

**ЭФФЕКТИВНАЯ
ПОДГОТОВКА
К ОГЭ**

ОГЭ

ФИЗИКА

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СПРАВОЧНИК

- Подробный теоретический материал
- Тренировочные задания



**ЭФФЕКТИВНАЯ
ПОДГОТОВКА
К ОГЭ**

ОГЭ

А.В. Попов

ФИЗИКА

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СПРАВОЧНИК



МОСКВА
2019

УДК 373:53
ББК 22.3я721
П58

Попов, Анатолий Васильевич.
П58 ОГЭ. Физика : универсальный справочник / А. В. Попов. — Москва : Эксмо, 2019. — 112 с. — (ОГЭ. Универсальный справочник).

Справочник предназначен для подготовки учащихся к ОГЭ по физике.
Пособие содержит подробный теоретический материал по всем темам, проверяемым экзаменом, а также тренировочные задания в форме ОГЭ. В конце справочника приводятся ответы.

Издание будет полезно учителям физики, так как даёт возможность эффективно организовать учебный процесс и подготовку к экзамену.

УДК 373:53
ББК 22.3я721

Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

Справочное издание
анықтамалық баспа

ОГЭ. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СПРАВОЧНИК

Попов Анатолий Васильевич
ОГЭ
ФИЗИКА
Универсальный справочник
(орыс тілінде)

Ответственный редактор *А. Жилинская*
Ведущий редактор *Т. Судакова*
Художественный редактор *А. Кашлев*

Россия. ООО «Издательство «Эксмо»
123308, Москва, ул. Зорге, д. 1. Тел.: 8 (495) 411-68-86.
Home page: www.eksmo.ru E-mail: info@eksmo.ru
Өндіруші: «ЭКМО» АҚБ Баспасы, 123308, Мәскеу, Зорге көшесі, 1 үй.
Тел.: 8 (495) 411-68-86.

Home page: www.eksmo.ru E-mail: info@eksmo.ru
Тауар белгісі: «Эксмо»

Интернет-магазин : www.book24.ru

Интернет-магазин : www.book24.kz

Интернет-дүкен : www.book24.kz

Импортёр в Республику Казахстан ТОО «РДЦ-Алматы».
Қазақстан Республикасындағы импорттаушы «РДЦ-Алматы» ЖШС.
Дистрибутор и представитель по приему претензий на продукцию,
в Республике Казахстан: ТОО «РДЦ-Алматы»
Қазақстан Республикасында дистрибутор және өнім бойынша арыз-талаптарды
қабылдаушының өкілі «РДЦ-Алматы» ЖШС,
Алматы қ., Домбровский көш., 3-а», литер Б, офис 1.
Тел.: 8 (727) 251-59-90/91/92; E-mail: RDC-Almaty@eksmo.kz
Өнімнің жарамдылық мерзімі шектелмеген.

Сертификация туралы ақпарат сайты: www.eksmo.ru/certification

Сведения о подтверждении соответствия издания согласно законодательству РФ
о техническом регулировании можно получить на сайте Издательства «Эксмо»
www.eksmo.ru/certification

Өндірген мемлекет: Ресей. Сертификация қарастырылған

Дата изготовления / Подписано в печать 29.04.2019. Формат 84x108¹/₁₆.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,76. Тираж экз. Заказ

6+

ISBN 978-5-04-103751-2



9 785041 037512 >

ISBN 978-5-04-103751-2



EKSMO.RU
новинки издательства



© Попов А.В., 2019
© Оформление. ООО «Издательство «Эксмо», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
---------------	---

1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

1.1. КИНЕМАТИКА	6
1.1.1. Механическое движение. Траектория. Путь. Перемещение.....	6
1.1.2. Прямолинейное движение. Скорость	8
1.1.3. Равноускоренное прямолинейное движение	9
1.1.4. Векторные величины в физике.....	10
1.1.5. Свободное падение	11
1.1.6. Движение по окружности.....	12
1.2. ДИНАМИКА	14
1.2.1. Масса. Плотность вещества	14
1.2.2. Сила	15
1.2.3. Инерция тел. Первый закон Ньютона.....	16
1.2.4. Второй и третий законы Ньютона	16
1.2.5. Сила трения	17
1.2.6. Сила упругости	17
1.2.7. Сила тяжести. Закон всемирного тяготения.....	18
1.2.8. Импульс тела. Закон сохранения импульса.....	19
1.3. РАБОТА И ЭНЕРГИЯ	21
1.3.1. Механическая работа и мощность	22
1.3.2. Кинетическая энергия	22
1.3.3. Консервативные и неконсервативные силы	23
1.3.4. Потенциальная энергия. Закон сохранения энергии в механике	23
1.3.5. Потенциальная энергия тела в однородном поле тяжести	25
1.3.6. Потенциальная энергия упругодеформированной пружины	25
1.3.7. Простые механизмы. Коэффициент полезного действия простых механизмов	26
1.4. ГИДРО- И АЭРОСТАТИКА	29
1.4.1. Давление жидкостей	29
1.4.2. Атмосферное давление. Опыт Торричелли	30
1.4.3. Закон Паскаля.....	31
1.4.4. Закон Архимеда.....	32
1.5. ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ	33
1.5.1. Амплитуда, фаза, период и частота гармонических колебаний.....	33
1.5.2. Затухающие колебания.....	36
1.5.3. Вынужденные колебания. Резонанс	37
1.6. ВОЛНЫ В УПРУГОЙ СРЕДЕ	39
1.6.1. Механизм образования волн в упругой среде.....	40
1.6.2. Звуковые волны	42
Тренировочные тестовые задания к разделу «Механические явления»	44
Тема 1.1 «Кинематика».....	44
Тема 1.2 «Динамика»	47
Тема 1.3 «Работа и энергия».....	49
Тема 1.4 «Гидро- и аэростатика»	50
Темы 1.5—1.6 «Механические колебания и волны. Звук»	51

2. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

2.1. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ	52
2.1.1. Строение вещества. Газы, жидкости и твердые тела	52
2.1.2. Внутренняя энергия и температура	54
2.2. ТЕРМОДИНАМИКА	56
2.2.1. Количество теплоты. Удельная теплоемкость тел	56
2.2.2. Закон сохранения энергии в тепловых процессах	58
2.2.3. Принцип работы тепловой машины	59
2.3. ИЗМЕНЕНИЕ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ ТЕЛ	61
2.3.1. Испарение и конденсация. Кипение жидкости	61

2.3.2. Влажность воздуха.....	62
2.3.3. Плавление и кристаллизация	63
Тренировочные тестовые задания к разделу «Тепловые явления»	66
3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ	
3.1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА.....	68
3.1.1. Электризация тел. Два рода зарядов	68
3.1.2. Закон сохранения заряда	69
3.1.3. Электрическое поле	69
3.1.4. Проводники и диэлектрики	70
3.2. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК	72
3.2.1. Сила тока	72
3.2.2. Закон Ома для участка цепи	73
3.2.3. Соединение проводников.....	75
3.2.4. Работа и мощность тока. Закон Джоуля-Ленца	76
3.3. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ	77
3.3.1. Взаимодействие магнитов. Магнитное поле	78
3.3.2. Опыт Эрстэда. Магнитное поле тока	78
3.3.3. Сила, действующая в магнитном поле на проводник с током	80
3.3.4. Явление электромагнитной индукции. Опыты Фарадея.....	80
3.3.5. Вихревые токи, или токи Фуко	82
3.3.6. Электромагнитное поле.....	82
3.4. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА.....	85
3.4.1. Прямолинейное распространение света.....	85
3.4.2. Отражение и преломление света	86
3.4.3. Дисперсия света.....	88
3.4.4. Линза	90
3.4.5. Построение изображений предметов в собирающей линзе.....	92
3.4.6. Рассеивающая линза	92
3.4.7. Глаз как оптическая система	93
3.4.8. Оптические приборы	94
Тренировочные тестовые задания к разделу «Электромагнитные явления»	97
4. КВАНТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ	
4.1. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА	101
4.1.1. Опыты Резерфорда по рассеянию α -частиц веществом. Планетарная модель атома.....	101
4.1.2. Заряд, масса и размер ядер атомов.....	102
4.1.3. Радиоактивность	103
4.1.4. Энергия связи ядер	104
4.1.5. Получение ядерной энергии. Цепная ядерная реакция.....	105
4.1.6. Ядерные реакторы.....	107
4.1.7. Термоядерные реакции. Проблема управляемого термоядерного синтеза.....	108
Тренировочные тестовые задания к разделу «Квантовые явления»	111
Ответы	112

Введение

*Физика – наука о природе, о наиболее общих и простых законах движения материи. Слово *physis* в переводе с греческого означает «природа». Физика как наука зародилась в Древней Греции и включала в себя все, что человеку было известно о природных явлениях, в частности, и астрономию как науку о движении небесных тел. Физика была тогда наукой описательной, основывалась на наблюдениях и не пользовалась экспериментом как критерием истинности умозаключений. Постановкой экспериментов человечество открыло новую эпоху в своем развитии. Это произошло в XVII веке нашей эры, обусловило бурное развитие знаний о природе и позволило открыть законы, которым подчиняются природные явления. Сформулированные на языке математики, они устанавливают количественные связи между физическими характеристиками явлений.*

Изучая законы природы и познавая суть природных явлений, физика всегда была двигателем прогресса. Каждая её ветвь в своём развитии неизбежно приводила к возникновению какой-либо сферы человеческой деятельности. Так, исследование явлений электричества и магнетизма привело к возникновению радиосвязи и электроники, открытия в области микромира — к освоению энергии атома и созданию современных информационных технологий. В свою очередь, потребности практики стимулировали развитие науки. Термодинамика как наука возникла из потребности заменить физический труд животных и человека машинным.

Накопление знаний о природе привело к возникновению и других естественных наук, таких как химия, биология, геофизика, астрофизика. В основе этих наук лежат законы, открытые физикой. Развитие техники также обусловлено успехами физики, так как знание глубинных закономерностей природных явлений дало возможность создать эффективно действующие механизмы, современные приборы связи, транспортные средства, компьютеры, лазеры и другие атрибуты высоких технологий.

Физика как наука условно делится на несколько связанных между собой разделов, рассматривающих разные природные явления. Это — *механика, молекулярная физика, электромагнетизм, оптика, физика атома и атомного ядра.*

В настоящем пособии излагаются вопросы школьного курса физики, предлагаемые ученикам 9 класса во время проведения Государственной итоговой аттестации (ГИА). Они охватывают четыре темы — механические, тепловые, электромагнитные и квантовые явления. Соответствующие разделы пособия разделены на подразделы, в конце каждого из которых приводится список вопросов для самопроверки, призванных обратить внимание изучающего предмет на самое важное, что в нем содержится. Тестовые задания, заключающие каждую из тем, помогут учащимся приспособиться к условиям прохождения ГИА и оценить уровень их сложности.

