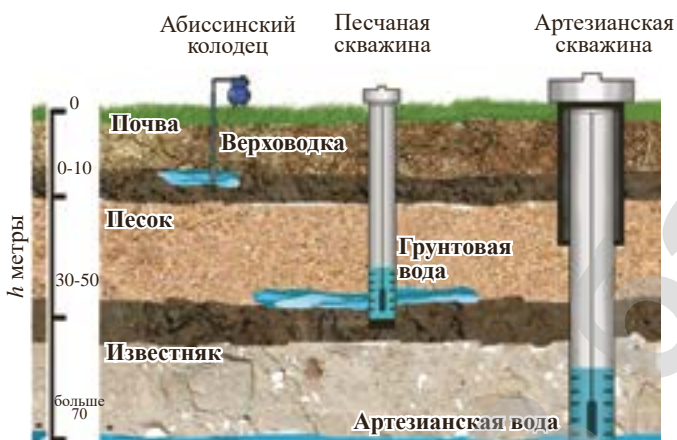


Рис. 53. Глубина колодцев и скважин

Интересно знать!

Артезианские воды славятся не только своими прекрасными качествами самой «вкусной» пресной воды, но и целым набором полезных для организма минералов, микроэлементов и прочих биологически активных веществ (рис. 50).

Ответьте на вопрос

Почему артезианские колодцы строят в низинах (рис. 50)?

Ответьте на вопрос

Почему артезианская вода – самая чистая (рис. 53)?

Задание 2

Рассмотрите рисунки 51 и 52. Что общего в устройстве фонтанов? На каком принципе они действуют?



Рис. 54. Пон-дю-Гар – древнеримский акведук. Перекинут через реку Гардон во французском департаменте Гар близ Ремулана. Длина 275 метров, высота 47 метров. Памятник Всемирного наследия ЮНЕСКО



Рис. 55. Акведук, вид сверху. Каталония, Испания. Памятник Всемирного наследия ЮНЕСКО

Интересно знать!

Для снабжения населения водой римляне возводили многокилометровые *акведуки* – *водопроводы, доставлявшие воду из горных источников* (рис. 54, 55). Они придавали водопроводным трубам равномерный уклон вниз на всем их пути. Над оврагами создавались прочные арочные конструкции, которые украшали и дополняли ландшафт.

Возьмите на заметку

Один из римских акведуков Аква Марциа имеет 100 км в длину что вдвое превышает расстояние между ее концами. Римляне не знали закон сообщающихся сосудов. Они проложили полсотни километров каменной кладки из-за незнания элементарного закона физики.

Интересно знать!

Первый водопровод в Казахстане был построен в 1911 году в г. Семипалатинск. Руководил строительством водопровода Д.В. Елисеев. Проект был разработан товариществом «Нептун» г. Москвы. Водоприемник был размещен на протоке реки Иртыш в Семипалатинку, насосная станция построена на берегу речки Семипалатинки, а здание водонапорной башни на самом высоком месте города, между улицами Дальняя и Новосельская (на улице Жамакаева) (рис. 56).



Рис. 56. Водонапорная башня, г. Семей

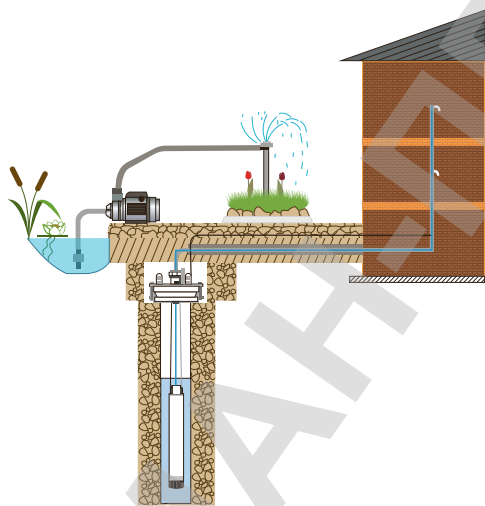


Рис. 57. Водопровод с поверхностными и погружными насосами



Рис. 58. Водопровод с водонапорной башней

Задание 3

Сравните рисунки 57 и 58. Что общего и в чем различие водопроводов, изображенных на рисунках?

Задание 4

Объясните свойства сообщающихся сосудов на основе закона Паскаля.

Ответьте на вопрос

Почему водонапорные башни стали историческими объектами?

II. Применение закона Паскаля

Закон Паскаля получил широкое применение. Приведем небольшой перечень устройств и сооружений, в основе действия которых лежит закон Паскаля: гидравлический пресс, гидравлический домкрат, пневматические машины и устройства (отбойный молоток, долото); гидросооружения для подъема и спуска судов на плотинах – шлюзы; измерительный прибор – жидкостный манометр; надувные резиновые изделия: мячи, багуты, камеры велосипедные, надувные шары; системы водоснабжения: фонтаны, артезианские колодцы, водонапорные башни, водометы, опрыскиватели, гидропушки.

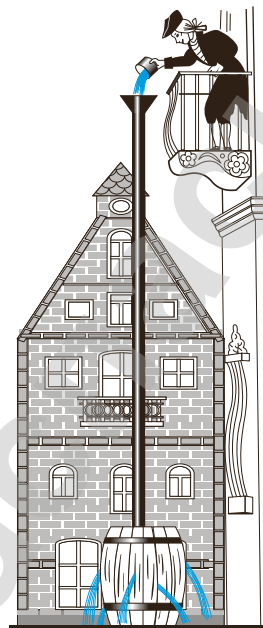


Рис. 59. Опыт Б. Паскаля



Вспомните!

Опыт, подтверждающий зависимость давления жидкости от высоты ее столба и плотности был продемонстрирован Б. Паскалем в 1648 году. Трубку диаметром 1 см и высотой 5 м он вставил в закрытую дубовую бочку с водой. С балкона 2 этажа Паскаль вылил в эту трубку кружку воды. Давление в бочке увеличилось настолько, что вода потекла через щели, образовавшиеся в бочке (рис. 59).

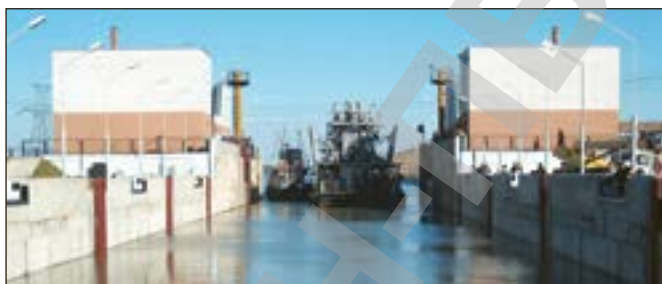


Рис. 61. Однокамерный шлюз Шульбинской ГЭС на Иртыше, ВКО

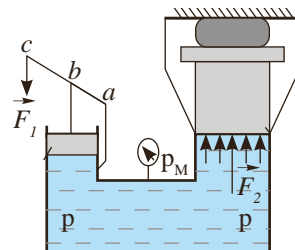


Рис. 60. Гидравлический пресс



Рис. 62. Принципиальная схема шлюза



Задание 5

Используя трубку ПВХ, линейку и скотч, изготовьте манометр. Испытайте его в действии: соединив с капсулой, измерьте давление внутри сосуда с водой.



Задание 6

Рассмотрите рисунки 60–62. Поясните принцип действия гидравлического пресса и шлюза.

Контрольные вопросы

1. Какие сосуды называют сообщающимися?
2. Какими свойствами обладают сообщающиеся сосуды?
3. В чем заключается закон Паскаля?
4. Приведите примеры практического применения закона Паскаля.

★ Упражнение

8

1. Определите давление газа в сосуде по показанию водного манометра (рис. 63). Плотность воды 1000 кг/м^3 . Давление атмосферы примите равным 100 кПа .
2. В известном опыте Паскаля давление в бочке с водой создается весом столба воды в трубке. Если удвоить силу, действующую на тело, то удвоится и давление. Следовательно, если вместо одной трубки с водой взять две (рис. 64), то давление воды на стенки бочки должно увеличиться вдвое. Манометр, показывающий давление, производимое на жидкость, при замене одной трубки двумя не изменяет своих показаний. В чем ошибка рассуждений?

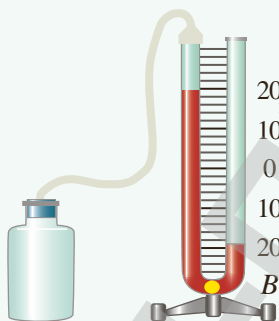


Рис. 63. К упражнению 8.1

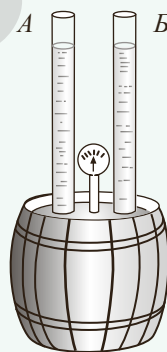


Рис. 64. К упражнению 8.2

3. Определите максимальный выигрыш в силе, который дает гидравлический пресс с площадями поршней 5 см^2 и $0,5 \text{ м}^2$.

Экспериментальные задания

1. Наденьте мешок на руку, опустите руку в сосуд с водой. Обратите внимание, на то, как он охватит руку вплотную со всех сторон.
2. Убедитесь в том, что давление передается во всех направлениях одинаково, заполнив полиэтиленовый мешок с заранее проделанными мелкими отверстиями водой (рис. 65).



Рис. 65. К экспериментальному заданию 2

3. Вставьте в закрытый сосуд с водой трубку. Что нужно сделать, чтобы вода вылилась по трубке (рис. 66)?

Объясните технологию подъема нефти по скважине, основываясь на проведенном опыте (рис. 67).



Рис. 66. К экспериментальному заданию 3



Рис. 67. К экспериментальному заданию 3

Творческое задание

1. Подготовьте сообщение с презентацией о применении закона Паскаля в технике.
2. Изготовьте модель фонтана.

§9. Опыт Торричелли. Атмосферное давление

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснить термин гидростатического давления.



Ал Хайсама (XI в.) – арабский ученый-универсал: математик, механик, физик и астроном.

I. Ученые об атмосфере и ее свойствах. Опыт Торричелли

Аристотель считал, что воздух имеет вес и является одним из четырех материальных элементов. Он знал о всасывающем действии разреженного пространства и пришел к выводу, что «Природа не терпит пустоты».

Ал Хайсама был убежден в том, что воздух имеет вес и что плотность воздуха уменьшается с высотой. Наблюдая за продолжительностью сумерек, Ал Хайсама оценивал высоту атмосферы примерно в 40 километров.

Наблюдая за работой всасывающего насоса при построении колодца итальянскими мастерами, Галилей определил предельную высоту водяного столба как 18 локтей (около 10 м), которую он назвал мерой «боязни пустоты». Он с достаточной точностью оценил давление атмосферы.



Ответьте на вопросы

1. Как измеряют атмосферное давление?
2. Чему равно нормальное атмосферное давление?
3. Как человек дышит?
4. Чему равна масса воздушной оболочки Земли?



Эксперимент

1. Пронаблюдайте за подъемом воды за поршнем (рис. 68). Что заставляет воду подниматься за поршнем?
2. Наполните стакан водой, закройте листом бумаги. Переверните стакан вверх дном, придерживая бумагу рукой (рис. 69). Отнимите руку от бумаги. Объясните, почему лист удерживает воду в стакане.

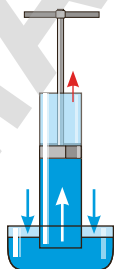


Рис. 68. К эксперименту 1

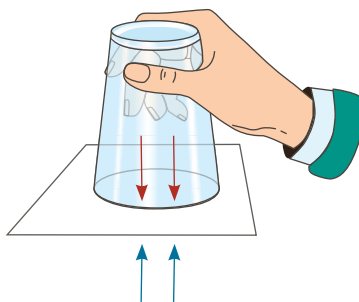


Рис. 69. К эксперименту 2

После изобретения воздушного насоса О. Герике взвесил откачанный сосуд и сосуд с воздухом. Он отметил, что «воздух, несомненно, является телесным нечто». Знаменитый опыт с магдебургскими полушариями окончательно убедил его в существовании атмосферного давления (рис. 70).



Рис. 70. Опыт О. Герике с магдебургскими полушариями, 1654 г.

Восемь пар лошадей не могли разорвать или с трудом разрывали полушария, между которыми был откачан воздух. Когда разрыв происходил, то слышался звук, похожий на ружейный выстрел. Когда в пустоту полушарий вводился воздух, то разнять их было очень легко.

Знаменитые опыты Паскаля с водяным барометром в 1646 г. доказали, что вода может подняться под действием атмосферного давления на высоту 10–13 м. Высота столба жидкости в барометре связана с высотой его расположения над уровнем моря. Тем самым Паскаль подтвердил выводы Торричелли.



Отто фон Герике (XVII в.) – немецкий физик, инженер и философ.



Эванджелиста Торричелли (XVII век) – итальянский математик и физик, ученик Галилея.



Ответьте на вопросы

1. Почему жидкость не выливается из пипетки (рис. 71)?
2. Объясните принцип действия автопоилки (рис. 72)?



Рис. 71. К вопросу 1



Рис. 72. Автопоилка для кур

Торричелли измерил давление атмосферы, сравнив его с давлением ртутного столба. Опыт оправдал его ожидания, ртуть остановилась на заданной высоте, над нею образовалась «торричеллиева пустота» (рис. 73).

Ученый заметил, что высота ртутного столба колеблется: в сухую солнечную погоду повышается, во влажную ветреную – понижается. Это стало доказательством зависимости высоты ртутного столба от давления атмосферы.



Кусочки науки

Опыт произведен Торричелли в 1643 г. для доказательства существования атмосферного давления (рис. 73). Запаянную с одного конца трубку он наполнил ртутью и погрузил открытым концом в чашку с ртутью; часть ртути из трубки перелилась в чашку, в трубке остался столб ртути, который уравновесил атмосферное давление. Пустота над ртутным столбом названа *торричеллиевой пустотой*.



Рис. 73. Опыт Торричелли

II. Атмосферное давление

Трубка Торричелли стала первым барометром. Было измерено давление атмосферы в горах, в шахтах, под водой и выявлено, что при подъеме на 12 м давление атмосферы уменьшается приблизительно на 1 мм рт.ст.

С опыта Торричелли началось научное наблюдение за погодой, важнейшими характеристиками которой являются давление и температура. На смену ртутному барометру пришел барометр-анероид (рис. 74).



Рис. 74. Барометр-анероид



Вспомните!

1. Давление столба жидкости определяют по формуле: $p = \rho gh$.
2. Давление неподвижной жидкости принято называть гидростатическим давлением.
3. Атмосферное давление уменьшается на 1 мм рт.ст. при подъеме на высоту 12 м.
4. Нормальным атмосферным давлением называют давление, равное 760 мм рт.ст. на уровне моря.



Запомните!

Единицы измерения атмосферного давления:
 1 Па, 1 гПа, 1 мм рт.ст.
 Связь единиц измерений:
 1 гПа = 100 Па;
 1 мм рт.ст. \approx 133,3 Па.



Рис. 75. Самая глубокая шахта в мире (5000 м). Тау-Тона, ЮАР



Задание 1

1. Определите цену деления и показания шкал барометра-анероида.
2. Как изменятся показания прибора при спуске в шахту на глубину 600 м (угольные шахты Караганды).
3. Определите давление атмосферы в самой глубокой шахте мира Тау-Тона в ЮАР, глубиной 5000 метров (рис. 75).



Интересно знать!

Представители таких профессий, как водолазы и рабочие кессонов – специальных конструкций, которые используются для постройки подводных сооружений, – вынуждены работать в условиях повышенного давления. При погружении на глубину 10 м давление возрастает в 2 раза, на 100 м – в 11 раз.



Задание 2

1. Докажите, что 760 мм рт.ст. = 101 300 Па.
2. Запишите давление в гПа.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Самолет летит на высоте 2100 м. Сравните давление воздуха снаружи и внутри самолета, если внутри самолета оно соответствует нормальному атмосферному давлению. Определите давление атмосферы на указанной высоте.

Дано:

$$h = 2100 \text{ м}$$

$$p_1 = 760 \text{ мм рт.ст.}$$

$$\Delta p = ? \quad p_2 = ?$$

Решение:

Атмосферное давление уменьшается на 1 мм рт.ст. при подъеме на высоту 12 м. Составим пропорцию:

$$1 \text{ мм рт.ст.} - 12 \text{ м,}$$

$$\Delta p, \text{ мм рт.ст.} - 2100 \text{ м.}$$

Определим изменение давления атмосферы при подъеме

$$\text{на указанную высоту: } \Delta p = \frac{1 \text{ мм рт.ст.} \cdot 2100 \text{ м}}{12 \text{ м}} = 175 \text{ мм рт.ст.} \approx 23327,5 \text{ Па.}$$

Это значение является разностью между давлением внутри и снаружи самолета.

Определим давление на указанной высоте:

$$p_2 = p_1 - \Delta p$$

$$p_2 = 760 \text{ мм рт.ст.} - 175 \text{ мм рт.ст.} = 585 \text{ мм рт.ст.} \approx 77980,5 \text{ Па.}$$

Ответ: $\Delta p \approx 23327,5 \text{ Па; } p_2 \approx 77980,5 \text{ Па.}$

Контрольные вопросы

1. Почему давление атмосферы нельзя рассчитать так же, как рассчитывают давление жидкости на дно сосуда?
2. В чем заключался опыт Торричелли?
3. Как называют прибор для измерения атмосферного давления?
4. Какие виды барометров существуют? Почему широкое распространение получил металлический барометр?
5. Какое давление называют нормальным атмосферным давлением? Чему оно равно?
6. Как изменяется атмосферное давление при увеличении высоты над землей? При спуске под землю?

★ Упражнение

9

1. По проекту, пик башни «Абу-Даби Плаза» в г. Нур-Султан составляет 382 м. Определите давление на этой высоте (рис. 76).
2. Составьте диаграмму зависимости давления от высоты на последних этажах высотных зданий.

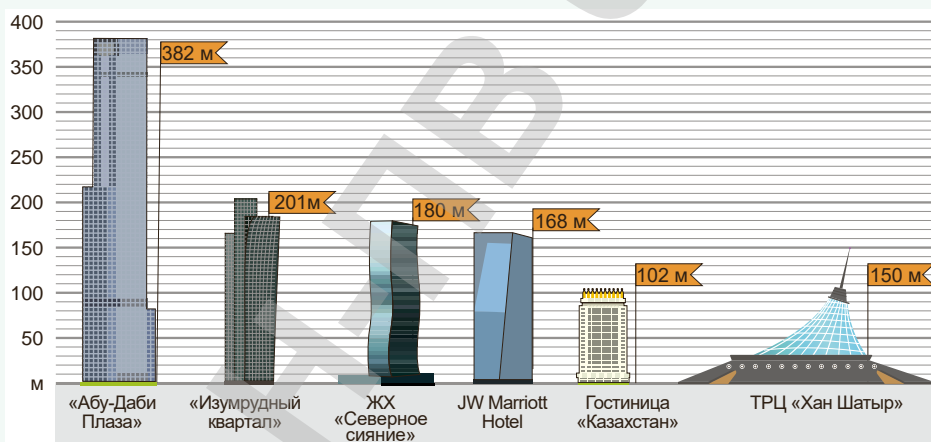


Рис. 76. Диаграмма высотных зданий в городах Нур-Султан и Алматы

3. Определите гидростатическое давление на дне Каспийского моря (рис. 77). Рассчитайте истинное давление с учетом атмосферного, сравнив уровни свободной поверхности с уровнем моря.
4. Определите давление на дне Каспийского моря вблизи побережья г. Актау (рис. 78).

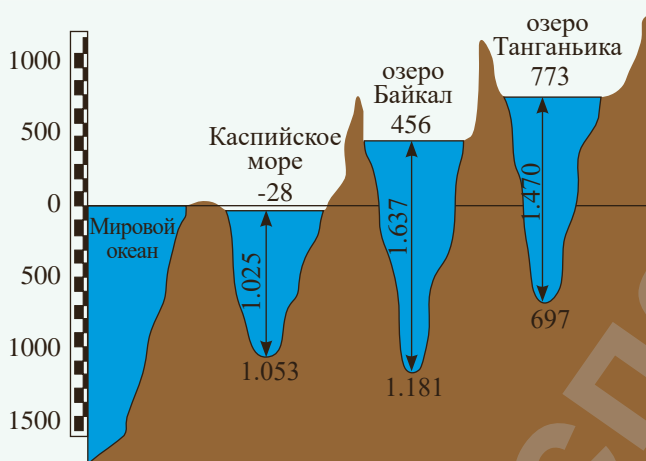


Рис. 77. Каспийское море-озеро уступает по глубине только озерам Байкал и Танганьика

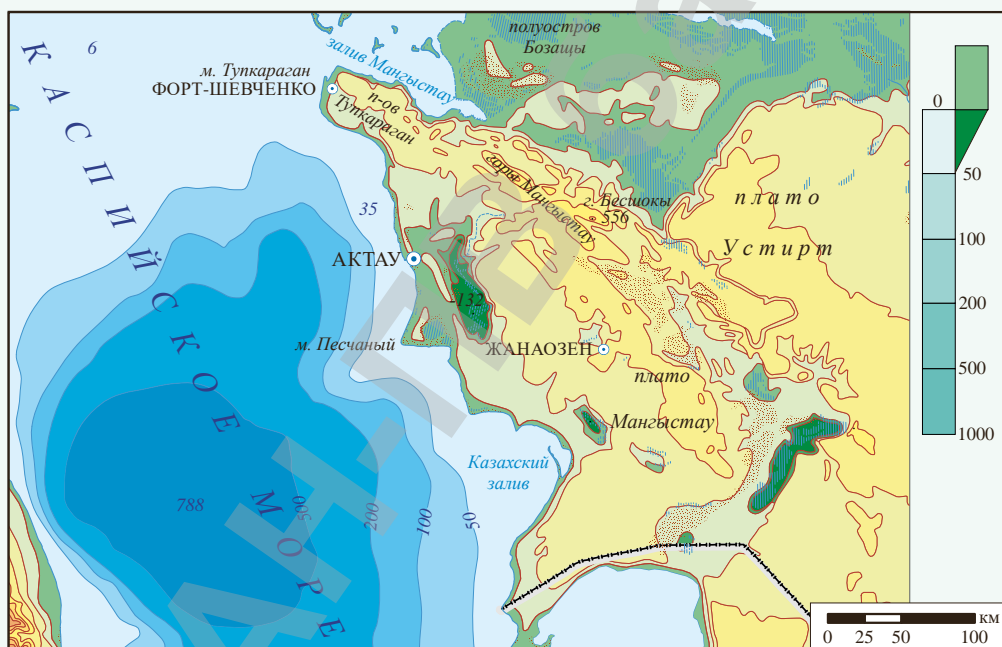


Рис. 78. Гидрографическая карта Каспийского моря. Казахстан, Актау

Творческое задание

Подготовьте сообщения с ppt-презентацией (на выбор):

1. «Кессон для подводной работы».
2. «Устройство и назначение барокамеры».
3. «Кессонная болезнь, ее последствия».

Итоги главы 3

Условия равновесия твердого тела	Момент силы
$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0$ $M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0$	$M = Fd$
Гидростатическое давление	Условия равновесия неоднородной жидкости в сообщающихся сосудах
$p = \rho gh$	$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{h_2}{h_1}$

Глоссарий

Центр тяжести – это точка приложения силы тяжести, действующей на тело при любом его положении.

Центр масс – это точка пересечения линий действия сил, приводящих тело в поступательное движение.

Равновесие – состояние тела или системы тел, при котором под действием приложенных сил они остаются в покое.

Равновесие называют устойчивым, если тело, выведенное из положения равновесия и предоставленное самому себе, возвращается в прежнее положение.

Равновесие называют неустойчивым, если тело, выведенное из положения равновесия и предоставленное самому себе, будет еще больше отклоняться от положения равновесия.

Равновесие называют безразличным, если тело, выведенное из положения равновесия и предоставленное самому себе, не меняет своего состояния.

Давление, производимое на жидкость или газ, передается в любую точку без изменений во всех направлениях.

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Законы сохранения позволяют, не рассматривая силы, действующие на тела системы, и не прослеживая движение тел из одного состояния в другое, решать задачи динамики. Законы сохранения импульса и полной механической энергии выполняются для тел замкнутой системы любых размеров, как для частиц микромира, так и космических тел. Законы справедливы и в том случае, когда на тела системы действуют внешние силы, но их равнодействующая равна нулю. В земных условиях такими силами являются сила притяжения Земли и сила реакции опоры.

Изучив главу, вы сможете:

- объяснять законы сохранения.

§10. Законы сохранения импульса и механической энергии

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять законы сохранения.



Рене Декарт (1596–1650) – французский философ, математик, физик и физиолог, ввел понятие количества движения. Декарт высказал закон сохранения количества движения, дал понятие импульса силы.

I. Импульс тела

Взрыв – настолько знакомое явление, что не всегда и не у всех вызывает вопрос: «Откуда взялось движение осколков, ведь снаряд находился в покое»? Представим обратный процесс: все осколки собираются в целый снаряд. Такой процесс невозможен, это противоречит законам физики. Но что-то похожее можно смоделировать. Два движущихся неупругих тела одинаковой массы, движущиеся навстречу друг другу с одинаковыми скоростями, при столкновении останавливаются. Способность движения исчезать и вновь появляться дала пищу для размышления многим ученым.

Французским ученым Р. Декартом для объяснения указанных свойств впервые было введено понятие «количество движения». Так как физическое понятие массы в то время отсутствовало, он определил импульс как произведение «величины тела на скорость его движения». Позже такое определение было уточнено И. Ньютоном: «количество движения есть мера такового, устанавливаемая пропорционально скорости и массе».

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (1)$$

Импульс тела – векторная величина, его направление совпадает с направлением скорости тела $\vec{p} \uparrow \vec{v}$. Единица измерения импульса тела в СИ $[p] = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$.

Импульс тела связан с импульсом силы вторым законом Ньютона в импульсном виде.

Импульс силы равен изменению импульса тела.

$$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}, \quad (2)$$

где $\Delta\vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$ – изменение импульса тела, $\vec{F}\Delta t$ – импульс силы.

Единица измерения импульса силы $[\vec{F}\Delta t] = 1 \text{ Н} \cdot \text{с}$.

Из полученного соотношения (2) следует, что направление силы, действующей на тело, совпадает с направлением изменения импульса тела $\vec{F} \uparrow \Delta\vec{p}$.

II. Закон сохранения импульса для замкнутой системы

Закон сохранения импульса является следствием второго и третьего законов Ньютона.

Импульс замкнутой системы взаимодействующих тел остается величиной постоянной, если сумма внешних сил, действующих на тела системы, равна нулю.

$$\vec{p}_c = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = const, \quad (3)$$

где \vec{p}_c – геометрическая сумма импульсов тел, входящих в систему, n – число тел в системе, i – порядковый номер тела.

Формула (3) при упругом взаимодействии трех тел примет вид:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + m_3 \vec{v}_3 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2 + m_3 \vec{u}_3, \quad (4)$$

где $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3$ – скорости тел до столкновения, $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \vec{u}_3$ – скорости тел после столкновения.

После упругого удара тела, разлетаясь, движутся отдельно друг от друга.

При неупругом взаимодействии закон сохранения (3) примет вид:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + m_3 \vec{v}_3 = (m_1 + m_2 + m_3) \vec{u}, \quad (5)$$

где \vec{u} – скорость тел после взаимодействия.

После неупругого взаимодействия тела соединятся друг с другом и движутся дальше, как одно тело.

III. Реактивное движение. Скорость ракеты при мгновенном сгорании топлива

Человек движется, отталкиваясь от земли, также отталкивается от земли и машина; лодка плывет по реке только потому, что гребцы отталкиваются веслами от воды. Отталкивание от опоры кажется необходимым условием для движения. Так ли это? Возможен ли другой способ начала движения? Представьте, что вы стоите на коньках на ледовой арене и бросаете другу оказавшийся в ваших руках рюкзак. При этом вы покажитесь назад, хотя и не думали отталкиваться ногой ото льда. Созданное броском движение называют *реактивным движением*.

Реактивное движение – это движение тела, возникающее в результате отделения некоторой его части с определенной скоростью.

Кусочки науки

\sum – знак суммы дискретных величин.

Ответьте на вопросы

1. Почему законы сохранения выполняются только для замкнутых систем?
2. Почему при стрельбе из ружья происходит отдача в плечо? Что необходимо сделать, чтобы отдача уменьшилась?

Возьмите на заметку!

При изучении движения осколков после взрыва используют закон сохранения импульса для неупругого взаимодействия (5).

Задание 1

Приведите примеры реактивного движения в природе и технике.

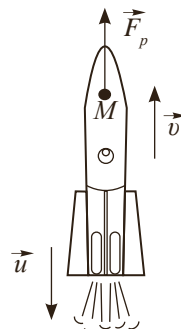


Рис. 79. Струя газа, создающая реактивную силу

Расчет реактивного движения тел производится на основе закона сохранения импульса.

Рассмотрим движение ракеты при условии, что топливо сгорает мгновенно (рис. 79). Газ, вылетая со скоростью \vec{u} относительно ракеты, сообщает ей дополнительный импульс $\Delta\vec{p} = -m\vec{u}$ и тем самым создает реактивную силу:

$$\vec{F}_p = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} = -\frac{m\vec{u}}{\Delta t}. \quad (6)$$

Определим скорость ракеты на основе закона сохранения импульса тела. Импульс ракеты с топливом до старта равен нулю, после старта – произведению ее массы без топлива на скорость движения. Закон сохранения импульса в векторном виде примет вид:

$$(M - m)\vec{v} - m\vec{u} = 0.$$

Определив проекции векторов на ось 0у, получим:
 $(M - m)v = mu$

или
$$v = \frac{m}{M - m} u, \quad (7)$$

где \vec{v} – скорость ракеты при мгновенном сгорании топлива.



Константин Эдуардович Циолковский (1857–1935) – российский и советский ученый и изобретатель, школьный учитель. Основоположник теоретической космонавтики. Обосновал использование ракет для полетов в космос, пришел к выводу о необходимости использования «ракетных поездов» – прототипов многоступенчатых ракет. Основные научные труды относятся к аэронавтике, ракетодинамике и космонавтике.

Интересно знать!

Научные труды К.Э. Циолковского о ракетодинамике и космонавтике

1903 г. – опубликовал статью «Исследование мировых пространств реактивными приборами», предложил первый проект ракеты на жидком топливе.

1911 г. – определил скорость, необходимую для выхода ракеты в Солнечную систему, разработал теорию движения одноступенчатых и многоступенчатых ракет.

1926–1929 гг. – выполнил расчет топлива, необходимого для выхода ракеты в Солнечную систему.

IV. Закон сохранения энергии

Механическая энергия, равная сумме кинетической и потенциальной энергий, сохраняется в том случае, когда в системе действуют силы, зависящие только от расстояний.

К ним относятся сила тяготения и сила упругости. Работа этих сил может быть выражена как приращение потенциальной энергии, взятой с противоположным знаком:

$$A = -(mgh_2 - mgh_1); \quad A = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right)$$

или
$$A = -(W_{p2} - W_{p1}). \quad (8)$$

Ответьте на вопросы

1. Почему расчет скорости движения ракеты на основе закона сохранения импульса тела дает приближенный результат?
2. Изменится ли скорость ракеты, движущейся по инерции в космическом пространстве, если на ее сопло надеть изогнутую трубу выходным отверстием в сторону движения и включить двигатель?

Работу любой силы можно определить по теореме об изменении кинетической энергии:

$$A = Fs = ma \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$$

или

$$A = W_{k2} - W_{k1}, \quad (9)$$

где $W_k = \frac{mv^2}{2}$ – кинетическая энергия движущегося тела.

Из равенств (8) и (9) следует, что:

$$W_{k1} + W_{p1} = W_{k2} + W_{p2}, \quad (10)$$

таким образом:

$$W = W_k + W_p = \text{const}, \quad (11)$$

что является выражением закона сохранения энергии.

В замкнутой системе тел полная механическая энергия остается величиной постоянной.



Интересно знать!

Вечный двигатель (лат. Perpetuum Mobile) – машина, которая должна работать сама по себе без подачи какой-либо энергии извне: энергии топлива, мускульной силы человека, энергии падающей воды.

Невозможность построения вечного двигателя есть прямое следствие закона сохранения энергии.



Рис. 80. Модель вечного двигателя



Задание 2

Поясните замысел создателя вечного двигателя по рисунку 80.

V. Национальный космический центр РК

Национальное космическое агентство Казахстана создает национальный космический центр в городе Нур-Султан. В состав нового центра войдут конструкторско-технологическое бюро космической техники, сборочно-испытательный комплекс космических аппаратов (СБИК КА), национальная лаборатория космических технологий и предприятия по производству комплектующих космических аппаратов. На территории строящегося объекта разместятся центры переподготовки и повышения квалификации специалистов, дифференциальной коррекции и мониторинга системы высокоточной спутниковой навигации. На рисунке 81 изображен макет Национального космического центра РК, который будет состоять из семи зданий.

В декабре 2008 года французская компания EADS Astrium была выбрана в качестве стратегического партнера АО «НК «Қазақстан Ғарыш Сапары» в реализации двух масштабных космических проектов: по созданию сборочно-испытательного комплекса космических аппаратов (СБИК КА) и космической системы дистанционного зондирования Земли (КС ДЗЗ) РК.



Рис. 81. Макет Национального космического центра РК

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Частица массой m_1 , движущаяся со скоростью $v_1 = 10$ м/с, испытала абсолютно упругое столкновение с покоившейся частицей массой m_2 . Определите отношение масс m_2/m_1 , если столкновение лобовое и частицы разлетаются с одинаковыми скоростями u , равными 20 м/с.

Дано:

$$v_1 = 10 \text{ м/с}$$

$$v_2 = 0$$

$$u_1 = u_2 = u = 20 \text{ м/с}$$

$$\vec{u}_1 = -\vec{u}_2$$

$$m_2/m_1 = ?$$

Решение:

Применим закон сохранения импульса для центрального абсолютно упругого столкновения частиц. Запишем закон сохранения в векторной форме: $m_1 \vec{v}_1 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2$.

В проекции на выбранную координатную ось Ox , направление которой совпадает с направлением вектора скорости \vec{v}_1 , и, принимая во внимание, что $u_1 = u_2 = u$, получим:

$$m_1 v_1 = -m_1 u + m_2 u = u(m_2 - m_1);$$

$$\frac{v_1}{u} = \frac{m_2}{m_1} - 1;$$

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{v_1}{u} + 1 = \frac{10}{20} + 1 = 1,5$$

Ответ: $m_2/m_1 = 1,5$.

Контрольные вопросы

1. При каком условии выполняются законы сохранения?
2. Что такое импульс тела? В чем он измеряется?
3. Что называют импульсом силы?
4. Сформулируйте закон сохранения импульса.
5. Какое движение называют реактивным? Приведите примеры.
6. Сформулируйте закон сохранения полной механической энергии.

**Упражнение****10**

1. Тележка с песком массой 10 кг катится со скоростью 1 м/с по гладкой горизонтальной поверхности. В песок попадает шар массой 20 кг, летевший навстречу тележке с горизонтальной скоростью 2 м/с, и застревает. В какую сторону и с какой скоростью покатится тележка после этого?
2. Тележка движется по горизонтальной дороге со скоростью 18 км/ч и въезжает на горку. На какой высоте над уровнем дороги остановится тележка? Трение не учитывать.
3. Пружина жесткостью 100 Н/м и массой 400 г падает на землю с высоты 5 м. На сколько сожмется пружина, если при ударе ее ось останется вертикальной?

Творческое задание

- I. Подготовьте реферат по темам (на выбор):
 1. «Реактивное движение в природе».
 2. «История создания реактивных и ракетных двигателей. Современные ракеты-носители».
 3. «К.Э. Циолковский как писатель-фантаст».
 4. «Стратегическое партнерство Казахстана и Франции в космической сфере».
 5. «Жизнь в космосе».
 6. «Космодром Байконур».
- II. Составьте хронологическую таблицу полетов АМС. Проанализируйте полученные результаты. Какие страны принимают активное участие в изучении космоса? Какие небесные объекты Солнечной системы наиболее изучены? Составьте диаграммы.

Итоги главы 4

Законы сохранения	Энергия	Работа
Закон сохранения импульса $\vec{p}_c = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = const$	Кинетическая энергия $W_k = \frac{mv^2}{2}$	$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$ $A = -(W_{p2} - W_{p1})$
Закон сохранения энергии $W = W_k + W_p = const$	Потенциальная энергия $W_p = \frac{kx^2}{2}$ $W_p = mgh$	$A = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right)$ $A = -(mgh_2 - mgh_1)$

Законы динамики

Закон сохранения импульса

Импульс замкнутой системы взаимодействующих тел остается величиной постоянной, если сумма внешних сил, действующих на тела системы, равна нулю.

Закон сохранения энергии

В замкнутой системе тел, в которых действуют только консервативные силы, полная механическая энергия остается величиной постоянной.

Глоссарий

Реактивное движение – движение тела, возникающее в результате отделения некоторой его части с определенной скоростью.

Энергия полная механическая – сумма потенциальной и кинетической энергии тела.

ГИДРОДИНАМИКА

Законам гидро- и аэродинамики подчиняются движение воды в реке или по трубам водопроводов, крови в кровеносных сосудах, огромных масс атмосферного воздуха.

Исследование движения жидкостей и газов усложняется явлениями, связанными с наличием внутреннего трения между их слоями и сжимаемостью газов. В данном подразделе мы рассмотрим движение твердых тел в идеальной жидкости и ее течение.

Основы гидродинамики были заложены в XVIII веке в трудах Даниила Бернулли, Жана Лерона Даламбера, Леонарда Эйлера. Термин «гидродинамика» принадлежит Бернулли.

Изучив главу, вы сможете:

- описывать течения жидкостей и газов;
- определять зависимые, независимые и контролируемые (постоянные) физические величины и учитывать точность измерений;
- определять факторы, влияющие на результаты экспериментов, и предлагать пути их улучшения.

§11. Кинематика жидкости

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать течения жидкостей и газов.



Даниил Бернулли (1700–1782) – швейцарский физик и математик, академик Петербургской академии наук с 1725 по 1733 гг., член Парижской академии наук с 1748 г., один из создателей кинетической теории газов, гидродинамики и математической физики, автор монографии «Гидродинамика».

I. Гидро- и аэродинамика

Исторически гидро- и аэродинамика возникла в связи с исследованиями движения судов с целью повышения их мореходных качеств, изучением принципов работы паруса, винта, крыла, насоса и других устройств.

Гидро- и аэродинамика – это раздел механики, изучающий движение жидкостей и газов, а также взаимодействие движущихся жидкостей и газов с твердыми телами.

Гидродинамика используется в различных сферах деятельности человека. Ее используют при проектировании кораблей и летательных аппаратов, водопроводов и нефтепроводов, насосов и гидротурбин. К задачам гидродинамики относятся вычисление подъемной силы и силы сопротивления, действующей на движущееся тело. Для упрощения решения задач гидродинамики введены понятия «идеальная жидкость» и «элемент тока».

Идеальная жидкость – это жидкость, вязкостью и сжимаемостью которой можно пренебречь.

В идеальной жидкости нет трения между ее слоями.

Элемент тока – это условно выделенный малый объем жидкости (газа), изменением формы которого при движении можно пренебречь.

II. Наблюдение движения жидкости. Линии тока. Трубка тока

Один из способов изучения движения жидкости заключается в следующем: в жидкость подмешивают металлические блески и делают фотоснимок с малой выдержкой при сильном освещении. На снимке блески выглядят, как черточки, длины которых пропорциональны скорости течения жидкости. По направлению движения блесков можно судить о направлении течения жидкости в любой

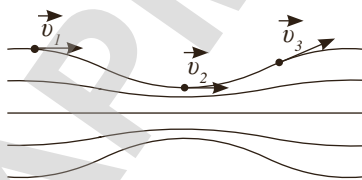


Рис. 82. Линии тока

точке ее поверхности. При увеличении выдержки фотосъемки черточки сливаются в сплошные линии, которые называют *линиями тока* (рис. 82).

Линии тока – это линии, касательные к которым совпадают по направлению со скоростью течения жидкости в соответствующих точках пространства.

При исследовании движения жидкости можно рассматривать трубку тока.

Трубка тока – это объем жидкости или газа, ограниченный линиями тока.

Скорость жидкости или газа в каждой точке линии тока направлена по касательной, следовательно, жидкость, находящаяся внутри трубки тока, не пересекает ее боковой поверхности.

III. Ламинарное и турбулентное течение

Законы гидродинамики выполняются для жидкости с ламинарным течением.

Течение ламинарное, если слои жидкости, не перемешиваясь, скользят относительно друг друга.

Ламинарным, или слоистым, является течение воды в спокойных реках (рис. 83). Ламинарная струя фонтана выглядит, как стеклянный стержень (рис. 84). Установки для получения ламинарной струи используются в светодинамических и светомузыкальных фонтанах (рис. 85).



Рис. 83. Река Буктырма, ламинарное течение



Рис. 84. При ламинарном течении площадь сечения трубки тока сохраняется

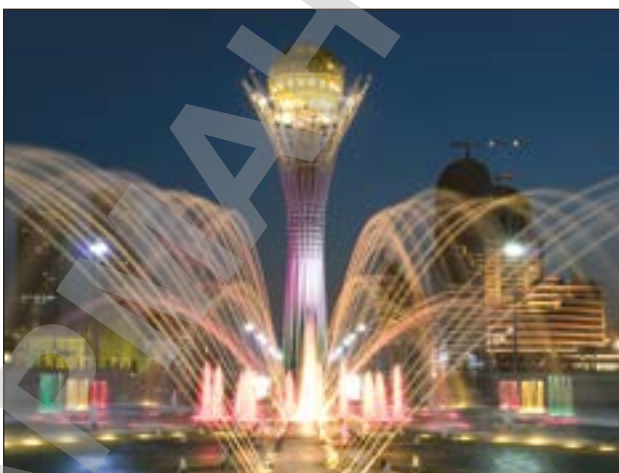


Рис. 85. Струи фонтана с ламинарным течением



Задание 1

Приведите примеры использования ламинарного течения в бытовых и технических устройствах.

При увеличении скорости течения жидкости наступает момент, когда возникают вихри и течение становится турбулентным (рис. 86).

Течение турбулентное, если оно сопровождается перемешиванием слоев жидкости с образованием завихрений.

В турбулентном течении мгновенные значения скорости и давления в данной точке жидкости или газа, меняются случайным образом. При одних и тех же условиях распределение этих величин во всем объеме жидкости будет различным и практически не повторяется. Для турбулентного течения используют средние значения скорости и давления. Турбулентные потоки изучают экспериментально.

Течение жидкости и газа может быть установившимся и неустановившимся. Установившимся, или стационарным, движением называется такое движение жидкости, при котором в данной точке пространства давление и скорость не изменяются во времени.

Течение стационарное, если во всех точках пространства скорости элементов жидкости не меняются со временем.

Движение, при котором скорость и давление изменяются не только в зависимости от координат пространства, но и от времени, называется *неустановившимся*, или *нестационарным*.

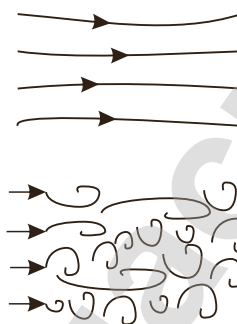


Рис. 86. Линии тока при ламинарном и турбулентном течении



Рис. 87. Рахмановская река в Восточном Казахстане



Рис. 88. Водопад Бурканбулак. Жетысу Алатау



Ответьте на вопросы

- 1 Почему течение реки в широкой части ламинарное, а в узкой может стать турбулентным? Почему течение воды в водопадах турбулентное (рис. 87, 88)?
- 2 Почему турбулентное течение опасно для водного транспорта и воздушных судов?

IV. Течение вязкой жидкости

Скорость течения различных слоев жидкости в трубе или реке не одинакова. У краев трубы или у берега и дна реки скорость меньше, чем в середине. На рисунке 89 изображено распределение скорости жидкости по сечению трубы: скорость меняется от нуля у стенки до максимального значения в середине трубы. Различие скоростей объясняется вязкостью жидкости или действием сил внутреннего трения между ее слоями.

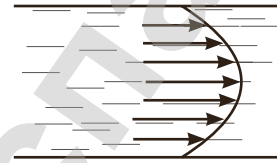


Рис. 89. Скорость течения воды максимальная в середине трубы

Вязкость – это свойство реальных жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой.

Вязкость жидкости возрастает с уменьшением температуры. Скорость течения воды в реке в осенний период уменьшается и может практически прекратиться в зимний период.

Существование сил внутреннего трения и трения о стенку трубы приводит к понижению давления по направлению течения жидкости вдоль трубы: чем дальше от начала трубы, тем меньше давление текущей жидкости. В этом можно убедиться на опыте, воспользовавшись прибором, изображенным на рисунке 90.

V. Движение тел в жидкостях и газах. Формула Стокса

При движении тел в жидкостях и газах возникают силы сопротивления. Они вызваны двумя причинами:

- 1) трением среды о поверхность тела;
- 2) изменением потока жидкости или газа при обтекании тела.

Сила лобового сопротивления среды зависит от вязкости среды, а также от скорости движения тела, его размеров и формы.

Сила лобового сопротивления, которую испытывает шарик, падающий в вязкой жидкости или газе,

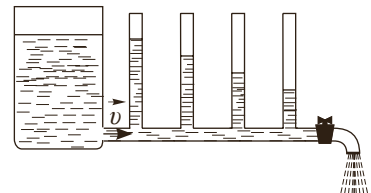


Рис. 90. Понижение давления жидкости по направлению течения

определяется формулой Стокса, названной в честь английского физика Джорджа Габриеля Стокса, внесшего значительный вклад в гидродинамику:

$$F = 6\pi\eta r v,$$

где η – коэффициент внутреннего трения жидкости или газа, или динамическая вязкость, единица измерения $[\eta] - 1 \text{ Па} \cdot \text{с}$; r – радиус шарика; v – скорость шарика.

Формула Стокса позволяет определить вязкость жидкостей. Приборы, созданные для определения вязкости жидкости, называют *вискозиметрами*. Действие вискозиметра Гепплера основано на законе Стокса, он представляет собой трубку, в которую помещается вязкая среда (рис. 91). Вязкость определяется по скорости прохождения падающим шариком промежутков между метками на трубке вискозиметра, который позволяет вести измерения с погрешностью в пределах от 1 до 3 %.



Рис. 91. Вискозиметр

Контрольные вопросы

1. Какую жидкость называют идеальной?
2. Что такое линии тока? Трубка тока?
3. Какие виды течений жидкостей и газов вам известны? В чем их различие?
4. Каким образом сила внутреннего трения влияет на скорость течения жидкости в трубах?
5. Укажите причины возникновения силы сопротивления движению в жидкостях и газах.
6. Как определяют вязкость жидкости? В чем ее измеряют?



Упражнение

11

Стальной шарик диаметром 1 мм падает с постоянной скоростью 0,185 см/с в большом сосуде, наполненном касторовым маслом. Выполните задания.

- 1) Определите силу тяжести, действующую на стальной шарик, плотность стали 7800 кг/м^3 , примите $g \approx 10 \text{ м/с}^2$.
- 2) Определите силу Архимеда, плотность касторового масла 900 кг/м^3 .
- 3) Можно ли утверждать, что сила тяжести равна сумме сил Архимеда и Стокса? Запишите соотношение сил.
- 4) Изобразите силы, действующие на шарик.
- 5) Определите силу Стокса.
- 6) Определите динамическую вязкость касторового масла.

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Основатели гидродинамики».
2. «Применение законов гидро- и аэродинамики в составлении прогноза погоды».
3. «Управляемые фонтаны с ламинарным течением: устройство и принцип действия».

Итоги главы 5

Формула Стокса

$$F = 6\pi\eta r v$$

Глоссарий

Вискозиметр – прибор для измерения вязкости жидкости.

Вязкость – свойство реальных жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой.

Гидро- и аэродинамика – раздел механики, изучающий движение жидкостей и газов, а также взаимодействие движущихся жидкостей и газов с твердыми телами.

Идеальная жидкость – жидкость, вязкостью и сжимаемостью которой можно пренебречь.

Линии тока – линии, касательные к которым совпадают по направлению со скоростью течения жидкости в соответствующих точках пространства.

Трубка тока – объем жидкости или газа, ограниченный линиями тока.

Течение ламинарное, если слои жидкости, не перемешиваясь, скользят относительно друг друга.

Турбулентное течение – течение, при котором сопровождается перемешиванием слоев жидкости с образованием завихрений.

Стационарное течение – течение, при котором во всех точках пространства скорости элементов жидкости не меняются со временем.

Элемент тока – условно выделенный малый объем жидкости (газа), изменением формы которого при движении можно пренебречь.

Для изучения тепловых процессов в молекулярной физике используют два метода: статистический и термодинамический.