1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

- Знать:**
- смысл понятий: физическое явление, физический закон, вещество и поле, взаимодействие тел;
 - смысл физических величин: путь, перемещение, скорость, ускорение, масса, плотность вещества, сила, давление, импульс, работа, мощность, кинетическая энергия, потенциальная энергия;
 - смысл законов Ньютона, закона всемирного тяготения, законов сохранения энергии и импульса.
- Уметь:**
- объяснить и описать физические явления и процессы:
 - равномерное прямолинейное движение;
 - равноускоренное прямолинейное движение;
 - обращение тела по окружности;
 - колебательное движение;
 - передача давления жидкостями и газами;
 - плавание тел.

1.1. КИНЕМАТИКА

Материей называют все существующие в природе тела и различные поля — поле тяготения, электромагнитное поле, поле внутриядерных сил. Материя находится в непрерывном движении, простейшей формой которого является перемещение тел друг относительно друга, т. е. *механическое движение*. Эта форма движения изучается в механике. Раздел механики, в котором рассматривается движение материальных тел, не касаясь причин, его вызывающих, называется **кинематикой**.

1.1.1. Механическое движение. Траектория. Путь. Перемещение

Простейшим объектом, движение которого изучает механика, является материальная точка.

Материальной точкой в механике называется тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь. Планеты, обращающиеся вокруг Солнца, можно считать материальными точками, поскольку размеры планет, сколь бы велики они ни были, все же очень малы по сравнению с их расстояниями до Солнца. Снаряд, выпущенный из орудия, или поезд, идущий из одного города в другой, также могут быть приняты за материальную точку.

При *поступательном движении* твердого тела все его точки описывают одинаковые траектории. Поэтому в дальнейшем движущуюся материальную точку мы часто будем называть *телом*. Примерами поступательного движения служат движение кабин колеса обозрения, движение поршней в цилиндрах двигателя автомобиля.

Движение тела в пустом пространстве лишено смысла. Мы можем говорить лишь об относительном перемещении.

Тело, относительно которого определяется положение других тел, называется **телом отсчета**. В качестве тела отсчета чаще всего используют Землю, с которой связывают прямоугольную *декартову систему координат* (рис. 1.1). Отрезки x , y , z , отсекаемые на осях координат перпендикулярными к ним плоскостями, проходящими через точку M , называются *координатами точки M* .

Системой отсчета называется совокупность системы координат, связанной с телом отсчета, и покоящихся относительно него часов.

Движение точки полностью описано, если известно ее положение в любой момент времени относительно выбранной системы координат. Число независимых координат, определяющих положение тела в пространстве, называется *числом его степеней свободы*. Положение материальной точки задается тремя координатами, поэтому она имеет *три степени свободы*. Чтобы описать ее движение, необходимо найти три функции:

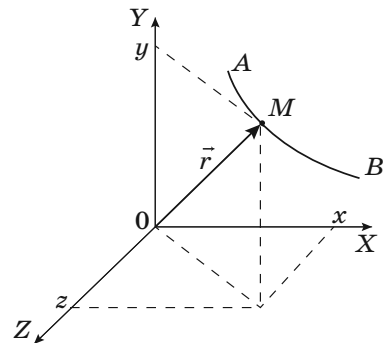


Рис. 1.1

$$\begin{aligned} x &= x(t), \\ y &= y(t), \\ z &= z(t). \end{aligned} \quad (1.1)$$

Вид этих функций определяется конкретными условиями, в которых происходит движение материальной точки. Их знание позволяет определить ее положение в любой момент времени.

Траекторией называется совокупность последовательных положений материальной точки, т. е. линия, которую она описывает в пространстве при своем движении (линия AB на рис. 1.1). Система уравнений (1.1) задает траекторию точки в *параметрическом виде*, где в качестве параметра выступает время t .

В общем случае траектория представляет собой кривую линию. Движение по траектории можно уподобить ходьбе по извилистой тропинке в лесу. Расстояние, пройденное по ней за некоторый промежуток времени, называется **пройденным путем**. Путь s — скалярная физическая величина, т. е. такая, которая характеризуется только численным значением, показывающим в данном случае, сколько единиц длины — *метров* — укладывается на длине траектории.

Отрезок прямой, соединяющей исходную точку пути с конечной точкой, называется **перемещением тела**. Перемещение, в отличие от пройденного пути, является величиной *векторной*, поскольку показывает направление, в котором оно было совершено. Сказанное иллюстрируется рис. 1.2, на котором изображена траектория S движения тела из точки A в точку B , лежащая в плоскости XOY , и вектор перемещения \overline{AB} .

В частном случае, если тело возвращается в исходную точку, его перемещение равно нулю. Величина перемещения (длина вектора \overline{AB}) меньше длины пройденного пути и равна ему только в том случае, когда движение происходит вдоль прямой линии, соединяющей начало и конец пути, а скорость тела на всем пути не изменяет своего направления.

Задача механики заключается в отыскании функций (1.1). Для формулировки законов, с помощью кото-

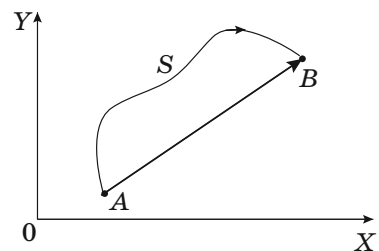
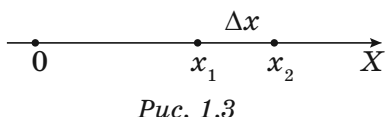


Рис. 1.2

рых могут быть найдены эти функции, нужно ввести понятия *скорости, ускорения, массы, импульса и силы*. В кинематике вводятся понятия *скорости и ускорения*. Определим их для материальной точки, движущейся вдоль одной из координатных осей, когда ее положение в пространстве характеризуется одной координатой.

1.1.2. Прямолинейное движение. Скорость

Рассмотрим движение материальной точки вдоль прямой линии, которую выберем в качестве координатной оси X (рис. 1.3). Координатой x точки M называется ее расстояние от начала координат (точки O).



Зависимость координаты от времени выражается функцией $x = x(t)$. Пусть в момент времени t материальная точка имела координату $x_1 = x(t)$, а спустя промежуток времени Δt — координату $x_2 = x(t + \Delta t)$, так что их разность $\Delta x = x_2 - x_1 = x(t + \Delta t) - x(t)$ есть путь, который она прошла за время Δt .

Отношение пройденного пути ко времени:

$$v_{\text{cp}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} \quad (1.2)$$

называется **средней скоростью** материальной точки за время Δt .

Среднюю скорость поезда можно найти, разделив расстояние между городами s на его время в пути t :

$$v_{\text{cp}} = \frac{s}{t}. \quad (1.3)$$

Если путь Δs , проходимый телом за короткий промежуток времени Δt , например за одну секунду, столь мал, что его скорость за это время существенно не изменяется, отношение этого пути ко времени Δt будет равно скорости тела в данный момент времени. Она носит название **мгновенной** или просто **скорости** тела:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}. \quad (1.4)$$

Скорость показывает быстроту изменения координаты тела и измеряется в системе СИ в *метрах в секунду*: $[v] = \text{м/с}$.

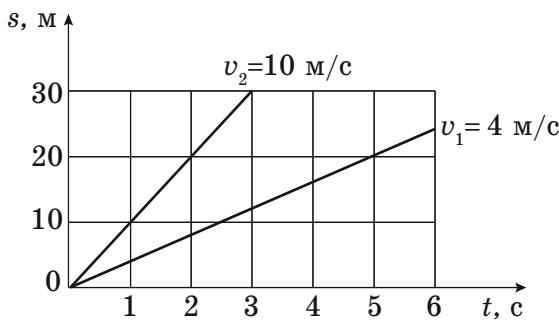
Если на всем пути тело движется с постоянной скоростью, его мгновенная скорость совпадает со средней:

$$v = v_{\text{cp}}.$$

Пройденный путь s за промежуток времени t находится тогда из уравнения (1.3):

$$s = v \cdot t. \quad (1.5)$$

Движение с постоянной скоростью называется **равномерным**. График зависимости пути от времени при таком движении представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат (рис. 1.4).



1.1.3. Равноускоренное прямолинейное движение

Движение тела является **ускоренным**, если его скорость с течением времени изменяется.

Зависимость скорости тела от времени выражается функцией $v = v(t)$. Пусть в момент времени t тело имело скорость $v_1 = v(t)$, а спустя промежуток времени Δt — скорость $v_2 = v(t + \Delta t)$, т. е. приращение скорости: $\Delta v = v_2 - v_1 = v(t + \Delta t) - v(t)$.

Отношение приращения скорости ко времени, за которое оно произошло, называется **средним значением ускорения**:

$$a_{\text{ср}} = \frac{\Delta v}{\Delta t}. \quad (1.6)$$

Его значение за короткий промежуток времени равно *мгновенному ускорению* или просто *ускорению* тела. Ускорение показывает быстроту изменения скорости тела в данный момент времени и измеряется в метрах в секунду за секунду:

$$[a] = \text{м/с}^2.$$

Если возрастание скорости происходит равномерно, то $a = \text{const}$ и движение его называется **равноускоренным**.

Поскольку $\Delta v = v - v_0$, из уравнения (1.6) в этом случае можно получить зависимость скорости от времени:

$$v = v_0 + at, \quad (1.7)$$

где v_0 — скорость в начальный момент времени ($t = 0$). График этой зависимости приведен на рис. 1.5.

В силу того, что скорость возрастает пропорционально времени движения, среднее значение скорости равно полусумме начального и конечного ее значений:

$$v_{\text{ср}} = \frac{v + v_0}{2}. \quad (1.8)$$

Подставив сюда уравнение (1.7) и учитывая уравнение (1.3), найдем путь, пройденный телом за время t :

$$s = \frac{v + v_0}{2} t = \frac{2v_0 + at}{2} t = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (1.9)$$

График этой функции — *парабола*. При $v_0 = 0$, когда тело начинает движение из состояния покоя, вершина параболы совпадает с началом координат (рис. 1.6).

Если тело движется замедленно, его ускорение отрицательно ($a < 0$).