В основе статистического метода лежит молекулярно-кинетическая теория (МКТ). В указанной теории физические процессы рассматривают на основе знаний о внутреннем строении вещества.

Термодинамический метод предполагает изучение тепловых явлений без использования представлений о внутреннем строении вещества, на основе законов термодинамики и параметров, характеризующих систему в целом: температуры, давления и объема.

ГЛАВА 6

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Гипотеза атомистического строения вещества впервые была выдвинута **Демокритом**.

К XX в. были измерены размеры молекул различных веществ, их массы и скорости, выяснено расположение атомов в молекулах, т.е. была окончательно завершена молекулярно-кинетическая теория строения вещества. В создании молекулярно-кинетической теории большую роль сыграли: русский ученый **М.В. Ломоносов**, немецкий физик **Р. Клаузиус**, английские физики **Дж. Джоуль**, **Дж. Максвелл**, австрийский физик **Л. Больцман**.

Различие в строении твердых тел позволяет объяснить такие свойства, как упругость, пластичность, хрупкость, прочность, твердость, текучесть.

Изучив главу, вы сможете:

- описывать молекулярно-кинетическую теорию и модель идеального газа;
- описывать модели твердых тел, жидкостей и газов на основе молекулярно-кинетической теории;
- различать структуры кристаллических и некристаллических твердых веществ.

§12. Основные положения МКТ. Термодинамические параметры

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать молекулярно-кинетическую теорию и модель идеального газа;
- описывать модели твердых тел, жидкостей и газов на основе молекулярно-кинетической теории.



Ответьте на вопросы

1. Почему молекулы более разнообразны, чем атомы?
2. Объясните исчезновение дыма в воздухе.
3. Почему легче соединить два куска пластилина, чем два куска свинца?



Джон Уильям Стретт, лорд Рэлей (1842–1919) – английский физик и механик, получивший в 1904 г. Нобелевскую премию по физике «за исследование плотности газообразных элементов и открытие в связи с этим аргона». В 1879 г. Рэлей стал профессором Кембриджского университета и директором Кавендишской лаборатории. С 1908 по 1919 г. был президентом Кембриджского университета.

I. Основные положения молекулярно-кинетической теории

В курсе физики 7 и 8 классов при изучении тем «Строение вещества» и «Тепловые явления» вы получили первоначальные сведения о молекулах и атомах, об их движении и взаимодействии. Такие явления, как диффузия и броуновское движение, смачивание и подъем жидкости по капиллярам, испарение и кипение, плавление и кристаллизация, легко объяснить на основе МКТ – молекулярно-кинетической теории – и трех ее положений:

1. Все вещества состоят из частиц (молекул или атомов), между которыми есть промежутки.
2. Частицы вещества непрерывно и хаотически движутся.
3. Частицы взаимодействуют друг с другом силами, имеющими электрическую природу.

II. Опытное обоснование 1-го положения МКТ

Убедительным подтверждением первого положения МКТ является оценка размеров и массы молекул английским физиком Дж. Рэлеем.

Предположив, что капля олеинового масла растекается по поверхности воды слоем толщиной в одну молекулу, он определил ее размер:

$$d = \frac{V}{S},$$

где d – диаметр молекулы, V – объем растекшейся капли, S – площадь капли.

Приняв объем молекулы равной $V_0 = d^3$, нашел количество молекул во всем объеме вещества:

$$N = \frac{V}{V_0}.$$

При известном значении массы капли и числа молекул в ней рассчитал массу одной молекулы, которая равна:

$$m_0 = \frac{m}{N}.$$

Результаты опытов, проведенные по методу Рэрея, показывают, что размер молекулы составляет порядка 10^{-9} м, а ее масса – около 10^{-26} кг.

Никаких сомнений в верности первого положения МКТ не осталось, когда учеными были созданы электронный, а затем туннельный микроскопы.

Благодаря туннельному микроскопу, принцип действия которого основан на сканировании поверхностей веществ, получены снимки расположения молекул и атомов (рис. 92). Металлическая игла сканирующего туннельного микроскопа скользит над объектом на расстоянии меньше нанометра (рис. 93).

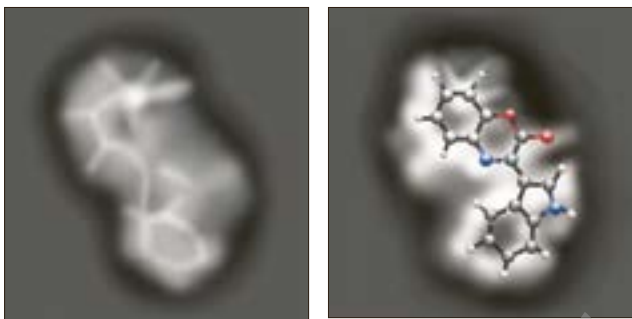


Рис. 92. Снимок расположения молекул в веществе

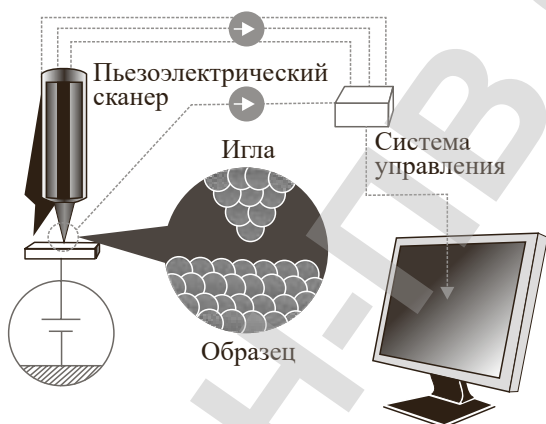


Рис. 93. Принцип действия туннельного микроскопа

В процессе движения на иглу подается небольшой потенциал, и в итоге между иглой и образцом создается туннельный ток – электроны из образца, преодолевая расстояние до иглы, перепрыгивают на нее. Количество электронов зависит от расстояния до кончика иглы, поэтому, определяя величину туннельного тока, ученые могут понять, каков рельеф поверхности образца. Создание туннельного микроскопа стало значительным шагом в изучении наномира. В 1986 г. сотрудникам Исследовательского центра компании ИВМ в Цюрихе Г. Биннигу и Г. Рореру за это достижение была присуждена Нобелевская премия.

Эксперимент в классе

1. Оцените число молекул в одном листе учебника, полагая, что объем молекулы составляет порядка 10^{-9} м³.
2. Определите площадь нефтяного пятна с помощью самодельной палетки, полагая, что масштаб съемки М 1: 100000 (рис. 94).

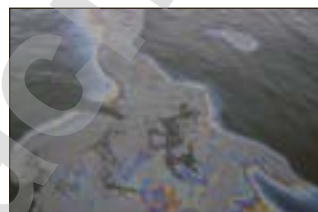


Рис. 94. Разлив нефти

Обратите внимание!

Тонна нефти, растекаясь по поверхности океана пленкой 1/16 мкм, занимает площадь около 12 км².

Ответьте на вопросы

1. Какая площадь будет покрыта при разливе нефти из танкера грузоподъемностью 550 тысяч тонн? Сравните с площадью Каспийского моря (371 000 км²).
2. Какие экологические проблемы создает разлив нефти (рис. 95)?



Рис. 95. Гибель птиц и животных в областях разлива нефти

III. Опыт Штерна как доказательство второго положения молекулярно-кинетической теории

В 1920 г. немецкий физик Отто Штерн поставил опыт по определению средней скорости движения молекулы. На плоском горизонтальном основании он закрепил две коаксиальные цилиндрические поверхности (1) и (2), которые могли вращаться вокруг оси OO_1 (рис. 96). Внутренний цилиндр имел узкую щель (4). Вся система находилась в вакууме. По оси OO_1 располагалась платиновая проволока (3), покрытая серебром, ее нагревали до высокой температуры. Атомы серебра, испаряясь с поверхности и проходя через узкую щель в стенке внутреннего цилиндра (2), долетали до внутренней поверхности внешнего цилиндра и осаждались на нем в виде узкой полоски напротив щели. При вращении цилиндров с угловой скоростью ω цилиндры проворачивались на угол φ за промежуток времени t , необходимый атомам для достижения стенки второго цилиндра. В результате атомы осаждались в виде размытой полоски на расстоянии s от предыдущей полосы. Среднюю скорость движения атомов серебра между двумя цилиндрами Штерн определил следующим образом:

$$v = \frac{R - r}{t}, \quad (1)$$

где R – радиус внешнего цилиндра, r – радиус внутреннего цилиндра.

Выразив смещение серебряной полоски через скорость вращения цилиндра: $s = v_u t = \omega R t$ (2), где v_u – линейная скорость вращения внешнего цилиндра, Штерн определил время полета атомов между цилиндрами:

$$t = \frac{s}{\omega R}. \quad (3)$$

Из формулы (1) с учетом формулы (3) получил:

$$v = \frac{\omega R(R - r)}{s}. \quad (4)$$

При известных значениях R , r , ω и значении s , полученного опытным путем, была определена средняя скорость движения атомов серебра, которая оказалась равной 650 м/с.



Отто Штерн (1888–1969) – немецкий физик. С 1923 г. – профессор и директор физико-химической лаборатории университета в Гамбурге. С 1933 г. – профессор Технологического института Карнеги в Питтсбурге (США). В 1943 г. Штерн был удостоен Нобелевской премии по физике.

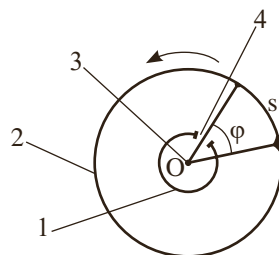


Рис. 96. Схема установки для опыта Штерна



Ответьте на вопросы

1. Почему в опыте Штерна установку помещают в вакуумную камеру?
2. Почему толщина слоя серебра, осаждающегося на поверхность вращающегося цилиндра, в опыте Штерна не везде одинакова?

IV. Силы взаимодействия между молекулами как доказательство третьего положения молекулярно-кинетической теории

Атомы молекул состоят из положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов. При деформации сжатия или растяжения возникает сила, которая стремится восстановить прежние размеры и форму тела. Эта сила возникает вследствие электромагнитного взаимодействия между атомами и молекулами вещества.

На рисунке 97 представлены графики: график 1 соответствует зависимости силы отталкивания между атомами от расстояния между ними; график 2 – зависимости силы притяжения атомов от расстояния между ними; график 3 – результирующая сил молекулярного взаимодействия. Из графика следует, что при $r \leq r_0$ преобладают силы отталкивания, а при $r \geq r_0$ преобладают силы притяжения. На расстоянии $r = r_0$ силы притяжения и отталкивания равны, поэтому равнодействующая сила равна нулю: $F = 0$.

График зависимости силы от расстояния доказывает, что межмолекулярные силы проявляются на расстояниях, равных размерам молекул. На расстояниях, равных 2–3 размерам молекул, силы взаимодействия молекул исчезают.

V. Модели твердых тел, жидкостей и газов на основе МКТ. Идеальный газ

Свойства веществ в различных агрегатных состояниях известны вам с 7 класса. Вспомним основные из них: твердые тела сохраняют свою форму и объем; жидкости, сохраняя свой объем, легко меняют форму, они текучи; газы заполняют весь предоставленный объем, не имеют своей формы и объема. На основании знаний о свойствах веществ в различных агрегатных состояниях и трех положений МКТ легко смоделировать их строение.

Для математического описания тепловых процессов, происходящих в газах, вводится понятие «идеальный газ».

Идеальный газ – это физическая модель газа, в которой потенциальной энергией взаимодействия между молекулами можно пренебречь; расстояние между молекулами много больше размеров молекул. Между молекулами не действуют силы притяжения

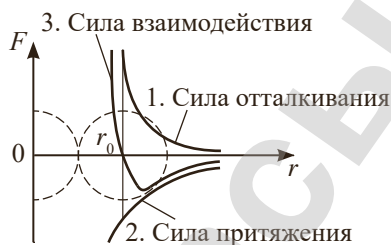


Рис. 97. График зависимости силы взаимодействия атомов от расстояния между ними



Задание

Изобразите модели веществ в твердом, жидком и газообразном состояниях, а также идеального газа.



Ответьте на вопросы

1. В чем различие изображенных вами моделей?
2. Чем отличается модель газообразного состояния вещества от идеального газа?



Возьмите на заметку!

Реальные разреженные газы ведут себя как идеальный газ. Все газы при низких давлениях и высоких температурах близки по своим свойствам к идеальному газу. При высоких давлениях молекулы газа сближаются, в этом случае пренебречь их собственными размерами нельзя. При понижении температуры кинетическая энергия молекул уменьшается, становится сравнимой с потенциальной энергией.

или отталкивания, соударения частиц между собой и со стенками сосуда абсолютно упругие.

Реальный газ при низком давлении и высокой температуре можно считать идеальным.

VI. Цель и задача МКТ. Термодинамические параметры. Основное уравнение МКТ

Цель молекулярно-кинетической теории – объяснение свойств макроскопических тел и закономерностей тепловых процессов на основе представлений о том, что все тела состоят из отдельных хаотически движущихся частиц.

Основная задача молекулярно-кинетической теории – установить связь между микроскопическими и макроскопическими параметрами вещества и, исходя из этого, найти уравнение состояния данного вещества.

Величины, которые характеризуют молекулярный мир, например, скорость молекулы, ее массу, энергию, называют *микроскопическими* (от древнегреч. «микрос» – «малый») *параметрами*.

Макроскопическими (от греч. «макрос» – «большой») *величинами*, или *параметрами*, называют величины, характеризующие свойства тел в целом, без учета их внутреннего строения.

Макроскопические величины, характеризующие состояние тел, называют *термодинамическими параметрами*. Термодинамическими параметрами являются объем V , давление p и температура T .

Ученые установили связь между макроскопическими и микроскопическими параметрами идеального газа. Соотношение величин получило название основного уравнения молекулярно-кинетической теории:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2, \quad (5)$$

где p – давление газа, n – концентрация, m_0 – масса атома, \bar{v}^2 – средняя квадратичная скорость.

Концентрация молекул связана с плотностью газа соотношением $n \cdot m_0 = \rho$, подставив в уравнение (5), получим:

$$p = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2. \quad (6)$$

Если учесть, что средняя кинетическая энергия молекул равна $\bar{E} = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$, то уравнение (5) примет вид:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2 \cdot \frac{2}{2} = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$$

или
$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}. \quad (7)$$

Давление идеального газа прямо пропорционально средней кинетической энергии поступательного движения молекул, содержащихся в единице объема газа.

Соотношения (5), (6) и (7) называют *основным уравнением молекулярно-кинетической теории*. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории связывает макроскопические параметры с микроскопическими.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте основные положения молекулярно-кинетической теории.
2. В чем заключается опыт Штерна?
3. Какими свойствами обладают силы молекулярного взаимодействия?
4. Что представляет собой модель идеального газа?

★ Упражнение**12**

1. Капля минерального масла плотностью $\rho = 920 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ и массой 0,023 мг, вылитая на поверхность воды, образовала пленку площадью 60 см². Предполагая, что молекулы в пленке расположились в один ряд, определите их поперечные размеры.
2. Какой скоростью обладали молекулы паров серебра, если их угловое смещение в опыте Штерна составило 5,4° при частоте вращения прибора 150 с⁻¹? Расстояние между внешним и внутренним цилиндрами равно 2 см.
3. В сосуде объемом $V = 1$ л находится водород массой 2 г. Определите давление водорода, если средняя квадратичная скорость его молекул $v = 400$ м/с.

Творческое задание

1. Изучите статистику аварий с нефтяными танкерами и нефтепроводами. Составьте сравнительные таблицы (графики, диаграммы) по странам, по фирмам.
2. Подготовьте сообщение по темам (на выбор):
 - «Взгляды древних философов на строение вещества. Атомистический взгляд на строение вещества».
 - «Диффузия в природе, быту и промышленности».

§13. Кристаллические и некристаллические вещества

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- различать структуры кристаллических и некристаллических твердых веществ.



Ответьте на вопросы

1. Почему монокристаллы ценятся больше, чем поликристаллы?
2. Почему камнем на кирпиче можно оставить царапины, а кирпичом на камне – нет?
3. Почему графитовый стержень карандаша легко отслаивается, только в направлении, перпендикулярном его оси?



Рис. 98. Монокристаллы горного хрусталя и дымчатого кварца

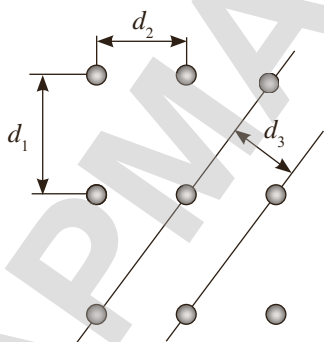


Рис. 99. Монокристаллы анизотропны

I. Кристаллические и аморфные тела. Изотропность и анизотропность твердых тел

Как правило, твердыми телами называют все предметы, сохраняющие форму и объем. В физике их делят на *кристаллические* и *некристаллические* тела. Кристаллические тела могут быть *монокристаллическими* и *поликристаллическими*.

Некристаллические (аморфные) тела отличаются от кристаллических тем, что у них нет определенной температуры плавления. В физике аморфные тела рассматривают как вязкую жидкость. К аморфным телам можно отнести воск, пластилин, янтарь, стекло, затвердевшую смолу. У аморфных тел нет кристаллической решетки, они изотропны.

Изотропность – это независимость физических свойств вещества от выбранного в нем направления.

Кристаллические тела, представляющие собой монокристалл, анизотропны.

Анизотропность – это зависимость физических свойств вещества от выбранного в нем направления.

В естественных условиях крупные монокристаллы с геометрически правильными формами образуют, к примеру, кварц, топаз, алмаз, горный хрусталь, графит (рис. 98).

Анизотропию механических, тепловых, электрических и оптических свойств кристаллов легко объяснить тем, что сила взаимодействия между частицами вещества зависит от выбора направления в кристаллической решетке. Расстояние между ними в различных направлениях отличается $d_1 > d_2 > d_3$ (рис. 99).

Поликристаллическое тело представляет собой совокупность сросшихся друг с другом хаотически ориентированных монокристаллов, размер которых колеблется от 1–2 мкм до нескольких мм (рис. 100). В целом поликристаллическое тело изотропно. Если в поликристалле есть преимущественная ориентация зерен монокристаллов, то поликристалл является текстурированным, и в этом случае он обладает анизотропией. При длительном отжиге в поликристаллах

образуются крупные кристаллические блоки. Происходит *рекристаллизация* – *преимущественный рост отдельных зерен за счет других*. Примерами поликристаллических тел являются металлы, поликристаллические алмазы, керамика.

II. Кристаллическая решетка. Дефекты в кристаллах

Для наглядного представления внутренней структуры кристалла его изображают в виде кристаллической решетки.

Кристаллическая решетка – это пространственное периодическое расположение атомов или ионов в кристалле.

Точки кристаллической решетки, в которых расположены атомы или ионы, называются *узлами кристаллической решетки*.

Картину расположения узлов в кристаллической решетке можно получить с помощью ионного микроскопа.

Все кристаллические решетки разделяют на четыре типа: ионные, атомные, молекулярные и металлические.

Различают точечные и линейные дефекты. К точечным дефектам относят замещение собственного атома чужеродным (рис. 101, а), внедрение атома в пространство между узлами решетки (рис. 101, б), отсутствие атома в одном из узлов кристаллической решетки (рис. 101, в). Линейные дефекты возникают при нарушении порядка расположения атомов в плоскости кристалла (рис. 101, г).

III. Прочность и твердость кристаллических тел

Способность тела противостоять разрушению под действием внешних сил называют *прочностью*. Прочность кристаллов, в которых обнаруживают дефекты, в десятки и даже в сотни раз уступает прочности чистых кристаллов.

В технике все материалы, кроме прочности, различают по твердости. *Твердость* – это свойство материала разрушать поверхность других материалов. Более твердым является тот материал, который царапает поверхность другого материала. Резцы и сверла для резки металлов должны обладать большей твердостью, чем обрабатываемый металл. Их изготавливают из сверхтвердых сплавов, состоящих из зерен карбидов вольфрама или титана, сцементированных кобальтом.

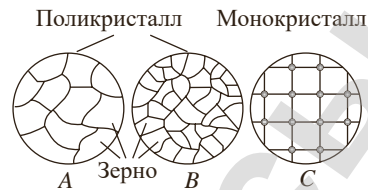


Рис. 100. Структура поликристалла

Ответьте на вопросы

1. Почему монокристаллы анизотропны, а поликристаллы – изотропны?
2. Почему у аморфных тел нет определенной температуры плавления?
3. В чем различие четырех типов решеток: ионной, атомной, молекулярной и металлической?

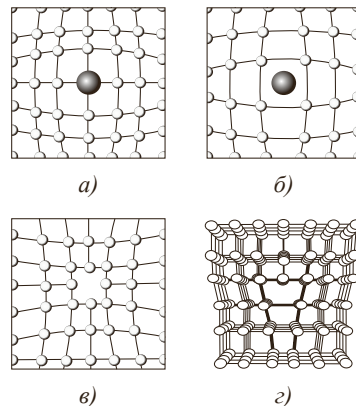


Рис. 101. Виды дефектов

Интересно знать!

Для повышения прочности кристаллов в них создают специальные дефекты, которые наоборот увеличивают прочность кристалла. Они препятствуют разрыву связей по линии случайных дефектов. Например, прочность стали повышается примерно в три раза при введении в нее хрома или вольфрама.

IV. Упругая и пластическая деформация тел. Пластичность и упругость твердых тел

Под действием внешних сил частицы кристалла смещаются от положения равновесия, вследствие чего тело *деформируется*: *меняются его размеры и форма*.

Свойство материала восстанавливать свою форму называют *упругостью материала*. Упругими свойствами обладают все кристаллические тела, резина.

Свойство сохранять приобретенную под действием внешних сил форму называют пластичностью. Аморфные тела, как правило, обладают пластичными свойствами.

Вспомните!

Деформация, которая полностью исчезает после прекращения действия внешних сил, называется упругой деформацией. Деформация, которая не исчезает после прекращения действия внешних сил, называется пластической.

V. Виды упругой деформации

В зависимости от направления и точек приложения внешних сил деформации твердых тел подразделяют на четыре основных вида: *растяжение или сжатие, изгиб, сдвиг и кручение*.

Увеличение длины тела при действии двух равных по величине, но противоположных по направлению сил вдоль оси тела, называют деформацией растяжения (рис. 102, а). Деформацию растяжения испытывают тросы, цепи, канаты. Уменьшение длины под действием двух равных по величине и направленных навстречу друг другу вдоль оси тела сил называют деформацией сжатия (рис. 102, б). Деформацию сжатия испытывают опорные колонны, стены домов.

Изгиб – деформация в результате одновременного растяжения и сжатия противоположных поверхностей тела (рис. 102, в). Изгиб испытывают балки перекрытий в зданиях, мостах.

Смещение слоев тела относительно друг друга под действием пары сил, обладающих пренебрежительно малым значением момента, называют деформацией сдвига (рис. 102, г). Деформацией сдвига подвержены крепежные детали, тела, движущиеся относительно друг друга с трением.

Задание

Приведите примеры пластической и упругой деформации.

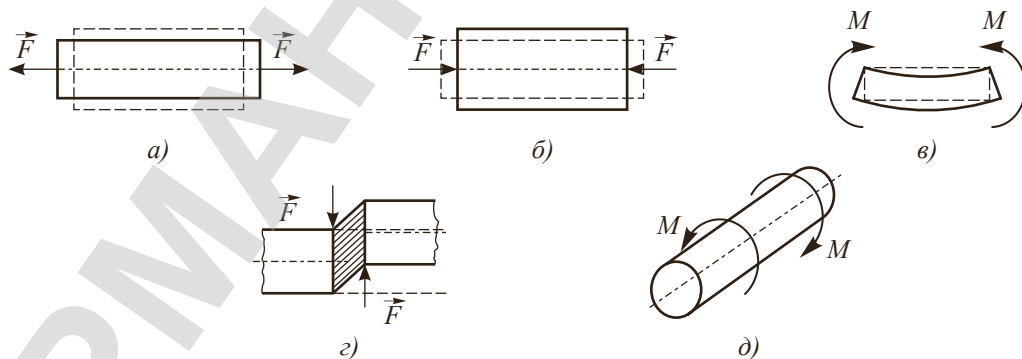


Рис. 102. Виды упругой деформации

Поворот слоев тела относительно друг друга, под действием пары сил, приложенных в плоскости, перпендикулярной оси тела, называют деформацией кручения (рис. 102, д). Валы машин, ручка отвертки испытывают деформацию кручения.

VI. Применение монокристаллов и поликристаллов

Искусство создавать сверкающие гранями украшения из природных монокристаллов было развито уже в древности. Ювелирные украшения из алмаза, горного хрусталя, изумруда, малахита, рубина и других природных драгоценных камней имеют спрос и по сей день. Научно-технический интерес к монокристаллам появился с развитием оптики, лазерной техники, полупроводниковой электроники. Исследование свойств известкового шпата привело к открытию поляризации света, созданию поляризационных приборов и 3D изображений. Призмы из кварцевого стекла стали применять в спектроскопах для спектрального разложения света. Почти во всех современных электронных приборах есть детали, выполненные из высокочистых монокристаллических материалов. Наиболее прочный природный монокристалл – алмаз – используется в строительстве и тяжелом машиностроении, в добыче полезных ископаемых. Технический алмаз напыляют на сверла, пилы, шлифовальные круги, ножницы по металлу. Алмазы редко встречаются в природе. Выращивание искусственных монокристаллов позволило использовать в промышленности до 97 % искусственных алмазов.

В связи с переходом к альтернативным источникам электроэнергии большим спросом пользуется сверхчистый кремний, который служит материалом для изготовления солнечных панелей. Стержни кремниевого монокристалла выращивают искусственно из кремниевого расплава, разрезают на части толщиной 0,2–0,4 мм и после обработки используют для изготовления фотоэлектрических элементов, входящих в состав солнечных панелей (рис. 103). При медленном охлаждении кремниевого расплава, из него получается поликристаллический кремний. В этом случае процесс менее трудоемок в сравнении с выращиванием монокристалла. Такой кремний также используется для изготовления солнечных панелей (рис. 104). Существенным недостатком поликристаллического кремния является то, что он имеет области с зернистыми границами, которые ухудшают его качество. Монокристаллические панели при их серийном производстве имеют максимальную эффективность по преобразованию солнечной энергии до 22 %, а серийно выпускаемые поликристаллические панели – до 18 %. Это связано с чистотой сырья монокристаллов кремния, которая в таких батареях достигает почти 100 %.



Рис. 103. Солнечные панели из монокристаллов



Рис. 104. Солнечные панели из поликристаллов

VII. Производство кремния в РК

К альтернативным источникам энергии переходят во всем мире, с каждым годом растет спрос на солнечные батареи.

В Шымкенте с 2014 г. в рамках государственной программы по развитию горно-металлургической отрасли в РК, разработан и уже запущен проект по производству высококачественного кремния на базе предприятия ТОО «Стекло К». Он вошел в программу Министерства образования и науки «Целевое развитие университетской науки, ориентированной на инновационный результат». Внедрив два этапа проекта, завод уже производит три продукта: ферросилиций, технический кремний и белую сажу. Из 300 тонн белой сажи можно получить 200 тонн высокочистого кремния. Доведя процесс до получения высокочистого кремния, планируется наладить производство фотоэлектрических преобразователей и сборку панелей солнечных батарей.

Производство металлургического кремния запущено в Караганды с 2016 г. (рис. 105). Металл чистотой не менее 98,5 % производится по технологии немецкой компании, которая выступает и основным гарантом сбыта казахстанского кремния. Строительство завода по производству металлического кремния в Караганды было начато в 2007 г. компанией Silicium Kazakhstan.



Рис. 105. Производство металлургического кремния, г. Караганды

Контрольные вопросы

1. В чем отличие аморфных тел от кристаллических?
2. Что называют кристаллической решеткой? Какие виды решеток вам известны?
3. Каким способом увеличивают прочность кристаллов?
4. Какие виды деформаций испытывают твердые тела? Укажите направление и точку приложения внешних сил при каждом виде деформации.

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Способы выращивания кристаллов».
2. «Использование кристаллов и поликристаллов в различных отраслях народного хозяйства РК».

Итоги главы 6

Размер молекулы	Количество молекул	Масса одной молекулы
$d = \frac{V}{S}$	$N = \frac{V}{V_0}$	$m_0 = \frac{m}{N}$
Скорость молекулы из опыта Штерна	Основное уравнение МКТ	
$v = \frac{\omega R(R-r)}{s}$	$p = \frac{1}{3} nm_0 \bar{v}^2$; $p = \frac{2}{3} n \bar{E}$; $p = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2$	
Взаимодействие молекул		

При $r \leq r_0$ преобладают силы отталкивания.

При $r \geq r_0$ преобладают силы притяжения

Основные положения МКТ

1. Все вещества состоят из частиц (молекул или атомов), между которыми есть промежутки.
2. Частицы вещества непрерывно и хаотически движутся.
3. Частицы взаимодействуют друг с другом силами, имеющими электрическую природу.

Глоссарий

Анизотропность – зависимость физических свойств вещества от выбранного в них направления.

Деформация кручения – поворот слоев тела относительно друг друга под действием пары сил, приложенных в плоскости, перпендикулярной оси тела.

Деформация растяжения – увеличение длины тела при действии двух равных по величине, но противоположных по направлению сил вдоль оси тела.

Деформация сдвига – смещение слоев тела относительно друг друга под действием пары сил, обладающих пренебрежительно малым значением момента.

Деформация сжатия – уменьшение длины под действием двух равных по величине и направленных навстречу друг другу сил вдоль оси тела.

Идеальный газ – физическая модель газа, в которой молекулы представляют собой упругие шарики пренебрежимо малых размеров, потенциальной энергией взаимодействия между которыми можно пренебречь.

Изгиб – деформация тела в результате одновременного растяжения и сжатия противоположных поверхностей тела

Изотропность – независимость физических свойств вещества от выбранного в нем направления.

Кристаллическая решетка – пространственная сетка, узлы которой совпадают с центрами равновесия атомов и молекул в кристалле.

Макроскопические параметры – величины, характеризующие свойства тел в целом, без учета их внутреннего строения.

Пластическая деформация – деформация, которая не исчезает после прекращения действия внешних сил.

Пластичность – свойство тела сохранять форму, приобретенную под действием внешних сил.

Прочность – способность тела противостоять разрушению под действием внешних сил.

Твердость – свойство материала разрушать поверхность других материалов.

Термодинамические параметры – макроскопические величины, характеризующие состояние тел: давление, объем, температура.

Упругость – свойство материала восстанавливать свою форму после прекращения действия внешних сил.

Упругость материала – свойство материала восстанавливать свою форму.

ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Газовые законы были открыты опытным путем задолго до появления молекулярно-кинетической теории. Законы были установлены на опытах с реальными газами при условиях, приближающих их к модели идеального газа: при большой температуре и невысоком давлении. Такие газы, как азот и кислород, из которых состоит атмосфера Земли, с достаточной точностью могут рассматриваться как идеальные газы при обычных условиях.

Изучив главу, вы сможете:

- применять уравнение состояния идеального газа в решении задач;
- различать графики газовых процессов.

§14. Уравнение состояния идеального газа. Изопроцессы. Адиабатный процесс

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять уравнение состояния идеального газа при решении задач и различать графики газовых процессов.

I. Уравнение состояния идеального газа

Состояние некоторой массы газа определяется значениями трех параметров: давлением p , объемом V и температурой T . Изменение одного из этих параметров приводит к изменению других.

Уравнение, которое связывает между собой термодинамические параметры, называют уравнением состояния газа.

Получим соотношение параметров состояния газа из основного уравнения МКТ:

$$p = nkT. \quad (1)$$

Подставим в уравнение (1) формулы расчета концентрации:

$$n = \frac{N}{V} \quad (2)$$

и числа молекул в веществе, выраженного через количество вещества:

$$N = \nu N_A, \quad (3)$$

получим:

$$pV = \frac{m}{M} k N_A T. \quad (4)$$

Заменим произведение постоянной Больцмана на число Авогадро универсальной газовой постоянной:

$$R = k N_A = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}. \quad (5)$$

С учетом (5), запишем уравнение (4) в виде:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (6)$$

Соотношение (6) является уравнением состояния газа, его называют уравнением Менделеева – Клапейрона.

II. Уравнение состояния газа и объединенный газовый закон

Рассмотрим два различных состояния некоторого газа массой m : начальное – с параметрами p_1, V_1, T_1 ; конечное – с параметрами p_2, V_2, T_2 . Для начального состояния уравнение состояния газа имеет вид $p_1 V_1 = \frac{m}{M} RT_1$. Переместим переменные величины в левую часть уравнения, получим:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{m}{M} R. \quad (7)$$

Для конечного состояния газа запишем аналогичное соотношение величин:

$$\frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{m}{M} R. \quad (8)$$

? Ответьте на вопросы

1. Почему вода из узкой длинной трубки, запаянной с одного конца, не выливается полностью, если трубку развернуть открытым концом вниз?
2. Почему всплывающие в воде пузыри воздуха увеличиваются в размерах?

✓ Запомните!

Значение универсальной газовой постоянной:

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}.$$

Приравняем левые части уравнений (7) и (8):

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (9)$$

или
$$\frac{pV}{T} = const. \quad (10)$$

Полученные выражения (9) и (10) называют уравнением Клапейрона в честь французского физика Бенуа Клапейрона.

Для данной массы газа произведение давления на объем, деленное на абсолютную температуру, есть величина постоянная, не зависящая от состояния, в котором находится газ.

III. Изопроцессы

В физике и технике широкое применение получили изопроцессы.

Изопроцесс (от древнегреч. «isos» – «равный», «одинаковый») – это процесс, протекающий в системе с неизменной массой при постоянном значении одного из параметров системы.

Уравнения зависимости между двумя переменными термодинамическими параметрами для изопроцессов называют *газовыми законами*. Газовые законы можно рассматривать как частные случаи объединенного газового закона Клапейрона (9).

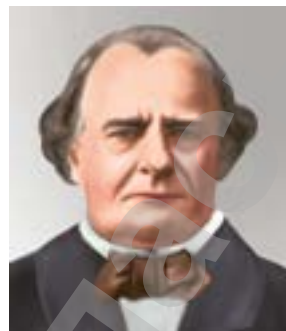
IV. Закон Бойля – Мариотта

Газовый закон, устанавливающий зависимость давления газа от его объема при постоянной температуре назван, законом Бойля – Мариотта. Уравнение газового закона получено экспериментально в 1662 г. английским физиком Робертом Бойлем и независимо от него в 1676 г. французским физиком Эдмоном Мариоттом. Закон Бойля – Мариотта описывает изотермический процесс. *Изотермический процесс – это изменение состояния термодинамической системы при постоянной температуре.*

Из уравнения Клапейрона (9) для газа с $m = const$, $M = const$ при $T = const$ следует:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (11)$$

или
$$pV = const. \quad (12)$$



Бенуа Поль Эмиль Клапейрон (1799–1864) – французский физик и инженер. В 1834 г. вывел уравнение состояния идеального газа. Впервые ввел в термодинамику графический метод, изобразив термодинамический процесс в pV -диаграмме.



Запомните!

Уравнение состояния газа описывает связь между параметрами одного и того же состояния. Газовые законы описывают изменение состояния газа и устанавливают связь между параметрами исходного и конечного состояний газа.



Ответьте на вопросы

1. Почему уравнение состояния Клапейрона можно использовать только для газов с неизменным количеством вещества?
2. В чем принципиальное отличие уравнения состояния от газовых законов?

При постоянном значении температуры произведение давления газа данной массы на его объем остается постоянной величиной.

Из (11) следует, что давление идеального газа обратно пропорционально его объему:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}. \quad (13)$$

График такой зависимости – гипербола, которую называют *изотермой*. На *рисунке 106* представлены изотермы двух процессов, которые происходили при различных значениях температуры. Чем больше температура газа $T_2 > T_1$, тем выше расположена изотерма на плоскости pV -диаграммы.

V. Закон Гей-Люссака

Газовый закон, который описывает изобарный процесс, называют законом Гей-Люссака. Экспериментальное исследование зависимости объема газа от температуры провел в 1802 г. французский физик Жозеф Гей-Люссак.

Изобарный процесс – это процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном давлении.

Из уравнения Клапейрона, при $p = const$, следует:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (14)$$

или

$$\frac{V}{T} = const. \quad (15)$$

При постоянной массе газа и неизменном давлении отношение его объема к температуре остается постоянной величиной.

Из уравнения (14) следует, что зависимость объема от температуры прямо пропорциональная: $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$. На VT -диаграмме график зависимости представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат (*рис. 107*). График изобарного процесса называют *изобарой*. Различным давлениям соответствуют разные изобары. С увеличением давления при постоянной температуре объем газа уменьшается, поэтому изобара процесса с большим

Ответьте на вопрос

Почему при использовании уравнения состояния необходимо все величины выразить в СИ, а в расчетах с использованием газового закона единицы измерения физических величин должны просто совпадать, например, объемы – в литрах?

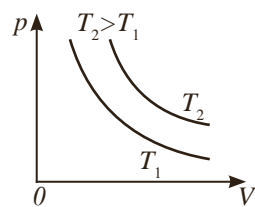


Рис. 106. Изотермы

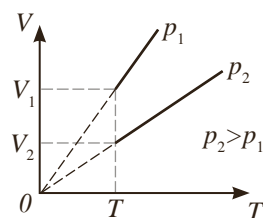


Рис. 107. Изобары

давлением ближе к оси температур. Газовые законы, справедливые для идеальных газов, при низких температурах не выполняются. Поэтому на VT -диаграмме график изображен штриховой линией при низких температурах.

VI. Закон Шарля

Зависимость давления от температуры при постоянном объеме газа была установлена экспериментально французским ученым Жаном Шарлем в 1787 г. и названа законом Шарля. *Изохорный процесс* – это процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном объеме.

Из уравнения Клапейрона при $V = const$ следует:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (16)$$

или
$$\frac{p}{T} = const. \quad (17)$$

При постоянной массе и неизменном объеме газа отношение его давления к температуре остается постоянной величиной.

Зависимость давления от абсолютной температуры прямо пропорциональна: $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$. График зависимости p от T – изохора, которая представлена на рисунке 108. Чем больше объем газа $V_2 > V_1$, тем меньше в нем давление при постоянной температуре. Изохора с большим объемом газа расположена ближе к оси температур.

VII. Графическое изображение изопроцессов на различных диаграммах

Любая точка на диаграмме соответствует состоянию газа, линия – термодинамическому процессу. Отметим точками три состояния газа с соответствующими им параметрами $p_1T_1V_1$, $p_2T_2V_2$, $p_3T_3V_3$ на pV -диаграмме (рис. 109, а). Направление переходов из одного состояния в другое обозначим стрелками. Для удобства использования диаграммы проведем вспомогательную линию: изотерму при температуре, равной температуре газа в первом состоянии T_1 . Из диаграммы видно, что переход из точки 1 в 2 происходит изобарно: $p_1 = p_2$, при этом температура газа возрастает $T_2 > T_1$, объем увеличивается, следовательно, при переходе из состояния 1

Вспомните!

1. Для определения неизвестного множителя необходимо произведение разделить на известный множитель.
2. Для определения среднего члена пропорции необходимо перемножить крайние и разделить на известный средний.
3. Графиком обратной пропорциональной зависимости является гипербола, прямо пропорциональной зависимости – прямая линия.

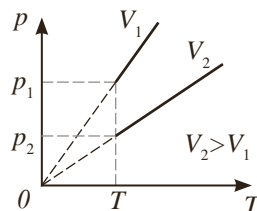


Рис. 108. Изохоры

Ответьте на вопрос

Почему графики изопроцессов не начинаются с нуля?

в состояние 2 газ расширялся изобарно. Переход из состояния 2 в 3 изотермический, давление газа уменьшалось $p_3 < p_2$, объем возрастал, газ изотермически расширялся.

Переход газа из состояния 1 в 2 и затем 3 можно изобразить на VT -диаграмме (рис. 109, б) и на pT -диаграмме (рис. 109, в).

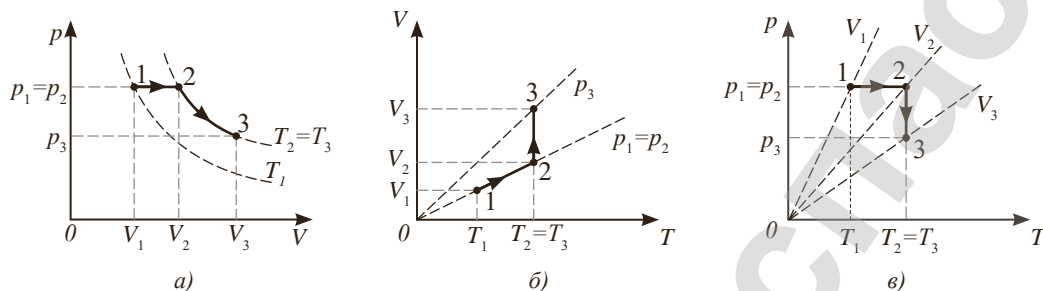


Рис. 109. Изображение термодинамических процессов в различных диаграммах: 1–2 изобарное расширение, 2–3 изотермическое расширение



Задание 1

Рассмотрите диаграммы, изображенные на рисунках 110 а, б, в. Графики каких процессов изображены на каждой диаграмме? Обоснуйте ваш ответ.

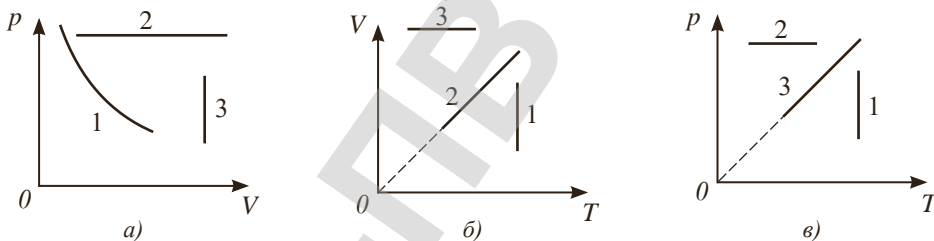


Рис. 110. Диаграммы изопроцессов

VIII. Адиабатный процесс

Процесс можно считать адиабатным, если он происходит за короткий промежуток времени, за который окружающая среда не может совершить теплообмен с газом. Адиабатный процесс возможен в теплоизолированных газах.

Адиабатный процесс – это процесс, происходящий в термодинамической системе, при отсутствии теплообмена с окружающими телами.

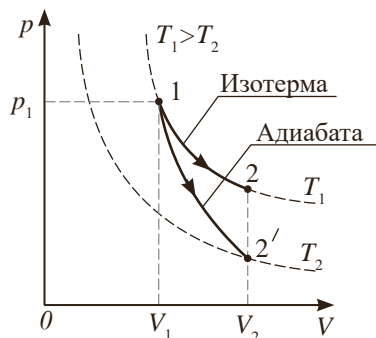


Рис. 111. Работа газа при адиабатном процессе меньше, чем при изотермическом

Примерами адиабатного процесса с увеличением температуры могут быть процессы сжатия воздуха с парами горючего вещества в воздушном огне или

бензиновой смеси в цилиндре ДВС. В результате адиабатного расширения воздуха, содержащего водяные пары, образуются облака.

График адиабатного процесса изображен на *рисунке 111*.



Задание 2

1. Приведите примеры использования сжатого и разреженного газа в промышленности.
2. Сравните адиабату с изотермой (*рис. 111*). Укажите основное различие графиков.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Кислород массой 10 г находится под давлением $p = 0,303\text{ МПа}$ при температуре 10°С . После нагревания при постоянном давлении кислород занял объем 10 л . Определите его начальный объем и конечную температуру.

Дано:

$$m = 10\text{ г}$$

$$p = 0,303\text{ МПа}$$

$$t_1 = 10^\circ\text{С}$$

$$V_2 = 10\text{ л}$$

$$V_1 - ?$$

$$T_2 - ?$$

СИ

$$10 \cdot 10^{-3}\text{ кг}$$

$$0,303 \cdot 10^6\text{ Па}$$

$$283\text{ К}$$

$$10 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3$$

Решение:

Из уравнения Менделеева – Клапейрона

$$pV_1 = \frac{m}{M}RT_1,$$

определим объем газа в первом состоянии

$$V_1 = \frac{mRT_1}{Mp};$$

$$V_1 = \frac{10 \cdot 10^{-3}\text{ кг} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 283\text{ К}}{0,032 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot 0,303 \cdot 10^6\text{ Па}} = 2,4 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3.$$

Выразим из уравнения Менделеева – Клапейрона для второго состояния газа конечную температуру:

$$pV_2 = \frac{m}{M}RT_2, \quad T_2 = \frac{pV_2M}{Rm};$$

$$T_2 = \frac{0,303 \cdot 10^6\text{ Па} \cdot 0,032 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot 10 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3}{8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 10 \cdot 10^{-3}\text{ кг}} = 1,18 \cdot 10^3\text{ К}$$

Ответ: $V_1 = 2,4 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3$; $T_2 = 1,18 \cdot 10^3\text{ К}$.

Контрольные вопросы

1. Какое уравнение называют уравнением состояния газа?
2. При каком условии выполняется соотношение термодинамических параметров, полученных Клапейроном?

3. В чем заключается основное различие уравнения состояния газа от газовых законов?
4. Что называют изопроцессом?
5. Какой процесс называют изотермическим? Изобарным? Изохорным?
6. Какие законы называют газовыми?
7. Сформулируйте газовые законы.

★ Упражнение

13

1. При сжатии газа его объем уменьшился с 8 л до 5 л, а давление повысилось на 60 кПа. Определите первоначальное давление.
2. При температуре 27 °С давление газа в закрытом сосуде составляло 75 кПа. Каким будет давление при температуре –13 °С?
3. При увеличении абсолютной температуры в 1,4 раза объем газа увеличился на 40 см³. Определите первоначальный объем газа.
4. Давление газа при уменьшении его объема в 2 раза увеличилось на 120 кПа, а абсолютная температура возросла на 10 %. Каким было первоначальное давление?

Экспериментальное задание

Проведите наблюдения: используя узкую трубку, выдувайте у дна сосуда с водой пузыри. Почему при всплытии пузыри воздуха увеличиваются в размерах?

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Компрессоры и их назначение».
2. «Как получить глубокий вакуум? Для чего он необходим?»

Итоги главы 7

Уравнение состояния Менделеева – Клапейрона	Объединенный газовый закон Уравнение Клапейрона	
$pV = \frac{m}{M} RT$	При $m = \text{const}$ $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$; $\frac{pV}{T} = \text{const}$	
Газовые законы для изопроцессов		
Закон Бойля – Мариотта	Закон Гей-Люссака	Закон Шарля
$m = \text{const}, T = \text{const}$ $p_1 V_1 = p_2 V_2$ $pV = \text{const}$	$m = \text{const}, p = \text{const}$ $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$; $\frac{V}{T} = \text{const}$	$m = \text{const}, V = \text{const}$ $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$; $\frac{p}{T} = \text{const}$

Законы МКТ

Закон Бойля – Мариотта:

При постоянном значении температуры произведение давления газа данной массы на его объем остается постоянной величиной.

Закон Гей-Люссака:

При постоянной массе газа и неизменном давлении отношение его объема к температуре остается постоянной величиной.

Закон Шарля:

При постоянной массе и неизменном объеме газа отношение его давления к температуре остается постоянной величиной.

Объединенный газовый закон Клапейрона:

Для данной массы газа произведение давления на объем, деленное на абсолютную температуру, есть величина постоянная, не зависящая от состояния, в котором находится газ.

Глоссарий

Адиабатный процесс – процесс, происходящий в термодинамической системе при отсутствии теплообмена с окружающими телами.

Газовый закон – уравнение зависимости между двумя переменными термодинамическими параметрами для изопроцессов.

Изопроцесс – процесс, протекающий в системе с неизменной массой, при постоянном значении одного из параметров системы.

Изобарный процесс – процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном давлении.

Изотермический процесс – изменение состояния термодинамической системы при постоянной температуре.

Изохорный процесс – процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном объеме.

Изобара – график зависимости объема газа данной массы от его температуры при постоянном давлении.

Изотерма – график зависимости давления газа данной массы от его объема при постоянной температуре.

Изохора – график зависимости давления газа данной массы от его температуры при постоянном объеме.

Уравнение состояния газа – уравнение, которое связывает между собой термодинамические параметры.

ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Термодинамика зародилась как экспериментальная наука о способах преобразования тепловой энергии тел в механическую энергию машин. Тепловые машины сыграли и продолжают играть основную роль в механизации ручного труда. Позже основы термодинамики проникли во многие разделы физики, так как обмен теплом является одним из основных процессов в жизни человека. Термодинамика рассматривает явления, связанные с взаимным превращением механической и внутренней энергий и передачей внутренней энергии от одного тела к другому.