Выражая время t из уравнения (1.7) и подставляя его в уравнение (1.9), получим формулу, связывающую конечную и начальную скорости движения, ускорение и пройденный путь:

$$v^2 - v_0^2 = 2as. \quad (1.10)$$

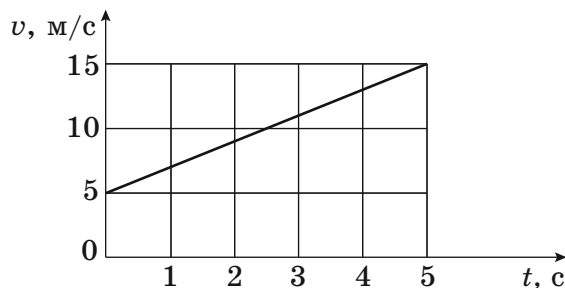


Рис. 1.5

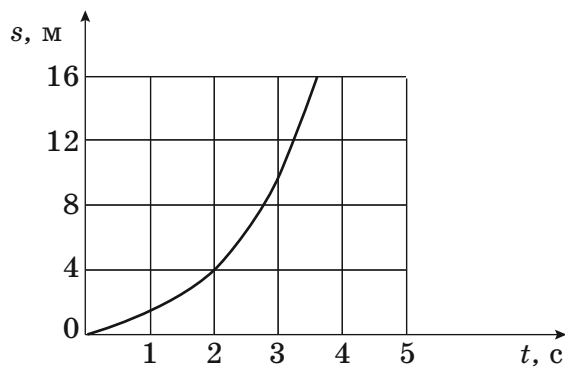


Рис. 1.6

Уравнения (1.7), (1.9) и (1.10) составляют полную систему уравнений, достаточную для решения задач кинематики, в которых рассматривается движение тел с постоянным ускорением.

Скорость и ускорение являются величинами *векторными*, и указанные уравнения следует записывать для каждой из компонент этих векторов — проекций их на оси координат.

1.1.4. Векторные величины в физике

Движение тела часто происходит по траектории, не являющейся прямой линией. В этом случае скорость изменяется и по модулю, и по направлению и рассматривается как вектор.

Физические величины, характеризующиеся не только численным значением, но и направлением в пространстве, называются **векторными**.

Помимо скорости, векторными являются также *перемещение, сила, ускорение* и ряд других величин. Принадлежность какой-либо величины к векторным устанавливается, в конечном счете, опытным путем по признаку, подчиняется ли она правилу сложения векторов.

В качестве примера рассмотрим перемещение тела из точки *A* сначала в точку *B*, а затем — в точку *C* (рис. 1.7). Результирующее перемещение изображает отрезок *AC*. Обозначая каждое из перемещений векторами \vec{a} , \vec{b} , \vec{c} , приходим к заключению, что

$$\vec{a} + \vec{b} = \vec{c}. \quad (1.11)$$

Формула (1.11) и рис. 1.7 устанавливают *правило сложения векторов*:

Чтобы получить сумму векторов \vec{a} и \vec{b} , нужно совместить начало вектора \vec{b} с концом вектора \vec{a} и соединить начало вектора \vec{a} с концом вектора \vec{b} направленным отрезком \vec{c} , который и будет равен сумме векторов \vec{a} и \vec{b} .

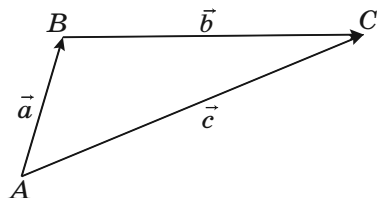


Рис. 1.7

Векторы \vec{a} и \vec{b} называются *слагаемыми векторами*, вектор \vec{c} — *геометрической суммой*, или *результирующим вектором*. Очевидно, что от перестановки слагаемых сумма векторов не меняется:

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

Чтобы образовать сумму *n* векторов \vec{a} , \vec{b} , \vec{c} , ..., используют *правило многоугольника*:

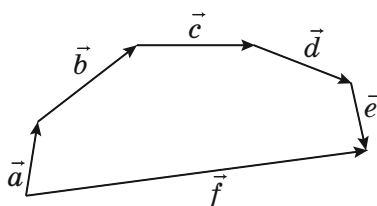


Рис. 1.8

Векторы следует расположить так, чтобы начало каждого следующего слагаемого вектора совпало с концом предыдущего. Сумма векторов — вектор, проведенный из начала первого к концу последнего из них (рис. 1.8).

Разность векторов \vec{a} и \vec{b} можно найти, отложив оба вектора \vec{a} и \vec{b} из общего начала и соединив конец вектора \vec{b} с концом вектора \vec{a} , который и будет вектором $\vec{a} - \vec{b}$ (рис. 1.9).

Диагональ параллелограмма, построенного на векторах \vec{a} и \vec{b} , дает их сумму (*правило параллелограмма*). Другая диагональ этого параллелограмма будет их разностью (рис. 1.10).

Помимо сложения и вычитания, векторы можно умножать на *скаляр*, т. е. величину, характеризующую только своим численным значением.

Умножив вектор \vec{a} на число α , получим вектор \vec{b} , параллельный исходному, но имеющий длину, в α раз отличающуюся от длины вектора \vec{a} :

$$\vec{b} = \alpha \vec{a}. \quad (1.12)$$

Модуль (или длину) вектора обозначают той же буквой, но без стрелки: $|\vec{a}| = a$. Векторы единичной длины — *орты*, задающие направления осей X , Y и Z декартовой системы координат, — обозначаются соответственно буквами \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} (рис. 1.11). Пользуясь правилом сложения векторов (1.11) и правилом умножения на скаляр (1.12), вектор \vec{a} можно представить в виде суммы:

$$\vec{a} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k},$$

где a_x , a_y , a_z — его проекции на координатные оси, называемые *составляющими* (или *компонентами*) вектора \vec{a} .