Изучив главу, вы сможете:

- объяснять смысл первого и второго законов термодинамики;
- описывать принцип работы и применение теплового двигателя.

§15. Применение законов термодинамики

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять смысл первого и второго законов термодинамики.



Интересно знать!

На основе представлений о теплороде сформировались такие понятия, как «количество теплоты», «теплоемкость тела».



Ответьте на вопрос

Почему физики отказались от гипотезы существования теплорода?



Задание 1

1. Приведите примеры двух способов изменения внутренней энергии.
2. Дайте определение каждому виду теплопередачи, приведите пример.



Ответьте на вопросы

1. Что такое теплота? Количество теплоты?
2. Какие двигатели называют вечными двигателями I и II рода?
3. Почему создание таких двигателей невозможно?

I. Природа теплоты

С XVII в. существовали две гипотезы о природе теплоты. Согласно первой гипотезы *теплота представляет собой особый вид материи – теплород*, – который может перетекать от одного тела к другому. Когда тело нагревалось, считалось, что теплород вливается в это тело, а при охлаждении выливается из него. Тот факт, что тела при нагревании расширяются, казалось, подтверждал эту теорию, так как теплород, вливаясь в тело, занимает некоторый объем. Смущало то, что ряд веществ при нагревании сжимаются, а при охлаждении расширяются. Кроме того, если теплота – это вещество, то в горячем виде тело должно весить больше, чем в холодном. Опыты, однако, показывали, что масса тел при нагревании оставалась прежней.

Вторая гипотеза о природе теплоты – корпускулярная, она объясняла все тепловые явления движением частиц, из которых состоит вещество. Английский ученый Бенджамин Томпсон, граф Румфорд, установил, что при сверлении пушечного ствола тупым сверлом выделяется такое количество теплоты, что объяснить это теорией теплорода было невозможно. Большое впечатление на современников Румфорда произвел опыт, в котором в ящик с водой был помещен пушечный ствол, и через 2,5 часа после начала сверления вода в нем закипела без нагрева огнем. На основании опытов Румфорд пришел к выводу: «Я должен признать, что результаты всех моих экспериментов не приводят ни к какому иному выводу, что теплота не что иное, как колебательное движение частиц тела».

К середине XIX в. ученым удалось экспериментально доказать эквивалентность понятий «энергия», «количество теплоты» и «работа».

Количественные доказательства эквивалентности работы, внутренней энергии и количества теплоты были получены на опытах немецким физиком Р. Майером и английским физиком Д. Джоулем. Единицу измерения этих величин назвали джоулем в честь английского ученого:

$$[A] = 1 \text{ Дж}, \quad [Q] = 1 \text{ Дж}, \quad [U] = 1 \text{ Дж},$$

а между единицей измерения количества теплоты *1 калория* и работой *1 джоуль* установлена связь: $1 \text{ кал} \approx 4,2 \text{ Дж}$.



Вспомните!

(Из курса физики 8 класса).

Два способа изменения внутренней энергии тела: 1) совершение механической работы; 2) теплообмен.

Энергия – это мера различных форм движения и взаимодействия тел и способности их совершать работу.

Работа – это мера превращения одного вида энергии в другой.

Количество теплоты – это количественная мера изменения внутренней энергии тела в результате теплообмена.

Три способа теплопередачи: 1) теплопроводность; 2) конвекция; 3) излучение.

II. Первый закон термодинамики

Сформулируем первый закон термодинамики с учетом двух способов изменения внутренней энергии.

Изменение внутренней энергии тела ΔU при переходе из одного состояния в другое равно сумме совершенной над телом работы A' и полученного им количества теплоты Q .

$$\Delta U = A' + Q \quad (1)$$

Первый закон термодинамики является законом сохранения и превращения энергии для тепловых процессов. Об изменении внутренней энергии тела можно судить по его состоянию. Об увеличении внутренней энергии свидетельствует увеличение температуры тела, его размельчение или разбрызгивание, плавление, кипение, испарение, увеличение объема. Если для изменения состояния тела или нескольких тел была затрачена энергия, то их внутренняя энергия возрастает.



Вспомните!

Формулы расчета количества теплоты

Процесс	Формула
Нагревание и охлаждение	$Q = cm(t_2 - t_1)$
Плавление	$Q = \lambda m$
Отвердевание	$Q = -\lambda m$
Кипение	$Q = r \cdot m$
Конденсация	$Q = -r \cdot m$
Сгорание топлива	$Q = qm$

Знак минус в формулах свидетельствует о том, что тело передает энергию другим телам или окружающей среде.

Таблица 5. Физические величины и их единицы измерения

Физическая величина	Обозначение	Единица измерения
Удельная теплоемкость вещества	c	$[c] = 1 \frac{Дж}{кг \cdot К}$
Удельная теплота плавления	λ	$[\lambda] = 1 \frac{Дж}{кг}$
Удельная теплота парообразования	r	$[r] = 1 \frac{Дж}{кг}$
Удельная теплота сгорания топлива	q	$[q] = 1 \frac{Дж}{кг}$

III. Внутренняя энергия. Изменение внутренней энергии

С точки зрения МКТ *внутренняя энергия тела – это сумма потенциальной энергии взаимодействия частиц, из которых состоит тело, и средней кинетической энергией их теплового движения.*

Определим внутреннюю энергию идеального газа некоторого объема. Потенциальная энергия взаимодействия идеальных газов пренебрежительно мала, поэтому внутренняя энергия тела равна сумме средних кинетических энергий всех его молекул. Выразим внутреннюю энергию тела U через среднюю кинетическую энергию одной молекулы $\bar{E} = \frac{3}{2}kT$:

$$U = N\bar{E} = \nu N_A \frac{3}{2}kT = \frac{3}{2}\nu RT, \quad (2)$$

где $N = \nu N_A$ – число молекул в заданном объеме. Заменяв количество вещества отношением массы к молярной массе:

$$\nu = \frac{m}{M}, \quad (3)$$

получим формулу расчета внутренней энергии идеального одноатомного газа:

$$U = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} RT. \quad (4)$$

Из (4) следует, что внутренняя энергия тела массой m зависит только от температуры, следовательно, изменение внутренней энергии определяется изменением температуры:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} R \Delta T. \quad (5)$$

IV. Работа газа или пара при расширении

Из курса физики 8 класса вам известно, что работа, совершенная газом при расширении равна: $A = F(h_2 - h_1) = pS(h_2 - h_1)$ (рис. 112) или:

$$A = p\Delta V, \quad (6)$$

где p – давление газа.

Работа внешней силы: $A' = -F'(h_2 - h_1) = -A$.

Работа внешних сил равна работе пара или газа, взятого с противоположным знаком.

$$A' = -A. \quad (7)$$

V. Первый закон термодинамики и работа газа

Запишем первый закон термодинамики (1), используя соотношения (7), получим:

$$Q = A + \Delta U. \quad (8)$$

Количество теплоты, полученное газом, расходуется на изменение внутренней энергии и на совершение работы газом.



Задание 2

Дайте определение величинам, внесенным в таблицу 5.

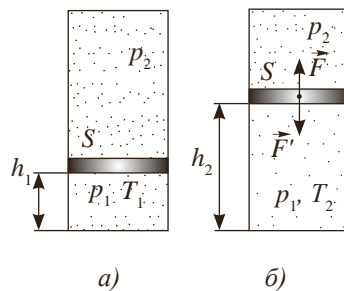


Рис. 112. Газ при расширении совершает работу



Ответьте на вопрос

Почему работа газа и работа внешней силы равны, но противоположны по знаку?

VI. Первый закон термодинамики для изопроцессов

При изохорном процессе объем газа не меняется, работа газом не совершается. Первый закон термодинамики примет вид:

$$Q_V = \Delta U \quad \text{при } V = \text{const.} \quad (9)$$

При изобарном процессе объем и температура газа меняются, следовательно, полученное количество теплоты идет на изменение внутренней энергии газа и совершение работы газом:

$$Q = \Delta U + A. \quad (10)$$

Если температура газа не меняется, его внутренняя энергия остается величиной постоянной, тогда первый закон термодинамики будет иметь вид:

$$Q_T = A. \quad (11)$$

VII. Применение первого закона термодинамики

Наиболее распространенными после механических явлений являются тепловые. Мы наблюдаем их в природе, используем в быту и технике. Теплообмен без совершения работы происходит в жидкостях и твердых телах, например, нагревательные приборы выполнены из веществ с хорошей теплопроводностью, для сохранения тепловой энергии используют теплоизоляторы, в системе отопления используют вещество с высокой теплоемкостью – воду.

Пар или газ используют не только в теплообмене, но и для совершения работы и превращения тепловой энергии в механическую. Действие тепловых двигателей основано на совершении работы посредством расширения пара (газа). Первые паровые машины использовали на паровозах и пароходах. Позднее широкое применение получили двигатели внутреннего сгорания и дизели, что привело к бурному развитию автомобильного, речного, морского и железнодорожного транспорта. В Казахстане в 1982 г. был основан Костанайский дизельный завод для производства двигателей, на базе которого с 2010 г. действует ТОО «Сарыарка Автопром» холдинговой компании АО AllurGroup (рис. 113). Завод собирает 44 модели автомобилей семи мировых брендов: Ssang Yong, Peugeot, Toyota, Iveco, Hyundai, Jac, Geely. Первыми автомобилями, производимыми по методу полного цикла стали Nomad и Toyota. Завод стал первой производственной площадкой Toyota на территории Центральной Азии и второй в странах СНГ. AllurGroup запустил проекты по производству легковой и коммерческой техники JAC, подписал соглашение о сотрудничестве между ТОО «Сарыарка Автопром» и PSA Peugeot Citroen и переходе на полный цикл сборки автомобилей Peugeot 301. Начал работу над производством больших городских автобусов Iveco Urbanway, оборудованных экологическими дизелями.



Задание 3

Докажите, что работа газа при расширении положительная $A > 0$, а работа внешней силы давления отрицательная $A' < 0$. При сжатии, наоборот, работа газа отрицательная, а работа внешней силы положительная.



Рис. 113. Сборка молодыми специалистами автомобиля на заводе ТОО «Сарыарка Автопром», г. Костанай

С появлением газовых турбин и ракетных двигателей получили развитие самолето- и ракетостроение, космическая промышленность. В апреле 2012 года впервые запущен отечественный самолет «Арай» (рис. 114), что послужило началом развития казахстанского самолетостроения для частной авиации.



Рис. 114. Гражданский самолет «Арай» производства «Авиа Мастер Эйркрафт», г. Алматы

VIII. Второй закон термодинамики

Первый закон термодинамики требует от термодинамического процесса определенного энергетического баланса и ничего не говорит о том, возможен такой процесс или нет. Направление самопроизвольно протекающих процессов устанавливает второй закон термодинамики, он непосредственно связан с необратимостью реальных тепловых процессов.

Необратимый процесс – это процесс в термодинамической системе, который не допускает возможность самопроизвольного возвращения системы в первоначальное состояние без каких-либо изменений в окружающей среде.

В работе «О движущей силе теплоты и о законах, которые можно отсюда получить для теории теплоты», опубликованной в 1850 г., Р. Клаузиус сформулировал утверждение, назвав ее тепловой аксиомой: «Теплота сама собой не может переходить от тела холодного к телу горячему».

Уточненная формулировка известна как формулировка второго закона или второго начала термодинамики Клаузиуса.

Невозможен процесс, единственным результатом которого была бы передача энергии путем теплообмена от тела с низкой температурой к телу с более высокой температурой.



Задание 4

1. Укажите направление теплового процесса при контакте двух тел с разными температурами.
2. Докажите, что процесс превращения механической энергии во внутреннюю под действием силы трения является необратимым.
3. Приведите примеры необратимых процессов.



Рудольф Клаузиус (1822–1888) – немецкий физик, механик и математик. Основные труды посвящены теоретической термодинамике. За научные исследования был избран членом-корреспондентом Французской академии наук.



Задание 5

Используя Интернет, выясните, какие формулировки второго начала термодинамики были предложены различными учеными. Сравните и выясните, какая из формулировок для вас наиболее понятна.

IX. Вечные двигатели

Вопреки законам термодинамики стремление ученых создать вечный двигатель не иссякло и по сей день.

В соответствии с законами термодинамики различают вечные двигатели I и II рода.

Вечный двигатель первого рода – это воображаемая машина, которая совершала бы работу неограниченно долгое время, не заимствуя энергию извне.

Вечный двигатель второго рода – воображаемый механизм, превращающий все количество теплоты в работу.

Создать вечный двигатель пытались многие изобретатели. Все попытки заканчивались неудачей, что стало экспериментальным доказательством выполнения законов термодинамики. Из первого закона термодинамики следует, что $A = Q - \Delta U$, следовательно, любой двигатель может совершить работу только за счет энергии Q , полученной извне, или за счет уменьшения своей внутренней энергии $A = -\Delta U$, если $Q = 0$. Второй закон термодинамики постулирует о невозможности прекращения теплового движения и достижения абсолютного нуля температуры.



Обратите внимание!

Энергия любого вида – механическая, химическая, электрическая – может полностью превратиться в любой другой вид энергии.

Внутренняя энергия превращается в любой другой вид энергии лишь частично.

Молекулы тела не могут, полностью отдав энергию, прекратить движение.



Возьмите на заметку!

Второй закон термодинамики является постулатом, который представляет собой результат обобщения огромного числа опытных данных. Он получил многочисленные экспериментальные подтверждения.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Идеальный газ, находящийся в цилиндре под поршнем, нагревают, газ при этом совершает работу 600 Дж. Какое количество теплоты было передано газу?

Дано:

$$A = 600 \text{ Дж}$$

$$Q = ?$$

Решение:

Запишем формулу первого закона термодинамики:

$$Q = \Delta U + A. \quad (1)$$

Внутренняя энергия одноатомного газа равна:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT = \frac{3}{2} p \Delta V. \quad (2)$$

$$\text{Работа газа:} \quad A = p \Delta V. \quad (3)$$

Решая совместно уравнения (1), (2) и (3), получим: $Q = \frac{3}{2} A + A = \frac{5}{2} A$.

Подставив численное значение работы, получим: $Q = \frac{5}{2} \cdot 600 \text{ Дж} = 1500 \text{ Дж}$.

Ответ: $Q = 1500 \text{ Дж}$.

Контрольные вопросы

1. Что такое внутренняя энергия? От каких параметров она зависит?
2. Какими способами можно изменить внутреннюю энергию тела или системы тел?
3. Назовите способы теплообмена. Дайте им определения.
4. Что называют количеством теплоты? Какие формулы расчета количества теплоты вам известны?
5. Каков физический смысл совершенной работы?
6. Сформулируйте законы термодинамики.
7. Какое применение получили два начала термодинамики?

★ Упражнение

14

1. Определите внутреннюю энергию одноатомного идеального газа, взятого в количестве 5 молей, при температуре 27°C ?
2. Зависит ли изменение внутренней энергии газа от способа его перевода из состояния 1 в состояние 2 (рис. 115)? Определите изменение внутренней энергии при переходе из состояния 1 в состояние 2, если газ одноатомный; $p_0 = 10^5 \text{ Па}$, $V_2 = 2 \text{ л}$.

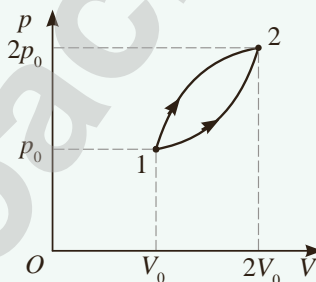


Рис. 115. К упражнению 14.2

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Из истории Костанайского дизельного завода».
2. «Перспективы развития «АО «Агромашхолдинг»».
3. «Перспективы развития самолето- и ракетостроения в РК».

§16. Тепловые двигатели

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать принцип работы и применение теплового двигателя.

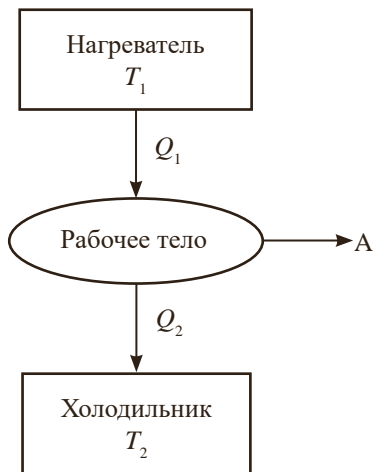


Рис. 116. Принципиальная схема тепловой машины

I. Принцип действия тепловых двигателей

Каждый тепловой двигатель состоит из трех частей: нагревателя, холодильника и рабочего тела, способного расширяться и сжиматься (рис. 116). Обычно роль рабочего тела выполняют газ или пар, заключенные в сосуд с поршнем. Техническая задача состоит в том, чтобы дать рабочему телу возможность попеременно приходить в соприкосновение с нагревателем и холодильником. При соприкосновении с нагревателем рабочее тело расширяется и совершает работу. Соприкосновение с холодильником заставляет рабочее тело сжиматься, поршень возвращается в исходное положение, и цикл начинается снова: рабочее тело, получив энергию от нагревателя, расширяется.

II. Циклический процесс. Работа газа за цикл

Рассмотрим круговой процесс, состоящий из двух изобар и двух изохор (рис. 117).

Круговой процесс, или цикл, – это процесс, в результате которого система, пройдя через ряд промежуточных состояний, возвращается в исходное состояние.

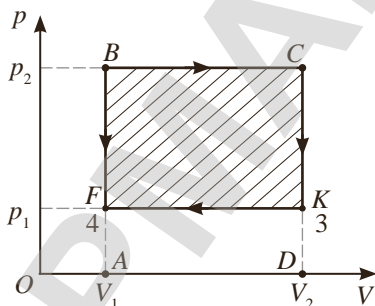


Рис. 117. Диаграмма циклического процесса из двух изобар и двух изохор

Из диаграммы видно, что газ, расширяясь, совершает положительную работу $A_1 > 0$, численно равную площади фигуры $ABCD$. При сжатии работа газа отрицательная $A_2 < 0$, численно равная площади фигуры $AKFD$. Следовательно, работа, совершенная газом за цикл, равна площади фигуры $BCKF$, ограниченной графиками переходов газа по всем состояниям цикла:

$$A = A_1 - A_2. \quad (1)$$

III. Тепловые машины. КПД машины

Если круговой процесс происходит по прямому циклу: из состояния 1 переходит в состояние 3 и затем возвращается в исходное состояние 1 по часовой стрелке, то машину называют тепловой. В ней энергия, переданная рабочему телу от нагревателя, превращается в механическую энергию, совершается работа.

Тепловая машина – это устройство, предназначенное для преобразования внутренней энергии газа или пара в механическую энергию.

КПД теплового двигателя равен отношению работы газа к количеству теплоты, переданного нагревателем:

$$\eta_T = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}, \quad (2)$$

где Q_1 – количество теплоты, переданное нагревателем газу;
 Q_2 – количество теплоты, отданное газом холодильнику.

IV. Цикл Карно. Идеальная тепловая машина

КПД первых тепловых машин был крайне мал, он едва достигал 8–9 %. В 1824 году французский инженер Сади Карно установил основные закономерности работы тепловых двигателей и предложил цикл с максимальным значением КПД. Машину, работающую по циклу Карно, называют *идеальной машиной*.

Круговой процесс Карно состоит из двух изотерм и двух адиабат (рис. 118).

В своих расчетах С. Карно пришел к выводу, что КПД идеального двигателя не может быть равным 100 %, он имеет предел, который определяется температурой нагревателя и холодильника:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \text{ или } \eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (3)$$

Из полученной формулы (3) следует, что для повышения коэффициента полезного действия тепловых двигателей возможны два пути: повышение температуры нагревателя T_1 или понижение температуры холодильника T_2 .

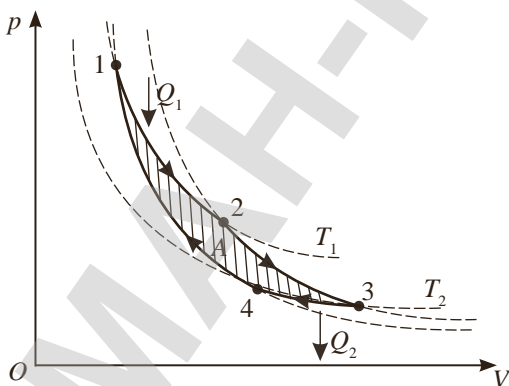


Рис. 118. Диаграмма циклического процесса идеальной машины

Ответьте на вопросы

Почему КПД идеальной машины не может быть равен 100 %, а достигает порядка 70 %?

Задание

Используя текст учебника и материалы сети Интернет, составьте таблицу «Виды тепловых машин». В таблице укажите:

1. название двигателя;
2. устройство;
3. принцип действия;
4. область применения.;
5. максимальное значение КПД.

V. Классификация тепловых двигателей

Энергию газа или пара, которую используют в тепловых двигателях, получают при сжигании различных видов топлива. Если сжигание топлива производится вне

цилиндра, где происходит расширение газа, то двигатель называют двигателем внешнего сгорания. К двигателям внешнего сгорания относятся паровая машина, паровая турбина, двигатель Стирлинга.

Если топливо сгорает внутри камеры расширения, то двигатель называют двигателем внутреннего сгорания. Примерами таких двигателей могут служить ДВС, дизель, роторно-поршневой двигатель, турбореактивный и реактивный двигатель.

VI. Виды тепловых машин и их применение

Паровые машины. Основное достоинство паровой машины – простота конструкции и хорошие тяговые характеристики. Поэтому паровая машина очень удобна в качестве тягового двигателя, например, на паровозах. К серьезным недостаткам паровых машин относятся их низкий КПД порядка 10 %, сравнительно невысокая максимальная скорость, большой вес и постоянный расход топлива и воды. На *рисунке 119* дан общий вид паровой машины, приводящей колесо в движение. Рабочим телом в этом двигателе является водяной пар.

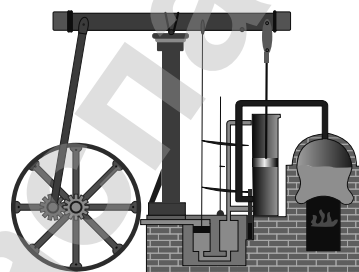


Рис. 119. Паровая машина

Двигатели внутреннего сгорания. В двигателях внутреннего сгорания источником тепла является энергия топлива. При полном сгорании топлива на один килограмм бензина приходится не менее пятнадцати килограммов воздуха. Важной характеристикой, определяющей полноту сгорания топлива и высокое КПД двигателя, является степень сжатия горючей смеси. Достигнуть высоких степеней сжатия (8–9 кратное) без детонации удалось применением бензина со специальными присадками, содержащими свинец. КПД двигателей внутреннего сгорания составляет от 20 до 30 %.

На *рисунке 120* изображен четырехцилиндровый ДВС, работающий за 4 такта: впуск горючей смеси, сжатие, рабочий ход и выпуск отработанных газов. К концу второго такта происходит воспламенение топлива от искры свечи. В каждом цилиндре такты происходят поочередно. Двигатели внутреннего сгорания широко применяются в автомобильном транспорте.



Рис. 120. Двигатель внутреннего сгорания

Двигатель Дизеля. Немецкий инженер Рудольф Дизель в 1892 г. для повышения КПД двигателя внутреннего сгорания предложил увеличить степень сжатия рабочего тела. Высокая степень сжатия без детонации достигается за счет сжатия воздуха без горючей смеси. По окончании процесса сжатия в цилиндр впрыскивается горючее. В дизельных двигателях не нужна система зажигания, нет сложностей с опережением зажигания и можно использовать сравнительно дешевое дизельное топливо (рис. 121). Не требуется и карбюратор, поскольку нет предварительного смешивания топлива с воздухом. Однако из-за высокой степени сжатия конструкция должна быть прочнее. Степень сжатия в дизельных двигателях доходит до 20:1, что позволяет достичь высокого значения КПД. Современные дизели имеют КПД около 40 %.

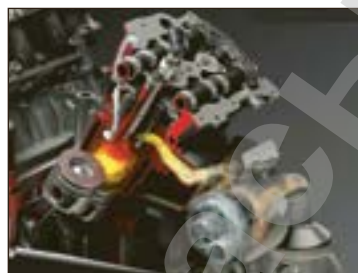


Рис. 121. Двигатель Дизеля

Дизельные двигатели используются в мощных грузовых автомобилях, тракторах, на судах речного и морского транспорта, железнодорожных локомотивах.

Двигатель Стирлинга. В 1816 г. шотландец Р. Стирлинг изобрел поршневой двигатель внешнего сгорания. Рабочий цикл двигателя осуществляется за 4 такта: сжатие, нагревание, рабочий ход, охлаждение. Рабочий газ нагревается внешним источником тепла, как в паровой машине (рис. 122), а охлаждается водой, постоянно циркулирующей в двигателе. По сравнению с паровыми машинами двигатель Стирлинга имеет довольно высокий КПД – около 30 %. Эти двигатели отличаются бесшумной работой и экономичностью, могут работать на любом виде топлива: дровах, угле, газе и даже на солнечной энергии. Их применяют для отопления и получения электроэнергии в автономных домах. Наиболее совершенные конструкции двигателей Стирлинга разработаны для судов, подводных лодок и грузовых автомобилей. Специально разработанный генератор Стирлинга с радиоизотопным источником энергии будет использован в космической экспедиции к спутникам Сатурна, запланированной NASA на 2020 г.



Рис. 122. Модель двигателя Стирлинга

Газовые турбины – это двигатели непрерывного действия, которые преобразуют энергию сжатого или нагретого газа в механическую работу (рис. 123). Топливо может гореть как вне турбины, так и в самой турбине. Основными элементами конструкции являются ротор и статор. Преимуществами газотурбинных двигателей являются то, что они имеют более высокий КПД и меньше выбросов вредных веществ по сравнению с поршневыми двигателями, потребляют любое горючее, которое можно распылить: газ, нефтепродукты, пылеобразный уголь.

Газовые турбины используют в сверхзвуковых самолетах, ракетах на жидком топливе.

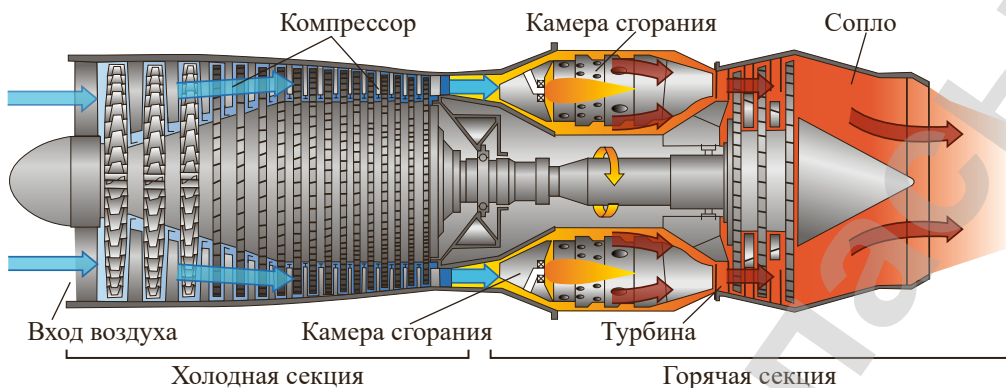


Рис. 123. Газовая турбина

VII. Влияние тепловых машин на окружающую среду

Тепловые машины отрицательно действуют на окружающую среду. При сжигании топлива, которое сопровождается выделением в атмосферу углекислого газа, используется кислород из атмосферного воздуха. Инфракрасное излучение, испускаемое земной поверхностью, все в большей мере поглощается атмосферой. Дальнейшее существенное увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере может привести к повышению ее температуры. При сжигании угля и нефти атмосфера загрязняется азотными и серными соединениями, вредными для здоровья человека.

Более половины всех загрязнений атмосферы создает транспорт. Кроме оксида углерода и соединений азота, автомобильные двигатели ежегодно выбрасывают в атмосферу 2–3 млн т свинца, соединения которого добавляют в автомобильный бензин для предотвращения детонации топлива в двигателе.



Возьмите на заметку

Легковой автомобиль при среднем годовом пробеге 15 тыс. км выделяет в атмосферу 250 кг углекислого газа, 93 кг углеводорода, 27 кг окислов азота.



Задание

1. Изучив влияние тепловых машин на окружающую среду, разработайте меры по охране окружающей среды.
2. Определите количество вредных веществ, выделяемых за год в атмосферу легковыми автомобилями в вашем городе и в 5 крупных городах Казахстана. Составьте сравнительную диаграмму по результатам расчетов.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В идеальной тепловой машине рабочее тело за цикл получает от нагревателя 10^3 Дж тепла и совершает работу 300 Дж. Определите КПД машины и температуру нагревателя, если температура холодильника 280 К.

Дано:

$$Q_1 = 10^3 \text{ Дж}$$

$$A = 300 \text{ Дж}$$

$$T_2 = 280 \text{ К}$$

$$T_1 = ?$$

$$\eta = ?$$

Решение:

Для определения КПД тепловой машины используем известные формулы:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (2)$$

и

Вычислим КПД: $\eta = \frac{300 \text{ Дж}}{10^3 \text{ Дж}} = 0,3$; $\eta = 30 \%$.

Для определения температуры нагревателя преобразуем формулу (2):

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = 1 - \eta \Rightarrow T_1 = \frac{T_2}{1 - \eta}.$$

Выполним расчеты: $T_1 = \frac{280 \text{ К}}{1 - 0,3} = 400 \text{ К}.$

Ответ: $\eta = 30 \%$; $T_1 = 400 \text{ К}.$

Контрольные вопросы

1. Какой процесс называют круговым?
2. Назовите основные части любой тепловой машины.
3. Какие превращения энергии происходят в тепловой машине?
4. Какой процесс назван циклом Карно?
5. Какие тепловые двигатели вам известны?
6. Назовите преимущества и недостатки тепловых двигателей.
7. Какие вредные вещества выбрасывают в атмосферу тепловые машины?
8. Каковы основные направления борьбы с отрицательными последствиями применения тепловых двигателей?

★ Упражнение

15

1. Тепловая машина работает по замкнутому циклу. Подведенное за цикл количество теплоты $Q_1 = 0,1 \text{ МДж}$, отданное холодильнику $Q_2 = 80 \text{ кДж}$. Определите полезную работу за цикл и КПД тепловой машины.
2. Определите КПД идеальной тепловой машины, если температура нагревателя и холодильника $t_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_2 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно.
3. Идеальная тепловая машина совершает за один цикл работу $A = 73,5 \text{ кДж}$. Температура нагревателя $t_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, температура холодильника $t_2 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$. Найдите КПД цикла и количество теплоты, отданное холодильнику за один цикл.

Творческое задание

Подготовьте сообщение на тему: «Тепловые двигатели и охрана окружающей среды».

Итоги главы 8

Внутренняя энергия, изменение внутренней энергии	Работа газа	Количество теплоты
$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$ $\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$	$A = p \Delta V$ $A = \frac{m}{M} R \Delta T$ <p>Связь работы внешних сил и работы газа</p> $A' = -A$	<p>При нагревании (охлаждении)</p> $Q = cm(t_2 - t_1)$ <p>При плавлении (отвердевании)</p> $Q = \pm \lambda m$ <p>При кипении (конденсации)</p> $Q = \pm r \cdot m$ <p>При сгорании топлива</p> $Q = qm$
I закон термодинамики	КПД машин	
	Тепловая машина	Идеальная тепловая машина
$\Delta U = A' + Q$ $Q = A + \Delta U$	$\eta_T = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$	$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

Законы термодинамики**Первый закон термодинамики:**

Изменение внутренней энергии ΔU тела при переходе из одного состояния в другое равно сумме совершенной над телом работы A' и полученного им количества теплоты Q .

Количество теплоты, полученное газом, расходуется на изменении внутренней энергии и на совершении газом работы.

Второй закон термодинамики:

Невозможен процесс, единственным результатом которого была бы передача энергии путем теплообмена от тела с низкой температурой к телу с более высокой температурой.

Глоссарий

Вечный двигатель первого рода – воображаемая машина, которая совершала бы работу неограниченно долгое время, не заимствуя энергию извне.

Вечный двигатель второго рода – воображаемый механизм, превращающий все количество теплоты в работу.

Внутренняя энергия тела – сумма потенциальной энергии взаимодействия частиц, из которых состоит тело, и средней кинетической энергии их теплового движения.

Количество теплоты – количественная мера изменения внутренней энергии при теплообмене.

Круговой процесс, или цикл – процесс, в результате которого система, пройдя через ряд промежуточных состояний, возвращается в исходное состояние.

Необратимый процесс – процесс в термодинамической системе, который не допускает возможность самопроизвольного возвращения системы в первоначальное состояние без каких-либо изменений в окружающей среде.

Тепловая машина – устройство, предназначенное для преобразования внутренней энергии газа или пара в механическую энергию.

Термодинамика – раздел физики, который рассматривает явления, связанные с взаимным превращением механической и внутренней энергий и передачей внутренней энергии от одного тела к другому.

ЖИДКИЕ И ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

Свойства жидкостей и твердых тел зависят от внутренней структуры вещества: расстояния между частицами и порядка их расположения. Благодаря особенностям взаимодействия молекул жидкости с молекулами твердых тел мы наблюдаем капиллярные явления, смачивание или несмачивание твердых тел жидкостями.

Над поверхностью жидкостей и твердых тел в результате испарения образуются пары, свойства которых зависят от внешних условий.

В данной главе мы рассмотрим некоторые свойства жидкостей и их паров.

Изучив главу, вы сможете:

- определять относительную влажность воздуха с помощью гигрометра и психрометра;
- объяснять природу поверхностного натяжения и роль капиллярных явлений в повседневной жизни.

§17. Влажность воздуха. Точка росы

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- определять относительную влажность воздуха с помощью гигрометра и психрометра.



Ответьте на вопросы

1. Какие два способа парообразования существуют? Дайте им определения.
2. От каких факторов зависит скорость испарения?



Вспомните!

Процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное называют парообразованием. Конденсация – это процесс превращения пара в жидкость.

I. Насыщенный и ненасыщенный пар

Если процесс парообразования происходит в закрытом сосуде при неизменной температуре, то увеличение концентрации пара жидкости через некоторое время прекратится. Устанавливается динамическое равновесие между процессами испарения и конденсации.

Динамическое равновесие – это состояние термодинамической системы, при котором за одно и то же время число молекул, покидающих жидкость, становится равным числу молекул, возвращающихся в нее.

Пар, находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью, называют **насыщенным паром**.

Давление пара зависит от температуры и концентрации молекул:

$$p = nkT. \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует, что при $T = const$ давление пара определяется только концентрацией молекул. Следовательно, пар насыщается при определенном количестве молекул в единице объема. При изменении температуры давление определяется двумя параметрами: температурой и концентрацией молекул.

Пар, создающий давление ниже давления насыщенного пара, является **ненасыщенным**.

Пар, не находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью, называют **ненасыщенным паром**.

Если пар над жидкостью не насыщен, то испарение преобладает над конденсацией.

II. Абсолютная влажность воздуха. Точка росы

Окружающий нас воздух всегда содержит в себе водяные пары.

Количество водяного пара, содержащегося в 1 м^3 воздуха, называют **абсолютной влажностью воздуха**.

Если в воздухе объемом V содержится пар массой m , то в каждой единице объема воздуха содержание водяного пара будет равно:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2)$$

где ρ – абсолютная влажность.

Водяные пары, находящиеся в воздухе, являются, как правило, ненасыщенными.

Температуру, при которой водяной пар, находящийся в атмосферном воздухе, становится насыщенным, называют *точкой росы*.

Точка росы зависит от содержания водяных паров в воздухе. Если абсолютная влажность воздуха велика, то конденсация происходит при сравнительно высоких температурах.

III. Относительная влажность

Интенсивность испарения воды зависит от степени насыщения водяных паров, которая характеризуется относительной влажностью.

Относительная влажность воздуха – это отношение абсолютной влажности воздуха к количеству пара, которое необходимо для насыщения 1 м³ воздуха при данной температуре, выраженное в процентах:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_H} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где φ – относительная влажность, ρ – абсолютная влажность или плотность пара, ρ_H – абсолютная влажность или плотность насыщенного пара при данной температуре.

Несложно доказать, что отношение абсолютных влажностей равно отношению давлений, следовательно:

Отношение давления водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению насыщенного водяного пара при той же температуре, выраженное в процентах, называют *относительной влажностью воздуха*.

$$\varphi = \frac{p}{p_H} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где p – давление водяного пара, p_H – давление насыщенного пара при той же температуре.

IV. Гигрометр. Волосной гигрометр

Приборы для определения влажности воздуха называют *гигрометрами* (от древнегреч. «гигрос» – «влажный»). Созданы различные виды гигрометров: волосной, конденсационный, психрометрический, электронный термогигрометр.

Действие волосного гигрометра основано на явлении удлинения конского или человеческого волоса при увеличении влажности воздуха. При изменении влажности от 0 до 100 % удлинение волоса составляет около 2,5 % от его длины. В гигрометрах



Запомните!

Единица измерения абсолютной влажности в СИ:

$$[\rho] = 1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Наиболее часто употребляется единица измерения

$$1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$



Возьмите на заметку

1. В метеорологии абсолютной влажностью называют давление водяного пара, содержащегося в воздухе, выраженное в мм рт. ст.

2. Молярная масса водяного пара равна

$$M = 18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$



Ответьте на вопрос

Почему о степени насыщения воздуха водяными парами невозможно судить по абсолютной влажности?

деформация волоса передается на стрелочный указатель с помощью системы рычагов (рис. 124), а в гигрографах – на перо, с помощью которого производится запись на ленте вращающегося барабана (рис. 125). В зимнее время при температурах ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ волосной гигрометр является основным прибором, т.к. более точные приборы не могут работать при низких температурах.

Существуют как волосные, так и пленочные гигрографы. Оборот барабана может быть суточным или недельным.

Волосным гигрометром определяют относительную влажность воздуха.

V. Конденсационный гигрометр. Определение влажности воздуха по точке росы

Конденсационный гигрометр используют для определения точки росы. Он представляет собой металлическую камеру, укрепленную на штативе (рис. 126, а). В камере два отверстия: одно для термометра, второе для продувания воздуха (рис. 126, б). Передняя стенка камеры (2) и кольцевая рамка (3) зеркально отполированы. Рамка и камера отделены друг от друга теплоизоляционным материалом (4). Камеру (1) наполовину заполняют эфиром или спиртом и продувают воздух над поверхностью жидкости с помощью резиновой груши (5). Испаряясь, жидкость охлаждается, на стенках коробки конденсируется пар. Отполированная поверхность коробки тускнеет в сравнении с поверхностью рамки. В момент появления росы снимают показание термометра – точку росы.

По точке росы определяют влажность воздуха в помещении. Для этого в таблице плотностей насыщенного пара находят значение абсолютной влажности ρ , соответствующее точке росы. Определив по той же таблице плотность насыщенного пара ρ_H при температуре окружающей среды, рассчитывают относительную влажность по формуле (3). Аналогичные расчеты можно выполнить, определив парциальное давление и давление насыщенного пара по таблице давлений насыщенного пара.

VI. Электронный термогигрометр

Термогигрометр – это карманный прибор, служащий для измерений температуры воздуха и его влажности. Термогигрометр объединяет два метеорологических устройства – цифровой термометр, измеряющий

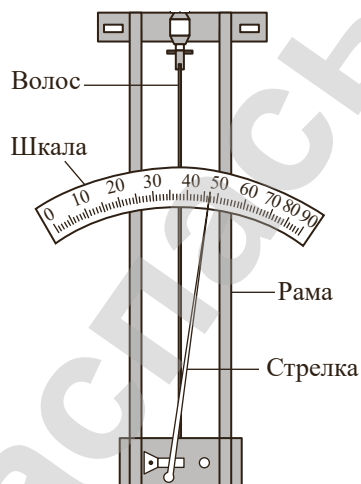


Рис. 124. Волосной гигрометр



Рис. 125. Пленочный гигрограф

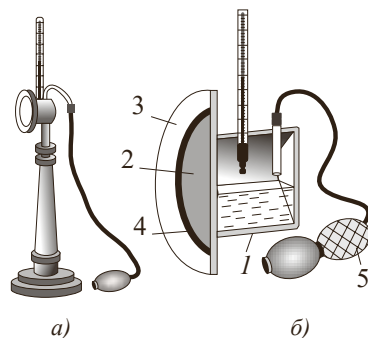


Рис. 126. Конденсационный гигрометр

температуру воздуха, и цифровой гигрометр, измеряющий влажность изделия посредством контакта зонда с изучаемым объектом. Для измерения влажности помещения термогигрометр устанавливают на расстоянии не менее полутора метра от отопительных приборов, кондиционеров или увлажнителей (рис. 127). Существуют цифровые термогигрометры с выносными датчиками, которые можно закрепить в необходимом помещении, вдали от самого прибора.



Рис. 127. Термогигрометр

Основное применение термогигрометра – определение уровня влажности воздуха и точки росы. Его применяют в быту и на производстве, например, при оценке влажности строительных материалов, штукатурки, древесины, в складских помещениях, при хранении столярных изделий, в медицинских учреждениях, библиотечном хозяйстве, музеях. Они компактны, просты и удобны в эксплуатации, оснащены жидкокристаллическими дисплеями. Выполняют многие дополнительные функции такие, как возможность подключаться к компьютеру, встроенные календари, термометры. Популярными становятся автомобильные и комнатные термогигрометры (рис. 128).



Рис. 128. Цифровой термогигрометр

VII. Психрометр

Психрометр служит для определения относительной влажности воздуха. Он состоит из двух одинаковых термометров, укрепленных на корпусе (рис. 129). Резервуар одного из термометров обмотан марлей и опущен в сосуд с водой. Вода с марли испаряется, термометр охлаждается, его показания становятся ниже показаний сухого термометра. Для определения относительной влажности по психрометру определяют температуру воздуха и разность температур между показаниями сухого и влажного термометров. По психрометрической таблице (таблица 9 Приложения) определяют относительную влажность воздуха.

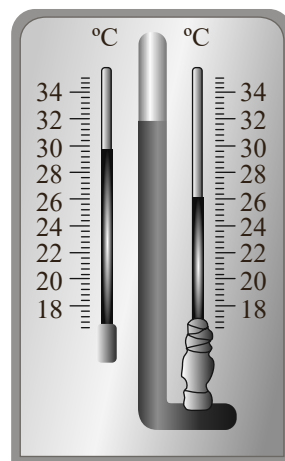


Рис. 129. Психрометр

Ответьте на вопросы

1. Почему туман, как правило, наблюдается ранним утром (рис. 130)?
2. Почему при понижении температуры воздуха в комнате начинает ощущаться сырость?
3. Почему после жаркого дня роса бывает более обильной?



Рис. 130. Утренний туман над озером Бурабай

Ответьте на вопрос

Как изменится показание психрометра, если влажность воздуха увеличится?

**Задание**

1. Прочитайте о принципах действия конденсационного гигрометра и психрометра.
2. Составьте алгоритм определения относительной влажности воздуха с использованием приборов.
3. Определите влажность воздуха в кабинете физики, коридоре и фойе школы.

Контрольные вопросы

1. Какой пар называют насыщенным?
2. Что называют абсолютной влажностью воздуха? В каких единицах ее измеряют?
3. Какую температуру называют точкой росы?
4. Что называют относительной влажностью?
5. Как и какими приборами определяют влажность воздуха?

**Упражнение****16**

1. Определите плотность насыщенных паров воды при температуре 50 °С.
2. Насыщенный водяной пар, имевший начальную температуру 20 °С, отделили от жидкости и нагрели до 30 °С при постоянном объеме. Определите давление пара. Как называют такой пар?
3. Определите абсолютную влажность воздуха при температуре 50 °С, если давление водяного пара равно 8 кПа.
4. Абсолютная влажность воздуха при температуре 300 К равна 12,9 г/м³. Чему равна относительная влажность воздуха?

Экспериментальное задание

Определите влажность воздуха в комнатах квартиры с использованием 2 комнатных термометров. Сравните результаты.

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Современные гигрометры на службе метеорологической службы».
2. «Область применения приборов для определения влажности».
3. «Роль влажности в жизнедеятельности живых организмов».

§18. Поверхностное натяжение жидкости. Смачивание, капиллярные явления

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять природу поверхностного натяжения и роль капиллярных явлений в повседневной жизни.



Ответьте на вопросы

1. Почему шарик из мокрого песка рассыпается под водой?
2. Почему трудно снять с руки мокрую перчатку?



Рис. 131. Действие силы поверхностного натяжения



Эксперимент

Проведите опыт с проволочным кольцом и нитью (рис. 132). Опустите кольцо в мыльный раствор. Нарушив целостность пленки в различных ее частях, наблюдайте за результатом.

I. Силы поверхностного натяжения

Составляющие сил молекулярного взаимодействия, параллельные свободной поверхности жидкости, стремятся сблизить молекулы поверхностного слоя. В результате действия этих сил поверхностный слой оказывается в состоянии натяжения. На границе жидкости и твердого тела силы поверхностного натяжения действуют на твердое тело перпендикулярно его поверхности (рис. 132). Действие сил поверхностного натяжения можно наблюдать на простых опытах. Опустим в мыльный раствор проволочное кольцо, к сторонам которого без натяжения подвязана нить. Внутри

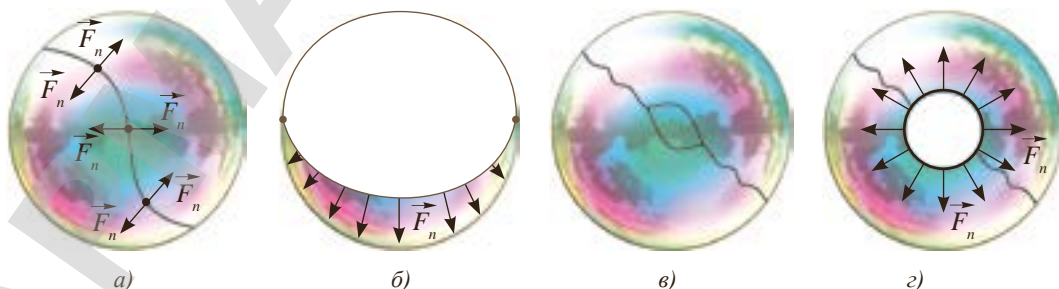


Рис. 132. Наблюдение действия силы поверхностного натяжения

кольца образуется мыльная пленка, в которой нить расположится произвольно (рис. 132, а). Проколем пленку по одну сторону нити. Оставшаяся пленка сокращается, и, натягивая нить, придает ей форму дуги окружности (рис. 132, б). Повторим опыт, подвязав к рамке петлю из нити (рис. 132, в). Проколем пленку внутри петли, в результате чего внешняя часть пленки растянет петлю, придав ей форму кольца (рис. 132, г).

Силы поверхностного натяжения – это силы взаимного притяжения молекул поверхностного слоя жидкости, направленные по касательной к поверхности и стремящиеся уменьшить ее площадь.

II. Коэффициент поверхностного натяжения. Определение коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва капли

Для количественной характеристики явления поверхностного натяжения введен коэффициент поверхностного натяжения.

Коэффициент поверхностного натяжения – это отношение силы поверхностного натяжения к длине границы поверхностного слоя жидкости.

Коэффициент поверхностного натяжения обозначают буквой σ (сигма). По определению:

$$\sigma = \frac{F_n}{l}, \quad (1)$$

где l – длина поверхностного слоя, F_n – сила поверхностного натяжения.

Для капли жидкости, отрывающейся от трубки малого диаметра, границей поверхностного слоя является длина окружности, радиус которой равен внутреннему радиусу трубки (рис. 133, а):

$$l = 2\pi r = \pi d. \quad (2)$$

Капля отрывается в момент, когда вес капли становится равным силе натяжения:

$$P = F_n. \quad (3)$$

Из формул (1), (2), (3) следует, что

$$\sigma = \frac{mg}{\pi d}. \quad (4)$$

В случае выдувания мыльного пузыря из трубки образуются две поверхностные пленки (рис. 133, б), следовательно, мыльный пузырь отрывается от трубки в момент, когда внешняя сила становится равной силе поверхностного натяжения, созданного по двум границам поверхностного слоя:

$$F_{\text{внеш}} = 2F_n. \quad (5)$$

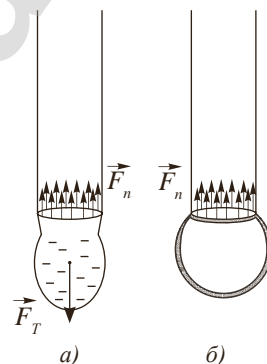


Рис. 133. Границей поверхностного слоя является длина внутренней окружности трубки

Эксперимент

Исследуйте зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры, рода жидкости и наличия примесей (рис. 133). Как изменится размер капли в момент отрыва при увеличении коэффициента поверхностного натяжения?