Длина вектора \vec{a} равна диагонали прямоугольного параллелепипеда. По теореме Пифагора:

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

Если два вектора равны между собой, то их проекции также равны между собой и наоборот, т. е. если $\vec{a} = \vec{b}$, то

$$a_x = b_x, \quad a_y = b_y, \quad a_z = b_z.$$

Проекция геометрической суммы нескольких векторов равна алгебраической сумме проекций слагаемых векторов, т. е. если $\vec{a} = \vec{b} + \vec{c}$, то:

$$a_x = b_x + c_x, \quad a_y = b_y + c_y, \quad a_z = b_z + c_z.$$

1.1.5. Свободное падение

Проиллюстрируем сказанное в предыдущих пунктах этого раздела на примере свободного падения тела в поле тяжести Земли. Пусть тело бро-

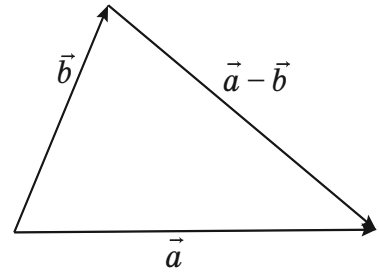


Рис. 1.9

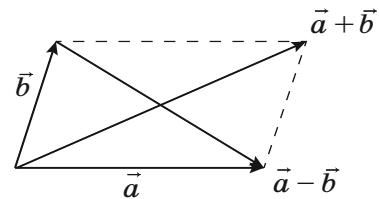


Рис. 1.10

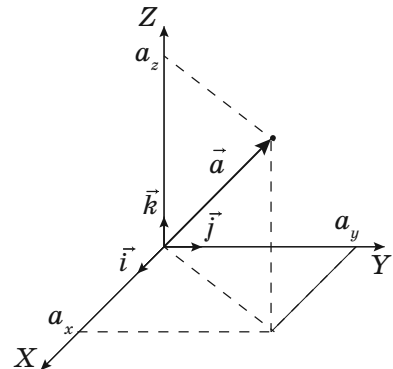


Рис. 1.11

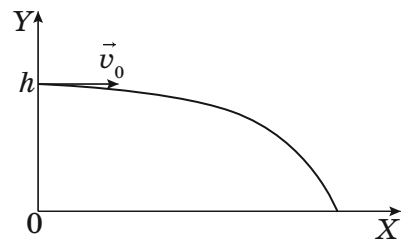


Рис. 1.12

шено горизонтально на высоте h со скоростью v_0 (рис. 1.12). Найдём уравнение траектории его движения.

Движение тела происходит в плоскости. Выберем в этой плоскости оси координат X и Y , как показано на рис. 1.12. Поскольку сила тяжести направлена вертикально вниз, проекция на ось X вектора ускорения равна нулю: $a_x = 0$.

По формуле (1.7), отнесенной к оси X , найдём, что проекция вектора скорости на эту ось постоянна: $v_x = v_0 = \text{const}$.

Поскольку $s = x - x_0$, уравнение (1.9) можно записать в виде:

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{a_x t^2}{2}, \quad (1.13)$$

где x_0 — координата тела по оси X в начальный момент времени. В нашем случае $x_0 = 0$. Тогда:

$$x(t) = v_0 t. \quad (1.14)$$

Ускорение тела вдоль оси Y равно ускорению свободного падения g , взятому со знаком «минус», так как проекция вектора \vec{g} на эту ось отрицательна: $a_y = -g$. Заменив x на y в формуле (1.13) и учитывая, что начальная координата тела по оси Y : $y_0 = h$, а проекция начальной скорости $v_{0y} = 0$, найдём:

$$y(t) = h - \frac{gt^2}{2}. \quad (1.15)$$

Уравнения (1.14) и (1.15) задают траекторию тела в параметрическом виде. Выразив t из первого и подставив его во второе, получим уравнение этой траектории в явном виде. Поскольку $t = \frac{x}{v_0}$, имеем:

$$y(x) = h - \frac{g}{2v_0^2} x^2. \quad (1.16)$$

Это уравнение параболы с вершиной в точке $(0, h)$ и ветвями, направленными вниз (рис. 1.12). В однородном поле тяжести, когда ускорение свободного падения одинаково в любой точке пространства, тело движется по параболе.

Из уравнения (1.15) можно найти время полета тела t_n . В момент касания поверхности Земли его координата по оси Y станет равной нулю:

$$y(t_n) = h - \frac{gt_n^2}{2} = 0,$$

откуда:

$$t_n = \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

Подставляя его в уравнение (1.14), найдём дальность полета тела l по горизонтали:

$$l = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

Дальность полета пропорциональна скорости бросания тела v_0 и возрастает с увеличением высоты h , с которой оно было брошено.

1.1.6. Движение по окружности

Наиболее простой случай криволинейного движения — *равномерное движение по окружности*. Вектор скорости тела направлен по касательной к этой окружности в каждой ее точке и изменяется только по направлению, оставаясь постоянным по модулю (рис. 1.13).