Единица измерения коэффициента поверхностного натяжения: $[\sigma] = 1 \frac{H}{м}$.

Коэффициент поверхностного натяжения зависит от рода жидкости, ее температуры и наличия в ней примесей. При повышении температуры и наличии примесей коэффициент поверхностного натяжения уменьшается.

III. Смачивание. Краевой угол

Молекулы жидкости, находящиеся на границе с твердым телом, взаимодействуют как с молекулами жидкости, так и с частицами твердого тела. Если силы притяжения со стороны частиц твердого тела больше сил притяжения между молекулами самой жидкости, то жидкость смачивает тело. Свободная поверхность жидкости искривляется и принимает вогнутую форму (рис. 134, а).

Если жидкость не смачивает твердое тело, то свободная поверхность жидкости принимает выпуклую форму (рис. 134, б). Искривленную свободную поверхность жидкости называют мениском.

Угол между поверхностью твердого тела и касательной к мениску в точке его пересечения с твердым телом называют краевым углом θ .

Для жидкостей, смачивающих твердое тело, краевой угол острый, для несмачивающих – тупой.

IV. Капиллярные явления

Взаимодействие жидкости со смачиваемыми и несмачиваемыми поверхностями твердых тел является причиной капиллярных явлений.

Капилляры (с лат. «capillus» – «волос») – это трубки с очень малым внутренним диаметром.

Уровень жидкости в капиллярной трубке поднимается в сравнении с уровнем жидкости в сосуде, если она смачивает стенки трубки. Подъем жидкости происходит до тех пор, пока сила тяжести, действующая на столб жидкости в капилляре, не станет равной силе поверхностного натяжения:

$$F_T = F_n, \tag{6}$$

где $F_T = mg = \rho Shg = \rho \cdot \pi r^2 hg,$ $\tag{7}$

$$F_n = \sigma l = \sigma 2\pi r. \tag{8}$$

Подставив формулы (7) и (8) в (6), получим: $\rho \pi r^2 hg = \sigma 2\pi r,$

откуда:
$$h = \frac{2\sigma}{\rho gr} \tag{9}$$

Запомните!
Единица измерения коэффициента поверхностного натяжения:
 $[\sigma] = 1 \frac{Дж}{м^2} = 1 \frac{Н}{м}.$

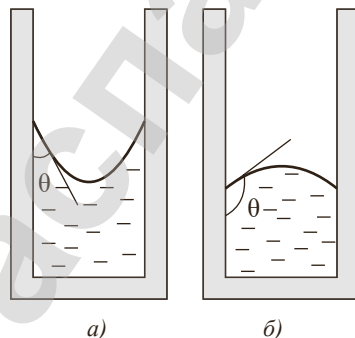


Рис. 134. Свободная поверхность жидкости в капиллярах искривляется

Эксперимент
Убедитесь в том, что:
1) свободная поверхность воды в стеклянном капилляре становится вогнутой;
2) в трубке с меньшим диаметром искривление поверхности значительнее.
Объясните наблюдаемые явления на основе МКТ.

или
$$h = \frac{4\sigma}{\rho g d}. \quad (10)$$

Чем меньше диаметр капилляра, тем выше уровень жидкости в капилляре.

В том случае, когда жидкость не смачивает стенки трубки, жидкость опускается ниже ее уровня в сосуде. Уровень снижения определяют по формуле (10).

V. Роль капиллярных явлений в повседневной жизни

Капиллярные явления играют важную роль в повседневной жизни, как в быту, так и в природе. Ткани всех растений и живых организмов пронизаны капиллярными трубками, по которым питательные вещества поступают во все клетки организма. Сама корневая система растений представляет собой множество капиллярных трубок. Структура уплотненной почвы – это тоже система капиллярных трубок. Рыхление почвы необходимо для разрушения капиллярных трубок.

В повседневной жизни мы используем салфетки и полотенца, которые с легкостью впитывают влагу. Принцип действия фломастера и маркера основан на капиллярных явлениях. Для достижения необходимого качества поверхность писчей бумаги необходимо покрыть ее специальным слоем. Производство строительных материалов, тканей для изготовления непромокаемой спецодежды также должны учитывать капиллярные явления и решать вопросы пропитки материалов.



Эксперимент

Исследуйте качество салфеток различных фирм.



Задание

Приведите примеры практического использования смачивания и капиллярных явлений.

Контрольные вопросы

1. Какие силы называют силами поверхностного натяжения?
2. Как направлены силы поверхностного натяжения на границе жидкости и твердого тела?
3. Какую величину называют коэффициентом поверхностного натяжения? В каких единицах его измеряют?
4. Какое явление называют смачиванием? Что такое капиллярные явления?



Упражнение

17

1. Спичка длиной $l = 4 \text{ см}$ плавает на поверхности воды. Если по одну сторону от спички налить касторовое масло, то она придет в движение. Определите силу, действующую на спичку, и ее направление. Коэффициенты поверхностного натяжения воды и масла $\sigma_1 = 72 \text{ мН/м}$ и $\sigma = 33 \text{ мН/м}$ соответственно.
2. Проволочное кольцо радиусом $R = 6 \text{ см}$ приведено в соприкосновение с поверхностью раствора медного купороса. Какую силу нужно приложить, чтобы оторвать кольцо от поверхности раствора? Коэффициент поверхностного натяжения медного купороса $\sigma = 74 \text{ мН/м}$.

3. Чему равен коэффициент поверхностного натяжения воды, если с помощью пипетки, имеющей кончик диаметром $d = 0,4 \text{ мм}$, можно дозировать воду с точностью до $m = 0,01 \text{ г}$.
4. Определите разность уровней ртути в двух сообщающихся капиллярах с диаметром каналов $d = 1 \text{ мм}$ и $d = 2 \text{ мм}$ соответственно.

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Как моющие средства удаляют пятна и грязь?»
2. «Как самостоятельно приготовить раствор для гигантского мыльного пузыря» (рис. 135)?
3. «Использование капилляров в легкой и тяжелой промышленности».
4. «Капиллярные явления в природе».
5. «Производство водонепроницаемых тканей и строительных материалов в РК».



Рис. 135. Гигантский мыльный пузырь

Итоги главы 9

Влажность воздуха	Коэффициент поверхностного натяжения	Высота подъема жидкости в капилляре
<p>Абсолютная влажность</p> $\rho = \frac{m}{V}$ <p>Относительная влажность</p> $\varphi = \frac{\rho}{\rho_H} \cdot 100\% \quad \varphi = \frac{p}{p_H} \cdot 100\%$	$\sigma = \frac{F_n}{l}$	$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$ $h = \frac{4\sigma}{\rho g d}$

Глоссарий

Абсолютная влажность воздуха – количество водяного пара, содержащегося в 1 м³ воздуха.

Гигрометр – прибор для определения влажности воздуха.

Динамическое равновесие – состояние термодинамической системы, при котором за одно и то же время число молекул, покидающих жидкость, становится равным числу молекул, возвращающихся в нее.

Капилляры – трубки с очень малым внутренним диаметром.

Конденсация – процесс превращения пара в жидкость.

Коэффициент поверхностного натяжения – отношение силы поверхностного натяжения к длине границы поверхностного слоя жидкости.

Краевой угол – угол между поверхностью твердого тела и касательной к мениску в точке его пересечения с твердым телом.

Мениск – искривленная свободная поверхность жидкости.

Насыщенный пар – пар, находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью.

Ненасыщенный пар – пар, не находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью.

Относительная влажность воздуха – отношение абсолютной влажности воздуха к количеству пара, которое необходимо для насыщения 1 м³ воздуха при данной температуре, выраженное в процентах.

Относительная влажность воздуха – отношение давления p водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению насыщенного водяного пара при той же температуре, выраженное в процентах.

Силы поверхностного натяжения – силы взаимного притяжения молекул поверхностного слоя жидкости, направленные по касательной к поверхности и стремящиеся уменьшить ее площадь.

Точка росы – температура, при которой водяной пар, находящийся в атмосферном воздухе, становится насыщенным.

Основным содержанием раздела «Электричество и магнетизм» является описание свойств электромагнитного поля и его взаимодействия с заряженными телами. В электродинамике рассматривают электрическое и магнитное взаимодействие между заряженными телами. Любые взаимодействия, которые происходят посредством электромагнитных полей, являются предметом электродинамики.

ГЛАВА 10

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Электростатикой называют раздел электродинамики, в котором изучается взаимодействие неподвижных зарядов. Заряд может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Впервые понятие «электрический заряд» было введено в законе Кулона в 1785 г.

Изучив главу, вы сможете:

- обсуждать свойства электрического поля и определять его силовую характеристику;
- описывать действие электростатического поля на движение заряда;
- сравнивать характеристики гравитационного и электростатического полей;
- объяснять роль конденсатора в простой электрической цепи.

§19. Электрическое поле

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- обсуждать свойства электрического поля и определять его силовую характеристику;
- описывать действие электростатического поля на движение заряда.



Вспомните!

Атом нейтрален.

Атом, потерявший часть электронов, становится положительным ионом.

Атом с избыточным количеством электронов называют отрицательным ионом.



Возьмите на заметку!

Первые измерения величины заряда электрона провел в 1909–1913 гг. американский физик Р. Милликен. Он наблюдал движение микроскопических капелек масла в электрическом поле. Ему удалось доказать, что заряды капелек кратны элементарному заряду, и измерить величину этого заряда, он равен:
 $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.



Запомните!

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{H \cdot M^2}{Kл^2};$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{Kл^2}{H \cdot M^2};$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}.$$

I. Электрический заряд

Минимально возможным электрическим зарядом обладает электрон, его называют *элементарным зарядом*. Заряды тел обусловлены избытком или недостатком электронов, следовательно, их заряд кратен *элементарному заряду*. Любая свободная заряженная частица несёт лишь целое число элементарных зарядов:

$$q = N|e|. \quad (1)$$

Единица измерения заряда в СИ $[q] = 1 \text{ Кл}$.

Кулон – это электрический заряд, проходящий через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А за время 1 с.

В 1843 г. английским физиком М. Фарадеем был установлен закон сохранения заряда:

Алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы остается неизменной, какие бы процессы не происходили внутри этой системы.

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = const. \quad (2)$$

Закон сохранения заряда наряду с законами сохранения энергии и импульса является фундаментальным законом природы. Он применим как для тел макромира, так и микромира.

II. Закон Кулона

Закон взаимодействия двух точечных зарядов был установлен французским физиком **Ш. Кулоном** в 1785 году. *Точечные заряды – это заряженные тела, размеры которых намного меньше расстояния между ними.* Опытным путем Ш. Кулон установил, что:

Сила взаимодействия двух точечных зарядов направлена вдоль прямой линии, соединяющей заряды, прямо пропорциональна произведению модулей обоих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

$$F_k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad (3)$$

или
$$F_K = \frac{k|q_1||q_2|}{\epsilon r^2}, \quad (4)$$

где $|q_1|, |q_2|$ – модули зарядов взаимодействующих тел, r – расстояние между точечными зарядами, k – коэффициент пропорциональности, ϵ_0 – электрическая постоянная, ϵ – диэлектрическая проницаемость среды.

На *рисунке 136* изображены силы взаимодействия двух точечных зарядов, на основании третьего закона Ньютона они равны:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \quad (5)$$

Кулоновские силы являются *центральными*, они действуют вдоль прямой, соединяющей точечные заряды.

III. Электрическое поле

Вокруг заряженных тел пространство приобретает новое свойство: внесенные в него легкие или заряженные тела испытывают силу отталкивания или притяжения. Под действием силы тела перемещаются и располагаются в пространстве в строго определенном порядке. Наблюдая за расположением вокруг заряженных тел мелко нарезанных волосинок, взвешенных в масле, можно рассмотреть линии (*рис. 137*), картина которых для тел различной формы отличается.

Пространство вокруг заряженных тел называют *электрическим полем*. Понятие электрического поля впервые ввел английский физик М. Фарадей. Он утверждал, что заряды отталкиваются или притягиваются посредством электрического поля.

Электрическое поле – это особый вид материи, посредством которого происходит взаимодействие заряженных тел.

Электрическое поле неподвижных и не меняющихся со временем зарядов называют электростатическим полем.

Электрическое поле, окружающее заряженное тело, можно исследовать с помощью *пробного заряда* – положительно заряженного точечного заряда.



Возьмите на заметку

Масса электрона:
 $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

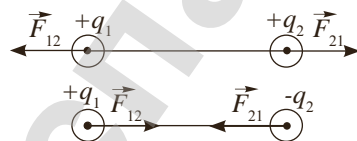


Рис. 136. Кулоновские силы центральные



Эксперимент

Исследуйте пространство вокруг точечных зарядов и заряженных пластин с использованием прибора для наблюдения силовых линий электростатического поля (*рис. 137*).

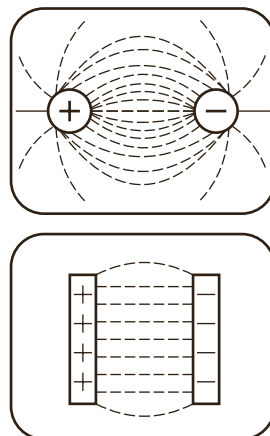


Рис. 137. Расположение волосинок, взвешенных в масле вокруг заряженных тел

IV. Напряженность электрического поля.

Напряженность точечного заряда

Напряженность – это силовая характеристика электрического поля.

Напряженность электрического поля – это физическая величина, равная отношению силы, с которой поле действует на положительный пробный заряд, помещенный в данную точку пространства, к величине этого заряда.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (6)$$

Определим из формулы (6) силу, действующую на заряд, внесенный в поле точечного заряда Q :

$$F = qE. \quad (7)$$

На основании закона Кулона сила взаимодействия между точечными зарядами Q и q равна:

$$F = \frac{k|Q||q|}{\epsilon r^2}. \quad (8)$$

Из (7) и (8) следует, что:

$$E = \frac{kQ}{\epsilon r^2}. \quad (9)$$

Нами получена формула для расчета напряженности поля точечного заряда. Напряженность в заданной точке пространства определяется зарядом тела Q , создавшего поле, она не зависит от внесенного в него заряда q . Напряженность является функцией расстояния: чем дальше расположена точка пространства от источника поля, тем модуль напряженности меньше (рис. 138). Единица измерения напряженности, согласно формуле (6):

$$[E] = 1 \frac{Н}{Кл}.$$

V. Направление вектора напряженности и силовые линии

Напряженность электрического поля является векторной величиной. *Направление вектора напряженности в каждой точке пространства совпадает с направлением силы, действующей на положительный пробный заряд.*

Если поле создано положительным зарядом, то напряженность поля в любой точке пространства

Эксперимент

Используя пробный заряд, исследуйте электрическое поле заряженного металлического шара.

Выясните, какой заряд был передан шару?

Как изменяется электрическое поле при удалении от шара?

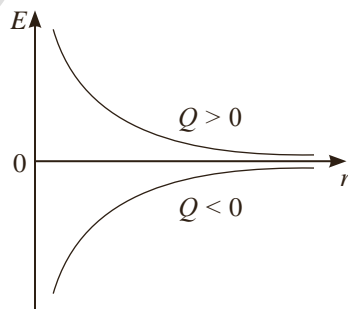


Рис. 138. График зависимости напряженности поля точечного заряда от расстояния

Ответьте на вопросы

1. Почему силовые линии электрического поля не пересекаются?
2. Почему изменение положения точечного заряда, внесенного в однородное поле, не влияет на значение, действующей на него силы?

будет направлена от заряда вдоль радиальной прямой. В поле отрицательного заряда вектор напряженности направлен вдоль радиальной прямой к заряду. Радиальные прямые – это линии действия сил, они являются силовыми линиями электрического поля (рис. 139). Впервые понятие «силовые линии» ввел М. Фарадей. Изображение поля стало наглядным и удобным.

Силовые линии поля, созданного двумя пластинами, представляют собой равноудаленные параллельные линии, плотность которых не меняется (рис. 140). Такое поле принято называть *однородным*. Для однородного поля во всех его точках вектор напряженности постоянный.

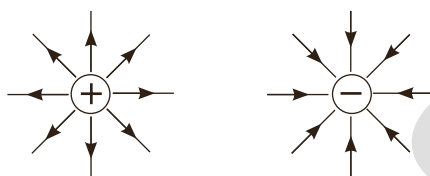


Рис. 139. Силовые линии положительного и отрицательного точечных зарядов

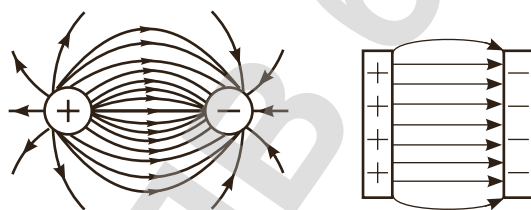


Рис. 140. Силовые линии полей между точечными разноименными зарядами и разноименными пластинами

Для *неоднородного* поля, созданного точечными зарядами, плотность силовых линий около зарядов больше, вдали от зарядов меньше, что свидетельствует об изменении напряженности поля. Чем плотнее силовые линии, тем больше напряженность поля.

Силовые линии электрического поля – это линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением векторов напряженности в этих точках.

Картины силовых линий показывают, что:

- 1) линии электрического поля не пересекаются, так как в любой точке пространства напряженность не может иметь несколько направлений;
- 2) линии электрического поля исходят из положительного заряда и сходятся на отрицательном.

VI. Работа по перемещению заряда в неоднородном электрическом поле. Потенциальная энергия тела в поле точечного заряда

Пусть заряд q под действием кулоновской силы перемещается из точки A в точку B вдоль силовой линии поля, созданного положительным зарядом Q (рис. 141).

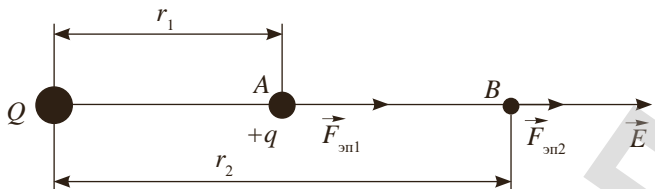


Рис. 141. Работа электрического поля по перемещению заряда q в поле, созданном зарядом Q

Сила, перемещающая заряд, зависит от расстояния между зарядами и является величиной переменной. Поэтому работу по перемещению заряда в неоднородном электрическом поле определим через изменение потенциальной энергии заряженного тела, взятого со знаком минус:

$$A = -(W_{p_2} - W_{p_1}). \quad (10)$$

Используя аналогию с неоднородным гравитационным полем, запишем формулу потенциальной энергии заряда q в электрическом поле неподвижного заряда Q :

$$W_p = \frac{kQq}{\varepsilon \cdot r}.$$

Тогда формула для расчета работы электрического поля по перемещению заряда (10) примет следующий вид:

$$A = \frac{kqQ}{\varepsilon \cdot r_1} - \frac{kqQ}{\varepsilon \cdot r_2}. \quad (11)$$

VII. Потенциал однородного электрического поля.

Связь потенциала с напряженностью

Потенциал поля равен отношению потенциальной энергии заряда к этому заряду:

$$\varphi = \frac{W_p}{q}. \quad (12)$$

Он может принимать положительные или отрицательные значения.

Физический смысл имеет разность потенциалов поля, так как через нее выражается работа сил поля по перемещению заряда.

Для однородного электрического поля потенциал точки поля равен:

$$\varphi = \frac{qEd}{q} = Ed. \quad (13)$$

Преобразовав формулы (11) и (12), получим известную вам из курса 8 класса связь между работой поля и разностью потенциалов:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (14)$$

где $\varphi_1 = Ed_1$, $\varphi_2 = Ed_2$ – потенциалы начальной и конечной точек расположения заряда в электростатическом поле.



Ответьте на вопрос

В чем отличие однородного поля от неоднородного?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Два точечных заряда $q_1 = 6,6 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ и $q_2 = 1,32 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ находятся на расстоянии $r_1 = 40 \text{ см}$. Какую работу нужно совершить, чтобы сблизить их до расстояния $r_2 = 25 \text{ см}$?

<p>Дано: $q_1 = 6,6 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ $q_2 = 1,32 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ $r_1 = 40 \text{ см}$ $r_2 = 25 \text{ см}$</p>	<p>СИ 0,4 м 0,25 м</p>	<p>Решение: Работа внешних сил и силы электрического поля противоположны по знаку, следовательно, работа, которую необходимо совершить для приближения зарядов, равна: $A = q_1(\varphi_2 - \varphi_1)$,</p> <p>где $\varphi_1 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_1}$, а $\varphi_2 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2}$</p> $A = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) \approx 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}$ <p>Ответ: $A \approx 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}$.</p>
<p>$A = ?$</p>		

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон сохранения заряда, закон Кулона.
2. Какой заряд называют точечным?
3. Что называют электрическим полем?
4. Что такое напряженность электрического поля? Как она определяется? Куда направлена?
5. Какое поле называют однородным? Какое – неоднородным?
6. Что называют потенциалом поля?
7. Какова связь потенциала поля с его напряженностью?

**Упражнение****18**

1. С какой силой взаимодействуют два точечных заряда 10 нКл и 15 нКл, находящиеся на расстоянии 5 см друг от друга?
2. Два одинаковых шарика, заряженные один положительным зарядом 15 мкКл, другой – отрицательным –25 мкКл, приводят в соприкосновение и вновь раздвигают на расстояние 10 см. Определите заряд каждого шарика и силу их взаимодействия после соприкосновения.
3. С каким ускорением движется электрон в поле с напряженностью 10 В/м?
4. Определите напряженность поля в точке, удаленной на 5 см от заряда 0,1 мкКл.

§20. Электроёмкость. Конденсаторы.

Единицы измерения ёмкости и количества электричества

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять роль конденсатора в простой электрической цепи.



Ответьте на вопросы

1. Как получить электрический заряд? Как его сохранить?
2. Из каких материалов: проводников или диэлектриков, вы изготовили бы «сосуд» для зарядов?

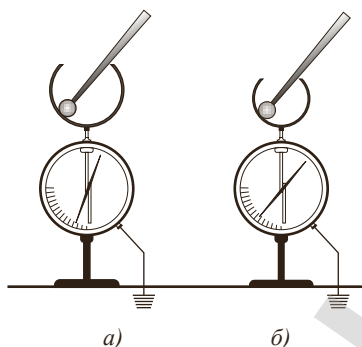


Рис. 142. Электроёмкость больше у сферы большего радиуса

I. Электрическая ёмкость уединенных проводников

Передадим один и тот же заряд q сфере, касаясь ее внутренней поверхности пробным зарядом несколько раз. При каждом касании стрелка электрометра будет отклоняться на одно и то же значение (рис. 142, а). Следовательно, между зарядом и потенциалом шара существует прямо пропорциональная зависимость:

$$q = C\varphi,$$

где C коэффициент пропорциональности.

Выясним, зависит ли потенциал поля от размеров проводника. Для этого повторим опыт со сферой меньшего радиуса. При таком же значении переданного заряда стрелка электрометра отклонится на больший угол (рис. 142, б). Следовательно, потенциал сферы меньшего радиуса выше: $\varphi_2 > \varphi_1$. Из результатов опыта следует, что коэффициент C является характеристикой проводящих сфер, его назвали *электроёмкостью*.

Электроёмкость уединенного проводника – это физическая величина, численно равная отношению заряда проводника к его потенциалу.

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (1)$$

Подставим в формулу (1) расчета потенциала проводящей сферы $\varphi = \frac{kq}{\varepsilon \cdot r}$, получим:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot r}{k} \quad (2)$$

или

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon r. \quad (3)$$

Чем больше радиус уединенной сферы, тем больше ее электроёмкость. Полученные выводы верны и для шара, так как внутри проводников нет свободных зарядов, электрическое поле отсутствует.

За единицу измерения электрической ёмкости принят фарад. Она названа в честь М. Фарадея:

Вспомните!

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}.$$



Ответьте на вопрос

Почему ёмкость проводящего шара определяются так же, как и ёмкость сферы: $C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon r$?

Фарад – это емкость проводника, потенциал которого возрастает на 1 В при изменении заряда на 1 Кл.

$$[C] = 1\Phi = \frac{1\text{Кл}}{1\text{В}}.$$

В практике используют единицы измерения емкости с дольными приставками:

$$1 \text{ мк}\Phi = 10^{-6} \Phi,$$

$$1 \text{ н}\Phi = 10^{-12} \Phi,$$

$$1 \text{ п}\Phi = 10^{-9} \Phi.$$

II. Конденсатор

Приблизим ладони рук к заряженной сфере (рис. 142), показание электромметра уменьшится, следовательно, потенциал сферы уменьшится. На основании формулы (1) можно утверждать, что емкость сферы с проводящей оболочкой возрастает. Чем меньше расстояние между ними, тем емкость больше. *Две проводящие сферы, разделенные диэлектриком, представляют собой сферический конденсатор.*

Широкое применение получил плоский конденсатор, состоящий из двух плоских параллельных пластин, разделенных диэлектриком. Пластины конденсатора называют *обкладками*.

Конденсатор – устройство для накопления заряда и энергии электрического поля. Плоский конденсатор состоит из двух пластин, разделенных диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с размерами обкладок.

Напряженность однородного поля между пластинами:

$$E = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 S}.$$

Разность потенциалов между пластинами конденсатора, или потенциал одной из обкладок относительно другой, равен:

$$\Delta\varphi = Ed = \frac{qd}{\varepsilon\varepsilon_0 S}. \tag{4}$$

Подставив (4) в (1), получим емкость плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}. \tag{5}$$

Из формулы (5) следует, что для увеличения емкости конденсатора необходимо увеличить площадь обкладок и, уменьшив расстояние между ними, внести диэлектрик.

Интересно знать!

Радиус шара, обладающего емкостью 1 Φ равен 9 млн км:

$$r = Ck = 1\Phi \cdot 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} = 9 \cdot 10^9 \text{ м}.$$

Радиус такого шара превышает радиус Земли в 1400 раз:

$$\frac{r}{R_3} = \frac{9 \cdot 10^9 \text{ м}}{6,4 \cdot 10^6 \text{ м}} \approx 1400.$$

Емкость нашей планеты, без атмосферы, составляет 0,71 мФ:

$$C_3 = \frac{6,4 \cdot 10^6 \text{ м}}{9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}} = 0,71 \cdot 10^{-3} \Phi = 0,71 \text{ м}\Phi.$$

Интересно знать!

Наша Земля представляет собой сферический конденсатор, внешней сферой которого является ионосфера, а диэлектриком – воздух.

III. Энергия электрического поля

Заряженный конденсатор обладает запасом потенциальной энергии, равной работе, совершенной при его зарядке. Работу, которую необходимо совершить при зарядке, можно определить как работу по раздвижению пластин от нулевого расстояния до расстояния d . Рассмотрим движение одной пластины с зарядом q в поле другой пластины напряженностью E_1 , которая составляет половину напряженности поля между двумя пластинами $E_1 = \frac{E}{2}$. Сила по перемещению пластины равна

$$F = qE_1 = \frac{qE}{2}, \text{ совершенная работа: } A = Fd = \frac{qEd}{2}.$$

Учитывая, что $U = Ed$, получим $A = \frac{qU}{2}$. Сле-

довательно, энергия поля, созданного между обкладками конденсатора, равна:

$$W = \frac{qU}{2}. \quad (6)$$

Используя формулу связи заряда и напряжения $q = CU$, запишем энергию поля в виде:

$$W = \frac{CU^2}{2} \quad (7)$$

и $W = \frac{q^2}{2C}. \quad (8)$

Формула (7) используется в случае, когда конденсатор подключен к источнику тока и напряжение на его обкладках не меняется. Формула (8) удобна для расчетов в том случае, когда конденсатор отключен от источника тока и его заряд остается постоянным по величине.

IV. Виды конденсаторов

Существуют конденсаторы постоянной и переменной емкости. Конденсаторы постоянной емкости состоят из двух или нескольких пластин, отделенных друг от друга диэлектриком (рис. 143). Пластины представляют собой металлическую фольгу, диэлектриком могут служить бумага, слюда, лак. В зависимости от использованного материала различают бумажные, слюдяные, электролитические конденсаторы (рис. 144). Конденсаторы переменной емкости

Таблица 6. Диэлектрическая проницаемость материалов, используемых в конденсаторах

Вещество	ϵ
Воздух	1,0005
Бумага	от 2,5 до 3,5
Стекло	от 3 до 10
Слюда	от 5 до 7
Порошки оксидов металлов	от 6 до 20

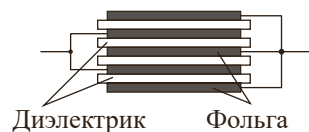


Рис. 143. Плоский конденсатор

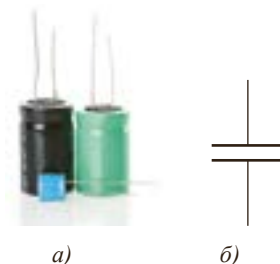


Рис. 144. а) металлобумажный и алюминиевый электролитические конденсаторы; б) обозначение конденсатора в схеме

Ответьте на вопрос

Почему широкое применение получили плоские конденсаторы, а не сферические?

состоят из двух групп пластин, соединенных осью (рис. 145). При вращении оси площадь перекрытия пластин изменяется. Такая конструкция позволяет плавно изменять емкость конденсатора.

В Казахстане разработкой и производством конденсаторов и конденсаторного оборудования занимается Усть-Каменогорский конденсаторный завод. Выпускаемое на заводе оборудование широко используется на многих предприятиях машиностроительной, металлургической, энергетической, нефтегазовой, крупной пищевой промышленности для повышения качества работы энергосистемы. Самыми востребованными на сегодня типами конденсаторов являются следующие (рис. 146, а, б):

- специальные конденсаторы (импульсные, высоковольтные);
- косинусные конденсаторы (высоковольтные, низковольтные);
- делители напряжения и конденсаторы связи;
- электротермические конденсаторы.



а)



б)



а)



б)

Рис. 145. а) конденсатор переменной емкости; б) обозначение конденсатора в схеме

Рис. 146. а) импульсные высоковольтные конденсаторы; б) косинусный низковольтный конденсатор КПС-0,44–2,5 производства Усть-Каменогорского конденсаторного завода

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Энергия плоского воздушного конденсатора $W_1 = 2 \cdot 10^{-7}$ Дж. Определите энергию конденсатора после заполнения его диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2$, если:

- 1) конденсатор отключен от источника питания,
- 2) конденсатор подключен к источнику питания.

Дано:

$$W_1 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}$$

$$\epsilon = 2$$

$$1) q = \text{const}$$

$$2) U = \text{const}$$

при $q = \text{const}$,

$$W_2 = ?$$

при $U = \text{const}$,

$$W_2 = ?$$

Решение:

Емкость конденсатора после заполнения диэлектриком увеличится в 2 раза:

$$C_2 = 2 C_1$$

В первом случае конденсатор отключен от источника, следовательно, его заряд не меняется, тогда энергию конденсатора определим по формуле:

$$W_2 = \frac{q^2}{2C_2} = \frac{q^2}{2 \cdot 2C_1} = \frac{W_1}{2}.$$

Энергия конденсатора уменьшилась в 2 раза: $W_2 = 10^{-7}$ Дж.

Во втором случае при подключенном к источнику конденсаторе напряжение на обкладках конденсатора остается постоянной величиной. Энергия конденсатора равна: $W_2 = \frac{C_2 U^2}{2} = \frac{2C_1 U^2}{2} = 2W_1$.

Энергия конденсатора увеличилась в 2 раза: $W_2 = 4 \cdot 10^{-7}$ Дж.

Ответ: при $q = \text{const}$, $W_2 = 10^{-7}$ Дж;

при $U = \text{const}$, $W_2 = 4 \cdot 10^{-7}$ Дж.

Контрольные вопросы

1. Что такое электрическая емкость? В чем она измеряется?
2. Какой прибор служит для накопления зарядов? Из чего он состоит?
3. Какие виды конденсаторов вам известны?
4. Как определяется энергия электрического поля?

★ Упражнение

19

1. Конденсатор, состоящий из двух пластин, имеет емкость 5 пФ. Какой заряд находится на каждой из его обкладок, если разность потенциалов между ними 1000 В?
2. Плоский конденсатор с размером пластин 25×25 см и расстоянием между ними 0,5 мм заряжен от источника напряжения до разности потенциалов 10 В и отключен от источника. Какой будет разность потенциалов, если пластины конденсатора раздвинуть на расстояние 5 мм?
3. Конденсатору емкостью 20 мкФ сообщили заряд 5 мкКл. Какова энергия заряженного конденсатора?
4. Емкость конденсатора, подключенного к источнику постоянного напряжения $U = 1000$ В, равна $C_1 = 5$ пФ. Расстояние между его обкладками уменьшили в $n = 3$ раза. Определите изменение заряда на обкладках конденсатора и энергии электрического поля.

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Из истории создания Усть-Каменогорского конденсаторного завода».
2. «Технология производства конденсаторов и экологические проблемы».

Итоги главы 10

Законы	Характеристики электрического поля	
	Напряженность	Потенциал
Закон сохранения заряда $q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = const$ $q = N e $ Закон Кулона $F_K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{ q_1 q_2 }{r^2}$ $F_K = \frac{k q_1 q_2 }{\epsilon r^2}$	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ Напряженность поля точечного заряда $E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}; E = \frac{kq}{\epsilon r^2}$ Напряженность поля между двумя разноименными пластинами $E = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0 S}; E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}$	$\varphi = \frac{W_p}{q}$ Потенциал поля точечного заряда $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}; \varphi = \frac{kq}{\epsilon r}$ Потенциал однородного поля $\varphi = Ed$
Потенциальная энергия заряда в поле, работа по перемещению заряда		Работа и потенциал поля
в однородном поле $W_p = qEd$ $A = -(qEd_2 - qEd_1)$	в неоднородном поле $W_p = \frac{kQq}{r}$ $A = \frac{kQq}{r_1} - \frac{kQq}{r_2}$	
Емкость проводников	Диэлектрическая проницаемость среды	Энергия электрического поля конденсатора
Емкость уединенного проводника $C = \frac{q}{\varphi}$ Емкость уединенного шара $C = 4\pi\epsilon_0 r$ Емкость плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$	$\epsilon = \frac{F_0}{F}$ $\epsilon = \frac{E_0}{E}$	$W = \frac{qU}{2}$ $W = \frac{CU^2}{2}$ $W = \frac{q^2}{2C}$

Законы

Закон сохранения заряда:

Алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы остается неизменной, какие бы процессы не происходили внутри этой системы.

Закон Кулона:

Сила взаимодействия двух точечных зарядов направлена вдоль прямой линии, соединяющей заряды, прямо пропорциональна произведению модулей обоих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Глоссарий

Конденсатор – устройство для накопления заряда и энергии электрического поля. Плоский конденсатор состоит из двух пластин, разделенных диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с размерами обкладок.

Кулон – электрический заряд, проходящий через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А за время 1 с .

Напряженность электрического поля – физическая величина, равная отношению силы, с которой поле действует на положительный пробный заряд, помещенный в данную точку пространства, к величине этого заряда.

Силовые линии электрического поля – линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением векторов напряженности в этих точках.

Точечные заряды – заряженные тела, размеры которых намного меньше расстояния между ними.

Фарад – емкость проводника, потенциал которого возрастает на 1 В при изменении заряда на 1 Кл .

Электрическое поле – вид материи, посредством которого происходит взаимодействие заряженных тел.

Емкость уединенного проводника – это физическая величина, численно равная отношению заряда проводника к его потенциалу.

Электростатическое поле – электрическое поле неподвижных и не меняющихся со временем зарядов.

Электростатика – раздел электродинамики, в котором изучаются взаимодействие неподвижных электрических зарядов.

ГЛАВА 11

ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Впервые движение заряженных частиц обнаружил итальянский ученый-биолог Луиджи Гальвани. Он наблюдал импульсивное сокращение лапки мертвой лягушки при контакте с пластинами из разнородного металла. Исследования Гальвани были продолжены Алессандро Вольта. Опытным путем он доказал, что между разнородными металлическими пластинами возникает ток, если их опустить в раствор соли, кислоты или щелочи. Обнаруженное движение заряженных частиц привлекло внимание многих ученых-физиков. Законы, которым подчиняются движущиеся заряды в различных средах, в основном были открыты экспериментально. Результаты исследований ученых получили широкое применение во всех отраслях промышленности и в быту. Невозможно представить наш современный мир без различных приборов и устройств, потребляющих электрический ток.

Изучив главу, вы сможете:

- объяснять понятия «электродвижущая сила» и «внутреннее сопротивление»;
- объяснять различия между электродвижущей силой и падением напряжения во внешней цепи (с точки зрения энергии);
- применять закон Ома для полной цепи и понимать последствия короткого замыкания;
- производить практические расчеты стоимости работы от мощности бытовых приборов.

§21. Электродвижущая сила и внутреннее сопротивление источника тока. Напряжение, разность потенциалов

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять понятия электродвижущая сила и внутреннее сопротивление, различия между электродвижущей силой и падением напряжения во внешней цепи (с точки зрения энергии).



Ответьте на вопросы

1. Какие источники постоянного тока вам известны?
2. Почему появилась необходимость в преобразователях постоянного тока в переменный? Как их называют?

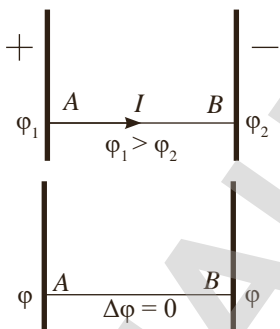


Рис. 147. Кратковременный ток между обкладками конденсатора

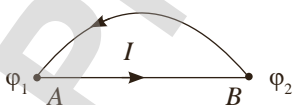


Рис. 148. Принцип действия электрической цепи

I. Условия возникновения и существования постоянного электрического тока

Соединим пластины заряженного конденсатора проводником AB , в проводнике появится электрический ток. После разрядки конденсатора разность потенциалов на концах проводника станет равной нулю, ток прекратится (рис. 147). Для поддержания тока в цепи необходимо создать разность потенциалов на его концах: перенести заряды обратно по другому проводу, создав замкнутую цепь (рис. 148). Перенос заряда из точки B в точку A возможен только с помощью сторонних сил неэлектрического происхождения, так как потенциал точки B меньше потенциала точки A .

На рисунке 149 изображена принципиальная схема электрической цепи. Внутри источника тока работа по перемещению заряда к полюсам совершается сторонними силами. Работа кулоновских сил отрицательная. Во внешней цепи заряды перемещаются под действием кулоновских сил. Положительные заряды перемещаются от положительного полюса источника к отрицательному полюсу. Отрицательные частицы – от отрицательного полюса к положительному.



Рис. 149. Принципиальная схема электрической цепи

Итак, для получения постоянного тока необходимым условием является наличие замкнутой проводящей цепи с источником тока. В состав цепи входят:



Ответьте на вопрос

Почему для восстановления разности потенциалов между точками A и B (рис. 148) необходима работа сторонних сил?

источник тока, потребители тока, соединительные провода, ключ и измерительные приборы.

II. Электродвижущая сила источника электрической энергии, внутреннее сопротивление источника тока

В электрических цепях взаимное превращение энергии происходит дважды. В источнике тока различные виды энергии превращаются в электрическую энергию. Во внешней цепи электрическая энергия вновь превращается в другие виды энергии, например, механическую или тепловую. Согласно закону сохранения энергии работа сторонних сил равна работе кулоновских сил на внутреннем и внешнем участке цепи:

$$A_{cm} = A_r + A_R.$$

Разделив уравнение на заряд, перенесенный по замкнутому контуру, получим:

$$\frac{A_{cm}}{q} = \frac{A_r}{q} + \frac{A_R}{q}$$

или

$$\mathcal{E} = U_r + U_R,$$

где \mathcal{E} – электродвижущая сила, U_r – падение напряжения на внутреннем участке цепи, U_R – падение напряжения на внешнем участке цепи.

Электродвижущая сила – это физическая величина, равная работе сторонних сил по перемещению единичного заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{cm}}{q}.$$

Единица измерения \mathcal{E} (ЭДС) – вольт, $[\mathcal{E}] = 1 \text{ В}$.

ЭДС – энергетическая характеристика источника тока. Все источники тока обладают внутренним сопротивлением r .

III. ЭДС и напряжение источника тока в различных режимах работы

1. *Режим холостого хода.* ЭДС источника тока измеряют непосредственным подключением к нему вольтметра при разомкнутой внешней цепи, в режиме холостого хода (рис. 150). В разомкнутой цепи ток отсутствует, следовательно, нет падения напряжения на внешнем участке цепи, на внутреннем участке оно ничтожно мало:

$$U_R = 0, U_r = 0.$$

Возьмите на заметку!

Ток называют постоянным, если его направление и значение силы тока не меняется.

Ответьте на вопросы

1. Почему совершение работы по распределению зарядов в источнике тока за счет кулоновских сил невозможно?
2. Почему работа сторонних сил в источнике тока равна сумме работы кулоновских сил на внешнем и внутреннем участке цепи?

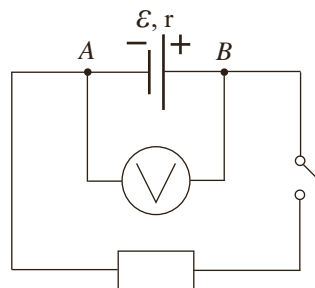


Рис. 150. Измерение ЭДС источника тока

Сопrotивление вольтметра бесконечно велико, его подключение к источнику практически не влияет на разность потенциалов между полюсами источника. Напряжение на вольтметре равно ЭДС:

$$\varphi_A - \varphi_B = \varepsilon.$$

2. *Рабочий режим.* При замкнутом ключе, в рабочем режиме, разность потенциалов между точками *AB* будет равна:

$$\varphi_A - \varphi_B = \varepsilon - U_r$$

или $\varphi_A - \varphi_B = U_R,$

вольтметр покажет напряжение на внешнем участке цепи. Падение напряжения внутри источника происходит из-за отрицательной работы электрических сил.

3. *Режим короткого замыкания.* Если сопротивление нагрузки ничтожно мало, то источник тока работает в режиме короткого замыкания. Напряжение на внутреннем участке цепи будет равно ЭДС:

$$U_r = \varepsilon.$$

Сила тока резко возрастает и достигает максимального значения:

$$I_{к.з.} = \frac{\varepsilon}{r}.$$

Режимы короткого замыкания и холостого хода являются предельными режимами работы источника тока.

IV. Электрический ток. Сила тока

Под воздействием внешнего электрического поля свободные заряды в проводниках движутся направленно, создается электрический ток.

Для характеристики электрического тока в проводнике введена физическая величина: сила тока.

Сила тока – это величина, равная количеству заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за единицу времени:

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

V. Как из постоянного тока сделать переменный

Альтернативные источники тока – солнечные батареи и ветрогенераторы – создают постоянный ток. Излишки энергии накапливаются в аккумуляторных батареях. Для подключения электрических приборов, рассчитанных на работу в цепи переменного тока, необходим преобразователь постоянного тока в переменный – инвертор

Ответьте на вопрос

Почему при подключении вольтметра к источнику тока напряжение на внутреннем сопротивлении ничтожно мало?

Эксперимент

1. Соберите цепь по схеме, изображенной на рисунке 150. Снимите показание вольтметра при замкнутом и разомкнутом ключе. Почему показание вольтметра при замкнутом ключе уменьшается?
2. Подключите последовательно с резистором реостат в цепь. Меняя положение ползуна, исследуйте распределение напряжения на внутренней и внешней части цепи. По полученным результатам сделайте выводы.

Ответьте на вопрос

Почему внутреннее сопротивление источника тока стремятся уменьшить в сравнении с сопротивлением внешней цепи?

(рис. 151). Широкое применение получили инверторы, позволяющие получить переменный ток напряжением 220 В от автомобильной аккумуляторной батареи. Такие инверторы производят в Казахстане, например ТОО «Солнечный свет».



Рис. 151. Инвертор – преобразователь напряжения 12 В постоянного тока в 220 В переменного тока мощностью 4000 Вт отечественного производства, г. Алматы



Задание

Запишите единицы измерения силы тока с использованием кратных и дольных приставок.

Контрольные вопросы

1. Укажите условия, при которых возможен электрический ток.
2. Какие силы совершают работу по распределению зарядов в источниках тока?
3. Как измеряют ЭДС источника тока?
4. Каким образом источник тока влияет на падение напряжения на участке цепи?
5. Как зависит распределение напряжений на внутреннем и внешнем участке цепи от их сопротивлений?



Упражнение

20

1. Через нить лампочки карманного фонаря за время $t = 2$ мин проходит заряд $q_1 = 20$ Кл. Определите силу тока и время, за которое через нить лампочки пройдет заряд $q_2 = 60$ Кл.
2. Определите силу тока при коротком замыкании для аккумулятора с ЭДС 12 В и внутренним сопротивлением 0,2 Ом.

Экспериментальное задание

Используя медную проволоку, металлическую скрепку и мультиметр, выясните, какие овощи и фрукты (банан, картофель, груша, помидор, огурец, луковица, яблоко) способны работать в качестве гальванического элемента. Какой из фруктов способствует возникновению большего напряжения между электродами?

Творческое задание

Изучите отечественный рынок источников постоянного тока: виды источников и фирмы, производящие данный вид продукции. Подготовьте сообщение по итогам исследования.

§22. Закон Ома для полной цепи

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять закон Ома для полной цепи и понимать последствия короткого замыкания.

Эксперимент

Соберите цепь из последовательно соединенных между собой источника постоянного тока, ключа, лампы от карманного фонарика, реостата и амперметра. К лампе подключите вольтметр (рис. 152).

Меняя положение ползуна реостата, наблюдайте за яркостью свечения лампы и показаниями измерительных приборов. Объясните наблюдаемые явления на основе закона Ома для участка цепи.

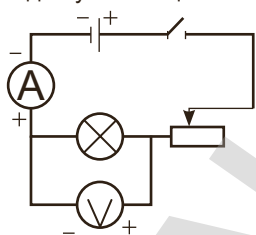


Рис. 152. К экспериментальному заданию

I. Закон Ома для участка цепи

Закон Ома для участка цепи, состоящего только из активного сопротивления, вам известен из курса физики 8 класса (рис. 152).

Сила тока прямо пропорциональна разности потенциалов на концах участка цепи и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}. \quad (1)$$

Ток по участку цепи течет из точки с высоким потенциалом в точку с низким потенциалом. Если $\varphi_1 > \varphi_2$ на рисунке 153, то ток течет слева направо.



Рис. 153. Участок цепи, состоящий из активного сопротивления.

II. Закон Ома для участка цепи с источником тока

Рассмотрим участок цепи, в котором содержится источник тока с электродвижущей силой ε и внутренним сопротивлением r (рис. 154). Падение потенциала на указанном участке происходит на сопротивлениях R_1 , R_2 и внутреннем сопротивлении источника тока r , а скачок потенциала – на полюсах источника тока. Аналогичные явления мы наблюдаем, если в русле реки построена плотина: на всех участках реки уровень воды понижается, а на плотине повышается.



Рис. 154. Участок цепи, содержащий источник тока

Ответьте на вопросы

1. Что представляет собой простой участок цепи?
2. Как выглядит участок цепи с источником тока?
3. Какую цепь называют полной?
4. В чем сходство и различие закона Ома для участка цепи и для полной цепи? Составьте диаграмму Венна.

Разность потенциалов на концах участка цепи равна разности суммы падений потенциала на каждом участке и скачка потенциала на источнике:

$$\begin{aligned} \varphi_1 - \varphi_2 &= (U_1 + U_r + U_2) - \varepsilon \\ \text{или } \varphi_1 - \varphi_2 &= (IR_1 + Ir + IR_2) - \varepsilon. \end{aligned} \quad (2)$$

Выразим из полученного уравнения силу тока:

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon}{(R_1 + R_2) + r}. \quad (3)$$

В общем случае выражение (3) можно записать в виде:

$$I = \frac{U + \varepsilon}{R + r}, \quad (4)$$

где R – общее сопротивление участка цепи, r – внутреннее сопротивление источника тока на участке цепи,

$U = \varphi_1 - \varphi_2$ – разность потенциалов на концах участка цепи, ε – ЭДС источника на данном участке.

Полученная формула выражает закон Ома для участка цепи, содержащей источник тока.

III. Закон Ома для полной цепи

Соединим концы участка цепи, изображенного на рисунке 154, получим замкнутую цепь (рис. 155). Потенциалы точек A и D станут равными, тогда $U = \varphi_1 - \varphi_2 = 0$, формула (4) примет вид:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (5)$$

Полученное выражение принято называть законом Ома для полной цепи.

Сила тока в цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока и обратно пропорциональна сумме внешнего и внутреннего сопротивления источника тока.

IV. Следствия из законов Ома для полной цепи

Из (5) следует, что:

$$\varepsilon = IR + Ir \text{ или } \varepsilon = U_R + U_r. \quad (6)$$

Поскольку ЭДС – это работа сторонних сил по перемещению заряда, то из (6) следует: *сторонние силы совершают работу как на внутреннем, так и на внешнем участке цепи*, о чем говорилось в § 21.

При малых значениях внутреннего сопротивления $r \rightarrow 0$ вся энергия источника используется

Вспомните!

Разность потенциалов двух точек – это напряжение на участке цепи между этими точками.

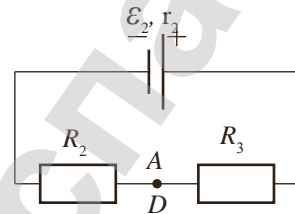


Рис. 155. Полная замкнутая цепь

Задание

Выразите из закона Ома для полной цепи (5) формулы расчета ЭДС, сопротивления внешней цепи и внутреннего сопротивления источника тока.

Вспомните!

Для определения делимого необходимо частное умножить на делитель.

Делитель равен отношению делимого к частному.

Для определения неизвестного слагаемого необходимо от суммы отнять известное слагаемое.

Запомните!

$$1A = \frac{1B}{1Om}.$$

на внешнем участке цепи $\varepsilon = U$. При малых значениях внутреннего сопротивления и отсутствии нагрузки $R = 0$ значение силы тока в замкнутой цепи резко возрастает, происходит короткое замыкание. Сила тока в цепи достигает максимального значения:

$$I_{к.з.} = \frac{\varepsilon}{r}, \quad (7)$$

это приводит к сильному разогреву источника соединительных проводов и к возможному сгоранию проводки.

? Ответьте на вопросы

1. Как источник тока, подключенный к участку цепи, влияет на силу тока в нем?
2. Почему потенциалы точек A и D при их соединении становятся равными?
3. При каком условии в цепи происходит короткое замыкание? В чем оно проявляется?
4. Какую опасность таит в себе явление короткого замыкания?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

При включении плеера напряжение на зажимах источника тока 2,8 В. ЭДС батареи элементов 3 В, внутреннее сопротивление 1 Ом. Определите силу тока в цепи.

Дано:

$$U = 2,8 \text{ В}$$

$$\varepsilon = 3 \text{ В}$$

$$r = 1 \text{ Ом}$$

$$I - ?$$

Решение:

Определим сопротивление плеера, используя законы Ома для участка и полной цепи:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1)$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (2)$$

Приравняем правые части уравнений (1) и (2) и выразим формулу для расчета сопротивления, используя свойства пропорции:

$$\frac{U}{R} = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (3)$$

$$UR + Ur = \varepsilon R, \text{ откуда } R = \frac{Ur}{\varepsilon - U}. \quad (4)$$

Расчетную формулу получим, подставив (4) в (1): $I = \frac{\varepsilon - U}{r}$.

$$\text{Вычислим значение силы тока: } I = \frac{3\text{В} - 2,8\text{В}}{1\text{Ом}} = 0,2\text{А}.$$

Ответ: $I = 0,2 \text{ А}$.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Ома для простого участка цепи и участка цепи, содержащего источник тока.
2. Сформулируйте закон Ома для полной цепи.
3. Какой ток принято называть током короткого замыкания?
4. Каковы последствия короткого замыкания цепи с малым внутренним сопротивлением источника?



Упражнение

21

1. ЭДС батареи $\varepsilon = 4,5 \text{ В}$, внутреннее сопротивление $r = 2 \text{ Ом}$. Батарея замкнута на резистор сопротивлением $R = 7 \text{ Ом}$. Определите силу тока в цепи и напряжение на зажимах батареи.
2. В проводнике сопротивлением $R = 2 \text{ Ом}$, подключенном к источнику тока с ЭДС $\varepsilon = 1,1 \text{ В}$, сила тока $I = 0,5 \text{ А}$. Определите силу тока при коротком замыкании источника.
3. Сила тока в цепи, содержащей источник тока и сопротивление $R_1 = 4 \text{ Ом}$, равна $I_1 = 0,2 \text{ А}$. Если внешнее сопротивление $R_2 = 7 \text{ Ом}$, то сила тока в цепи $I_2 = 0,14 \text{ А}$. Чему будет равна сила тока в цепи, если источник замкнуть накоротко?
4. При силе тока $I_1 = 1,5 \text{ А}$ напряжение на участке цепи $U_1 = 20 \text{ В}$, а при силе тока $I_2 = 0,5 \text{ А}$ напряжение на том же участке $U_2 = 8 \text{ В}$. Чему равна ЭДС, действующая на этом участке?

Творческое задание

1. Разработайте правила по ТБ при использовании электробытовых приборов.
2. Подготовьте презентации по выполненной работе.

§23. Работа и мощность электрического тока

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- производить практические расчеты стоимости работы и мощности бытовых приборов.



Вспомните!

Работа – это мера превращения энергии из одного вида в другой.



Рис. 156. Электрический счетчик казахстанского производства, г. Актобе



Задание 1

1. Приведите примеры двойного превращения энергии в электрической цепи.
2. Назовите бытовые и промышленные приборы, в которых электрическая энергия превращается в механическую, тепловую.

I. Работа постоянного тока в цепи

Работа тока заключается в направленном перемещении зарядов по проводнику силами электрического поля.

Работа тока – это физическая величина, равная произведению перенесенного электрическим полем заряда на напряжение на данном участке цепи.

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU. \quad (1)$$

Количество заряда, перенесенное за некоторый промежуток времени, зависит от силы тока: $q = It$.

Используя это соотношение из уравнения (1) получим:

$$A = UIt. \quad (2)$$

На основании закона Ома для участка цепи формулу (2) можно записать в виде:

$$A = I^2 R t \quad (3) \text{ или } A = \frac{U^2}{R} t. \quad (4)$$

Соотношение (3) удобно для расчета работы тока при последовательном соединении проводников, соотношение (4) – при параллельном соединении.

II. Измерение работы тока

Измерить работу тока можно, воспользовавшись тремя измерительными приборами (вольтметром, амперметром и часами).

На практике для измерения работы тока используют счетчик электрической энергии (рис. 156), в котором используют внесистемную единицу измерения работы 1 кВт · ч.

Стоимость электрической энергии при известном значении тарифа определяют по формуле: $St = T \cdot A$, где St – стоимость электрической энергии, T – тариф – стоимость 1 кВт · ч энергии.

В различных областях Казахстана тариф отличается, он определяется видом электростанции и расстоянием до местности. В целях экономии электроэнергии введен уровневый тариф, превышение нормы 100 кВт · ч на 1 человека предполагает оплату по тарифу 2-го уровня.

Таблица 7

Тарифы за электроэнергию в 2018 г.			тенге кВт · ч
Город	1-й уровень	2-й уровень	3-й уровень
Костанай	17,60	21,95	27,44
Алматы	16,65	21,99	27,48
Талдыкорган	16,45	19,86	24,82
Кокшетау	15,46	19,33	24,16
Тараз	14,41	17,94	22,43
Шымкент	14,49	18,88	23,61
Петропавловск	12,09	16,30	20,37
Уральск	10,46	13,23	16,53
Павлодар	10,69	13,72	17,15
Астана	9,61	15,59	19,49
Актобе	9,79	12,42	15,52
Караганды	10,12	13,37	16,72
Усть-Каменогорск	10,19	13,97	17,46
Атырау	5,67	7,13	8,93
Актау	19,42	–	–

III. Мощность тока

Мощность тока – это физическая величина, характеризующая быстроту выполнения работы по перемещению зарядов.

$$P = \frac{A}{t}. \quad (5)$$

Подставив формулы (2), (3) и (4) в (5), получим формулы расчета мощности тока на внешнем участке замкнутой цепи:

$$P = UI, \quad P = \frac{U^2}{R}, \quad P = I^2 R. \quad (6)$$

Для полной цепи мощность электрического тока равна:

$$P = \frac{\epsilon^2}{(R+r)^2} \cdot R. \quad (7)$$

Мощность тока определяют с помощью амперметра и вольтметра или ваттметра. Современный прибор компании «Медсервис» позволяет выполнить шесть замеров, характеризующих электрическую цепь: силу тока, напряжение, мощность, коэффициент мощности, частоту тока в сети, годовую мощность (рис. 157).



Вспомните!

Единица измерения работы электрического тока – джоуль:

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с} = 1 \text{ Вт} \cdot 1 \text{ с}.$$

Соотношение внесистемной единицы измерения работы электрического тока с джоулем:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Вт} \cdot \text{с} &= 1 \text{ Дж}, \\ 1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} &= 3600 \text{ Дж}, \\ 1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} &= 3600000 \text{ Дж} = \\ &= 3,6 \text{ МДж}. \end{aligned}$$



Задание 2

Рассмотрите таблицу 7. Выясните, какая тарифная сетка оплаты за электроэнергию действует в вашем регионе. Почему стоимость увеличивается по мере возрастания расхода энергии?



Вспомните!

Единица измерения мощности –

$$[P] = 1 \text{ Вт} = 1 \text{ А} \cdot 2 \text{ В}.$$



Рис. 157. Ваттметр казахстанского производства, г. Алматы

**Возьмите на заметку!**

Мощные приборы обладают малым сопротивлением.

IV. Работа и мощность источника тока

Полная работа в цепи – это работа сторонних сил, она равна:

$$A_{cm} = q\varepsilon \text{ или } A_{cm} = I\varepsilon t.$$

С учетом закона Ома для полной цепи $I = \frac{\varepsilon}{R+r}$ получим:

$$A_{cm} = \frac{\varepsilon^2}{R+r} \cdot t \text{ или } A_{cm} = I^2(R+r)t.$$

Полную мощность цепи можно определить по любой из формул:

$$P_{полн} = \frac{A_{cm}}{t}, \quad P_{полн} = I\varepsilon, \quad P_{полн} = \frac{\varepsilon^2}{R+r},$$

$$P_{полн} = I^2(R+r).$$

V. КПД источника тока

Коэффициент полезного действия – это отношение полезной работы к полной. Для электрической цепи полезной работой является работа электрического поля, полной работой – работа сторонних сил. Выполняются следующие соотношения:

$$\eta = \frac{A}{A_{cm}} = \frac{UI t}{\varepsilon I t} = \frac{P}{P_{полн}} = \frac{U}{\varepsilon} = \frac{IR}{I(R+r)} = \frac{R}{R+r}.$$

Расчет коэффициента полезного действия можно произвести по любой из предложенных формул:

$$\eta = \frac{A}{A_{cm}}, \quad \eta = \frac{P}{P_{полн}}, \quad \eta = \frac{U}{\varepsilon}, \quad \eta = \frac{R}{R+r}.$$

**Задание 3**

Сравните формулы расчета работы и мощности электрического тока с формулами расчета работы и мощности сторонних сил. В чем различие указанных формул?

**Ответьте на вопросы**

1. Почему КПД источника тока не может быть больше 100 %?
2. Почему в электротехнике внутреннее сопротивление источника тока стремятся уменьшить в сравнении с внешней цепью?

Контрольные вопросы

1. Какие превращения энергии происходят в полной цепи?
2. Как определяется работа и мощность электрического тока?
3. Какими приборами измеряют работу и мощность тока?
4. Чему равна полная работа в цепи?
5. Как определяют стоимость электроэнергии?
6. Как определяется КПД электрической цепи?

**Упражнение****22**

1. В течение какого времени можно нагреть воду объемом $V = 1$ л от температуры $t_1 = 20$ °С до кипения в чайнике при напряжении в сети $U = 200$ В, если сила тока $I = 8$ А?
2. Определите силу тока, проходящего через электрическую плиту мощностью 1200 Вт.
3. Какова стоимость 700 кВт·ч электроэнергии, потребленной семьей из 4 человек, проживающей в Костаная. Сравните со стоимостью такого же количества потребленной энергии семьей из 4 человек, живущей в Актау.
4. Определите коэффициент полезного действия источника тока, внутреннее сопротивление которого в 4 раза меньше сопротивления подключенного к нему электрического прибора.

Экспериментальное задание

По маркировкам осветительных ламп и паспортам бытовых приборов рассчитайте среднее значение электроэнергии, потребляемой вашей семьей за месяц. Сравните расходы энергии для работы каждого прибора. Определите стоимость и сравните с произведенной оплатой за последние месяцы. Проанализируйте, как ваша семья может уменьшить расходы электроэнергии.

Творческое задание

1. Подготовьте сообщение на тему: «Бытовые электроприборы: от прошлого к настоящему».
2. Разработайте правила техники безопасности при использовании бытовых электроприборов.
3. Воспользуйтесь материалами сети Интернет, результаты исследования представьте в виде диаграммы «Производство электроэнергии в РК по годам XXI века». Сравните с потреблением электроэнергии в эти же годы.

Итоги главы 11

Величины, характеризующие электрическую цепь	Закон Ома	Сила тока короткого замыкания
Сила тока $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, Напряжение $U = \frac{A}{q}$ Электродвижущая сила $\varepsilon = \frac{A_{cm}}{q}$	Для участка цепи $I = \frac{U}{R}$ Для полной цепи $I = \frac{\varepsilon}{R+r}$	$I_{к.з.} = \frac{\varepsilon}{r}$ $R = 0$
Работа тока и сторонних сил	Мощность тока	КПД
Работа тока $A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU$ $A = UI t$ $A = I^2 R t$ $A = \frac{U^2}{R} t$ Работа сторонних сил $A_{cm} = q\varepsilon$ $A_{cm} = I \varepsilon t$	Мощность тока $P = \frac{A}{t}$, $P = UI$ $P = \frac{U^2}{R}$, $P = I^2 R$ $P = \frac{\varepsilon^2}{(R+r)^2} \cdot R$ Полная мощность цепи $P_{полн} = \frac{A_{cm}}{t}$, $P_{полн} = I \varepsilon$, $P_{полн} = \frac{\varepsilon^2}{R+r}$, $P_{полн} = I^2 (R+r)$.	$\eta = \frac{A}{A_{cm}}$, $\eta = \frac{P}{P_{полн}}$, $\eta = \frac{U}{\varepsilon}$, $\eta = \frac{R}{R+r}$.

Законы, правила

Закон Ома для участка цепи

Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна приложенному к нему напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению.

Закон Ома для полной цепи

Сила тока в цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока и обратно пропорциональна сумме внешнего и внутреннего сопротивлений.

Глоссарий

Мощность тока – физическая величина, характеризующая быстроту выполнения работы по перемещению зарядов.

Работа тока – физическая величина, равная произведению перенесенного электрическим полем заряда на напряжение на данном участке цепи.

Сила тока – величина, равная количеству заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за единицу времени.

Электродвижущая сила – физическая величина, равная работе сторонних сил по перемещению единичного заряда.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

Одним из условий возникновения электрического тока является наличие свободных зарядов, способных двигаться под действием электрического поля. При определенных условиях электрический ток может проходить через различные вещества. В данном разделе мы выясним, какие частицы переносят электрический заряд в различных средах, какими законами связаны величины, характеризующие электрический ток.

Изучив главу, вы сможете:

- сравнивать принципы возникновения электрического тока в различных средах;
- экспериментально определять условия возникновения тока в электролитах;
- приводить примеры использования полупроводниковых приборов;
- описывать явление сверхпроводимости и его практическое применение.

§24. Электрический ток в металлах, полупроводниках, электролитах, жидкостях, газах, вакууме

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- сравнивать принципы возникновения электрического тока в различных средах.



Ответьте на вопросы

1. Почему для изготовления электротехнических приборов используют металлы?
2. Что такое молния?
3. Есть ли ток в вакууме? Что он собой представляет?

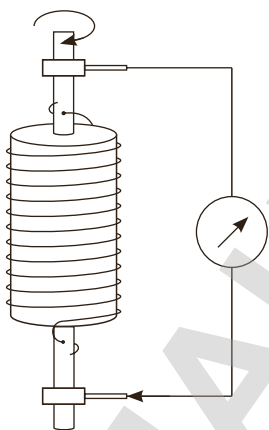


Рис. 158. Принципиальная схема установки опыта Р. Толмена и Т. Стюарта



Ответьте на вопрос

Какие частицы переносили заряд в опыте К. Рикке?

I. Опыты по обнаружению носителей зарядов в металлах

Прямые доказательства того, что ток в металлах обусловлен движением электронов были получены американскими учеными Р. Толменом и Т. Стюартом. В 1916 г. они определили удельный заряд носителей тока, усовершенствовав методику опытов, проведенных в 1913 г. российскими учеными С.Л. Манделъштамом и Н.Д. Папалекси. Опыт заключался в том, что вращающийся соленоид, концы которого с помощью скользящих контактов были замкнуты на гальванометр, резко останавливали (рис. 158). При торможении соленоида гальванометр регистрировал импульс тока. При длине обмотки порядка 500 м и линейной скорости вращения порядка 500 м/с удалось с достаточно высокой точностью определить удельный заряд носителей тока

$\frac{q}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$, что соответствовало характеристикам электрона.

II. Полупроводники. Носители зарядов в полупроводниках. Собственная проводимость

Полупроводники – это вещества, которые по своей удельной проводимости занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками. Они отличаются от проводников тем, что их удельная проводимость зависит от концентрации примесей, температуры и воздействия различных видов излучения. Типичные представители полупроводников – германий, селен, кремний.

При комнатной температуре число свободных электронов в полупроводнике незначительно. Движение электронов в полупроводниках аналогично их движению в металлах: при отсутствии электрического



Обратите внимание!

Концентрация свободных электронов порядка $10^{28} - 10^{29} \text{ м}^{-3}$, молекул воздуха в атмосфере – порядка 10^{25} м^{-3} .

поля движение хаотичное, при наличии внешнего поля кроме хаотичного движения появляется направленное. Проводимость свободных электронов называют *электронной проводимостью* или *проводимостью n-типа* (*negative* – «отрицательный»).

В направленном движении кроме свободных электронов участвуют *связанные электроны*.

Рассмотрим плоскостную схему электронных связей между атомами германия (рис. 159). На рисунке электронные связи атомов изображены линиями. Вокруг ядра атома германия расположены четыре внешних электрона, каждый из которых образует парную связь с электронами соседних атомов. Если электрон становится свободным, то это равносильно появлению в области бывшей связи положительного заряда, равного заряду электрона, который называют дыркой. Разорванная связь может восстановиться переходом электрона из соседних линий связи, тогда дырка появляется в линиях связи других атомов. При наличии электрического поля смещение дырки становится направленным и противоположным направлению движения электронов. Проводимость, обусловленная перемещением дырок, называют *дырочной проводимостью p-типа* (*positive* – «положительный»). Таким образом, *носителями зарядов в полупроводниках являются свободные электроны и дырки*.

Электронно-дырочную проводимость называют собственной проводимостью чистых полупроводников.



Обратите внимание!

При собственной проводимости число свободных электронов и дырок одинаковое.

III. Примесная проводимость полупроводников

Наличие примеси в полупроводнике влияет на его проводимость. Примеси обогащают полупроводник свободными электронами, если они принадлежат V, VI или VII группе таблицы Менделеева. Такие примеси называют *донорными*, а полупроводники *электронными*, или *n-типа*. Рассмотрим схему электронных связей между атомами германия

Таблица 8. Удельное сопротивление веществ (порядок)

Вещество	Удельное сопротивление
проводник	10^{-7} Ом · м
полупроводник	от 10^{-5} Ом · м до 10^8 Ом · м
диэлектрик	10^8 Ом · м

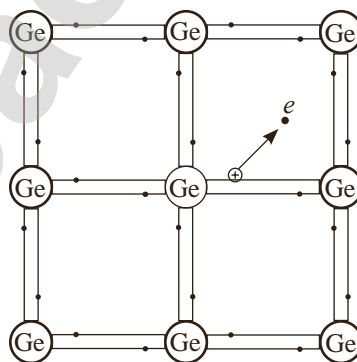


Рис. 159. Носители зарядов в полупроводниках: свободные электроны и дырки



Ответьте на вопросы

1. Почему при комнатной температуре проводимость полупроводников незначительная?
2. Почему при увеличении освещенности и температуры окружающей среды проводимость полупроводников возрастает?

и пятивалентного мышьяка (рис. 160). Четыре электрона атома мышьяка образуют связи с электронами атома германия, пятый становится свободным. Полупроводники *n*-типа обладают электронной проводимостью. Освобождение электронов не разрывает межатомные связи, дырки не образуются, связанные электроны направленного движения не создают. При низких температурах и слабой освещенности примесная проводимость превышает собственную в десятки и сотни тысяч раз.

Дырочная проводимость преобладает в полупроводниках с примесью веществ I, II и III группы таблицы Менделеева. При образовании парных электронных связей элементы этих групп дают дырки, так как обладают меньшим числом валентных электронов, чем полупроводник. Такие примеси называют *акцепторными*, а полупроводники *дырочными*, или *p*-типа. На рисунке 161 изображена схема связей атомов германия с атомом трехвалентного индия.

Примесная проводимость – это проводимость в полупроводниках с акцепторной, или донорной, примесью.

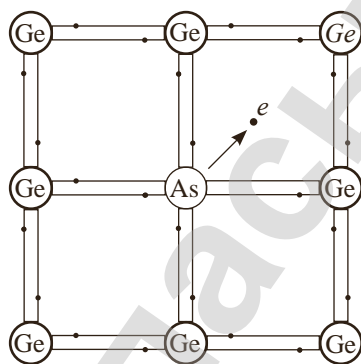


Рис. 160. Полупроводник *n*-типа

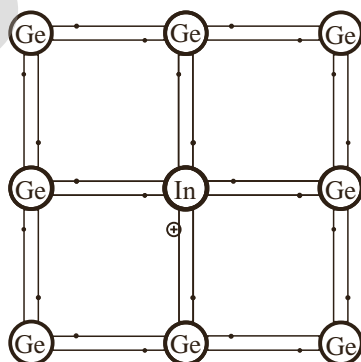


Рис. 161. Полупроводник *p*-типа

IV. Носители зарядов в электролитах

Молекулы электролитов и воды по своей структуре полярны. Связи между ионами молекул кислот, щелочей и солей в окружении молекул воды ослабевают, молекулы распадаются на ионы, происходит электролитическая диссоциация (рис. 162).

Электролитическая диссоциация – это распад молекул на ионы под действием растворителя:

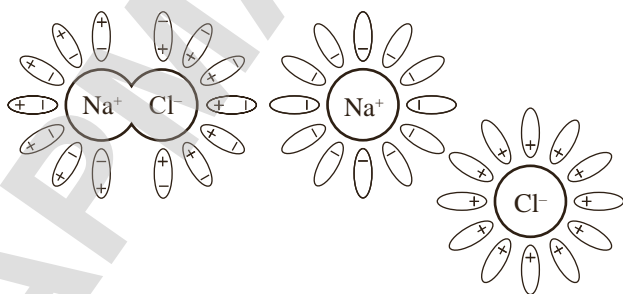
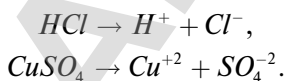


Рис. 162. Электролитическая диссоциация



Ответьте на вопрос

Почему полупроводники с преобладающей электронной проводимостью называются полупроводниками *n*-типа, а полупроводники с преобладающей дырочной проводимостью – полупроводниками *p*-типа?

Ионы в электролитах совершают хаотическое движение. Под действием электрического поля, созданного между анодом и катодом, в электролите возникает направленное движение ионов, появляется электрический ток (рис. 163). Электрический ток в электролитах представляет собой направленное движение положительных и отрицательных ионов, скорость которых невелика. Самые быстрые ионы водорода движутся со скоростью $0,0325 \frac{мм}{с}$ при напряженности поля $100 \frac{В}{м}$.

Наряду с диссоциацией в растворах при столкновении положительных ионов с отрицательными происходит обратный процесс восстановления молекул, названный *рекомбинацией*.

Рекомбинация – процесс соединения ионов в нейтральные молекулы.

V. Электролиз

При прохождении тока через электролит в результате окислительно-восстановительных реакций на электродах выделяется чистое вещество. Этот процесс называют *электролизом*.

Электролиз – это явление выделения чистого вещества на электродах при прохождении тока через электролит.

Если в воде растворить медный купорос $CuSO_4$, то в растворе образуются ионы водорода H^+ , гидроксида OH^- , меди Cu^{+2} и сульфата SO_4^{-2} :



Ионы гидроксида образуют на аноде кислород, ионы водорода на катоде превращаются в нейтральный водород, а ионы меди, нейтрализуясь, оседают на катоде (рис. 164). Катод покрывается слоем чистого металла. Гальваностегия используется для создания антикоррозионного или декоративного покрытия изделий (рис. 165). На рисунке 166 представлены гальванические ванны для покрытия изделий медью.

Вспомните!

Электролиты – это вещества, водные растворы и расплавы которых являются проводниками.

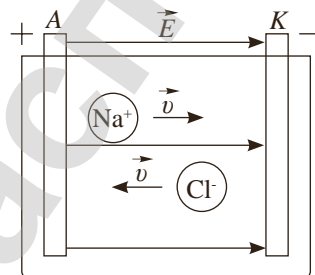


Рис. 163. Направленное движение заряженных частиц под действием внешнего поля

Задание 1

Запишите в тетради ионы, которые образуются при диссоциации едкого натра NaOH, укажите валентность.

Запомните!

Носителями зарядов в электролитах являются положительные и отрицательные ионы.

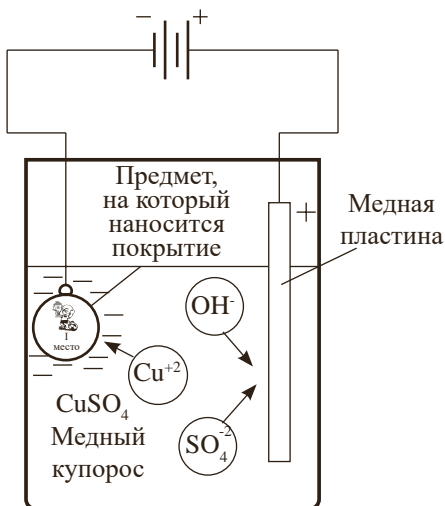


Рис. 164. Гальваностегия – покрытие изделия слоем металла



Рис. 165. Позолоченный сувенир «Золотой человек» отечественного производства, г. Алматы



Рис. 166. Ванны для покрытия изделий медью

VI. Законы электролиза

В 1834 г. М. Фарадей обнаружил, что за одно и то же время на катоде при постоянном значении тока выделяется одна и та же масса химического элемента. Фарадей ввел понятие *электрохимический эквивалент вещества*:

$$k = \frac{m}{q} \quad (1)$$

Электрохимический эквивалент – физическая величина, которая показывает, какая масса вещества выделяется на электроде при прохождении через электролит единичного заряда.

Единица измерения электрохимического эквивалента в СИ: $[k] = 1 \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$. Свои открытия Фарадей сформулировал в виде законов.

Первый закон Фарадея:

Масса вещества, выделившегося при электролизе, прямо пропорциональна прошедшему через раствор заряду:

$$m = kq. \quad (2)$$

Учитывая связь заряда с силой тока $q = It$, первый закон Фарадея примет вид:

$$m = kIt. \quad (3)$$

Второй закон Фарадея устанавливает связь между электрохимическим и химическим эквивалентом веществ. Он получен Фарадеем экспериментально:

$$k = \frac{M}{N_A |e| n}. \quad (4)$$

В выражении (4) отношение $\frac{M}{n}$ является химическим эквивалентом вещества,

M – молярная масса вещества, n – валентность иона, N_A – число Авогадро, $|e|$ – элементарный заряд.

Коэффициент пропорциональности химического и электрохимического эквивалента равен:

$$\frac{1}{N_A |e|} = \frac{1}{F},$$

где F – постоянная Фарадея, она равна: $F = 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$.

Математическое выражение второго закона Фарадея примет вид:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n}. \quad (5)$$

Электрохимические эквиваленты веществ прямо пропорциональны их химическим эквивалентам.

VII. Носители зарядов в газах

При нормальных условиях газ является диэлектриком, он состоит из нейтральных молекул или атомов. При ионизации газа под воздействием *теплового, ультрафиолетового, рентгеновского или радиоактивного излучения* он превращается в проводник. Молекулы газа теряют один или несколько электронов и превращаются в положительные ионы. Нейтральные молекулы при захвате свободных электронов образуют отрицательные ионы. В газах одновременно с ионизацией происходит *рекомбинация*: при захвате электронов положительными ионами образуются нейтральные молекулы.

При наличии внешнего электрического поля кроме теплового движения в ионизированном газе возникает ток. Отрицательные ионы и электроны движутся против направления вектора напряженности электрического поля, положительные ионы – по направлению вектора напряженности.



Запомните!

Носителями зарядов в газах являются положительные и отрицательные ионы и свободные электроны.

VIII. Ударная ионизация

При высокой напряженности электрического поля от 10^3 В/м до 10^5 В/м в момент столкновения электроны обладают энергией, достаточной для ионизации нейтральных молекул (рис. 167):

$$E_i = \frac{mv^2}{2} = qE\lambda,$$

где E_i – энергия ионизации, m – масса заряженной частицы, v – скорость заряженной частицы, q – заряд частицы, E – напряженность поля, λ – длина свободного пробега. Образующиеся в результате столкновения ионы и электроны разгоняются полем и в свою очередь ионизируют новые молекулы. Число заряженных частиц возрастает лавинообразно, происходит самоионизация газа при отсутствии внешнего ионизатора. Такой процесс получил название *ударная ионизация* (рис. 168).



Запомните!

Носителями зарядов в вакууме являются внешние в него заряженные частицы.

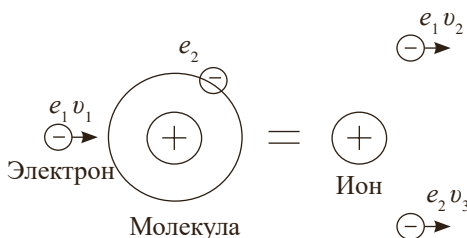


Рис. 167. Ионизация молекулы газа

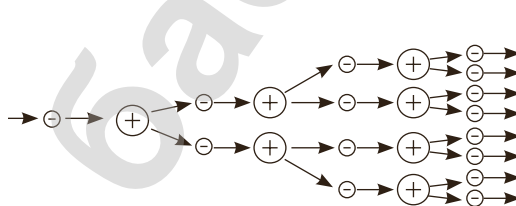


Рис. 168. Ударная ионизация

Ударная ионизация – это образование положительно заряженных ионов в результате столкновений атомов или молекул с быстрыми электронами.

IX. Носители зарядов в вакууме. Термоэлектронная эмиссия

Вакуум – это безвоздушное пространство, в нем нет частиц, которые могли бы стать носителями зарядов. Для получения электрического тока в вакууме необходимо ввести в него заряженные частицы. Наиболее простым методом является *термоэлектронная эмиссия*.

Термоэлектронная эмиссия – это испускание свободных электронов из металла при его нагревании до высокой температуры.



Задание 2

Рассмотрите рисунок 169. Назовите все приборы, из которых состоит цепь. Что происходит в цепи при прямом и обратном подключении источника тока? Как изменяются показания амперметра при увеличении напряжения на электродах лампы?

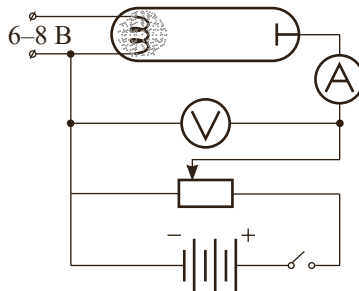


Рис. 169. Схема цепи для исследования тока в вакууме

Один из электродов вакуумной трубки в виде спирали подсоединяют к источнику тока напряжением 6–8 В (рис. 169). При прохождении тока электрод

накаляется до высокой температуры и испускает электроны, которые образуют электронное облако. При испускании электронов катод заряжается положительно и удерживает электроны возле себя. При наличии между катодом и анодом электрического поля электроны устремляются к аноду.

Контрольные вопросы

1. Какие частицы являются носителями зарядов в металлах?
2. Какие вещества относятся к полупроводникам?
3. Что такое собственная проводимость полупроводников?
4. Какую проводимость называют примесной?
5. Какие примеси называют донорными? Какие акцепторными?
6. Какие частицы являются носителями зарядов в газах?
7. Назовите ионизаторы газов.
8. При каком условии происходит самоионизация газа?
9. Какие частицы являются носителями зарядов в вакууме?
10. Что называют термоэлектронной эмиссией?

★ Упражнение

23

1. Составьте сравнительную таблицу для различных сред.

Среда	Носители зарядов	Особенности возникновения тока
Металлы		
Полупроводники		
Электролиты		
Газы		
Вакуум		

2. Две электролитические ванны с растворами $AgNO_3$ и $CuSO_4$ соединены последовательно. Какая масса m_2 меди выделится за время, в течение которого выделилось серебро массой $m_1 = 180$ г?
3. Электрон со скоростью $1,83 \cdot 10^6$ м/с влетел в однородное электрическое поле в направлении, противоположном направлению напряженности поля. Какую разность потенциалов должен пройти электрон, чтобы ионизировать атом водорода, если энергия ионизации $2,18 \cdot 10^{-18}$ Дж.

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Виды разрядов в природе и технике».
2. «Плазма и ее свойства».
3. «Принцип действия молниеотвода».
4. «Электровакuumные приборы: диод, триод, электронно-лучевая трубка, области их применения».

§25. Полупроводниковые приборы

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- приводить примеры использования полупроводниковых приборов.

I. Термисторы

Резко выраженная зависимость сопротивления полупроводников от температуры получила применение при изготовлении термометров сопротивления – *термисторов*.

Термистор – полупроводниковый резистор, сопротивление которого зависит от температуры.



Рис. 170. Термистор с датчиком

Термистор является приемной частью термометра. Преимущество полупроводникового термометра заключается в том, что термистор может иметь размеры в десятые доли миллиметра, сохраняя свою чувствительность (рис. 170). Это дает возможность определить температуру малых тел, для которых применение жидкостных термометров неприемлемо. Термистором можно обнаружить изменение температуры в миллионные доли Кельвина, в диапазоне от 1 до 1800 К.

Формы и размеры термисторов могут быть различными: в виде трубок, стержней, дисков, бусинок, шайб; от нескольких микрометров до нескольких сантиметров (рис. 171).

Термисторы применяются в технических устройствах: противопожарных сигнализациях, отопительных котлах и печах; в автомобильной электронике – для контроля степени охлаждения антифриза, масла, выхлопных газов, определения температура в салоне; в электронной промышленности – для стабилизации температуры лазерных фотоэлементов и диодов, медных обмоток катушек; в мобильных телефонах – для компенсации нагрева.

Широкое применение термисторы получили в бытовой технике: морозильниках, фенах, холодильниках, кондиционерах.



Задание 1

Приведите примеры использования термисторов.



Рис. 171. Термисторы

II. Фоторезисторы

Зависимость проводимости полупроводников от освещенности получила применение в фоторезисторах (рис. 172), благодаря которым стало возможным автоматическое управление электрическими цепями. На рисунке 173 изображена схема цепи с фоторезистором для автоматического подключения уличного освещения.

Фоторезистор – полупроводниковый резистор, сопротивление которого зависит от освещенности.

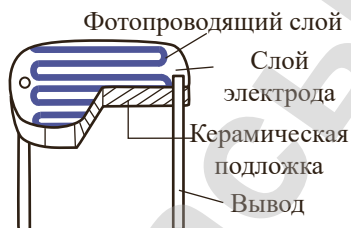


Рис. 172. Фоторезистор



Задание 2

Рассмотрите рисунок 173. Объясните принцип действия цепи.

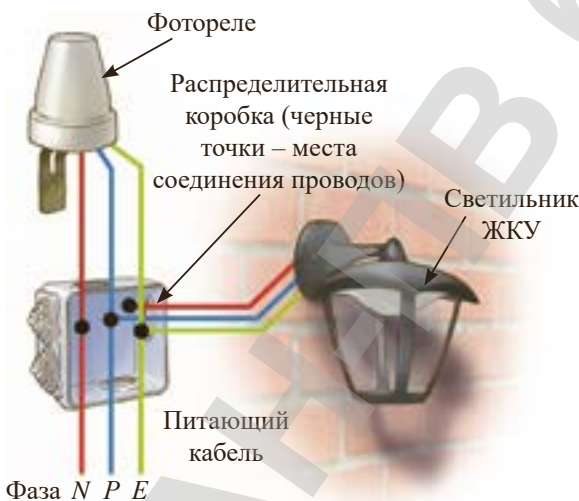


Рис. 173. Схема подключения фоторезистора (фотореле) в цепь уличного освещения

Фоторезисторы используют для регистрации слабых световых сигналов. Свойство изменения сопротивления фоторезистора при пересечении подсвечивающего его светового потока широко используется в различных счетчиках, например, в автоматических устройствах для подсчета изделий, движущихся на контейнере, контроля их размеров; в турникетах (рис. 174).



Ответьте на вопрос

Каким образом фоторезистор регулирует сеть уличного освещения?



Задание 3

Приведите примеры использования фоторезистора в качестве прибора для автоматического управления электрическими цепями.



Рис. 174. Турникет

Кроме обычных фоторезисторов имеются фоторезисторы, которые способны реагировать на инфракрасное излучение, невидимое человеческому глазу. Они получили широкое применение в системах автоматической охраны территорий и помещений. Если какое-либо тело появится на пути луча, то свет не попадет на фоторезистор, и на вход другой системы подается импульс – срабатывает сигнал тревоги.

III. Полупроводниковый диод

Рассмотрим контакт двух полупроводников p -типа и n -типа, через поверхность соприкосновения которых происходит диффузия свободных электронов и дырок. В результате диффузии пограничный слой со стороны полупроводника n -типа заряжается положительно, со стороны полупроводника p -типа – отрицательно, образуется p - n -переход (рис. 175). Поле \vec{E}_0 , созданное p - n -переходом, препятствует движению основных носителей зарядов.

Образовавшийся пограничный слой называют *запирающим слоем*. Он обладает односторонней проводимостью и представляет собой основную часть полупроводникового диода. Присоединим к полупроводникам источник тока: положительный полюс к полупроводнику n -типа, отрицательный полюс к полупроводнику p -типа (рис. 176). Напряженность внешнего поля совпадает с напряженностью поля p - n -перехода, запирающий слой расширяется, его сопротивление возрастает.

Поменяем полюса источника тока, тогда напряженность внешнего поля будет направлена противоположно направлению поля p - n -перехода (рис. 177). Запирающий слой станет тоньше или полностью исчезнет, сопротивление p - n -перехода уменьшится. Ток через полупроводник, созданный направленным движением основных носителей тока, возрастет. Таким образом, запирающий слой обладает односторонней проводимостью, он используется для выпрямления переменного тока.

Контакт полупроводников p -типа и n -типа является основной частью диода, изображение полупроводникового диода в схеме указано на рисунке 178.

IV. Светодиодная лампа

Светодиодная лампа состоит из цоколя – встроенного блока питания постоянного тока и драйвера – специально спроектированной платы со сверхмощным

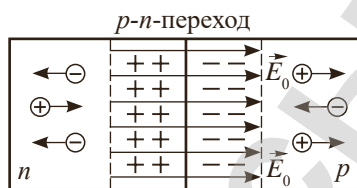


Рис. 175. p - n -переход

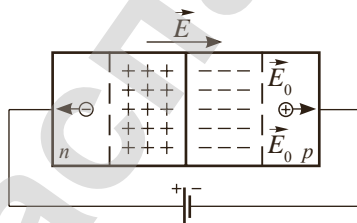


Рис. 176. Обратное включение p - n -перехода

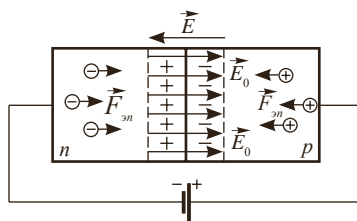


Рис. 177. Прямое включение p - n -перехода



Рис. 178. Внешний вид и изображение диода в схеме

светодиодом и рассеивателя (рис. 179). Светодиод – это *p-n-переход*, в котором электрическая энергия преобразуется в видимое излучение. Таким образом, основная часть светодиодной лампы – это полупроводниковый чип, размер которого составляет порядка $160 \times 550 \times 80$ мкм. Плата помещена в радиатор – алюминиевый корпус для увеличения теплоотвода. Светимость лампы усиливает люминофор, нанесенный на рассеиватель. Предусмотрены различные варианты входного напряжения на лампы от 12 В до 220 В. Потребление электроэнергии светодиодной лампы в 5–10 раз экономичнее обычных ламп накаливания. Светодиодные лампы обладают продолжительным сроком службы, их непрерывное свечение составляет более 5 лет.

На основе светодиодов создаются разнообразные источники света: прожекторы, лампы, линейные светильники, светодиодные линейки, светосигнальные приборы. Светодиодные установки подключаются к осветительной сети, имеют защиту от короткого замыкания и перенапряжения. Потребляемая мощность установок не превышает 200 Вт, они эксплуатируются в широких температурных режимах, от +40 до –60 °С. Светодиодные приборы признаны наиболее перспективными источниками света, производство осветительных ламп стало самой динамично развивающейся отраслью светотехники.

V. Усилитель на транзисторе

Полупроводниковые приборы с двумя *p-n-переходами* называют *транзистором* (рис. 180). Они могут быть *p-n-p-* и *n-p-n-*типа. Для изготовления *p-n-p-*транзистора необходима пластина из полупроводника *n*-типа, ее называют *базой Б*. На пластину напыляют или вплавляют два участка из полупроводника *p*-типа (рис. 181), при этом область коллектора К больше, чем эмиттера Э. Оба перехода подключают к источникам постоянного тока, которые регулируют работу запирающих слоев (рис. 182). Переход «эмиттер – база» прямой, а переход «база – коллектор» – обратный. Основные носители создают ток эмиттера на первом переходе. Дырки, прошедшие в базу, являются неосновными носителями для второго перехода и проходят его беспрепятственно. Подключив в цепь коллектора резистор большого сопротивления, можно получить сигнал высокого напряжения. Транзистор используют для усиления напряжения.



Рис. 179. Светодиодная лампа

? Ответьте на вопросы

1. Почему в полупроводниках при низких температурах преобладает примесная проводимость, а при высоких температурах – собственная проводимость?
2. Как повлияет на работу диода повышение температуры?

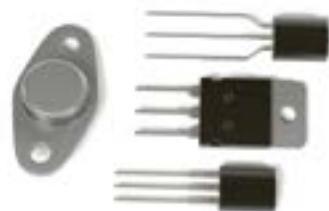


Рис. 180. Транзисторы

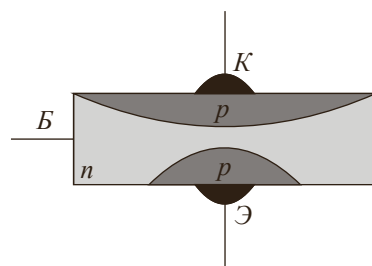


Рис. 181. Транзистор *p-n-p*-типа

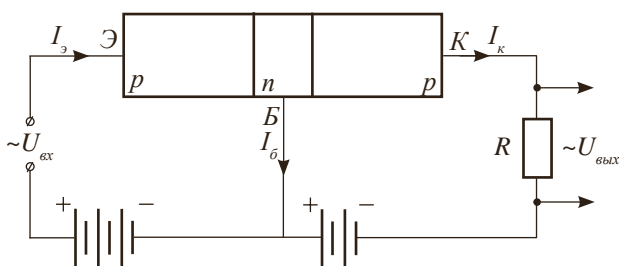


Рис. 182. Подключение источников к выводам транзистора



Запомните!

Ток коллектора I_k зависит только от тока эмиттера $I_э$ и не зависит от сопротивления R цепи коллектора:

$$I_k = I_э - I_б.$$

Напряжение на выходе усилителя на транзисторе зависит от сопротивления резистора:

$$U_{вых} = I_k R.$$

Контрольные вопросы

1. Что такое термистор, где его используют?
2. Каков принцип работы фоторезистора?
3. Где применяют фоторезисторы?
4. Какой прибор обладает односторонней проводимостью? Для чего он необходим?
5. Как устроен транзистор?
6. Где применяют транзисторы?



Упражнение

24

1. Определите напряжение на выходе маломощного кремниевого транзистора (рис. 183), если сопротивление подключенного к нему резистора 5 кОм. Сила тока в эмиттере составляет 1 мА, сила тока в базе 0,2 мА.
2. Используя условие задачи 1, определите, во сколько раз увеличилось напряжение на транзисторе, если на вход был подан сигнал напряжением 0,8 В.



Рис. 183. Кремниевый биполярный транзистор

Творческое задание

Подготовьте сообщение с ppt-презентацией на тему: «Полупроводниковые приборы в быту и технике».

§26. Сверхпроводимость

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать явление сверхпроводимости и его практическое применение.



Ответьте на вопросы

- Почему металлы с плотной кристаллической решеткой имеют большее удельное сопротивление?
- Почему при нагревании проводника его сопротивление увеличивается?
- Почему лампы накаливания перегорают в момент включения цепи?

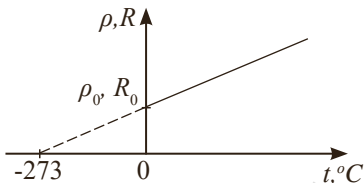


Рис. 184. График зависимости удельного сопротивления металла от температуры

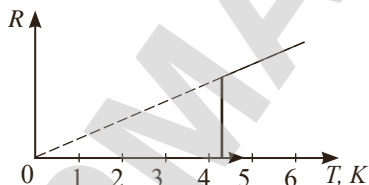


Рис. 185. При температуре ниже 4,2 К ртуть становится сверхпроводником

I. Зависимость сопротивления проводника от температуры

Опытным путем установлено, что между удельным сопротивлением и температурой существует прямая зависимость (рис. 184):

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta t),$$

где ρ_0 — удельное сопротивление проводника при температуре 0°C , α — температурный коэффициент сопротивления, Δt — изменение температуры относительно 0°C .

Температурный коэффициент сопротивления — эта физическая величина, которая показывает, как изменяется сопротивление проводника при нагревании на 1 К.

Единица измерения температурного коэффициента сопротивления в СИ: $[\alpha] = 1\text{ K}^{-1}$.

Поскольку $R = \rho \frac{l}{S}$, то зависимость сопротивления проводника от температуры имеет такой же вид:

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta t).$$

II. Явление сверхпроводимости

При приближении температуры некоторых металлов к абсолютному нулю их сопротивление скачком падает практически до нуля, например, для ртути эта температура составляет 4,2 К (рис. 185). Состояние проводника, при котором его электрическое сопротивление близко к нулю, называют сверхпроводимостью. Вещества, находящиеся в состоянии сверхпроводимости, получили название сверхпроводников. Явление сверхпроводимости было открыто датским ученым Хейке Камерлинг-Оннесом в 1911 г.

В теории сверхпроводников, разработанной в 1957 г. американскими учеными Л. Купером, Дж Бардином и Дж. Шриффером, предполагается, что в сверхпроводниках электроны образуют «куперовские пары», способные под воздействием электрического поля перемещаться через кристаллическую решетку без сопротивления, причем ток поддерживается и после снятия приложенного напряжения.

**Ответьте на вопрос**

Почему график зависимости сопротивления металлического проводника не отличается от графика зависимости удельного сопротивления от температуры?

Ученые, исследуя явление сверхпроводимости, установили, что сверхпроводящий ток является поверхностным. В 1986 г. были получены высокотемпературные сверхпроводники, было обнаружено, что оксидные соединения лантана и бария становятся сверхпроводниками при температуре 100 К.

III. Применение сверхпроводников

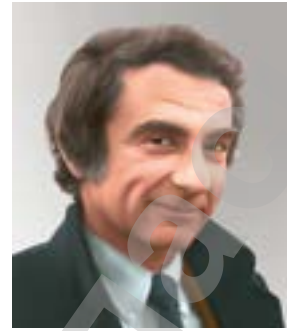
Сверхпроводимость позволяет получать в проводниках небольшого сечения огромные токи. В лаборатории Европейского центра ядерных исследований (ЦЕРН) разработаны сверхпроводники, способные передать электрический ток свыше 20000 А (рис. 186).

Из сверхпроводников изготавливают обмотки мощных электрических генераторов и электромагнитов, которые охлаждаются жидким гелием. Необходимость постоянного охлаждения таких установок создает сложности в их эксплуатации.

Большие токи создают мощные магнитные поля. Сила тока в сверхпроводящих магнитах БАК около 1200 А. Если обычные магниты позволяют получить магнитное поле с индукцией не более 2 Тл, то сверхпроводящие магниты БАК создают поле с индукцией 8,3 Тл. Для охлаждения сверхпроводников применяют жидкий гелий в сверхтекучем состоянии, при 1,9 К (рис. 187).

Высокотемпературная сверхпроводимость в недалеком будущем приведет к технической революции в радиоэлектронике и радиотехнике.