Пусть за малый промежуток времени Δt тело перемещается из положения A_1 в положение A_2 (рис. 1.14). Перенесем вектор \vec{v}_1 , показывающий скорость тела в точке A_1 , параллельно самому себе в точку A_2 . Отрезок прямой B_1B_2 равен изменению скорости тела $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$, а отношение $\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{a}$ —

вектор ускорения, параллельный вектору $\Delta \vec{v}$. Вектор ускорения, как видно из рис. 1.14, параллелен отрезку OA , т. е. направлен вдоль радиуса к центру окружности, а само ускорение называется *центростремительным*. Поскольку треугольники OA_1A_2 и $A_2B_1B_2$ подобны, можно записать:

$$\frac{\Delta v}{v_1} = \frac{A_1A_2}{R}. \quad (1.17)$$

Для короткого промежутка времени точки A_1 и A_2 расположены настолько близко друг к другу, что длину дуги A_1A_2 окружности можно считать равной длине отрезка A_1A_2 , сама же длина этой дуги есть путь, пройденный телом за время Δt со скоростью v_1 : $A_1A_2 = s = v_1 \cdot \Delta t$.

Тогда, подставляя в уравнение (1.17) и учитывая уравнение (1.6), получим:

$$a_{\text{ц}} = \frac{v^2}{R}. \quad (1.18)$$

При равномерном движении тела по окружности ускорение направлено к ее центру и равно квадрату скорости, деленному на радиус этой окружности.

Тело, равномерно движущееся по окружности, за время t совершает N оборотов. Число оборотов за единицу времени называется **частотой** n его обращения по окружности: $n = \frac{N}{t}$.

Периодом обращения T называется время, за которое оно совершает один оборот: $T = \frac{t}{N}$.

Период и частота — взаимно обратные величины: $T = \frac{1}{n}$.

Единица измерения периода $[T] = \text{с}$ (секунда), частоты $[n] = 1/\text{с}$ (оборот в секунду).

Период можно выразить через радиус окружности R и скорость тела v , разделив длину окружности на скорость: $T = \frac{2\pi R}{v}$.

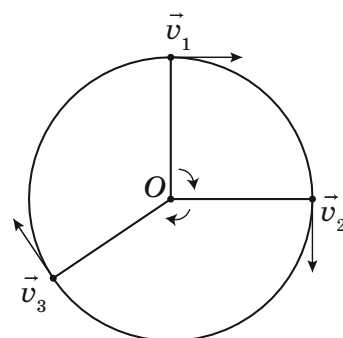


Рис. 1.13

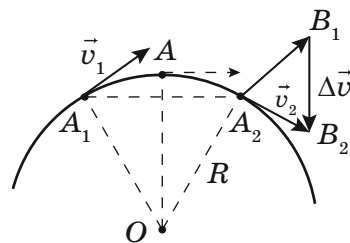


Рис. 1.14

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение физики как науки. Что она изучает и какова ее роль в ряду других естественных наук?
2. Что называется механическим движением? Какой способ описания механического движения вам известен?
3. Дайте определение материальной точки как основного объекта, движение которого изучает механика.
4. Дайте определение траектории движения материальной точки и назовите способы ее задания.
5. Сформулируйте основную задачу механики. Перечислите физические величины, которые необходимо знать для ее решения.
6. Дайте определение средней и мгновенной скорости материальной точки.
7. Нарисуйте графики зависимости пути и скорости от времени при равномерном движении материальной точки.
8. Что называется ускорением материальной точки и каков его физический смысл?
9. Изобразите графики зависимостей от времени координаты и скорости материальной точки при ее равноускоренном движении.
10. Выведите формулу $v^2 - v_0^2 = 2as$, которая справедлива при равноускоренном движении.
11. Что называется вектором? Приведите примеры векторных величин.
12. Сформулируйте правило сложения, правило вычитания векторов.
13. Что называется проекциями вектора на координатные оси? Как формулируются правила сложения и вычитания для проекций векторов?
14. Что называется модулем вектора и как его выразить через проекции вектора на координатные оси?
15. Чему равно центростремительное ускорение тела, равномерно движущегося по окружности?
16. Дайте определение периода и частоты обращения тела по окружности.

1.2. ДИНАМИКА

Динамика — раздел механики, изучающий движение тел под действием приложенных сил. Законы механики, позволяющие решить ее основную задачу — нахождение траектории тела, были сформулированы в XVII в. Исааком Ньютоном. Эти законы составляют основу механики как науки. Для их формулировки, наряду со скоростью и ускорением, вводятся понятия *массы, импульса и силы*.

1.2.1. Масса. Плотность вещества

Масса служит мерой количества вещества в теле. Массу какого-либо тела m можно определить путем сравнения с эталонной массой, взвешивая тело на рычажных или пружинных весах. Так, определенная масса называется *гравитационной*, поскольку критерием ее величины в данном случае является сила

притяжения к Земле, т. е. сила гравитации. Эталоном массы в 1 килограмм (кг) служит масса дистиллированной воды объемом 1 дм³ при температуре 4 °С, поскольку при этой температуре ее плотность максимальна.

Одинаковые по объему тела, изготовленные из разных веществ, имеют разные массы в силу того, что различаются их плотности.