Большой интерес ученых вызывает явление, названное *магнитной левитацией*. В 2013 г. Тель-Авивский университет и ассоциации Научно-технологических центров (ASTC) провели ряд опытов по взаимодействию сверхпроводника с постоянным магнитом. В качестве сверхпроводника был взят тонкий слой керамического материала: оксида иттрия-бария-меди ($YBa_2Cu_3O_7$), нанесенного на стеклянную или сапфировую подложку. Толщина сверхпроводника составила порядка 1 мкм. При $-185\text{ }^\circ\text{C}$ путем



Леон Нил Купер – американский физик, лауреат Нобелевской премии по физике в 1972 году. Совместно с Джоном Бардином и Джоном Шриффером он создал теорию сверхпроводимости, которую обычно называют теорией БКШ.



Рис. 186. Сверхпроводящий кабель, разработанный в лаборатории ЦЕРН

**Задание**

Используя сеть Интернет, поясните значение словосочетания «магнитная левитация».



Рис. 187. Часть криогенной системы БАК для поддержания температуры $-271,25^{\circ}\text{C}$, необходимой для супержидкого гелия

погружения в жидкий азот его превращают в сверхпроводник. В результате движения сверхпроводника и взаимодействия с постоянным магнитом в сверхпроводнике создается индукционный ток и порожденное им магнитное поле. Любое пространственное движение подложки с нанесенным слоем вызывает смещение внутреннего магнитного поля, в результате которого сверхпроводник сохраняет свое положение в пространстве (рис. 188).

К вопросу о создании транспорта на магнитных подушках вновь возвращается ряд стран.

Летом 2017 г. в Пекине проведены испытания линии для поездов на магнитной подушке протяженностью 10 км, соединяющей городские районы западной части столицы Китая.

Поезд на магнитной подушке, называемый «маглев», в ходе движения не касается рельсов. Поезд поднимается и приводится в движение в результате взаимодействия магнитов с высокотемпературным сверхпроводником.



Рис. 188. Взаимодействие сверхпроводника с рельсами из постоянного магнита



Интересно знать!

Над созданием хOVERборда, представленного во второй части фильма «Назад в будущее», безрезультатно трудились многие энтузиасты. За воплощение идеи взялся производитель автомобилей Lexus, пообещав создать настоящий хOVERборд (рис. 189, 190). Над его созданием 1,5 года работали две группы инженеров из Германии и Великобритании. Дека сделана из бамбука, а общая форма схожа с классическими скейтбордами. Известно, что в изобретении использовались сверхпроводники и постоянные магниты, которые охлаждаются жидким азотом.



Рис. 189. Ховерборд, действующий на явлении магнитной левитации, 2015 г.



Рис. 190. Для испытания ховерборда под цемент в скейт-парке Кубельес, под Барселоной были установлены сотни небольших магнитов

Обратите внимание!

Существует три основных технологий магнитного подвеса поездов: на сверхпроводящих магнитах, электромагнитах и постоянных магнитах (рис. 191). Поезда на магнитной подушке были созданы в конце XX века и испытаны в ряде стран: Китае, Японии, Германии, Южной Корее, Великобритании. Длина трассы составляла от 600 м в Великобритании и до 30 км – в Китае. В связи с высокой стоимостью создания единственной в мире действующей линией осталась трасса в Китае: «Аэропорт Пудун – станция шанхайского метро Лунъян Лу». На всех линиях использовались электромагниты.



Рис. 191. Поезд на сверхпроводящих магнитах

Немецкая инженерная компания Thyssen Krupp представила новый лифт MULTI. Он представляет собой маглев-лифт, аналогичный скоростному поезду на магнитной подушке. Для передвижения используется не трос, а линейные двигатели, установленные в рельсах, расположенных на стене шахты.

Лифт способен передвигаться не только вертикально, но и горизонтально. На пересечении вертикальных и горизонтальных рельсов диск способен вращаться (рис. 193). Новая лифтовая система позволит уменьшить ожидание, объезжать заторы и передвигаться между разными крыльями здания.

Интересно знать!

Тель-Авив планирует стать первым городом в мире с системой общественного транспорта на магнитной подвеске SkyTran (рис. 192). Систему разработали инженеры из НАСА и компании SkyTran, которая базируется в Исследовательском центре НАСА им. Эймса в Калифорнии. Разработчики утверждают, что это экологически чистая, недорогая, быстрая и удобная альтернатива автомобилям и автобусам. До станции назначения они скользят без остановки и препятствий. Полностью решается проблема пробок.



Рис. 192. Транспорт на магнитной подвеске

Ответьте на вопрос

Почему высокотемпературные сверхпроводники остаются предметом исследований ученых?

Максимальная высота, на которую может поднимать обычный лифт, ограничена, она не должна превышать 550 метров. Железный трос становится настолько тяжелым, что для подъема на последние этажи зданий, превышающих указанную высоту, необходимо делать пересадки. MULTI позволит архитекторам проектировать небоскребы новых форм.

В последнее десятилетие в работе американских исследователей намечился существенный прорыв в создании высокотемпературных сверхпроводников. Получены пленки из синтезированного

сложного химического соединения на основе таллия с эффектом сверхпроводимости при температуре 254 К ($-19\text{ }^{\circ}\text{C}$). Эффект нетрадиционной сверхпроводимости обнаружен также в соединениях арсенида железа и оксида меди.

Получение высокотемпературных сверхпроводящих пленок может привести к появлению нового класса энергосберегающей электроники.



Рис. 193. Вращающийся диск на пересечении рельсов лифта MULTI и кабина

Контрольные вопросы

1. Как сопротивление проводника зависит от температуры?
2. Что такое температурный коэффициент сопротивления?
3. Какое явление получило название «сверхпроводимость»?
4. Какое практическое применение получило явление сверхпроводимости?

★ Упражнение

25

1. Вычислите отношение сопротивлений вольфрамовой проволоки при температурах $t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t = 2400\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. При погружении катушки из алюминиевой проволоки под напряжением в тающий лед сила тока в ней равна $I_1 = 29\text{ мА}$, а при погружении в кипяток $- I_1 = 20\text{ мА}$. Определите температурный коэффициент сопротивления алюминия.

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Теория БКШ».
2. «Высокотемпературные сверхпроводники».
3. «Применение сверхпроводников».

Итоги главы 12

Основные величины	Формулы расчета
Энергия ионизации в газах	$E_i = \frac{m v^2}{2} = qE\lambda$
Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры	$\rho = \rho_0 (1 + \alpha\Delta t)$
Зависимость сопротивления проводника от температуры	$R = R_0 (1 + \alpha\Delta t)$
Первый закон Фарадея	$m = kq$
Второй закон Фарадея	$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n}$

Глоссарий

Гальваностегия – электрохимический процесс нанесения на металлическое изделие защитного или декоративного слоя другого металла.

Полупроводник – вещество, которое по своей удельной проводимости занимает промежуточное место между проводниками и диэлектриками и отличается от проводников сильной зависимостью удельной проводимости от концентрации примесей, температуры и воздействия различных видов излучения.

Примесная проводимость – проводимость в полупроводниках с акцепторной или донорной примесью.

Рекомбинация – процесс соединения ионов в нейтральные молекулы.

Собственная проводимость – электронно-дырочная проводимость чистых полупроводников.

Сверхпроводимость – состояние проводника, при котором его электрическое сопротивление близко к нулю.

Сверхпроводник – вещество, находящееся в состоянии сверхпроводимости.

Температурный коэффициент сопротивления – эта физическая величина, которая показывает, как изменяется сопротивление проводника при нагревании на 1 К.

Термистор – полупроводниковый резистор, сопротивление которого зависит от температуры.

Термоэлектронная эмиссия – испускание свободных электронов из металла при его нагревании до высокой температуры.

Транзистор – полупроводниковый прибор с двумя *p-n*-переходами, служащий для усиления сигнала.

Ударная ионизация – самоионизация газа при высокой напряженности поля.

Фоторезистор – полупроводниковый резистор, сопротивление которого зависит от освещенности.

Электрохимический эквивалент – физическая величина, которая показывает, какая масса вещества выделяется на электроде при прохождении через электролит единичного заряда.

Электролиты – вещества, водные растворы и расплавы которых являются проводниками.

Электролитическая диссоциация – распад молекул на ионы под действием растворителя.

Электролиз – явление выделения чистого вещества на электродах при прохождении тока через электролит.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

История магнетизма уходит корнями в глубокую древность, к античным цивилизациям Малой Азии. Именно на территории Малой Азии, в Магнесии, находили горную породу, образцы которой притягивались друг к другу. По названию местности такие образцы и стали называть «магнетиками». Магнетики взаимодействуют посредством магнитного поля.

Магнитное поле может существовать и без постоянного магнита, оно создается вокруг движущихся заряженных частиц. После Большого взрыва, с самого первого момента существования Вселенной, пространство было заполнено множеством движущихся протонов, электронов, а также ионов водорода и гелия. В 2010 г. астрофизики **Шиничиро Андо** из Калифорнийского технологического института и **Александр Кусенко** из Калифорнийского университета Лос-Анджелеса обнаружили реликтовый магнитный фон Вселенной по снимкам сверхмассивных черных дыр. По их мнению, снимки не были резкими из-за магнитного фона, пронизывающего всю Вселенную.

Магнитное поле – это вид материи, особенностью которой является действие на движущийся электрический заряд, проводники с током и тела, обладающие магнитным моментом.

Техническое применение магнитного поля лежит в основе всей электротехники, радиотехники и электроники. Магнитные поля используются в дефектоскопии, для удержания горячей плазмы в условиях управляемого термоядерного синтеза, в ускорителях заряженных частиц.

Изучив главу, вы сможете:

- описывать величину, характеризующую магнитное поле проводников;
- применять правило левой руки и описывать действие магнитного поля на движущиеся заряженные частицы и на проводник с током;
- описывать современные области использования магнитных материалов (неодимовые магниты, датчики, сейсмографы, металлоискатели) и обсуждать тенденции их применения;
- экспериментально собирать искусственные магниты и объяснять области их применения;
- объяснять факторы, влияющие на магнитное поле соленоида.

§27. Магнитное поле. Правило буравчика. Вектор магнитной индукции

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать величину, характеризующую магнитное поле проводников.

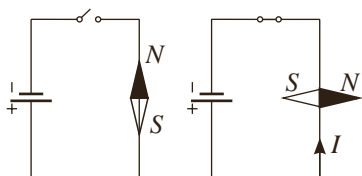


Рис. 194. Опыт Эрстеда

I. Опыты Эрстеда

В 1820 г. датскому физику К. Эрстеду удалось на опыте обнаружить магнитное поле вокруг проводника с током. Над проводом, расположенным вдоль меридиана, он подвесил на тонкой нити магнитную стрелку (рис. 194). При замыкании ключа магнитная стрелка поворачивалась и устанавливалась под прямым углом к проводу. Эрстед повторил опыт для проволок из различных металлов, а также для газоразрядных трубок, заполненных различными газами, для трубок с электролитами и пришел к выводу, что *в любой среде вокруг движущихся зарядов возникает магнитное поле.*

Из трех действий электрического тока: теплового, химического и магнитного, только магнитное действие проявляется при любых условиях и в любых средах.



Ответьте на вопрос

Почему при постановке опыта Эрстед располагал проводник с током вдоль меридиана Земли?

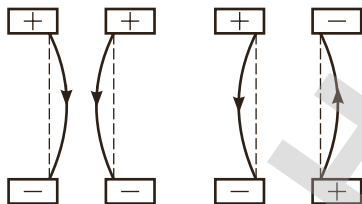


Рис. 195. Взаимодействие проводников с током

II. Опыты Ампера

Действие магнитного поля постоянного магнита на проводник с током и непосредственное взаимодействие проводников с током было изучено А. Ампером. Он провел ряд опытов, в результате которых пришел к следующим выводам:

- 1) Два параллельных проводника притягиваются, если токи в них совпадают по направлению; отталкиваются, если токи в них противоположны (рис. 195).
- 2) Проводник с током, подвешенный на тонких нитях, располагается перпендикулярно оси полюсового магнита (рис. 196).
- 3) Магнитное поле Земли оказывает ориентирующее действие на рамку с током так же, как на магнитную стрелку. При этом ось магнитной стрелки перпендикулярна плоскости витка (рис. 197).

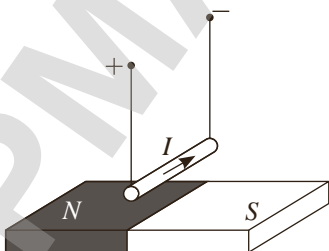


Рис. 196. Взаимодействие полосового магнита и проводника с током

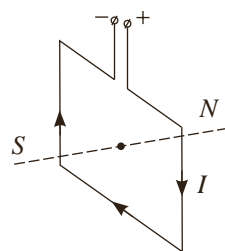
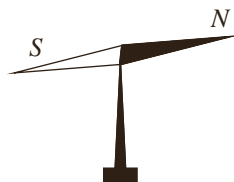


Рис. 197. Перпендикуляр к плоскости рамки с током ориентирован, как магнитная стрелка

III. Магнитная индукция прямого и кругового тока

Физическую величину, характеризующую силовое воздействие магнитного поля на проводник с током, называют магнитной индукцией.

Французские физики Ж. Био и Ф. Савар в 1820 г. опытным путем установили величину магнитной индукции для прямого тока:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}, \quad (1)$$

где B – магнитная индукция прямого проводника с током, силовая характеристика поля; I – сила тока в проводнике, a – кратчайшее расстояние от точки пространства до проводника (рис. 198), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H / A}^2$ – магнитная постоянная. Единица измерения магнитной индукции в СИ – 1 тесла:

$$[B] = 1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{H}}{\text{A} \cdot \text{м}}.$$

Определить магнитную индукцию полей, созданных проводниками сложной формы, ученым не удалось. Французский физик и математик П. Лаплас, обобщив экспериментальные данные, получил закономерность, позволяющую определить индукцию магнитного поля проводника любой формы.

На основе закона получена формула расчета магнитной индукции в центре кругового тока (рис. 199):

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

где R – радиус витка.

Индукция магнитного поля внутри соленоида (катушка с большим количеством витков N , с длиной, значительно превышающей диаметр витка $l \gg d$), рассчитанная по этому закону, равна:

$$B = \frac{\mu_0 IN}{l} \quad (3) \text{ или } B = \mu_0 nI, \quad (4)$$

где $n = \frac{N}{l}$ – число витков на единицу длины.

Магнитная индукция поля при постоянном значении тока остается величиной постоянной, следовательно, магнитное поле внутри соленоида однородно, силовые линии параллельны друг другу (рис. 200).

Для магнитных полей выполняется принцип суперпозиции:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n.$$

Ответьте на вопрос

Почему молния способна наэлектризовать железные тела?

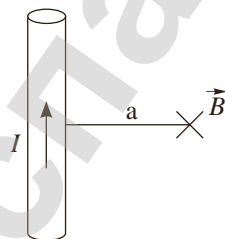


Рис. 198. Магнитная индукция поля уменьшается при удалении от проводника с током

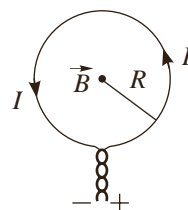


Рис. 199. Магнитная индукция в центре кругового тока уменьшается при увеличении радиуса витка

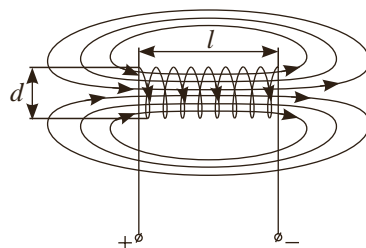


Рис. 200. Магнитное поле внутри соленоида однородно

Магнитную индукцию поля, созданного несколькими проводниками с током, определяют как векторную сумму магнитных индукций этих полей.

IV. Силовые линии магнитного поля прямого и кругового тока

Магнитное поле, так же как и электрическое, изображают силовыми линиями

Силовые линии магнитного поля – это линии, касательные к которым в каждой точке указывают направление вектора магнитной индукции.

Направление линий магнитного поля указывает северный полюс магнитной стрелки (рис. 201). Это направление принято за направление магнитной индукции поля. Направление силовых линий магнитного поля прямого и кругового тока определяют по правилу буравчика.

Если поступательное движение буравчика совместить с направлением тока в проводнике, то вращательное движение рукоятки укажет направление силовых линий магнитного поля (рис. 202).

Для изображения магнитных силовых линий в плоскости используют точки – «наконечники» стрел и крестики – их «оперения», при этом сам вектор магнитной индукции представляют как стрелу. Если вектор изображен точкой, то он направлен перпендикулярно плоскости рисунка вверх, если крестиком, то вектор также перпендикулярен плоскости рисунка, но направлен вниз. Аналогично изображают направление тока в разрезе проводника. На рисунке 203 изображен разрез проводника, в котором ток течет вверх. Силовые линии магнитного поля вокруг проводника представляют собой концентрические окружности, они направлены против часовой стрелки. На рисунке 204 разрез выполнен вдоль проводника с током, силовые линии магнитного поля перпендикулярны

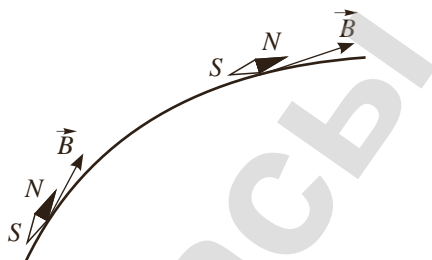


Рис. 201. Северный полюс магнитной стрелки указывает направление силовых линий магнитного поля

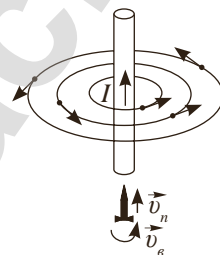


Рис. 202. Определение направления силовых линий магнитного поля проводника с током по правилу буравчика

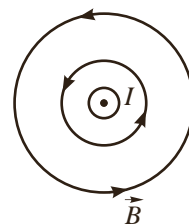


Рис. 203. Изображение силовых линий при поперечном сечении проводника

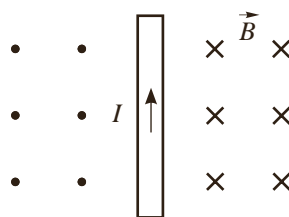


Рис. 204. Изображение силовых линий при продольном сечении проводника



Задание 1

Рассмотрите рисунок 205. На основе правила буравчика или правила правой руки поясните направление силовых линий магнитного поля, созданного круговым током.

плоскости рисунка, слева от проводника они направлены вверх, справа – вниз. Силовые линии кругового тока соленоида изображены на *рисунках 205, а, б, в*, в тех же плоскостях.

Направление магнитного поля катушки с током легко определить с помощью правила правой руки.

Если правую руку расположить, не касаясь катушки так, чтобы четыре пальца указывали направление тока в ее витках, то большой палец, отогнутый на 90°, укажет направление магнитного поля.

В отличие от силовых линий электрического поля силовые линии магнитного поля всегда замкнуты.

V. Гипотеза Ампера

А. Ампер, заметив сходство магнитного поля кругового тока с магнитным полем полосового магнита (*рис. 205, в и 206*), в 1820 г. выдвинул гипотезу о том, что магнитное свойство постоянных магнитов обусловлено существующими в них элементарными круговыми токами. Он считал, что поскольку силовые линии магнитного поля не имеют ни начала, ни конца, то в природе не должно быть магнитных зарядов. Только в начале следующего столетия, благодаря открытиям в области строения атома, выяснилось, что элементарные токи созданы движением электронов вокруг ядра.

Гипотеза Ампера легко объясняет неотделимость полюсов магнита и образование малых магнитов при делении большого. На *рисунке 207* изображено упорядоченное расположение элементарных токов в намагниченном железном бруске. В не намагниченном состоянии элементарные токи ориентированы произвольно, их магнитные поля компенсируют друг друга. При делении бруска на части расположение элементарных токов не меняется. Малый брусок обладает теми же свойствами, что и большой.

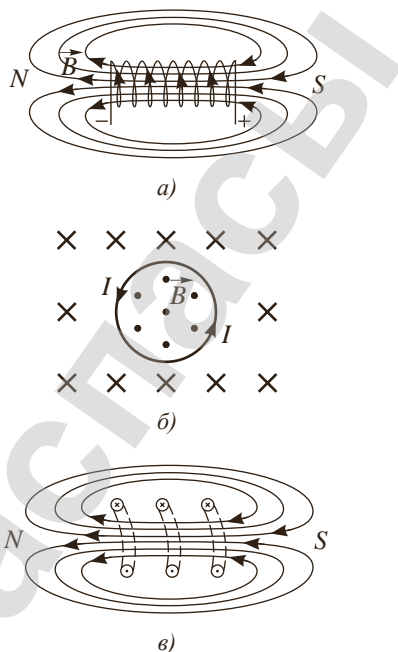


Рис. 205. Силовые линии кругового тока

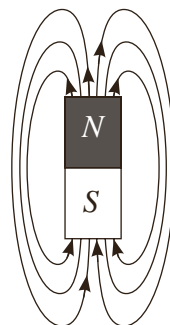


Рис. 206. Магнитное поле полосового магнита

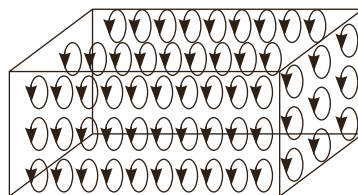


Рис. 207. Магнитное поле создано круговым движением электронов вокруг ядер



Ответьте на вопросы

1. Почему в природе нет магнитных зарядов?
2. Почему при делении магнита на части у каждого из них вновь появляются два полюса?
3. Почему магнитные поля постоянных магнитов со временем становится слабее?



Задание 2

По рисунку 208 объясните принцип действия системы, приводящей поезд на магнитной подушке в движение, и левитации. Используя материалы сети Интернет, сравните технологии магнитных подвесов первых поездов, построенных в Берлине, Бирмингеме, Шанхае и Японии.

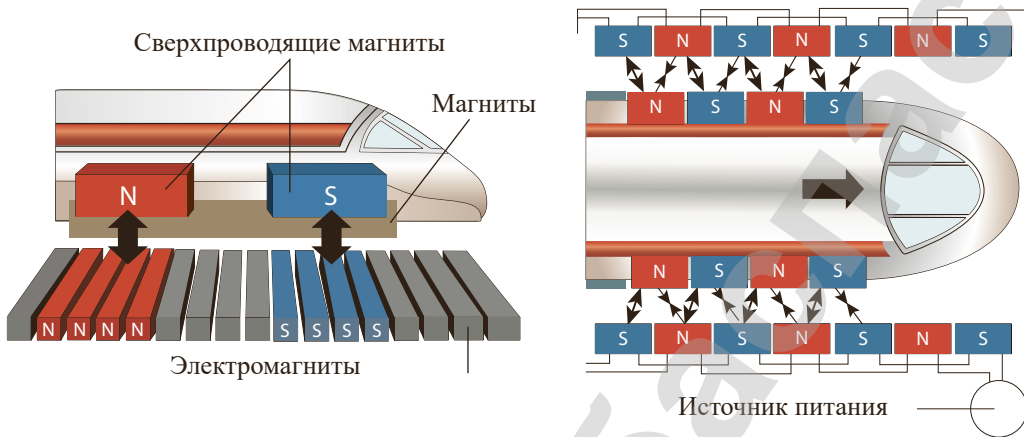


Рис. 208. Система для подвеса (левитации) поезда на магнитной подушке

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Прямой бесконечный провод, по которому течет ток I , имеет виток, как показано на рисунке а. Во сколько раз индукция магнитного поля в точке O при этом отличается от индукции магнитного поля прямого (рис. б) тока в этой же точке?

Дано:

I

$\frac{B_0}{B'_0} = ?$

Решение:

Когда провод изогнут так, как показано на рисунке а, векторы индукций магнитного поля \vec{B}_1 и \vec{B}_2 , создаваемые прямым током и витком, направлены в противоположные стороны, поэтому:

$$B_0 = B_1 - B_2 = \frac{\mu_0 I}{2r} \left(\frac{1}{\pi} - 1 \right).$$

Когда провод изогнут так, как показано на рисунке б, векторы индукций магнитного поля направлены в одну сторону, следовательно:

$$B'_0 = B_1 + B_2 = \frac{\mu_0 I}{2r} \left(1 + \frac{1}{\pi} \right), \text{ тогда } \frac{B_0}{B'_0} = \frac{\pi - 1}{\pi + 1}.$$

Ответ: $\frac{\pi - 1}{\pi + 1}$.

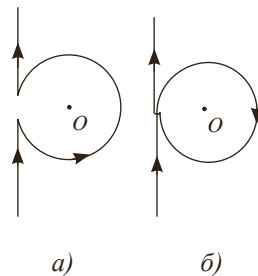


Рис. 1

Контрольные вопросы

1. Каким образом можно создать магнитное поле?
2. Как взаимодействуют проводники с током? Намагниченные тела? Постоянный магнит и проводник с током?
3. Как изображают магнитное поле?
4. Что определяют по правилу буравчика?
5. Как зависит магнитная индукция поля проводника с током от силы тока?
6. Как меняется индукция магнитного поля при удалении от проводника с током?
7. В чем заключается гипотеза Ампера?

**Упражнение****26**

1. Имеется два стальных бруска, один из которых намагничен. Как узнать, какой именно брусок намагничен, не пользуясь ничем, кроме этих брусков?
2. В прямом бесконечно длинном проводнике сила тока $I = 20$ А. Определите магнитную индукцию в точке, удаленной на расстояние $r = 5$ см от проводника.
3. В центре кругового тока радиусом $R = 5,8$ см индукция магнитного поля $B = 1,3 \cdot 10^{-4}$ Тл. Определите силу тока.

Творческое задание

Подготовьте сообщения с ppt-презентацией:

1. «Исследования У. Гильберта, О. Кулона, и Ф. Араго магнитных взаимодействий».
2. «Использование магнитов в технике».

§28. Сила Ампера. Сила Лоренца

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять правило левой руки и описывать действие магнитного поля на движущиеся заряженные частицы и на проводник с током.



Эксперимент

Повторите опыты Ампера. Подключите проводник к источнику постоянного тока, внесите в поле подковообразного магнита (рис. 209). Зафиксируйте направление отклонения проводника с током. Поменяйте полюса магнита, выясните, как изменится угол отклонения проводника. Повторите опыт с двумя магнитами. Измените силу тока в проводнике. Сделайте выводы из проведенных опытов. По какому признаку вы определили, что сила Ампера изменилась?

I. Закон Ампера

Опыты, проведенные А. Ампером, показали, что сила, действующая на проводник с током, зависит как от величины магнитной индукции, так и от ее направления. В этом легко убедиться на опыте (рис. 209). Силу, с которой магнитное поле действует на проводник с током, называют *силой Ампера*.

По результатам проведенных опытов, Ампер пришел к выводу, что:

Сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током, прямо пропорциональна перпендикулярной составляющей магнитной индукции, силе тока и длине проводника.

$$F_A = B_{\perp} I \cdot l \text{ или } F_A = BI \cdot l \sin \alpha, \quad (1)$$

где α – угол между вектором магнитной индукции \vec{B} и направлением тока. Из полученной формулы следует, что сила взаимодействия максимальна при условии, что $\sin \alpha = 1$, или $\alpha = 90^\circ$.

На основании закона Ампера раскрыт физический смысл магнитной индукции как силовой характеристики магнитного поля:

$$B = \frac{F_A}{Il \sin \alpha} \quad (2)$$

и установлена связь единицы измерения магнитной индукции с единицей измерения силы:

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

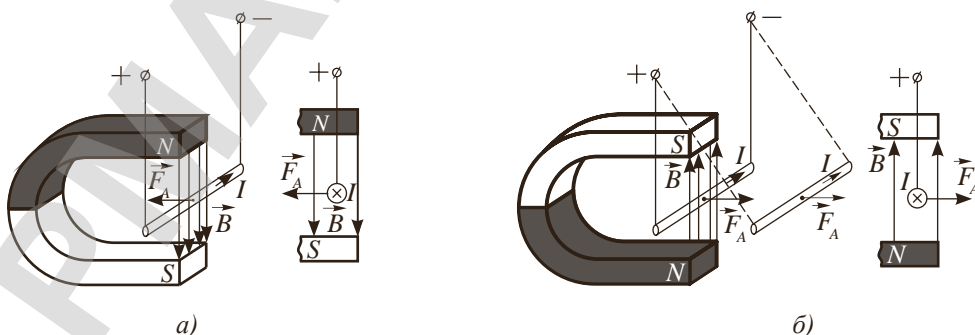


Рис. 209. Отклонение проводника с током в магнитном поле

II. Направление силы Ампера

Направление действия силы Ампера определяют по правилу левой руки:

Если левую руку расположить так, чтобы вектор индукции входил в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы Ампера.

Правило левой руки справедливо, если направление вектора магнитной индукции и силы тока в проводнике составляет угол 90° . Если угол меньше или больше 90° , то вектор магнитной индукции \vec{B} необходимо предварительно разложить на параллельную и перпендикулярную составляющие относительно проводника с током (рис. 210):

$$B_{\perp} = B \sin \alpha. \quad (3)$$

Направление силы Ампера определяют по перпендикулярной составляющей.

III. Сила Лоренца

Поскольку сила Ампера – это сила, действующая на проводник с током, а ток – это упорядоченное движение заряженных частиц, то силу, действующую на одну заряженную частицу, можно выразить соотношением:

$$F_L = \frac{F_A}{N}, \quad (4)$$

где N – число заряженных частиц.

Сила Лоренца – это сила, которая действует со стороны магнитного поля на движущуюся в нем заряженную частицу.

Согласно закону Ампера, $F_A = B I l \sin \alpha \quad (5).$

Выразим силу тока в проводнике через заряд одной частицы:

$$I = \frac{q}{t} = \frac{q_0 N}{t}. \quad (6)$$



Хендрик Антон Лоренц (1853–1928) – голландский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии по физике (1902 г.) за исследование влияния магнетизма на излучения. Почетный доктор Парижского и Кембриджского университетов, член Лондонского королевского и Германского физического обществ, с 1881 г. – член Нидерландской королевской академии наук.

Х. Лоренц развил электромагнитную теорию света и электронную теорию материи.



Задание 1

Используя правило левой руки, убедитесь в том, что отклонения проводника с током на рисунках 209, а, б изображены верно.

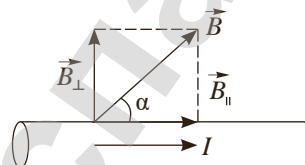


Рис. 210. Разложение вектора магнитной индукции на составляющие



Ответьте на вопрос

Почему проводник с током, расположенный параллельно вектору индукции, не отклоняется?

Подставив (5) и (6) в (4), получим:

$$F_L = \frac{Bq_0NI \sin \alpha}{tN}.$$

Учитывая $v_{op} = \frac{l}{t}$, где v_{op} – скорость направленного движения зарядов, получим формулу расчета силы Лоренца:

$$F_L = q_0 B v_{op} \sin \alpha, \quad (7)$$

где α – угол между вектором магнитной индукции \vec{B} и направлением скорости \vec{v} .

IV. Направление силы Лоренца

Направление силы Лоренца, действующей на положительную частицу, определяют по правилу левой руки. Для отрицательных частиц направление силы противоположное.

Сила Лоренца действует как на заряженные частицы, создающие ток в проводнике, так и на заряженные частицы, свободно движущиеся в пространстве.

V. Радиус кривизны траектории заряженной частицы, движущейся в магнитном поле

Пусть заряженная частица влетает в магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. В этом случае, поскольку сила Лоренца направлена перпендикулярно к скорости движения заряда, она создает частице центростремительное ускорение. Под действием силы Лоренца тело движется равномерно по окружности радиусом R (рис. 211). Для заряженной частицы, движущейся с ускорением, выполняется второй закон Ньютона:

$$m\vec{a} = \vec{F}_L. \quad (8)$$

Подставим в уравнение (8) формулу расчета силы Лоренца (7), заменив ускорение отношением квадрата скорости к радиусу вращения $a_{uc} = \frac{v^2}{R}$, получим:

$$\frac{mv^2}{R} = qBv \sin \alpha. \quad (9)$$

Задание 2

Рассмотрите рисунок 211. Выясните, верно ли изображено направление силы Лоренца? Какое правило вы использовали для выполнения задания?

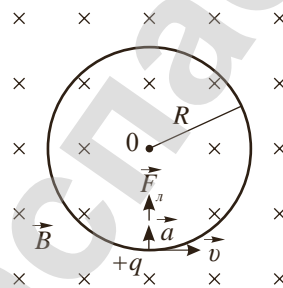


Рис. 211. Траектория частицы, скорость которой перпендикулярна силовым линиям однородного магнитного поля, – окружность

Задание 3

Поясните принцип действия циклотрона по его принципиальной схеме (рис. 212).

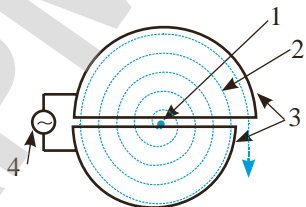


Рис. 212. Принципиальная схема циклотрона:

- 1 – место поступления протонов и ионов;
- 2 – траектория ускоряемой частицы;
- 3 – ускоряющие электроды (дуанты);
- 4 – генератор переменного напряжения.

Магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости рисунка

В рассматриваемом случае $\alpha = 90^\circ$, $\sin\alpha = 1$, при этом условии из уравнения (9) следует, что радиус кривизны траектории равен:

$$R = \frac{mv}{qB}. \quad (10)$$

Чем больше скорость частицы, тем больше радиус кривизны ее траектории в однородном магнитном поле $B = \text{const}$.

Ускоренное движение заряженных частиц и получение новых частиц при их столкновении получило применение в ряде устройств: циклотроне (рис. 213), коллайдере (рис. 214).

Основные радиоизотопы, которые производятся в циклотронах: Cd-109, Ge-68, Tl-201, Co-57, Ga-67.



Задание 4

Рассмотрите принципиальную схему устройства БАК (рис. 214).

Назовите основные блоки и части БАКа.



Рис. 213. Изохронный циклотрон У-150М в институте ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан



Рис. 214. Принципиальная схема устройства Большого адронного коллайдера



Рис. 215. Большой адронный коллайдер



Интересно знать!

БАК является самой крупной экспериментальной установкой в мире. В строительстве и исследованиях участвовали и участвуют более 10 тыс. ученых и инженеров из более чем 100 стран (рис. 215).

VI. Сила Лоренца и полярное сияние

Влиянием магнитного поля Земли объясняется возникновение полярного сияния вблизи ее полюсов. Заряженные частицы, летящие из космоса, перемещаются вдоль линий индукции поля Земли, «навиваясь» на них (рис. 216). Частицы приближаются к Земле преимущественно в полярных областях, вызывая тлеющий разряд – полярное сияние (рис. 217). Полярные сияния бывают не только на Земле. На рисунке 218 показана фотография Юпитера в период солнечной активности. Снимок сделан обращающейся вокруг Земли рентгеновской обсерваторией Чандра.

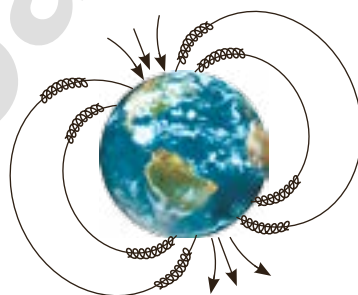


Рис. 216. Движение заряженных частиц в магнитном поле Земли

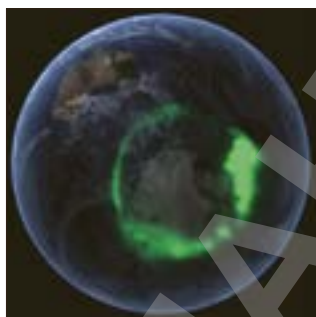


Рис. 217. Полярное сияние на Земле. Фото из космоса



Рис. 218. Полярное сияние на Юпитере



Задание 5

Рассмотрите рисунки 217 и 218. Укажите их сходства и различия.

На каких планетах Солнечной системы происходят полярные сияния? При каких условиях они наблюдаются?



Ответьте на вопрос

Почему при определении силы Лоренца, действующей на отрицательную частицу, четыре пальца направляют в сторону, обратную направлению движения частицы?

Контрольные вопросы

1. Как определяют направление силы Ампера? Значение силы Ампера?
2. Какую силу называют силой Лоренца?
3. От каких величин зависит значение силы Лоренца?
4. Какая взаимосвязь существует между силой Ампера и силой Лоренца?
5. Как определяют направление силы Лоренца, действующей на положительную частицу? На отрицательную?
6. По какой траектории движется частица, если ее скорость перпендикулярна вектору магнитной индукции.

★ Упражнение

27

1. Прямолинейный проводник с током длиной $l = 1$ м, по которому течет ток $I = 1,5$ А, находится в магнитном поле с индукцией $B = 10$ Тл. Определите силу, действующую на проводник, если силовые линии магнитного поля параллельны оси проводника.
2. Точечный заряд $q = -2 \cdot 10^{-6}$ Кл влетает со скоростью $v = 8$ м/с в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,25$ Тл. Угол между скоростью заряда и магнитной индукцией $\alpha = 30^\circ$ (рис. 219). Определите модуль и направление силы, действующей на заряд.
3. Электрон движется по окружности со скоростью $v = 10^6$ м/с в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,01$ Тл. Определите силу, действующую на электрон, и радиус окружности.

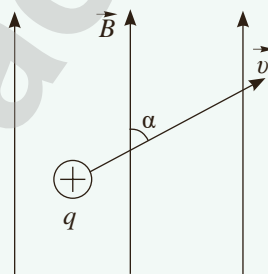


Рис. 219. К упражнению 27.2

Творческое задание

Подготовьте сообщения с ppt-презентацией (на выбор):

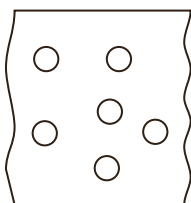
1. «Магнитная ловушка».
2. «ТОКАМАК».

§29. Магнитные свойства вещества

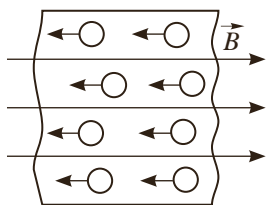
Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать современные области использования магнитных материалов (неодимовые магниты, датчики, сейсмографы, металлоискатели) и обсуждать тенденции их применения.



а)



б)

Рис. 220. Под действием силы Лоренца в диамагнетиках создается магнитное поле, противодействующее внешнему полю

I. Магнитные свойства вещества. Магнитная проницаемость

Все вещества по их магнитным свойствам условно делят на слабомагнитные и сильномагнитные. Основной характеристикой магнитных свойств вещества является магнитная проницаемость.

Магнитная проницаемость – это физическая величина, которая показывает, во сколько раз индукция магнитного поля в веществе отличается от индукции магнитного поля в вакууме:

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

где μ – магнитная проницаемость, B – магнитная индукция поля в веществе, B_0 – магнитная индукция поля в вакууме.

Магнитная проницаемость слабомагнитных веществ близка к единице. Вещества, магнитная проницаемость которых больше единицы $\mu > 1$, называют парамагнетиками, меньше единицы $\mu < 1$ – диамагнетиками. В таблице 16 Приложения приведены значения магнитных проницаемостей некоторых веществ.

Магнитная проницаемость сильномагнитных веществ достигает сотен и тысяч единиц, например, для железа – $\mu \approx 5000$, для пермаллоя, который представляет собой сплав никеля и железа, – $\mu \approx 100000$. Такие химические элементы, как железо, никель, кобальт, гадолиний, относятся к сильномагнитным веществам, обладающим наибольшей магнитной проницаемостью, поэтому их называют ферромагнетиками.

II. Природа магнитных свойств вещества

1) **Природа диамагнетизма.** При отсутствии внешнего поля диамагнетики не обладают магнитными свойствами. Микротоки, созданные электронами, движущимися по своим орбитам, создают магнитные моменты, компенсирующие друг друга (рис. 220, а). Если диэлектрик поместить в магнитное поле, то на электроны будет действовать сила Лоренца. Направление вращения электронов изменится, в веществе появится магнитное поле, направление которого будет противоположно внешнему полю (рис. 220, б). Поле, созданное диамагнетиком, ослабляет внешнее поле, согласно принципу суперпозиции полей.

2) **Природа парамагнетизма.** У парамагнетиков атомы обладают собственным магнитным моментом. Благодаря тепловому движению атомов они ориентированы

в различных направлениях и взаимно компенсируют друг друга (рис. 221, а). Под воздействием внешнего магнитного поля магнитные моменты полей, созданных орбитальным движением электронов, располагаются по направлению магнитной индукции внешнего поля (рис. 221, б). *Парамагнетики усиливают внешнее поле.*

3) *Природа ферромагнетизма.* В ферромагнетиках магнитное поле создается не только вследствие орбитального вращения электронов вокруг ядра, но и в результате их вращения вокруг собственной оси. Собственный момент вращения электронов получил название «спин» (от англ. *spin* – «вращение»). Внутри ферромагнетиков в отсутствие внешнего магнитного поля самопроизвольно существуют намагниченные области – домены. Спины электронов в этих областях ориентированы в одном направлении (рис. 222, а). При наличии внешнего магнитного поля границы доменов исчезают, их магнитные поля ориентируются вдоль вектора магнитной индукции внешнего поля, тем самым значительно усиливая внешнее магнитное поле (рис. 222, б).

При высоком значении температуры ферромагнетики теряют свойство намагниченности. Для каждого вещества температура имеет определенное значение, эту температуру называют точкой Кюри, в честь французского физика П. Кюри. *При температурах выше точки Кюри ферромагнетики становятся парамагнетиками, их магнитная проницаемость уменьшается до значения, близкого к единице $\mu > 1$.*

III. Магнитомягкие и магнитотвердые ферромагнетики

Все ферромагнетики делят на две группы: *магнитомягкие* и *магнитотвердые материалы*. Магнитомягкие ферромагнетики легко перемагничиваются. Магнитотвердые ферромагнетики длительное время сохраняют свои магнитные свойства.

IV. Применение ферромагнетиков

Магнитомягкие материалы, благодаря их свойству быстрого перемагничивания, используют для изготовления сердечников трансформаторов, электромагнитов двигателей и генераторов, в измерительных приборах магнитоэлектрической системы. Магнитотвердые ферромагнетики используют для изготовления постоянных магнитов. Со временем магнитное поле постоянных

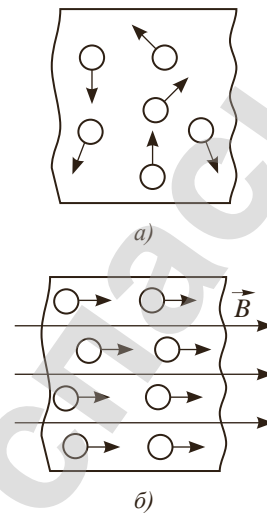


Рис. 221. Собственные магнитные моменты атомов усиливают внешнее поле, располагаясь по направлению его силовых линий

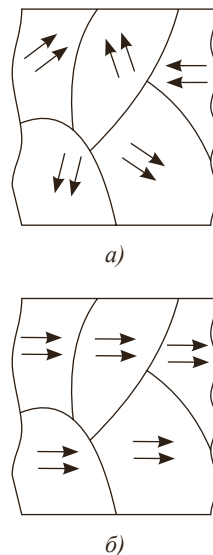


Рис. 222. Значительное усиление внешнего поля ферромагнетиками происходит вследствие вращательного движения электронов вокруг своей оси

магнитов ослабевает, при неправильном хранении магниты размагничиваются. Восстановить максимальную намагниченность постоянного магнита несложно, поместив его в поле, созданное соленоидом. Для сохранения свойства намагниченности постоянных магнитов необходимо уменьшить отдачу энергии во внешнее пространство, то есть создать замкнутый магнитопровод. Для этого полюса подковообразного магнита соединяют пластиной – якорем – из магнитомягкого железа, таким образом строгое расположение молекул внутри магнита поддерживается длительное время. Полосовые магниты при хранении складывают в пары разноименными полюсами друг к другу, полюса магнитов замыкают якорем из мягкого железа.

V. Неодимовые магниты и их применение

Самой большой силой притяжения при малых размерах обладают неодимовые магниты. Они сделаны из сплава неодима, железа и бора $NdFeB$ в различных соотношениях и покрыты антикоррозионным покрытием (рис. 223). Это сильнейшие постоянные магниты с намагниченностью, превышающей обычные магниты более чем в 18 раз. Впервые такой магнит был изготовлен в 1982 году компанией General Motors в партнерстве с Sumitomo Special Metals.

Область применения неодимовых магнитов очень широка. Они используются в тяжелой и легкой промышленности. Из них изготавливают магнитные замки, защелки, магнитные сепараторы для очистки сыпучих продуктов от металлосодержащих примесей, датчики для автоматизации различных процессов, например движения поршня гидравлического пресса (рис. 224, а). Установленные на входные двери датчики движения позволяют создать эффективную охранную систему (рис. 224, б). С появлением неодимовых магнитов стало актуальным изготовление генераторов и двигателей с постоянными магнитами. Неодимовые магниты используют при изготовлении сувениров и ювелирных украшений, появились современные застежки, пуговицы, магниты на холодильники, игрушки, например, конструкторы, кубики (рис. 225). Большой спрос получили металлоискатели, которые используют для поиска и подъема железосодержащих предметов из колодцев, водоемов, ям, расщелин и других труднодоступных мест. Они имеют специальное крепление для троса или веревки, а цилиндр диаметром 80 мм и высотой 40 мм удерживает груз до 300 кг (рис. 226).

Таблица 9. Точка Кюри для некоторых веществ

Вещество	Температура
Железо	767 °С
Никель	360 °С
Кобальт	1130 °С

Возьмите на заметку

Ферромагнетики теряют свои магнитные свойства при сильных ударах.

Ответьте на вопросы

1. Почему при точке Кюри ферромагнетики теряют свойство намагниченности?
2. Почему электромагнитным краном невозможно переносить раскаленное железо?



Рис. 223. Неодимовые магниты различных форм



а)



б)

Рис. 224. Датчики из неодимового магнита



Рис. 225. Игрушка-кубик для развития мелкой моторики



Рис. 226. Металлоискатель из неодимового магнита

Контрольные вопросы

1. Каков физический смысл магнитной проницаемости среды?
2. На какие виды делят вещества по их магнитным свойствам?
3. Какова природа диамагнетизма, парамагнетизма и ферромагнетизма?
4. В чем различие магнитомягких и магнитотвердых ферромагнетиков?
5. Где применяют ферромагнетики?

★ Упражнение

28

1. По графику (рис. 227) определите магнитную проницаемость стали при индукции B_0 намагничивающего поля, равной 0,4 и 1,2 мТл.
2. К противоположным концам диагонали каркаса в форме куба (рис. 228) подводится постоянное напряжение, по ребрам куба текут токи. Чему равна магнитная индукция поля в центре куба?

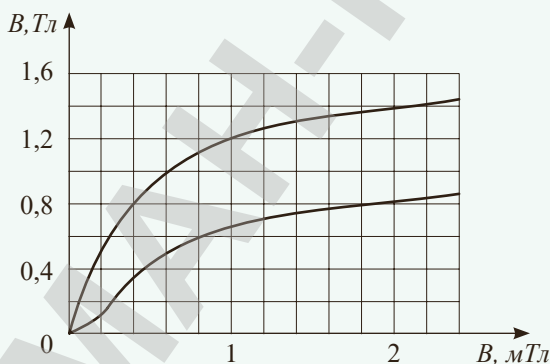


Рис. 227. К упражнению 28.1

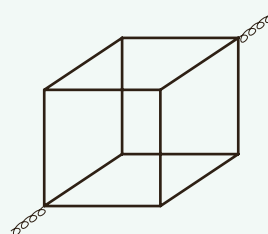


Рис. 228. К упражнению 28. 2

Творческое задание

Подготовьте сообщение с ppt-презентацией на тему: «Современные области использования магнитных материалов».

§30. Искусственные магниты. Соленоид

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- экспериментально собирать искусственные магниты и объяснять области их применения;
- объяснять факторы, влияющие на магнитное поле соленоида.



Ответьте на вопросы

1. Как намагнитить иголку?
2. Как из двух игл, одна из которых обладает магнитными свойствами, выбрать намагниченную, не используя никаких дополнительных средств?



Интересно знать!

«Камень из Магнесии» – так в древности называли магнит.

Согласно легенде, 4000 лет назад критский пастух Магнус пас своих овец в местности, которую называли Магнесия. Он заметил, что гвозди его башмаков и металлический наконечник посоха притягиваются к черному камню, на котором он стоит. Так, по одной из версий, впервые были найдены залежи магнитного железняка – магнетита. Это минерал, который люди стали использовать в качестве компаса. Если его подвесить на нитку, он будет вращаться, пока его магнитное поле не совпадет с магнитным полем Земли.

I. Естественные и искусственные магниты

В древние времена естественные магниты вытаскивали из кусков магнитного железняка. Сильные магниты достигали значительных размеров. Самый крупный известный естественный магнит, изготовленный таким способом, находится в Эстонии в университете г. Тарту. При массе 13 кг он способен удержать груз до 40 кг.

Искусственные магниты – это магниты, созданные человеком. Существуют искусственные магниты двух видов: *электромагниты* – катушки с сердечником из ферромагнетиков – и *постоянные магниты*, изготовленные из магнитотвердых ферромагнетиков или из смеси порошков различных материалов, длительное время сохраняющие магнитные свойства.

II. Способы изготовления постоянных магнитов

Английский физик Вильям Гильберт, находясь в Ирландии, исследовал магнитные свойства железных колонн. Он заметил, что все старинные колонны приобретали свойства постоянных магнитов, при этом нижний конец колонн имел южную полярность. Путешественники, побывавшие в Австралии, обнаружили, что южный полюс железных колонн расположен сверху. Дальнейшие исследования показали, что железный стержень, расположенный вдоль меридиана, со временем намагничивается: конец, обращенный к югу, обладает северной полярностью, противоположный конец – южной. *Таким образом, любое тело, содержащее ферромагнетик и внесенное в поле магнита, само становится магнитом.*

Если гвоздь или стальной стержень разместить вдоль силовых линий поля постоянного магнита или непосредственно привести в соприкосновение с постоянным магнитом, то они приобретают магнитные свойства. Полученные таким способом магниты слабые. Более сильные магниты получаются, если натирать стальной стержень магнитом в одном направлении. Искусственные магниты, полученные методом натирания, стали изготавливать в Англии еще в XVIII веке.

III. Материалы для изготовления искусственных магнитов

К концу XIX века магниты стали изготавливать из железа с добавлением вольфрама, что улучшило свойства искусственных магнитов примерно в 3 раза. Добавление кобальта усилило магнитные свойства еще в 3 раза. Современные *ферритовые магниты* изготавливают из сплава оксида железа с ферритом бария или стронция (рис. 229). Данный состав позволяет материалу сохранять свои магнитные свойства в широком температурном диапазоне от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+270\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Рис. 229. Ферритовые магниты



Рис. 230. Магниты из сплава альнико



Рис. 231. Самариевые магниты



Рис. 232. Неодимовые магниты

В начале XX века лучшим магнитным сплавом был сплав *альнико*, который состоял из алюминия, никеля и кобальта (рис. 230). С помощью магнитов из альнико можно было поднимать железные предметы массой, в 500 раз превышающей массу самого магнита. Изменив технологию изготовления магнитов с литья на спекание порошкообразного альнико, удалось создать магнит, способный поднять предмет, масса которого превосходила массу магнита в 4450 раз. Постоянные магниты на основе сплава из алюминия, никеля и кобальта отличаются высокой температурной устойчивостью и стабильностью: они способны сохранять свои магнитные свойства при температурах до $+550\text{ }^{\circ}\text{C}$

Самариевые магниты, состоящие из сплава самария с кобальтом, устойчивы к коррозии, окислению и температуре до $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 231).

В 1982 году японскими учеными разработаны *неодимовые магниты* (рис. 232). Их по праву признали самыми мощными магнитами. Основными характеристиками магнитов из сплава неодима, железа и бора являются устойчивость магнитной силы (они размагничиваются не более чем на 1–2 % за 10 лет), высокая прочность и устойчивость к коррозии.

IV. Электромагнит

В 1820 г. Х. Эрстед обнаружил, что вокруг проводника с током образуется магнитное поле. В 1825 г. британский физик и электротехник Уильям Стерджен создал

первый электромагнит. Он обмотал медной проволокой согнутый в подкову железный стержень и, пустив по проволоке ток, убедился, что железо приобретает магнитные свойства. При отключении тока магнитные свойства ослабевали, но остаточное намагничивание сохранялось. Во избежание короткого замыкания при намотке участки проволоки не должны были соприкасаться. Чем больше витков проволоки было намотано на железный сердечник, тем сильнее было магнитное поле. Стержню удалось поднять электромагнитом кусок железа массой в 4 кг.

В 1827 г. Д. Генри нашел решение проблемы с коротким замыканием в витках катушки, он обмотал медную проволоку шелковой тканью и накрутил ее на железный сердечник в несколько слоев. В 1831 г. Д. Генри сконструировал электромагнит, способный поднять 1500 кг.

V. Соленоид

Широкое применение получили катушки с большим количеством витков – соленоиды. Их длина многократно превышает диаметр: $l \gg d$. Обмотки соленоидов, как правило, изготавливают из медного провода с однослойной или многослойной намоткой. Сердечники могут быть из различных материалов с высоким значением коэффициента магнитной проницаемости: железными, чугунами, ферритами.

При прохождении тока вокруг соленоида образуется магнитное поле, аналогичное магнитному полю

Ответьте на вопросы

1. Какие планеты Солнечной системы обладают магнитным полем?
2. Какова причина возникновения магнитного поля вокруг звезд?



Рис. 233. Магнитное поле Земли

3. Какое значение имеет магнитное поле Земли (рис. 233) в сохранении благоприятных условий для жизни?
4. Почему стальные рельсы и полосы, лежащие на складах, со временем намагничиваются?

Возьмите на заметку!

Удары и резкие изменения температуры постоянного магнита приводят к его размагничиванию. При нагревании до точки Кюри магнитные свойства полностью исчезают.

Задание 1

Составьте технологический процесс изготовления компаса, изображенного на рисунке 235.

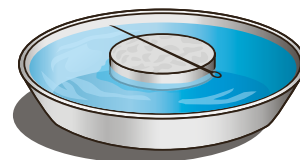


Рис. 235. Компас своими руками

Интересно знать!

Первый компас, появившийся в Китае в I тыс. до нашей эры, представлял собой медный лист с изображенными на нем сторонами света (рис. 234). Намагниченный указатель имел форму ковша, который символизировал созвездие Большой Медведицы. Ковшик приводили во вращение, при остановке ручка указывала на юг.



Рис. 234. Древний китайский компас

полосового магнита (рис. 236). Тот конец, из которого выходят силовые линии, является *северным полюсом* соленоида, а конец, в который силовые линии входят – *южным полюсом*. Полярность соленоида зависит от направления тока в нем. Внутри соленоида силовые линии параллельны, это свидетельствует о том, что магнитное поле однородное.

Если внутрь соленоида поместить стальной брусок, то через некоторое время под действием магнитного поля соленоида брусок намагнитится. Этот способ применяют при изготовлении *постоянных магнитов* (рис. 237).

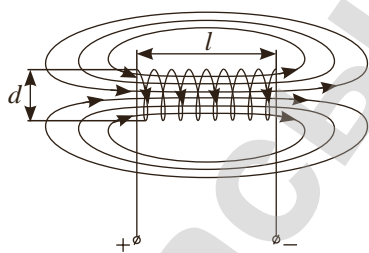


Рис. 236. Магнитное поле внутри соленоида однородное

VI. Магниты в нашей жизни

Ферритовые магниты в форме колец, брусков и подков широко используются как в промышленности, так и в быту, технике и электронике. Их используют в акустических системах, генераторах, двигателях постоянного тока. В автомобилестроении ферритовые магниты устанавливают в стартеры, стеклоподъемники, системы охлаждения и вентиляторы.

Сильный магнит из сплава самария-кобальта идеально подходит для агрессивных сред и сложных условий эксплуатации. Благодаря своим антикоррозионным свойствам самариевые магниты получили применение в космических аппаратах, авиационной и компьютерной технике. Их применяют в электродвигателях, генераторах, подъемных системах.

Мощные неодимовые постоянные магниты открыли новые возможности для самых разных отраслей промышленности. Их используют в электротехнике, медицинском оборудовании, в том числе в магнитно-резонансных томографах, фильтрах и очистных устройствах.

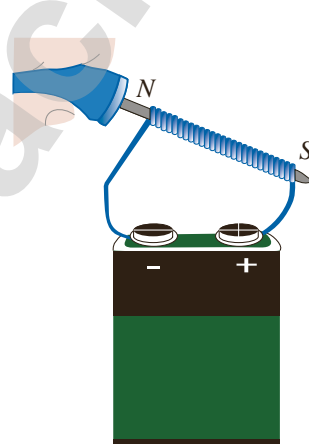


Рис. 237. Гвоздь, внесенный в магнитное поле соленоида, становится постоянным магнитом

VII. Магниты в современной науке

Магниты широко применяют и в современной науке. Магнитные материалы нужны для работы в СВЧ-диапазонах, для магнитозаписи и воспроизведения, создания магнитных запоминающих устройств. Магнитострикционные преобразователи позволяют определять глубину моря. Без магнитометров с высокочувствительными магнитными элементами трудно обойтись, если нужно измерить ничтожно слабые магнитные поля. Магнитная дефектоскопия – метод, позволяющий отыскивать поры или примеси в металлических слитках.

Магнетохимия – раздел физической химии, в котором изучается связь между магнитными и химическими свойствами веществ; кроме того, магнетохимия исследует влияние магнитных полей на химические процессы. Изучение связи между магнитными и химическими свойствами позволяет выяснить особенности химического строения вещества.

**Вспомните!**

Если правую руку положить на соленоид так, чтобы четыре пальца показывали направление тока в нем, то отогнутый большой палец укажет на северный полюс соленоида.

**Задание 2**

1. Определите полюса магнитного поля соленоида на *рисунке 236*.
2. Рассмотрите *рисунок 237*, проверьте, верно ли изображены полюса постоянного магнита.

**Эксперимент**

Изготовьте электромагнит (*рис. 237*).

Исследуйте его действие с помощью железных опилок и магнитной стрелки.

1. Определите полюса магнита по правилу правой руки и с помощью магнитной стрелки. Поменяйте направление тока в обмотке. Как это повлияет на полярность концов катушки?
2. Выясните, как повлияет на действие электромагнита изменение силы тока в обмотке, количества витков, материала сердечника и расстояния от электромагнита до железных опилок.

Контрольные вопросы

1. Какие магниты называют искусственными?
2. Какие два вида искусственных магнитов существует и как их изготовить?
3. Что называют соленоидом? Каковы его основные характеристики?
4. Где используются магниты?

**Упражнение****29**

1. Вертикальный магнит притягивает к себе железный шарик, помещенный на таком расстоянии от магнита, что это притяжение уравнивает силу тяжести, действующую на шарик, так что он может висеть в воздухе без опоры. Будет ли это равновесие устойчивым или нет? Куда будет двигаться шарик, если мы чуть-чуть поднимем или опустим его из положения равновесия?
2. Железный кубик, лежащий на гладком стекле, притягивается к магниту, тоже лежащему на этом стекле. Кубик скользит по стеклу. Как он движется: равномерно, равноускоренно или с возрастающим ускорением?

Творческое задание

Подготовьте сообщение с ppt-презентацией (на выбор):

1. «Порошковая металлургия – современная технология изготовления постоянных магнитов».
2. «Виды компасов, их устройство и принцип действия».
3. «Современные области использования магнитных материалов».

Итоги главы 13

Магнитная индукция поля проводника с током	Силы взаимодействия	Магнитная проницаемость вещества
Для прямого проводника $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$	сила Ампера $F_A = BI \cdot l \sin \alpha$	$\mu = \frac{B}{B_0}$
Для кругового тока $B = \frac{\mu_0 I}{2R}$	сила Лоренца $F_L = \frac{F_A}{N}$	Магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{A^2}$
Для соленоида $B = \mu_0 nI$	Принцип суперпозиции полей $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$	

Законы, правила**Правило буравчика**

Если поступательное движение буравчика совместить с направлением тока в проводнике, то вращательное движение рукоятки укажет направление силовых линий магнитного поля.

Правило правой руки

Если правую руку положить на катушку так, чтобы четыре пальца указывали направление тока в ее витках, то большой палец, отогнутый на 90° , укажет направление магнитного поля.

Закон Ампера

На проводник с током, помещенный в однородное магнитное поле, действует сила, пропорциональная силе тока и индукции магнитного поля.

Правило левой руки

Если левую руку расположить так, чтобы вектор индукции входил в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы Ампера.

Глоссарий

Диамагнетики – вещества, магнитная проницаемость которых меньше единицы $\mu < 1$.

Искусственные магниты – магниты, созданные человеком.

Магнитное поле – вид материи, особенностью которой является действие на движущийся электрический заряд, проводники с током, тела, обладающие магнитным моментом, с силой, зависящей от вектора скорости заряда и направления силы тока.

Магнитная проницаемость – физическая величина, которая показывает, во сколько раз индукция магнитного поля в веществе отличается от индукции магнитного поля в вакууме.

Парамагнетики – вещества, магнитная проницаемость которых больше единицы $\mu > 1$.

Силовые линии магнитного поля – линии, касательные к которым в каждой точке указывают направление вектора магнитной индукции.

Сила Ампера – сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током.

Сила Лоренца – сила, которая действует со стороны магнитного поля на движущуюся в нем заряженную частицу.

Ферромагнетики – вещества с большой магнитной проницаемостью.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Явление электромагнитной индукции открыто Майклом Фарадеем в 1831 г. Оно окончательно установило неразрывную связь между электрическим током и магнитным полем. Благодаря открытию закона электромагнитной индукции в XIX веке началось бурное развитие электротехники и радиотехники. На основании явления электромагнитной индукции были созданы индукционные генераторы электрической энергии и трансформаторы. Стала возможной передача электрической энергии на большие расстояния.

Изучив главу вы сможете:

- объяснять возникновение электродвижущей силы при изменении магнитного потока;
- объяснять правило Ленца;
- объяснять принцип действия электромагнитных приборов (электромагнитное реле, генератор, трансформатор);
- объяснять практическую важность магнитно-резонансной томографии.

§31. Закон электромагнитной индукции

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять возникновение электродвижущей силы при изменении магнитного потока;
- объяснять правило Ленца.

Эксперимент

Проведите опыты с катушкой и постоянным магнитом, изображенные на рисунках 238, а также с использованием электромагнита. Сравните выводы, полученные в результате опыта, с выводами в тексте учебника.

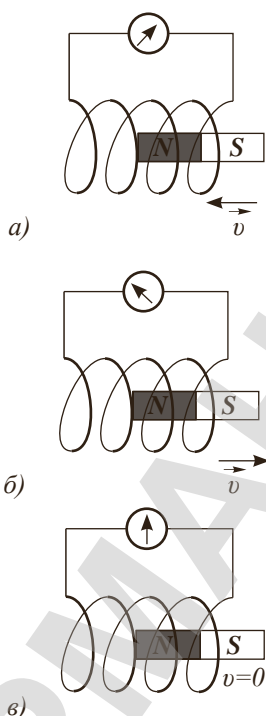


Рис. 238. Направление и сила индукционного тока зависят от направления и скорости движения магнита

I. Явление электромагнитной индукции

Используя современные приборы, несложно выяснить, при каких условиях в замкнутом проводнике возникает индукционный ток. Если в катушку, замкнутую на гальванометр, вдвигать магнит, то стрелка гальванометра отклонится, что свидетельствует о появлении индукционного тока (рис. 238, а). При извлечении магнита стрелка отклонится в противоположную сторону (рис. 238, б), ток в проводнике изменит свое направление. Если магнит не движется относительно катушки, то стрелка гальванометра установится на нуле, тока в катушке не будет (рис. 238, в).

Перемещение магнита относительно катушки приводит к изменению числа силовых линий, пронизывающих ее, поскольку вблизи магнита силовые линии плотнее (рис. 239). Следовательно, индукционный ток появляется в проводнике, если он находится в переменном магнитном поле.

Явление возникновения индукционного тока в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока, проходящего через него, называют явлением электромагнитной индукции.

Приблизим к катушке с переменным током проводящий контур, замкнутый на лампу малой мощности таким образом, чтобы оси катушки и контура расположились вдоль одной прямой (рис. 240). Лампа начнет светиться, при этом нет необходимости перемещать катушку и контур относительно друг друга.

Возьмите на заметку!

Переменное магнитное поле можно создать различными способами: перемещая постоянный магнит, включая и отключая цепь постоянного тока с электромагнитом, подключив электромагнит к источнику переменного тока.

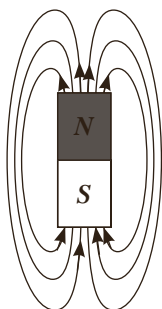


Рис. 239. Магнитное поле
полосового магнита
неоднородное

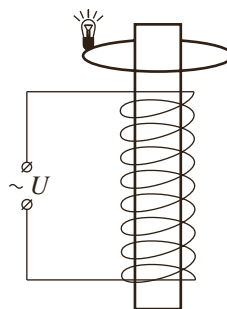


Рис. 240. Появление индукционного тока
в замкнутом контуре, расположенном
в переменном магнитном поле

Явление электромагнитной индукции в замкнутом проводящем контуре наблюдается при следующих условиях:

- 1) если контур движется в постоянном магнитном поле так, что число силовых линий магнитного поля пронизывающих контур, меняется;
- 2) если контур покоится в переменном магнитном поле.

II. Магнитный поток. Способы изменения магнитного потока

Густота силовых линий магнитного поля определяет его силовую характеристику – магнитную индукцию. Число линий магнитного поля, пронизывающих контур, характеризует магнитный поток.

Магнитный поток – это число линий магнитной индукции, пронизывающих замкнутый контур, внесенный в магнитное поле.

Магнитный поток, пронизывающий контур, можно изменить тремя способами:

- 1) увеличением или уменьшением магнитной индукции поля, о чем говорилось ранее;
- 2) изменением площади контура, например, перемещением подвижной стороны рамки или изменением формы рамки под воздействием внешней силы (рис. 241);
- 3) вращением контура в магнитном поле таким образом, чтобы число линий, пронизывающих контур, менялось (рис. 242 а, б).

В соответствии со способами изменения магнитного потока запишем формулу для его расчета:

$$\Phi = BS \cos \alpha, \quad (1)$$

где Φ – магнитный поток, пронизывающий контур, B – магнитная индукция поля, S – площадь рамки, α – угол между вектором магнитной индукции и нормалью к площади рамки (рис. 243).

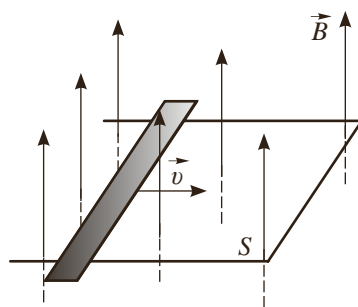


Рис. 241. Изменение
магнитного потока
через замкнутый контур
посредством изменения
площади

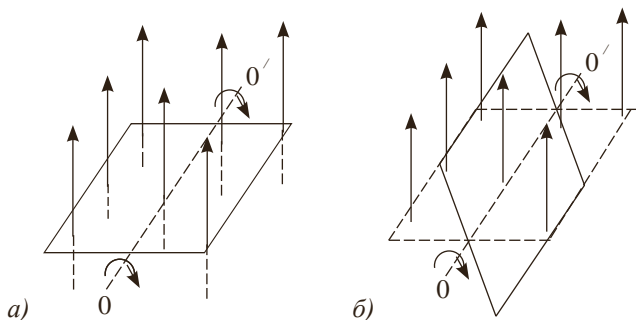


Рис. 242. Изменение магнитного потока через замкнутый контур в результате вращения рамки

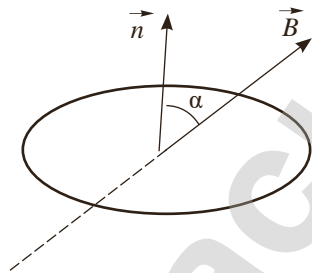


Рис. 243. Нормаль к плоскости рамки образует с вектором магнитной индукции угол α

Магнитный поток – это физическая величина, равная произведению индукции магнитного поля, пронизывающего контур, на площадь контура и косинус угла между вектором магнитной индукции и нормалью к площади рамки.

Из (1) следует, что:

$$\Phi = B_n S, \quad (2)$$

где $B_n = B \cos \alpha$ (3) – составляющая вектора \vec{B} , перпендикулярная плоскости контура.

Единица измерения магнитного потока в СИ – *1 вебер*. Она названа в честь немецкого ученого-физика Вильгельма Вебера, главные работы которого относятся к области магнитных явлений и электричества.

$$[\Phi] = 1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2.$$

III. Закон электромагнитной индукции

Появление индукционного тока в проводящем замкнутом контуре свидетельствует о возникновении электрического поля без видимого источника тока. Это поле создано переменным магнитным полем, его силовые линии не имеют ни начала, ни конца. *Такое поле называют вихревым*. Чем быстрее меняется магнитный поток, пронизывающий контур, тем сильнее электрическое поле, тем больше его ЭДС:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}, \quad (3)$$

в этом заключается закон электромагнитной индукции:

ЭДС индукции вихревого поля, созданного переменным магнитным полем, равна изменению магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, в единицу времени.



Вильгельм Эдуард Вебер (1804–1891) – немецкий физик. Основные работы Вебера посвящены электромагнетизму, акустике, тепловым явлениям, молекулярной физике. С 1840 г. Вебер занимался разработкой систем электростатических и магнитных единиц и определением связи между ними. Его именем названа единица магнитного потока.

Если контур состоит из нескольких витков, то ЭДС возрастает в N раз:

$$\varepsilon_i = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}, \quad (4)$$

где N – число витков.

Знак минус в записи закона определяет направление индукционного тока под воздействием вихревого поля.

IV. Энергия магнитного поля

Накапливать энергию магнитного поля способна катушка. В момент подключения электрической цепи содержащей катушку, источник постоянного тока должен совершить работу против индукционного электрического поля созданного в катушке. Энергия магнитного поля катушки при этом увеличивается.

Запишем формулу расчета энергии магнитного поля на основе аналогии инерционных свойств катушки и движущегося тела. Инерционность катушки характеризуется индуктивностью L , инерционные свойства движущегося тела – массой m . Физической величиной, аналогичной скорости движения тела v , является сила тока I в катушке. На основе аналогии кинетической энергии движущегося тела W_k с энергией магнитного поля $W_{м.п.}$ катушки можно записать:

$$W_{м.п.} = \frac{LI^2}{2}.$$

V. Правило Ленца

Взаимодействие замкнутой на гальванометр катушки и постоянного магнита в рассмотренных случаях происходит в соответствии с правилом Ленца.

Индукционный ток всегда имеет такое направление, при котором его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызывающему этот ток.

Для определения направления индукционного тока с использованием правила Ленца, необходимо воспользоваться следующим алгоритмом:

1. Установить направление линий магнитной индукции внешнего для замкнутого проводящего контура поля \vec{B} .
2. Выяснить, увеличивается или уменьшается поток магнитной индукции пронизывающий контур.



Вспомните!

Единицы измерения:

- индуктивности $[L]$ – 1 Гн;
- силы тока $[I]$ – 1 А;
- энергии $[W]$ – 1 Дж.



Ответьте на вопросы

1. Почему в законе электромагнитной индукции

$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ поставлен знак «минус»?

2. Почему колебания стрелки компаса затихают быстрее, если корпус прибора латунный, и медленнее, если корпус пластмассовый?
3. Почему падающее замкнутое проводящее кольцо, насаживаясь на полосовой магнит, замедляет свое движение? Почему замедление не наблюдается, если кольцо не замкнуто?



Задание

Используя алгоритм, определите направление индукционного тока в замкнутом проводящем контуре, изображенном на рисунке 244. Постоянный магнит приближается к контуру.

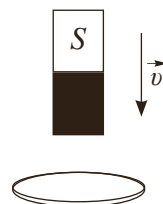


Рис. 244. К заданию

3. Установить направление линий магнитной индукции \vec{B}_i поля, созданного индукционным током, в соответствии с правилом Ленца:
 - если поток увеличивается ($\Delta\Phi > 0$), то линии индукционного поля должны быть направлены противоположно линиям магнитной индукции внешнего поля ($\vec{B}_i \uparrow \downarrow \vec{B}$);
 - если поток уменьшается ($\Delta\Phi < 0$), то линии магнитной индукции индукционного и внешнего поля должны быть направлены в одну сторону ($\vec{B}_i \uparrow \uparrow \vec{B}$).
4. По направлению вектора \vec{B}_i определить направление индукционного тока I_i , используя правило буравчика или правило правой руки.

Определив направление вектора магнитной индукции и направление индукционного тока, несложно убедиться, что правило Ленца согласуется с законом сохранения энергии.



Вспомните!

Если поступательное движение буравчика совместить с направлением тока в проводнике, то вращательное движение рукоятки укажет направление силовых линий магнитного поля.

Если взять проводящий контур в правую руку так, чтобы четыре пальца показывали направление тока в нем, то отогнутый большой палец покажет направление силовых линий магнитного поля внутри контура.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Замкнутый прямоугольный контур расположен в плоскости прямого проводника с током. Сила тока в проводнике возрастает. Определите направление индукционного тока в контуре и силы Ампера, действующей на контур.

Решение:

В решении задачи воспользуемся алгоритмом определения направления индукционного тока по правилу Ленца.

1. Установим направление линий магнитной индукции внешнего поля \vec{B} .

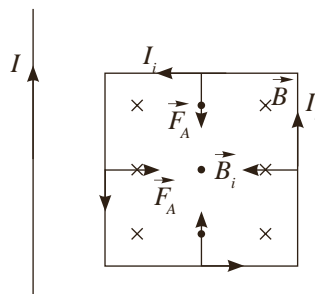
Внешнее поле создает проводник с током. Линии магнитной индукции внутри контура перпендикулярны плоскости рамки и направлены от нас (см. рис.), изобразим их в виде крестиков-«оперений» стрел.

2. Выясним, увеличивается или уменьшается поток магнитной индукции, пронизывающий рамку.

По условию задачи сила тока возрастает, что свидетельствует об увеличении потока $\Delta\Phi > 0$.

3. Установим направление линий магнитной индукции \vec{B}_i поля, созданного индукционным током, в соответствии с правилом Ленца.

$\Delta\Phi > 0$, следовательно, \vec{B}_i будет направлен в сторону, противоположную вектору магнитной индукции внешнего поля: $\vec{B}_i \uparrow \downarrow \vec{B}$. Изобразим вектор \vec{B}_i на рисунке в виде точки – стрелы, направленной перпендикулярно плоскости рамки вверх.



4. Используя правило буравчика, по направлению вектора \vec{B}_i определим направление индукционного тока I_i .

Индукционный ток направлен против часовой стрелки.

Направление силы Ампера, действующей на стороны рамки, определим по правилу левой руки. Силы Ампера сжимают рамку, стремясь уменьшить нарастающий магнитный поток.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
2. При каком условии в замкнутом проводящем контуре возникает индукционный ток?
3. Что характеризует магнитный поток?
4. Какое поле называют вихревым?
5. В чем заключается закон электромагнитной индукции?
6. Что устанавливают по правилу Ленца?

★ Упражнение

30

1. Проволочное кольцо расположено в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,5$ Тл так, что плоскость кольца составляет с силовыми линиями поля угол $\alpha = 30^\circ$. При этом магнитный поток через кольцо $\Phi = 24$ Вб. Определите радиус кольца.
2. Определите скорость изменения магнитного потока в соленоиде, состоящем из $N = 400$ витков, при возбуждении в нем ЭДС индукции $\varepsilon_i = 100$ В.
3. Магнитный поток, пронизывающий катушку, изменяется со временем, как показано на рисунке (рис. 245). Начертите график изменения ЭДС индукции, наводимой в катушке. Каково максимальное значение ЭДС индукции, если в катушке 400 витков?
4. Определите энергию магнитного поля катушки индуктивностью $0,04$ Гн при увеличении силы тока в цепи до 5 А.

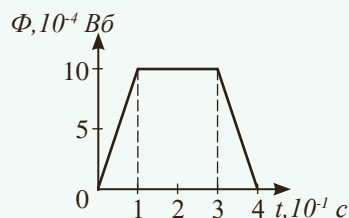


Рис. 245. К упражнению 30.3

Творческое задание

Выясните, какое практическое применение получило явление электромагнитной индукции. Подготовьте сообщение с ppt-презентацией.

§32. Электромагнитные приборы

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять принцип действия электромагнитных приборов (генератора, трансформатора, электромагнитного реле).



Задание 1

Поясните значение слов «униполярный», «магнитоэлектрический», «генератор».



Ответьте на вопросы

1. Почему между осью и краем диска генератора Фарадея индуцируется ЭДС?
2. Какая сила действует на движущиеся заряженные частицы в магнитном поле?



Рис. 246.
Генератор
Фарадея, 1831 г.

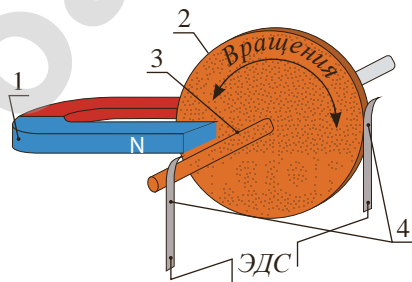


Рис. 247. Модель
магнитоэлектрического
генератора Фарадея: 1) магнит;
2) вращающийся медный диск;
3) ось диска; 4) щетки

II. Генератор индукционного тока

В современной энергетике используются индукционные генераторы постоянного и переменного тока (рис. 248, 249).



Рис. 248. Генератор
постоянного тока
4 ГПЭМ 55



Ответьте на вопросы

1. Как создается электрический ток в промышленной сети?
2. Почему приборы разной мощности подключают в одну и ту же сеть?
3. Как производится автоматическое управление электрическими цепями?



Рис. 249. Машинный зал электростанции.
Парогенератор

Генератор состоит из ротора и статора. В промышленных генераторах ротор, представляющий собой электромагнит, создает магнитное поле, в обмотке статора создается ЭДС (рис. 250). Для подачи питающего напряжения в ротор используют контактные кольца и щетки.

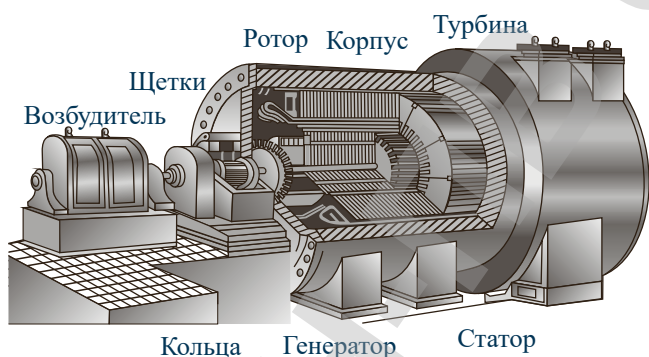


Рис. 250. Принципиальная схема промышленного генератора переменного тока

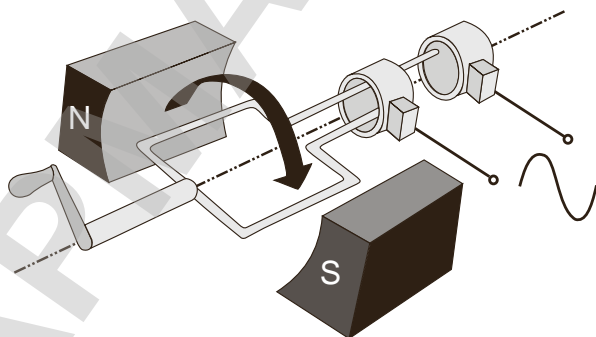


Рис. 251. Модель генератора переменного тока

? Ответьте на вопросы

1. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
2. Почему в маломощных генераторах в статоре, представляющем собой электромагнит, создают магнитное поле, а на концах обмотки ротора получают разность потенциалов?
3. Почему в генераторах постоянного тока используют полукольца, а в генераторах переменного тока – кольца?
4. Почему обмотки ротора и статора представляют собой множество соединенных между собой рамок?
5. Каким способом уменьшают частоту вращения ротора, не меняя частоту промышленного тока?
6. Какой закон лежит в основе действия генератора индукционного тока?

Задание 2

Рассмотрите модель генератора, изображенного на рисунке 251. Назовите основные части генератора. Объясните принцип его действия.

III. Трансформатор

Трансформатор – это устройство, преобразующее ток в цепи переменного тока (рис. 252). Он служит для повышения или понижения напряжения тока практически без потери мощности. Силовые трансформаторы, установленные на электростанциях, преобразуют ток для передачи электроэнергии на большие расстояния при высоких напряжениях до 1150 кВ. В местах потребления происходит понижение напряжения (рис. 253).

Трансформатор состоит из магнитопровода и двух обмоток: первичной и вторичной (рис. 254). К первичной обмотке подается электроэнергия от генератора, к вторичной обмотке подключаются потребители. Магнитопровод изготавливают из электротехнической листовой стали. Магнитный поток, пронизывающий обмотки трансформатора, создает ЭДС индукции во вторичной обмотке. Изменение магнитного потока в обмотках происходит синфазно: $\Phi = BS \cos \omega t$, поэтому отношение ЭДС индукций на первичной и вторичной обмотках равно отношению числа витков в обмотках:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (1)$$

Если число витков в первичной обмотке больше, чем во вторичной $N_1 > N_2$, то трансформатор называют понижающим. Коэффициент трансформации $k = \frac{N_1}{N_2} > 1$. Если $N_1 < N_2$, то трансформатор повышающий, коэффициент трансформации $k < 1$. На осно-



Рис. 252. Трансформатор



Рис. 253. Силовой трансформатор на подстанции

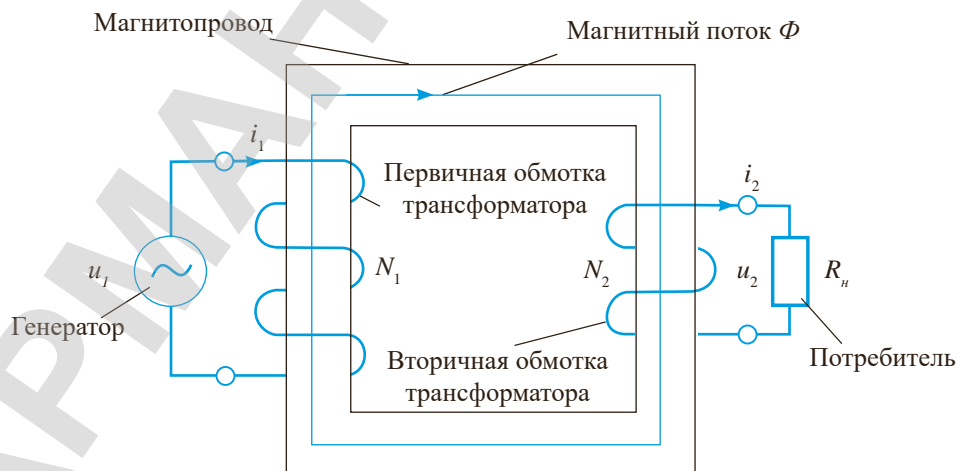


Рис. 254. Принципиальная схема устройства трансформатора

вании формулы (1) коэффициент трансформации можно определить как отношение ЭДС индукции в обмотках. Если не учитывать потери на обмотках трансформатора и потери на перемагничивание сердечника, то коэффициент трансформации равен отношению напряжений на входе и выходе трансформатора:

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{U_1}{U_2}. \quad (2)$$

Коэффициент полезного действия трансформаторов достигает 98 %. Предположив, что мощность тока в обмотках не изменилась, легко доказать, что коэффициент трансформации равен отношению:

$$k = \frac{I_2}{I_1},$$

где I_2 – сила тока во вторичной обмотке, I_1 – сила тока в первичной обмотке.

IV. Электромагнитное реле

Электромагнитное реле – это переключающее устройство для управления цепью большей мощности (рис. 255). Реле состоит из электромагнита и якоря (рис. 256). При подаче тока на обмотку электромагнита (1), он притягивает якорь (2) и замыкает контакты (3) мощной цепи. На рисунке 257 изображена принципиальная схема устройства для подачи (сброса) воды в бассейн (4). Цепь с подключенным насосом управляется маломощной цепью электромагнита.

Электромагнитные реле получили широкое распространение в сфере производства и распределения электрической энергии. Релейная защита высоковольтных линий обеспечивает безаварийный режим работы подстанций. В настоящее время электромагнитный тип реле широко используется в системах



Задание 3

1. Предположив, что мощность тока в обмотках тока постоянна:

$$P_1 = P_2,$$

докажите, что:

$$k = \frac{I_2}{I_1}.$$

2. Используя закон Джоуля – Ленца:

$$Q = I^2 R t.$$

докажите, что потери электроэнергии в линиях электропередач при высоком напряжении меньше, чем при низком.



Рис. 255. Электромагнитное реле



Задание 4

Рассмотрите рисунок 257. Объясните принцип действия реле.

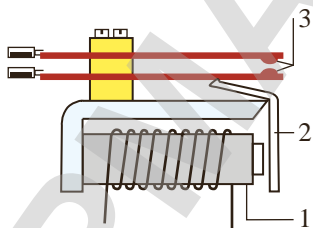


Рис. 256.

Принципиальная схема электромагнитного реле

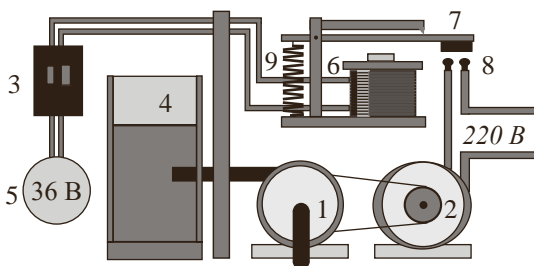


Рис. 257. Схема устройства для подачи (сброса) воды:

- 1) насос; 2) электродвигатель; 3) выключатель; 4) бассейн;
- 5) источник тока; 6) электромагнит; 7) стальная пластина;
- 8) контакты; 9) пружина

управления производственными и конвейерными линиями, конденсаторными установками для плавного пуска электрических двигателей высокой мощности.

Реле управления используется в различных видах бытовой техники, например: холодильниках, стиральных машинах.



Интересно знать!

Система управления конвейерными линиями на одном из элеваторов, построенная из современных полупроводниковых элементов, постоянно выходила из строя. Причиной тому было статическое электричество, созданное при движении зерна по конвейерной ленте. Проблема была решена, когда пульт управления был перенесен в другое помещение и дополнен реле.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
2. Объясните принцип действия генератора индукционного тока.
3. В чем различие индукционного генератора переменного тока от генератора постоянного тока?
4. Для чего необходим трансформатор?
5. Объясните принцип действия трансформатора.
6. Из чего состоит электромагнитное реле? Каков принцип его действия?



Упражнение

31

1. Что произойдет, если первичную обмотку подключить к источнику постоянного тока?
2. Под каким напряжением находится первичная обмотка трансформатора, имеющая 1000 витков, если во вторичной обмотке 3500 витков и напряжение 105 В?
3. Трансформатор, содержащий в первичной обмотке 840 витков, повышает напряжение с 220 до 660 В. Каков коэффициент трансформации? Сколько витков содержится во вторичной обмотке?
4. Мощность, потребляемая трансформатором, 90 Вт. Определите силу тока во вторичной обмотке, если напряжение на зажимах вторичной обмотки 12 В и КПД трансформатора 75 %.

Творческое задание

1. Подготовьте сообщение по темам (на выбор):
 - 1) «Из истории создания генераторов тока».
 - 2) «Виды трансформаторов и их назначение».
2. Разработайте и изобразите на рисунке схему управления электромагнитным реле цепью высокой мощности.

§33. Магнитно-резонансная томография

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять практическую важность магнитно-резонансной томографии.



Ответьте на вопросы

1. Почему МРТ, в отличие от флюорографии и рентгена, можно проходить многократно за короткий промежуток времени?
2. Почему точность диагностики МРТ значительно превышает точность других методов?

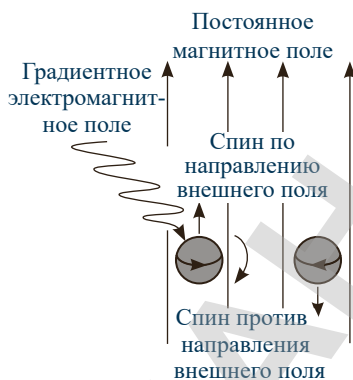


Рис. 258. Переворот спина протона во внешнем постоянном магнитном поле

I. Ядерный магнитный резонанс (ЯМР)

Ядра, состоящие из протонов и нейтронов, имеют собственный магнитный момент, так как согласно квантовой теории элементарные частицы обладают спином – магнитным моментом. Если нет внешнего магнитного поля, то магнитный момент ядер ориентирован произвольно. Ядро водорода, состоящее из одного протона, в поле постоянного магнита меняет свою пространственную ориентацию только в двух направлениях (рис. 258). Эти два состояния ядра различаются по значению энергии, при этом протон может скачкообразно переходить из одного состояния в другое. Переход сопровождается поглощением или выделением кванта энергии. Энергия протона больше в том случае, если его магнитный момент направлен в сторону, противоположную внешнему полю. Переход в состояние с большей энергией возможен, если дополнительная энергия кванта электромагнитного поля равна разности энергий протона в двух состояниях. Поле, передающее дополнительные кванты энергии, называют *градиентным*, а частоту квантов – *резонансной частотой*. Изменение ориентации протонов сопровождается резонансным поглощением квантов облучающего электромагнитного поля. Это явление было названо *ядерным магнитным резонансом (ЯМР)*. На рисунке 259 изображена принципиальная схема установки для осуществления ЯМР.

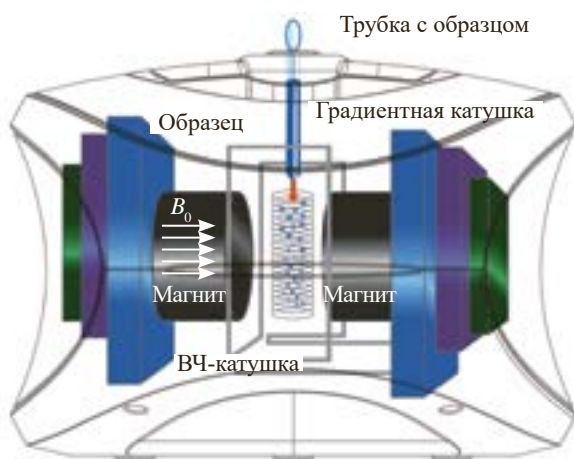


Рис. 259. Установка для ЯМР



Задание 1

Рассмотрите схему установки для ЯМР. Поясните принцип его действия.

ЯМР широко используется в физике, химии и биохимии для исследования структуры твердых тел и сложных молекул.

В медицине с помощью ЯМР получают пространственное изображение внутренних органов человека.

II. Из истории развития магнитно-резонансной томографии (МРТ)

Врач и экспериментатор медицинского центра Бруклина Реймонд Дамадьян обнаружил, что ЯМР водорода в раковой ткани отличается от здоровой ткани, потому что опухоли содержат больше воды. Чем больше воды, тем больше атомов водорода. После выключения аппарата МРТ остаточные колебания радиоволн от раковой ткани длятся дольше, чем от здоровой ткани. Совместно с врачами-аспирантами Майклом Голдсмитом и Ларри Минковым он сконструировал первый аппарат МРТ. В 1977 г. в течение около пяти часов было проведено первое сканирование человеческого тела, в 1978 г. были проведены первые сканы пациента с раком груди. Аппараты для МРТ быстро усовершенствовались. Уже в 1980 г. ученым Эдельштейном и его сотрудниками было продемонстрировано изображение организма человека, на съемку которого они потратили около пяти минут. К 1986 г. длительность отображения была уменьшена до 5 секунд без потери качества изображений. В 1988 г. Думоулин усовершенствовал метод МРТ-ангиографии, которая показывала отображение кровотока без применения контрастирующих препаратов. Затем в 1989 г. был представлен метод планарной томографии, который применялся для визуализации участков головного мозга, ответственных за двигательную и мыслительную функции.

III. Принцип работы МРТ, преимущества МРТ как метода диагностики

Магнитно-резонансная томография является медицинским диагностическим методом, который создает изображения тканей и органов человеческого тела с использованием принципа ядерного магнитного резонанса. МРТ может генерировать изображение тонкого среза ткани любой части человеческого тела – под любым углом и в любом направлении. МРТ позволяет получить изображение человеческих органов и тканей с помощью электромагнитного

Возьмите на заметку

Спектроскопия ЯМР, как метод изучения свойств молекул появилась в середине 40-х годов XX века и за очень короткое время, уже к середине 1950-х годов, стала одним из ключевых методов изучения органических соединений. Позднее этот метод начал активно применяться для изучения различных неорганических соединений.

Запомните!

Условие для наблюдения ЯМР водорода – облучение образца электромагнитными волнами с частотой

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h},$$

где E_1 – энергия состояния ядра с меньшей энергией, E_2 – энергия состояния ядра с большей энергией.

Ответьте на вопрос

Почему ЯМР-спектр для различных ядер отличается?

Задание 2

Используя текст учебника и информацию из сети Интернет, составьте хронологию исследования ЯМР и создания установок для МРТ.

поля. Протоны являются основным элементом магнитных свойств тканей организма.



Запомните!

Магнитно-резонансная томография – это метод исследования внутренних органов и тканей человека с использованием физического явления ядерного магнитного резонанса. Метод основан на измерении электромагнитного отклика атомных ядер, возбужденных градиентным электромагнитным полем в постоянном магнитном поле высокой напряженности.

МРТ создает устойчивое состояние магнетизма в человеческом теле, когда тело помещено в постоянное магнитное поле, затем стимулирует организм с помощью радиоволн, что меняет стационарную ориентацию протонов. После прекращения подачи радиоволн МРТ регистрирует электромагнитное излучение организма. Полученный сигнал используется для построения внутренних изображений тела с помощью обработки информации на компьютере. На рисунках 260 и 261 представлены изображения на экране компьютера, полученные с помощью МРТ.

Изображение МРТ не является фотографическим, это компьютеризированное изображение радиосигналов, излучаемых человеческим телом. МРТ превосходит по своим возможностям компьютерную томографию, так как в ней не используется ионизирующее излучение, как при КТ. Принцип ее работы основан на использовании безвредных электромагнитных волн.

В настоящее время МРТ стала отдельной областью медицины, без которой сложно представить себе диагностику. МРТ – безопасный способ обследования. Он позволяет обнаружить на самых ранних этапах развития тяжелые заболевания и патологии: новообразования, нарушения сосудов, функций сердца, мозга, внутренних структур организма, изменения позвонков, межпозвоночные грыжи, остеохондроз, переломы и другие травмы, воспалительные и инфекционные процессы. Помимо этого, томография позволяет визуализировать структуру органов и тканей, измерять скорость тока спинномозговой жидкости и крови, оценивать уровень диффузии в тканях, определять активацию коры головного

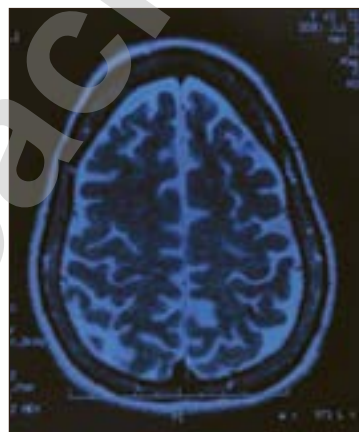


Рис. 260. Изображение головного мозга, полученное на экране компьютера МРТ

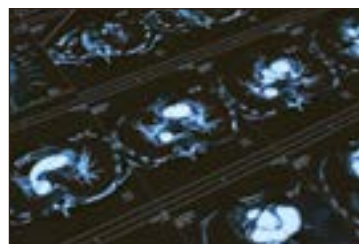


Рис. 261. Наблюдение за работой сердца в реальном времени с применением технологии МРТ

мозга при функционировании органов, за которые отвечает этот участок коры. Функциональная МРТ стала играть важную роль в области визуализации процессов головного мозга с начала 90-х годов прошлого века.



Задание 3

Сравните томограф (рис. 262) с установкой ЯМР (рис. 259). В чем их сходства и различия?

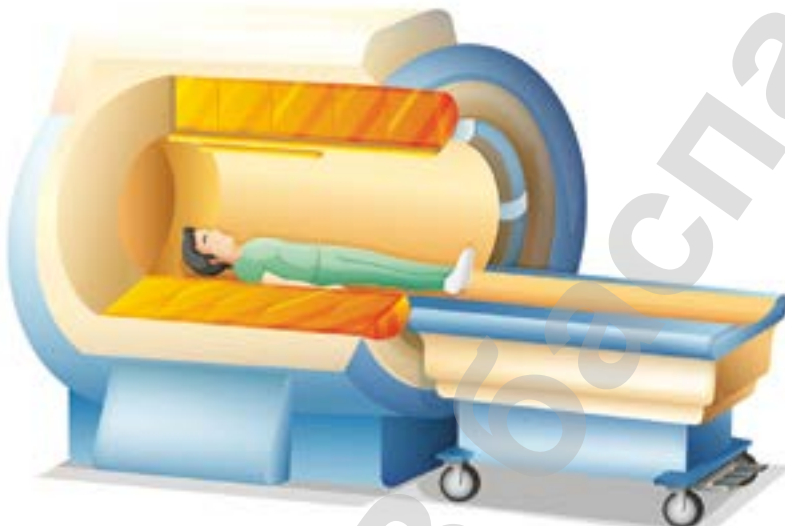


Рис. 262. Устройство томографа

IV. Мощность магнитного поля и факторы, влияющие на качество изображения

Первые томографы имели индукцию магнитного поля 0,005 Тл, но качество изображений, полученных на них, было низким. Современные томографы имеют мощные источники сильного магнитного поля. В качестве таких источников применяются электромагниты, магнитная индукция созданного ими поля достигает от 1 Тл до 3 Тл. Магнитная индукция поля постоянных магнитов достигает 0,7 Тл. На оборудовании МРТ ниже 1 Тл нельзя качественно сделать томографию внутренних органов и малого таза, так как мощность таких аппаратов слишком низкая. На низкопольных аппаратах МРТ, магнитная индукция которых менее 1 Тл, можно проводить только исследования головы, позвоночника и суставов с получением снимков обычного качества.

Постоянные магниты позволяют создать МРТ не только туннельного (закрытого) типа, но и открытого типа, что позволяет проводить исследования



Интересно знать!

МРТ для животных значительно дороже, чем для людей. Это связано с необходимостью применения общей анестезии для животных (рис. 263). Одно исследование человека занимает около 15 минут, а животного – 40–60 минут. Количество ветеринарных томографов и врачей, способных расшифровать МР-томограммы, пока очень невелико.



Рис. 263. Лев на томографии

в движении, в положении стоя, а также осуществлять доступ врачей к пациенту во время исследования. Появились аппараты для проведения исследований пациента в вертикальном положении или сидя.

Качество МРТ зависит не только от магнитной индукции поля, но и от выбора градиентной катушки, использования контраста, параметров исследования, опыта специалиста, оценивающего полученное изображение и способного определить наличие патологии. Введение контраста (гадолиния) внутривенно часто используется при МРТ. В настоящее время в аппаратах МРТ используется поле с магнитной индукцией от 0,1 Тл до 3,0 Тл.

Своевременность и точность диагностики делает магнитно-резонансную томографию незаменимой и эффективной для назначения лечения и быстрого выздоровления.



Возьмите на заметку

В клинической практике для аппаратов применяют следующую градацию аппаратов по мощности:

Градация томографов	Магнитная индукция
Низкопольные	от 0,1 Тл до 0,5 Тл
Среднепольные	от 0,5 Тл до 0,9 Тл
Высокопольные	выше 1 Тл
Сверхвысокопольные	3 Тл и 7 Тл

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление ЯМР?
2. Объясните принцип работы томографа.
3. Какие параметры, помимо индукции магнитного поля, влияют на качество МРТ?

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Функциональная МРТ».
2. «Современные модели томографов».
3. «История открытия ЯМР».
4. «Преимущества и опасности МРТ как метода диагностики».

Итоги главы 14

Магнитный поток	Закон электромагнитной индукции	Энергия магнитного поля катушки	Коэффициент трансформации
$\Phi = BS \cos \alpha$ α – угол между векторами \vec{B} и \vec{n}	$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ $\varepsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$	$W_{m.n} = \frac{LI^2}{2}$	$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{U_1}{U_2}$ $k = \frac{I_2}{I_1}$

Законы, правила

Закон электромагнитной индукции

ЭДС индукции вихревого поля, созданного переменным магнитным полем, равна изменению магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, в единицу времени.

Правило Ленца

Индукционный ток всегда имеет такое направление, при котором его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызывающему этот ток.

Глоссарий

Магнитный поток – число линий магнитной индукции, пронизывающих замкнутый контур, внесенный в магнитное поле.

Магнитный поток – физическая величина, равная произведению индукции магнитного поля, пронизывающего контур, на площадь контура и косинус угла между вектором магнитной индукции и нормалью к площади рамки.

Магнитно-резонансная томография – метод исследования внутренних органов и тканей человека с использованием физического явления ядерного магнитного резонанса.

Трансформатор – устройство, преобразующее ток в цепи переменного тока.

Электромагнитное реле – переключающее устройство для управления цепью большей мощности.

Явление электромагнитной индукции – явление возникновения индукционного тока в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока, проходящего через него.

Приложения

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ И ТАБЛИЦЫ

Приложение 1. Лабораторные работы

Лабораторная работа № 1.

Исследование движения шарика в жидкостях различной вязкости

Цель работы: исследовать зависимость установившейся скорости движения шарика от вязкости жидкости, определить вязкость глицерина.

Оборудование: три пробирки высотой 25 см с метками, верхняя метка должна быть нанесена на 5–8 см ниже края пробирки (рис. 1), подставка для пробирок, сосуды с моторным маслом, глицерином и растительным маслом, стальные шарики диаметром 1 мм (15 шт.), секундомер, салфетки.

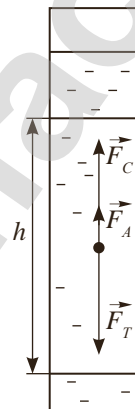


Рис. 1. Нанесение меток на пробирке

Краткая теория

На шарик, падающий в вязкой среде, действуют три силы: сила тяжести, сила Архимеда и сила сопротивления. При установившемся движении скорость падения постоянна, равнодействующая сил равна нулю:

$$\vec{F}_T + \vec{F}_A + \vec{F}_c = 0.$$

С учетом направления сил имеем: $F_T = F_A + F_c$.

Заменим в полученном соотношении силы через формулы:

$$F_T = mg = \rho_T \cdot \frac{4}{3} \pi R^3 \cdot g; \quad F_A = \rho_{ж} \cdot \frac{4}{3} \pi R^3 \cdot g; \quad F_c = 6\pi\eta Rv.$$

Решив уравнение относительно скорости, получим расчетную формулу:

$$v = \frac{2(\rho_T - \rho_{ж}) \cdot g \cdot R^2}{9\eta}, \tag{1}$$

где ρ_T – плотность шарика, $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, R – радиус шарика, v – установившаяся скорость шарика, η – вязкость жидкости.

Преобразуем формулу (1) для расчета вязкости:

$$\eta = \frac{2(\rho_T - \rho_{ж}) \cdot g \cdot R^2}{9v}. \tag{2}$$

Ход работы:

Задание 1. Исследование зависимости скорости шарика от вязкости жидкости.

1. Заполните пробирки жидкостями. По текучести жидкостей оцените их вязкость, занесите в таблицу названия жидкостей по возрастанию их вязкости.

Название жидкости	№ опыта	Время t , с	Высота падения h , м	Скорость v , м/с	Вязкость η , МПа · с	Сред. скорость v_{cp} , м/с
	1					
	2					
	3					
	4					
	5					

Название жидкости	№ опыта	Время t , с	Высота падения h , м	Скорость v , м/с	Вязкость η , МПа · с	Сред. скорость v_{cp} , м/с
	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
	1					
	2					
	3					
	4					
	5					

- Измерьте время движения шарика диаметром 1 мм между двумя нанесенными на пробирке метками.
- Измерьте расстояние h между метками, для каждого опыта рассчитайте скорость установившегося движения по формуле:

$$v = \frac{h}{t}.$$

- Определите среднее значение скорости движения для каждой жидкости, полученный результат занесите в таблицу.
- Сделайте вывод, сравните полученный результат с вашим предположением о вязкости жидкостей и формулой (1).

Задание 2. Определение вязкости глицерина

- Используя данные таблицы и формулу (2), рассчитайте значение вязкости глицерина для каждого опыта.
- Определите среднее значение вязкости глицерина.
- Определите абсолютную и относительную погрешности измерения.
- Запишите результат с учетом погрешности.
- Сравните полученное значение с табличным значением вязкости глицерина при температуре постановки опыта.

Контрольные вопросы

- Каков механизм внутреннего трения в жидкостях с точки зрения молекулярно-кинетической теории?
- Какова зависимость вязкости жидкости от температуры? Чем объясняется эта зависимость?
- Почему измерение времени падения шарика начинают не от поверхности жидкости, а от метки, достаточно удаленной от поверхности?

Лабораторная работа № 2.

Исследование условия возникновения тока в электролитах

Цель работы: Выяснить, растворы каких веществ являются проводниками, пронаблюдать за химическим действием тока.

Оборудование: источник тока, амперметр, лампа, кювета с медным и цинковым электродами, ключ, соединительные провода, стаканы с дистиллированной водой, раствором сахара и раствором поваренной соли, чашка с поваренной солью, стеклянная палочка.

Краткая теория

Способность воды растворять большинство веществ связана со структурой молекул воды. Так как центры положительных и отрицательных зарядов в ней сдвинуты друг относительно друга, молекулы воды являются диполями.

Так же как и другие вещества жидкости могут быть проводниками, полупроводниками и диэлектриками.

Майкл Фарадей назвал жидкие проводники электролитами, а электроды, соединенные с различными полюсами источника тока, – катодом и анодом.

Ход работы:

1. Соберите установку, изображенную на *рисунке 2*.
2. Опуская электроды в стаканы с различными жидкостями, определите, какие из них являются проводниками.
3. Занесите наблюдаемые явления в таблицу.
4. Предварительно высушив, опустите электроды в сухую поваренную соль.

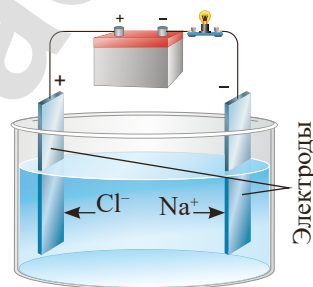


Рис. 2. Химическое действие электрического тока

№	Вещество	Наличие тока в цепи	Наблюдение химического действия тока
1	Дистиллированная вода, H_2O		
2	Раствор сахара		
3	Раствор поваренной соли $NaCl$		
4	Поваренная соль		

5. Ответьте на вопросы:

- Почему дистиллированная вода, раствор сахара и сухая поваренная соль не являются проводниками?
- Почему раствор поваренной соли проводит электрический ток?
- Как называется распад молекул на положительные и отрицательные ионы?
- Что называют электролитом?
- Как ведут себя ионы, если в раствор опустить катод и анод и подключить их к источнику тока?
- Что понимают под упорядоченным движением заряженных частиц?

Сделайте выводы: об условиях возникновения электрического тока; о наблюдаемых внешних проявлениях электрического тока в растворе поваренной соли; о носителях электрического тока в растворах электролитов.

Приложение 2. Таблицы физических величин

Таблица 1. Физические постоянные

Физическая постоянная	Обозначение	Значение постоянной
Скорость света в вакууме	c	$\approx 3 \cdot 10^8$ м/с
Элементарный заряд (заряд электрона)	e	$-1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса покоя электрона	m_e	$9,1 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	m_p	$1,67 \cdot 10^{-27}$ кг
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Универсальная газовая постоянная	R	8,31 Дж/(моль · К)
Гравитационная постоянная	G	$6,67 \cdot 10^{-11}$ Нм ² /кг
Постоянная Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
Постоянная Фарадея	F	9 648 4,56 Кл/моль
Молярный объем идеального газа при нормальных условиях ($t = 0$ °С, $p = 101,325$ кПа)	V_m	$2,24 \cdot 10^{-2}$ м ³ /моль
Постоянная Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Абсолютный нуль температуры	T_0	0 К = -273,15 °С
Нормальное атмосферное давление	$P_{атм н}$	101325 Па
Плотность воздуха при нормальных условиях	ρ	1,293 кг/м ³

Таблица 2. Плотность вещества

Вещество	Плотность		Вещество	Плотность	
	$(\frac{\Gamma}{\text{см}^3}, \text{ или } n \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3})$			$(\frac{\Gamma}{\text{см}^3}, \text{ или } n \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3})$	
Алюминий	2,7		Никель	8,9	
Бронза	8,7–8,9		Олово	7,3	
Вольфрам	19,34		Платина	21,6	
Железо, сталь	7,8		Свинец	11,4	
Золото	19,3		Серебро	10,5	
Латунь	8,7		Титан	4,5	
Медь	8,9		Цинк	7,18	

Таблица 3. Удельная теплоемкость вещества

Вещество	$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$	Вещество	$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$
Алюминий	920	Песок	880

Вещество	$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	Вещество	$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$
Вода	4200	Платина	140
Воздух	1000	Ртуть	130
Железо	460	Свинец	140
Керосин	2100	Серебро	250
Кирпич	880	Спирт	2500
Латунь	380	Сталь	500
Лед	2100	Стекло	840
Медь	380	Цинк	380
Никель	460	Чугун	540
Олово	250	Эфир	3340

Таблица 4. Удельная теплота плавления, температура плавления

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Алюминий	658	39	Олово	232	5,9
Железо	1539	27	Платина	1774	11
Золото	1063	6,7	Ртуть	-39	1,0
Лед	0	34	Свинец	327	2,5
Медь	1083	21	Серебро	960	10
Нафталин	80	15	Цинк	420	12

Таблица 5. Удельная теплота парообразования и температура кипения веществ при атмосферном давлении

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$r, 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$r, 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Вода	100	2,3	Спирт	78	0,9
Ртуть	357	0,3	Эфир	35	0,4

Таблица 6. Удельная теплота сгорания топлива

Вещество	$q, 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Вещество	$q, 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Бензин	46	Каменный уголь	30
Бурый уголь	17	Керосин	46
Водород	120	Нефть	44
Дизельное топливо	42,7	Порох	3,8

Вещество	$q, 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Вещество	$q, 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Дрова* (березовые)	13	Природный газ	44
Дрова* (сосновые)	13	Спирт	27
Древесный уголь	34	Торф	14

Таблица 7. Зависимость давления и плотности насыщенных паров от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$\rho, \text{г/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$\rho, \text{г/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$\rho, \text{г/м}^3$
0	0,61	4,84	20	2,34	17,32	40	7,38	51,2
1	0,66	5,18	21	2,49	18,14	41	7,78	53,8
2	0,71	5,54	22	2,64	19,22	42	8,21	56,5
3	0,76	5,92	23	2,81	20,35	43	8,65	59,4
4	0,81	6,33	24	2,99	21,54	44	9,11	62,3
5	0,87	6,76	25	3,17	22,80	45	9,59	65,4
6	0,94	7,22	26	3,36	24,11	46	10,10	68,6
7	1,0	7,70	27	3,57	25,49	47	10,62	72,0
8	1,07	8,21	28	3,78	26,93	48	11,17	75,5
9	1,15	8,76	29	4,01	28,45	49	11,75	79,1
10	1,23	9,33	30	4,25	30,04	50	12,34	82,8
11	1,31	9,93	31	4,50	31,70	55	15,75	104,0
12	1,40	10,57	32	4,71	33,45	60	19,93	129,5
13	1,50	11,25	33	5,03	35,27	65	25,02	160,1
14	1,60	11,96	34	5,27	37,18	70	31,18	196,4
15	1,71	12,71	35	5,63	39,18	75	38,56	239,3
16	1,82	13,50	36	5,95	41,30	80	47,37	289,7
17	1,94	14,34	37	6,28	43,50	85	57,82	348,7
18	2,06	15,22	38	6,63	45,80	90	70,12	417,3
19	2,20	16,14	39	6,99	48,20	100	101,32	588,5

Таблица 8. Критическая температура

Вещество	Критическая температура $t, ^\circ\text{C}$	Вещество	Критическая температура $t, ^\circ\text{C}$
Ртуть	1700	Углекислый газ	31
Вода	374	Кислород	-118
Спирт этиловый	243	Азот	-146

Вещество	Критическая температура t_c , °C	Вещество	Критическая температура t_c , °C
Эфир	197	Водород	-240
Хлор	146	Гелий	-263

Таблица 9. Психрометрическая таблица

Показания сухого термометра t_s , °C	Разность показаний сухого и влажного термометра t^* , °C									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Относительная влажность, %									
1	91	80	67	53	36	18				
2	90	81	69	56	41	24	4			
3	90	79	72	59	45	29	11			
4	91	81	69	62	49	34	17			
5	92	82	71	59	52	39	23	5		
6	92	83	73	62	49	43	28	12		
7	93	84	75	64	52	38	33	18	1	
8	93	86	77	67	55	42	28	24	8	
9	94	86	78	69	58	46	33	17	14	
10	94	87	80	71	61	50	37	23	7	
11	94	88	81	73	64	53	41	28	13	
12	95	89	82	75	66	56	45	33	19	4
13	95	90	83	76	68	59	49	38	25	10
14	95	90	84	78	70	62	52	42	30	16
15	96	91	85	79	72	64	55	45	34	22
16	96	91	86	80	74	67	58	49	39	27
17	96	92	87	82	76	69	61	52	43	32
18	96	92	88	83	77	71	63	55	46	36
19	97	93	89	84	79	73	66	58	50	40
20	97	93	89	85	80	74	68	61	53	44
21	97	94	90	86	81	76	70	63	56	48
22	97	94	91	87	82	77	72	66	59	51
23	97	94	91	87	83	79	73	68	61	54
24	98	95	92	88	84	80	75	70	64	57
25	98	95	92	89	85	81	77	71	66	59

Показания сухого термометра $t, ^\circ\text{C}$	Разность показаний сухого и влажного термометра $t', ^\circ\text{C}$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Относительная влажность, %									
26	98	95	93	90	86	82	78	73	68	62
27	98	96	93	90	87	83	79	75	70	64
28	98	96	93	91	88	84	80	76	72	66
29	98	96	94	91	88	85	82	78	73	68
30	98	96	94	92	89	86	83	79	75	70
31	98	97	94	92	90	87	84	80	76	72
32	98	97	95	93	90	88	85	81	78	74
33	99	97	95	93	91	88	85	82	79	75
34	99	97	95	93	91	89	86	83	80	77
35	99	97	96	94	92	90	87	84	81	78
36	99	97	96	94	92	90	88	85	82	79
37	99	98	96	94	93	91	88	86	83	80
38	99	98	96	95	93	91	89	87	84	81
39	99	98	96	95	93	92	90	88	85	83
40	99	98	97	95	94	92	90	88	86	83

Таблица 10. Коэффициент поверхностного натяжения жидкостей при 20°C

Вещество	$\sigma, \frac{\text{мН}}{\text{м}}$	Вещество	$\sigma, \frac{\text{мН}}{\text{м}}$
Вода	73	Молоко	46
Бензин	21	Нефть	26
Глицерин	59	Ртуть	487
Керосин	24	Спирт	22
Мыльный раствор	40	Уксусная кислота	28

Таблица 11. Механические свойства твердых тел

Вещество	Предел прочности на растяжение $\sigma_{\text{пч}}, \text{МПа}$	Модуль упругости $E, \text{ГПа}$	Вещество	Предел прочности на растяжение $\sigma_{\text{пч}}, \text{МПа}$	Модуль упругости $E, \text{ГПа}$
Алюминий	100	70	Мрамор	140	70
Бетон	48	20	Олово	20	50
Вольфрам	3000	415	Свинец	15	16

Вещество	Предел прочности на растяжение $\sigma_{пч}$, МПа	Модуль упругости E , ГПа	Вещество	Предел прочности на растяжение $\sigma_{пч}$, МПа	Модуль упругости E , ГПа
Гранит	150	49	Серебро	140	80
Золото	140	79	Сталь	500	200
Кирпич	17	3	Стекло	90	50
Лед	1	10	Фарфор	650	150
Медь	400	120	Цинк	150	80

Таблица 12. Диэлектрическая проницаемость среды

Вещество	Диэлектрическая проницаемость	Вещество	Диэлектрическая проницаемость
Вода	81	Парафин	2,1
Керосин	2,1	Слюда	6
Масло	2,5	Стекло	7

Таблица 13. Удельное сопротивление металлов и сплавов

Вещество	ρ , Ом	Вещество	ρ , Ом
Алюминий	$2,7 \cdot 10^{-8}$	Нихром	$1,05 \cdot 10^{-6}$
Вольфрам	$5,3 \cdot 10^{-8}$	Олово	$1,13 \cdot 10^{-7}$
Железо	$9,9 \cdot 10^{-8}$	Осмий	$9,5 \cdot 10^{-8}$
Золото	$2,2 \cdot 10^{-8}$	Платина	$1,05 \cdot 10^{-7}$
Константан	$4,7 \cdot 10^{-8}$	Ртуть	$9,54 \cdot 10^{-7}$
Латунь	$6,3 \cdot 10^{-8}$	Свинец	$2,07 \cdot 10^{-7}$
Магнаний	$3,9 \cdot 10^{-8}$	Серебро	$1,58 \cdot 10^{-8}$
Медь	$1,68 \cdot 10^{-8}$	Фехраль	$1,1 \cdot 10^{-6}$
Никелин	$4,2 \cdot 10^{-8}$	Цинк	$5,95 \cdot 10^{-8}$
Никель	$7,3 \cdot 10^{-8}$	Чугун	$5 \cdot 10^{-7}$

Таблица 14. Температурный коэффициент сопротивления

Вещество	α , K^{-1}	Вещество	α , K^{-1}
Вольфрам	$5 \cdot 10^{-3}$	Никелин	10^{-4}
Константан	$5 \cdot 10^{-6}$	Нихром	$2 \cdot 10^{-4}$
Магнаний	$8 \cdot 10^{-5}$	Фехраль	$2 \cdot 10^{-4}$

Таблица 15. Электрохимический эквивалент

Вещество	$k, \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$	Вещество	$k, \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$
Алюминий	$9,32 \cdot 10^{-8}$	Натрий	$2,38 \cdot 10^{-7}$
Водород	$1,04 \cdot 10^{-8}$	Никель (двухвалентный)	$3,04 \cdot 10^{-7}$
Золото	$6,81 \cdot 10^{-7}$	Никель (трехвалентный)	$2,03 \cdot 10^{-7}$
Калий	$4,05 \cdot 10^{-7}$	Ртуть	$2,07 \cdot 10^{-6}$
Кальций	$2,08 \cdot 10^{-7}$	Свинец	$1,07 \cdot 10^{-6}$
Кислород	$8,29 \cdot 10^{-8}$	Серебро	$1,12 \cdot 10^{-8}$
Магний	$1,26 \cdot 10^{-7}$	Хлор	$3,67 \cdot 10^{-7}$
Медь	$3,29 \cdot 10^{-7}$	Цинк	$3,39 \cdot 10^{-7}$

Таблица 16. Магнитные проницаемости пара- и диамагнетиков

Парамагнитные вещества	μ	Диамагнитные вещества	μ
Азот (газообразный)	1,000013	Водород (газообразный)	0,999937
Воздух (газообразный)	1,000038	Вода	0,999991
Кислород (газообразный)	1,000017	Стекло	0,999987
Кислород (жидкий)	1,0034	Цинк	0,999991
Эбонит	1,000014	Серебро	0,999981
Алюминий	1,000023	Золото	0,999963
Вольфрам	1,000175	Медь	0,999912
Платина	1,000253	Висмут	0,999824

Греческий алфавит			Латинский алфавит		
A a альфа	I i йота	P p ро	A a а	J j жи	S s эс
B б бета	K к кашпа	Σ σ сигма	B b бе	K k ка	T t тэ
Г γ гамма	Λ λ лямбда	T τ тау	C c це	L l эль	U u у
Δ δ дельта	Μ μ мю	Υ υ ипсилон	D d де	M m эм	V v вэ
E ε эпсилон	N ν ню	Φ φ фи	E e э	N n эн	W w дубль-вэ
Z ζ дзета	Ξ ξ кси	Χ χ хи	F f эф	O o о	X x икс
Η η эта	Ο ο омикрон	Ψ ψ пси	G g же	P p пэ	Y y игрек
Θ θ тета	Π π пи	Ω ω омега	H h аш	Q q ку	Z z зет
			I i и	R r эр	

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

ПЕРИОДЫ	РЯДЫ	Г Р У П П Ы Э Л					
		I	II	III	IV	V	VI
1	1	H 1 ВОДОРОД 1,008					
2	2	Li 3 ЛИТИЙ 6,941	Be 4 БЕРИЛИЙ 9,012	B 5 БОР 10,811	C 6 УГЛЕРОД 12,011	N 7 АЗОТ 14,00	O 8 КИСЛОРОД 15,999
3	3	Na 11 НАТРИЙ 22,990	Mg 12 МАГНИЙ 24,305	Al 13 АЛЮМИНИЙ 26,981	Si 14 КРЕМНИЙ 28,085	P 15 ФОСФОР 30,974	S 16 СЕРА 32,064
4	4	K 19 КАЛИЙ 39,098	Ca 20 КАЛЬЦИЙ 40,08	Sc 21 СКАНДИЙ 44,956	Ti 22 ТИТАН 47,90	V 23 ВАНАДИЙ 50,941	Cr 24 ХРОМ 51,996
	5	Cu 29 МЕДЬ 63,546	Zn 30 ЦИНК 65,38	Ga 31 ГАЛЛИЙ 69,72	Ge 32 ГЕРМАНИЙ 72,59	As 33 МЫШЬЯК 74,922	Se 34 СЕЛЕН 78,96
5	6	Rb 37 РУБИДИЙ 85,468	Sr 38 СТРОНЦИЙ 87,62	Y 39 ИТТРИЙ 88,906	Zr 40 ЦИРКОНИЙ 91,22	Nb 41 НИОБИЙ 92,906	Mo 42 МОЛИБДЕН 95,94
	7	Ag 47 СЕРЕБРО 107,868	Cd 48 КАДМИЙ 112,41	In 49 ИНДИЙ 114,82	Sn 50 ОЛОВО 118,69	Sb 51 СУРЬМА 121,75	Te 52 ТЕЛЛУР 127,60
6	8	Cs 55 ЦЕЗИЙ 132,905	Ba 56 БАРИЙ 137,33	La 57 ЛАНТАН 138,905	Hf 72 ГАФНИЙ 178,49	Ta 73 ТАНТАЛ 180,94	W 74 ВОЛЬФРАМ 183,85
	9	Au 79 ЗОЛОТО 196,966	Hg 80 РУТУТЬ 200,59	Tl 81 ТАЛЛИЙ 204,37	Pb 82 СВИНЕЦ 207,2	Bi 83 ВИСМУТ 208,980	Po 84 ПОЛОНИЙ [209]
7	10	Fr 87 ФРАНЦИЙ [223]	Ra 88 РАДИЙ 226,025	Ac 89 АКТИНИЙ [227]	Ku 104 КУРЧАТОВИЙ [261]	Ns 105 НИЛЬСБОРИЙ [261]	106
ВЫСШИЕ ОКСИДЫ		R ₂ O	RO	R ₂ O ₃	RO ₂	R ₂ O ₅	RO ₃
ЛЕТУЧИЕ ВОДОРОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ					RH ₄	RH ₃	H ₂ R
Л А Н Т А Н О И Д Ы							
Ce 58 ЦЕРИЙ 140,12	Pr 59 ПРАЗЕОДИМ 140,908	Nd 60 НЕОДИМ 144,24	Pm 61 ПРОМЕТИЙ [145]	Sm 62 САМАРИЙ 150,4	Eu 63 ЕВРОПИЙ 151,96	Gd 64 ГАДОЛИНИЙ 157,25	Tb 65 ТЕРБИЙ 158,925
А К Т И Н О И Д Ы *							
Th 90 ТОРИЙ 232,038	Pa 91 ПРОТАКТИНИЙ 231,036	U 92 УРАН 238,029	Np 93 НЕПТУНИЙ 237,048	Pu 94 ПЛУТОНИЙ [244]	Am 95 АМЕРИЦИЙ [243]	Cm 96 КЮРИЙ [247]	Bk 97 БЕРКЛИЙ [247]

СКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

E		M		E		H		T		O		B			
VII				VIII											
(H)												He 2 ГЕЛИЙ 4,003		2 K	
9 F ФТОР 18,998												Ne 10 НЕОН 20,179		8 L 2 K	
17 Cl ХЛОР 35,453												Ar 18 АРГОН 39,948		8 M 8 L 2 K	
Mn 25 МАРГАНЕЦ 54,938		Fe 26 ЖЕЛЕЗО 55,847		Co 27 КОБАЛЬТ 58,933		Ni 28 НИКЕЛЬ 58,70								N M L K	
35 Br БРОМ 79,904												Kr 36 КРИПТОН 83,80		8 N M L K 18 L 8 L 2 K	
Tc 43 ТЕХНЕЦИЙ 98,906		Ru 44 РУТЕНИЙ 101,07		Rh 45 РОДИЙ 102,905		Pd 46 ПАЛЛАДИЙ 106,42								O N M L K	
53 I ИОД 126,904												Xe 54 КСЕНОН 131,30		8 O N M L K 18 L 18 L 8 L 2 K	
Re 75 РЕНИЙ 186,207		Os 76 ОСМИЙ 190,2		Ir 77 ИРИДИЙ 192,22		Pt 78 ПЛАТИНА 195,09								P O N M L K	
85 At АСТАТ [210]												Rn 86 РАДОН [222]		8 P O N M L K 18 L 32 L 18 L 8 L 2 K	
107		108												O P O N M L K	
R ₂ O ₇				RO ₄											
HR															
★		5		8		-		7		1				P O N M L K	
Dy 66 ДИСПРОЗИЙ 162,50		Ho 67 ГОЛЬМИЙ 164,930		Er 68 ЭРБИЙ 167,26		Tm 69 ТУЛИЙ 168,934		Yb 70 ИТТЕРБИЙ 173,04		Lu 71 ЛЮТЕЦИЙ 174,967				P O P N M L K	
★		9		0		-		1		0		3		O P O N M L K	
Cf 98 КАЛИФОРНИЙ [251]		Es 99 ЭЙНШТЕЙНИЙ [254]		Fm 100 ФЕРМИЙ [257]		Md 101 МЕНДЕЛЕВИЙ [258]		(No) 102 НОБЕЛИЙ [255]		(Lr) 103 ЛОУРЕНСИЙ [256]				O P O P N M L K	

Химический знак: Sc
Порядковый номер: 21
СКАНДИЙ
44,956
Относительная атомная масса
Число электронов на данном энергетическом уровне: 2, 9, 8, 2
Название элемента

— s-элементы
— p-элементы
— d-элементы
— f-элементы

I энергетический уровень K
II энергетический уровень L
III энергетический уровень M
IV энергетический уровень N
V энергетический уровень O
VI энергетический уровень P
VII энергетический уровень Q

9 F
ФТОР
18,998
У элементов, которым соответствуют простые вещества – неметаллы, порядковые номера помещены в квадратике.

Mo 42
МОЛИБДЕН
95,94
У элементов, оксиды и гидроксиды которых проявляют амфотерные свойства, порядковые номера обведены кружочком.

Na 11
НАТРИЙ
22,990
У элементов, которым соответствуют простые вещества – металлы, порядковые номера особыми знаками не обозначены.

Ответы к упражнениям

Упр. 1. 1. 2 м/с, 0,3 м/с². 2. 2 м/с. 3. а) 2 м/с²; 0; 1 м/с², -4 м/с²; 99 м; 99 м; б) $x_1 = 5 + t^2$; в) рис. 1.
4. 3,24 м.

Упр. 2. 1. $\approx 8,3$ м/с. 2. 20 с. 3. 4 м/с. 4. 90 с; 81 м; $\approx 115,6$ с.

Упр. 3. 1. 25 м/с². 2. 25 м/с; 0,71 м/с².
3. -0,314 рад/с². 4. $\approx 0,49$ м/с; $\approx 0,015$ рад/с;
 $\approx 0,007$ м/с²; 0.

Упр. 4. 1. 2,5 Н. 2. 778 Н.

Упр. 5. 1. 9,5 %. 2. 7,57 км/с; 96,5 мин.

3. В два раза меньше. 4. В 4 раза, в 9 раз, в 16 раз.

Упр. 6. 1. 20,4 м/с; 56,4 м/с. 2. $\approx 5,35$ м/с.

3. $\approx 11,67$ м/с; $\approx 43^\circ$.

Упр. 7. 1. 120 кг. 2. 0,1 м от конца с большим грузом. 3. 11,4 см от конца стального стержня.

Упр. 8. 1. 96 кПа. 2. У двух трубок площадь сечения возрастает в 2 раза, давление остается прежним. 3. 1000.

Упр. 9. 1. ≈ 728 мм рт. ст. 3. $\approx 10,56$ МПа; $\approx 10,66$ МПа. 4. $10,3 \cdot 10^5$ Па.

Упр. 10. 1. 0,5 м/с; в прежнем направлении. 2. 1,28 м. 3. 20 мм.

Упр. 11. 1) 40,82 мН; 2) 4,71 мкН; 3) $F_a = F_A + F_k$; 5) 36,11 мкН; 6) 2 Па·с.

Упр. 12. 1. $4,18 \cdot 10^{-9}$ м. 2. 201 м/с. 3. $\approx 106,7$ кПа.

Упр. 13. 1. 100 кПа. 2. 65 кПа. 3. 100 см³. 4. 100 кПа.

Упр. 14. 1. ≈ 18698 Дж. 2. Нет, 900 Дж.

Упр. 15. 1. 20 Дж, 20 %. 2. $\eta = 39$ %. 3. 27 %; 274 кДж.

Упр. 16. 1. 82,8 г/м³. 2. 2400 Па, ненасыщенный. 3. 53,6 г/м³. 4. 50 %.

Упр. 17. 1. $1,6 \cdot 10^{-3}$ Н, в сторону масла. 2. 0,1 Н. 3. 78 мН/м. 4. 7 мм.

Упр. 18. 1. 540 мкН. 2. -5 мкКл; -5 мкКл; 22,5 Н. 3. $1,76 \cdot 10^{12}$ м/с². 4. $3,6 \cdot 10^7$ Н/Кл.

Упр. 19. 1. $5 \cdot 10^{-9}$ Кл. 2. 100 В. 3. 0,625 мкДж. 4. 10^{-8} Кл, $5 \cdot 10^{-6}$ Дж.

Упр. 20. 1. 0,17 А; 6 мин. 2. 60 А.

Упр. 21. 1. 0,5 А; 3,5 В. 2. 3,5 А. 3. 0,47 А. 4. 2 В.

Упр. 22. 1. 3,18 мин. 2. $\approx 5,45$ А. 3. 13250 тенге, 5667 тенге, больше на 7583 тенге.
4. 80 %.

Упр. 23. 2. 53,5 мг. 3. 4,15 В.

Упр. 24. 1. 4 В. 2. В 5 раз.

Упр. 25. 1. $\approx 12,5$. 2. 0,0045 К⁻¹.

Упр. 26. 1. Сложить бруски в виде буквы Т, если магнит – это брусок, обращенный концом к другому бруски, то они притянутся, в противном случае взаимодействия не будет. 2. $4 \cdot 10^{-5}$ Тл. 3. ≈ 12 А.

Упр. 27. 1. 0. 2. $2 \cdot 10^{-6}$ Н. 3. $1,6 \cdot 10^{-15}$ Н; 0,569 мм.

Упр. 28. 1. 2000, 1000. 2. 0.

Упр. 30. 1. 5 м. 2. -0,25 Вб/с. 3. 4 В. 4. 0,5 Дж.

Упр. 31. 1. Сгорит. 2. 30. 3. 1/3, 2520. 4. 5,625 А.

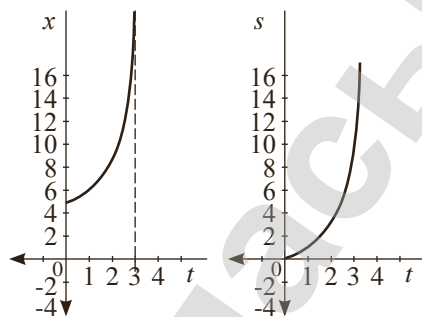


Рис. 1.

Предметно-именной указатель

Анизотропность	84	Напряженность электрического поля	132
Адиабатный процесс	96	Относительная влажность воздуха	119
Абсолютная влажность воздуха	118	Пластичность	86
Вискозиметр	74	Прочность	85
Вязкость	73	Полупроводник	158
Вечный двигатель первого рода	107	Примесная проводимость	160
Вечный двигатель второго рода	107	Парамагнетики	190
Внутренняя энергия тела	103	Реактивное движение	63
Гидро- и аэродинамика	70	Работа тока	152
Гигрометр	119	Рекомбинация	161
Гальваностегия	162	Работа	103
Динамика	23	Равновесие	43
Деформация кручения	86	Силы поверхностного натяжения	124
Деформация растяжения	86	Силовые линии электрического поля	133
Деформация сдвига	86	Сила тока	146
Деформация сжатия	86	Собственная проводимость	158
Динамическое равновесие	118	Сверхпроводимость	171
Диаммагнетики	190	Сверхпроводник	171
Закон движения	7	Силовые линии магнитного поля	180
Изгиб	86	Сила Ампера	185
Изотропность	84	Сила Лоренца	185
Идеальная жидкость	70	Течение ламинарное	71
Идеальный газ	81	Течение турбулентное	72
Кинематика	5	Течение стационарное	72
Кристаллическая решетка	85	Твердость	85
Количество теплоты	103	Тепловая машина	110
Круговой процесс или цикл	109	Термодинамика	103
Капилляры	125	Точка росы	119
Конденсация	118	Точечные заряды	130
Коэффициент поверхностного натяжения	124	Температурный коэффициент сопротивления	171
Краевой угол	125	Термистор	166
Конденсатор	137	Термоэлектронная эмиссия	164
Кулон	130	Транзистор	169
Линии тока	71	Трансформатор	210
Механика	5	Угловое ускорение	18
Мгновенная скорость тела	35	Ускорение	35
Макроскопические параметры	82	Упругость	86
Микроскопические параметры	82	Ударная ионизация	164
Мениск	125	Фарад	137
Мощность тока	153	Фоторезистор	167
Магнитное поле	177	Ферромагнетики	190
Магнитная проницаемость	190	Центр тяжести	42
Магнитный поток	203	Центр масс	42
Магнитно-резонансная томография	215	Энергия полная механическая	65
Насыщенный пар	118	Электрическое поле	131
Ненасыщенный пар	118	Электростатика	131

Электродвижущая сила	145
Электролитическая диссоциация	160
Электролиз	161
Энергия	103
Элемент тока	70
Электрохимический эквивалент	162
Электронно-дырочная проводимость	159
Емкость уединенного проводника	136
Явление электромагнитной индукции	202

Список использованной литературы

1. М. Балашов. Физика. Пробный учебник для 9 класса средней школы. – М.: Просвещение, 1993.
2. А. А. Ванеев., Э.Д. Корж., В.П. Орехов. Преподавание физики в 9 классе. М.: Просвещение, 1980.
3. А.А. Ванеев, З.Г. Дубицкая, Е.Ф. Ярунина. Преподавание физики в 10 классе средней школы. Москва: Просвещение, 1978.
4. В.С. Волькенштейн. Сборник задач по общему курсу физики – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1976. – 464 с.
5. В.И. Вертельник, Э.В. Позднеева и др. Физика. Тренинговые задания: в 2 ч. – Томск. Том. политехн. ун-т, 2006. – ч.1.–170 с.
6. Р.И. Грабовский. Курс физики: Учебное пособие. 11-е изд., стер.– СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 608 с.
7. Р.А. Гладкова, В.Е. Добронравов, Л.С. Жданов, Ф.С. Цодиков. Сборник задач и вопросов по физике для средних специальных учебных заведений.– 2-е изд. исправл. : Наука, 1974.
8. В.Г. Зубов, В.П. Шальнов. Задачи по физике. –М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975. – 280 с.
9. И.К. Кикоин, А.К. Кикоин. Физика. Учебник для 9 класса средней школы. – М.: Просвещение, 1992.
10. О.Ф. Кабардин. Физика: справ. материалы: Учеб.пособие для учащихся.– 3-е изд. – М.: Просвещение, 1991. – 367 с.
11. Методика факультативных занятий по физике: пособие для учителей О.Ф. Кабардин, С.И. Кабардина, В.А. Орлов и др.; – М.: Просвещение, 1980. – 191 с.
12. Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев. Физика. Учебник для 11 класса общеобразовательных учреждений. – М.: Просвещение, 1995 .
13. В.П. Орехов, А.В. Усова, И.К. Турышев и др. Методика преподавания физики в 8–10 классах средней школы. Москва: Просвещение, 1980.
14. А. Парфентьева. Задачи по физике. Для поступающих в вузы, – Классикс Стиль, 2005. – 480 с.
15. Практикум по физике в средней школе: дидакт. материал./В.А. Буров, Ю.И. Дик, Б.С Зворыкин и др .– Просвещение, 1987.
16. А.П. Рымкевич, П.А. Рымкевичю. Сборник задач по физике. – Москва: «Просвещение», 1984.
17. Сборник задач по физике: Для 10–11 кл. общеобразовательных учреждений/ Сост. Г.Н. Степанова. Изд. Просвещение, 2001.
18. Сборник задач по физике. 10–11 классы: пособие для учащихся общеобразоват. учреждений: базовый и профил. уровни/А. Парфентьева – 3-е изд. Просвещение, 2010. – 206 с.
19. Сборник задач по физике: Учебное пособие/Л.П. Баканина, В.Е. Белонучкин, С.М. Козел, И.П. Мазанько: Под ред. С.М. Козела – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983 – 288 с.
20. Л.В. Тарасов, А.Н. Тарасова. Вопросы и задачи по физике (Анализ характерных ошибок поступающих в вузы): Учебное пособие.– 4-е изд., стереотип.– М.: Высш. шк., 1990. – 256 с.

21. В.М. Ударцева, В.Н. Федоров, Ш.М. Шуиншина. Физика. Учебная программа для 10–11 классов естественно-математического направления общеобразовательной школы. – Нур-Султан: НАО им. И. Алтынсарина, 2013. – 19 с.
22. Физика. Перевод с английского А.С. Ахматова и др. – М.: Наука, 1965.
23. Физика: Механика: Учеб. Пособие для шк. И классов с углубл. изуч. физики/М.Балашов, А.И. Гомонова, А.Б. Долицкий и др.; Под ред. Г.Я. Мякишева – М: Просвещение, 1995. – 480 с.
24. Физика: Учебник для 10 классов естественно-математического направления общеобразовательных школ/Б. Кронгарт, В. Кем, Н. Койшибаев. – Алматы: Мектеп, 2006. – 352 с.
25. Физика в задачах для поступающих в вузы/В. Турчина – М: ООО Издательство «Оникс»; ООО «Издательство «Мир и образование»», 2008. – 768 с.
26. Физический практикум для классов с углубленным изучением физики: Дидакт. материалы: 9–11 кл./Ю.И. Дик, О. Ф. Кабардин, В.А. Орлов и др. – Просвещение, 1993.
27. Шахмаев и др. Физика. Учебник для 11 класса средних школ. – М.: Просвещение, 1991.
28. Л. Эллиот, У. Уилкоккс. Физика. Перевод с английского под редакцией проф. А.И. Китайгородского – Москва, Главная редакция физико-математической литературы издательства Наука, 1975.
29. Элементарный учебник физики под ред. акад. Ландсберга, том I. – Издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы. – Москва, 1975.
30. Элементарный учебник физики под ред. акад. Ландсберга, Т. 2. Электричество и магнетизм. – 13-е изд. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 480 с.
31. <http://fiz.1september.ru/>. Физика: еженедельник изд. дома «Первое сентября».
32. <http://class-fizika.narod.ru/> «Классная физика».

Список интернет-ресурсов

В учебнике использованы иллюстрации со следующих общедоступных ресурсов Интернета:

1. airandspace.si.edu
2. aboutspacejournal.net
3. kazteleradio.kz
4. airbus.com
5. popmech.ru
6. ethnosport.kz
7. plantarium.ru
8. gidroguru.com
9. tengrinews.kz
10. su-zholdary.kz
11. daviddarling.info
12. gharysh.kz
13. akvilon.su
14. ekaraganda.kz
15. creta-fan.ru
16. radikal.ru
17. severozapad.pro
18. satu.kz
19. weinregal-profi.de
20. ukkz.com
21. kz.all.biz
22. ru.aliexpress.com
23. ademi-ai.kz
24. megazakaz.com
25. robotclass.ru
26. dic.academic.ru
27. ebay.com
28. zakon.kz
29. bigpicture.ru
30. hi-news.ru
31. motor.ru
32. <http://paranormal-news.ru>
33. hightech.fm
34. mirkosmosa.ru
35. informburo.kz
36. citytravel.livejournal.com
37. neomagnet.by
38. s-project.com.ua
39. strong-mag.com
40. industrialmagnetics.in
41. polimagnit.prom.ua
42. www.storyrender.com
43. north-magnet.com

Содержание

Предисловие	4
Глава 1. Кинематика	5
§ 1. Основные понятия и уравнения кинематики равноускоренного движения тела ..	6
§ 2. Относительное движение	12
§ 3. Кинематика криволинейного движения	17
Глава 2. Динамика	23
§ 4. Силы. Сложение сил. Законы Ньютона	24
§ 5. Закон всемирного тяготения	29
§ 6. Движение тела в гравитационном поле	35
ГЛАВА 3. Статика и гидростатика	41
§ 7. Центр масс. Виды равновесия	42
§ 8. Сообщающиеся сосуды. Применение закона Паскаля	48
§ 9. Опыт Торричелли. Атмосферное давление	54
ГЛАВА 4. Законы сохранения	61
§ 10. Законы сохранения импульса и механической энергии	62
ГЛАВА 5. Гидродинамика	69
§ 11. Кинематика жидкости	70
Глава 6. Молекулярная физика	77
§ 12. Основные положения МКТ. Термодинамические параметры	78
§ 13. Кристаллические и некристаллические вещества	84
Глава 7. Газовые законы	91
§ 14. Уравнение состояния идеального газа. Изопроцессы. Адиабатный процесс	92
Глава 8. Основы термодинамики	101
§ 15. Применение законов термодинамики	102
§ 16. Тепловые двигатели	109
Глава 9. Жидкие и твердые тела	117
§ 17. Влажность воздуха. Точка росы	118
§ 18. Поверхностное натяжение жидкости. Смачивание, капиллярные явления	123
Глава 10. Электростатика	129
§ 19. Электрическое поле	130
§ 20. Электроемкость. Конденсаторы. Единицы измерения емкости и количества электричества	136
Глава 11. Постоянный ток	143
§ 21. Электродвижущая сила и внутреннее сопротивление источника тока. Напряжение, разность потенциалов	144
§ 22. Закон Ома для полной цепи	148
§ 23. Работа и мощность электрического тока	152
Глава 12. Электрический ток в различных средах	157
§ 24. Электрический ток в металлах, полупроводниках, электролитах, жидкостях, газах, вакууме	158
§ 25. Полупроводниковые приборы	166
§ 26. Сверхпроводимость	171
Глава 13. Магнитное поле	177
§ 27. Магнитное поле. Правило буравчика. Вектор магнитной индукции	178

§ 28. Сила Ампера. Сила Лоренца	184
§ 29. Магнитные свойства вещества	190
§ 30. Искусственные магниты. Соленоид	194
Глава 14. Электромагнитная индукция	201
§ 31. Закон электромагнитной индукции	202
§ 32. Электромагнитные приборы	208
§ 33. Магнитно-резонансная томография	213
Приложения. Лабораторные работы и таблицы	219
Приложение 1. Лабораторные работы	220
Лабораторная работа № 1.	
Исследование движения шарика в жидкостях различной вязкости	220
Лабораторная работа № 2.	
Исследование условия возникновения тока в электролитах	222
Приложение 2. Таблицы физических величин	223
Ответы к упражнениям	232
Предметно-именной указатель	233
Список использованной литературы	235



Внимание

При необходимости вы всегда сможете найти содержание CD с электронным приложением на сайте *arman-pv.kz* и загрузить его на свой компьютер для дальнейшей работы

Учебное издание

**Назифа Анваровна Закирова
Руслан Рауфович Аширов**

ФИЗИКА

Учебник для 10 класса общественно-гуманитарного направления
общеобразовательной школы

Художники	А. Айтжанов, Е. Мищенко
Главный редактор	К. Караева
Редактор	Б. Масакбаева
Корректор	Г. Маликова
Технический редактор	В. Бондарев
Художественный редактор	Е. Мельникова
Бильд-редактор	Ш. Есенкулова
Художник-оформитель	О. Подопригора
Дизайн обложки	В. Бондарев
Верстка	Л. Костина, С. Сулейменова, Г. Илишева, Т. Макарова, А. Кейикбойва, Н. Нержанова

По вопросам приобретения обращайтесь по следующим адресам:

г. Нур-Султан, м-н 4, д. 2, кв. 55.

Тел.: 8 (7172) 92-50-50, 92-50-54. E-mail: astana@arman-pv.kz

г. Алматы, м-н Аксай 1А, д. 28Б.

Тел./факс: 8 (727) 316-06-30, 316-06-31. E-mail: info@arman-pv.kz

Книжный магазин «Арман-ПВ»

г. Алматы, ул. Алтынсарина, д. 87. Тел.: 8 (727) 303-94-43.

Сдано в набор 02.08.18. Подписано в печать 25.06.19. Формат 70x100 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.
Гарнитура «Times New Roman». Печать офсетная. Объем 19,35 усл. печ. л. Тираж 9000 экз.

Артикул 810-008-001р-19