Плотностью вещества ρ называется отношение его массы к объему:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1.19)$$

Плотность вещества численно равна массе, содержащейся в единице объема ($V = 1 \text{ м}^3$). Единица плотности в системе СИ — килограмм на кубический метр:

$$[\rho] = \text{кг/м}^3.$$

Зная плотность, можно найти массу тела, не помещая его на весы. Для этого требуется измерить объем тела и умножить его на плотность:

$$m = \rho \cdot V.$$

1.2.2. Сила

Сила является мерой взаимодействия тел. Сила проявляет себя в изменении скорости движения тела, на которое действует, и определяется произведением массы тела на его ускорение:

$$\vec{F} = m\vec{a}. \quad (1.20)$$

В системе СИ единица силы — *ньютон* (Н):

$$[F] = \text{Н} = \text{кг} \cdot \text{м/с}^2.$$

1 ньютон — сила, сообщаящая телу массой в 1 кг ускорение в 1 м/с².

Из соотношения (1.20) следует, что ускорение тела обратно пропорционально его массе: $a = \frac{F}{m}$ — чем больше масса, тем труднее изменить скорость этого тела, т. е. масса тела есть мера его инертности. Масса в данном случае выступает в роли *инертной массы*.

Тела могут взаимодействовать друг с другом при их контакте благодаря силе трения, силе тяги или посредством создаваемых ими полей: гравитационного, электростатического (между заряженными телами), магнитного.

Сила, как и ускорение, имеет направление в пространстве и является величиной векторной, поскольку, как показывает опыт, силы подчиняются закону сложения векторов (1.11). Если к телу в одной его точке приложены две силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , оно движется так, будто на него действует одна — результирующая сила $\vec{F}_{\text{рез}}$, равная сумме этих сил (рис. 1.15):

$$\vec{F}_{\text{рез}} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2.$$

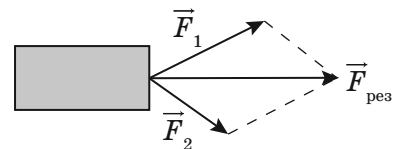


Рис. 1.15

1.2.3. Инерция тел. Первый закон Ньютона

Опыт показывает, что если какое-либо тело привести в движение и отпустить, оно через некоторое время придет в состояние покоя. Это происходит под действием силы трения, направленной в сторону, противоположную направлению движения. Уменьшая трение, можно добиться большей длины пробега тела до остановки.

Итальянский ученый Галилео Галилей в XVI в., проанализировав результаты поставленных им опытов, сумел понять, что движение тела происходит не благодаря приложенной силе, а в силу природного свойства тел сохранять состояние своего движения, которое он назвал *инерцией*, а также сформулировал закон, называемый **законом инерции**:

Если на тело не действуют силы, то оно покоится или движется с постоянной скоростью.

Этот закон Ньютон поставил первым в ряду трех своих законов, которые составили основу механики. Первый закон позволяет дать определение *инерциальной системы отсчета*.

Инерциальной называется система отсчета, относительно которой тело покоится или движется с постоянной скоростью, если на него не действуют силы или их сумма равна нулю. Такая система отсчета не имеет ускорения.

Система отсчета, движущаяся с ускорением, называется **неинерциальной**. В частности, неинерциальной является любая вращающаяся система отсчета. В неинерциальных системах на тела действуют дополнительные силы, называемые *силами инерции*, не связанные с взаимодействием тел. Так, человек в набирающем скорость автомобиле чувствует силу, прижимающую его к спинке сиденья. При торможении эта сила направлена в сторону движения и толкает его вперед.

1.2.4. Второй и третий законы Ньютона

Второй закон Ньютона позволяет найти ускорение тела, если известны действующие на него силы:

Произведение массы тела на его ускорение равно результирующей приложенных к нему сил.

$$m\vec{a} = \vec{F}_{\text{рез}}. \quad (1.21)$$

Третий закон Ньютона гласит:

Если два тела взаимодействуют друг с другом, то сила, действующая на первое тело со стороны второго, равна по модулю и противоположна по направлению силе, действующей на второе тело со стороны первого (рис. 1.16).

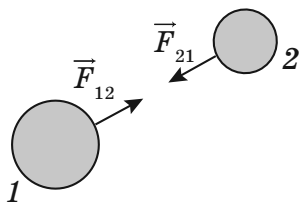


Рис. 1.16

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \quad (1.22)$$

Законы Ньютона выполняются в инерциальных системах отсчета. Они не выводятся из каких-либо

общих принципов. Критерием их справедливости служит опыт. Расчеты, основанные на законах Ньютона, согласуются с экспериментом.

1.2.5. Сила трения

Сила трения возникает между телами, когда они соприкасаются друг с другом, и проявляет себя при попытке сместить одно тело относительно другого. Сила трения обусловлена шероховатостями поверхностей, которые приходят в зацепление друг с другом и препятствуют движению. Трение можно уменьшить путем шлифовки поверхностей.

Сила трения пропорциональна силе нормального давления N , направленной перпендикулярно поверхности соприкосновения тел:

$$F_{\text{тр}} = \mu N. \quad (1.23)$$

Коэффициент пропорциональности μ называется *коэффициентом трения*. Он характеризует свойства соприкасающихся поверхностей и не зависит от веса тела.

В случае, когда поверхность соприкосновения тел горизонтальна, сила нормального давления равна весу тела:

$$N = mg.$$

Сила трения направлена в сторону, противоположную направлению движения тела. Ее можно найти, измерив с помощью динамометра силу F , которую нужно приложить, чтобы тело двигалось с постоянной скоростью (рис. 1.17). Поскольку в этом случае его ускорение равно нулю, согласно уравнению (1.21), обращается в нуль и результирующая действующих на него сил, т. е. движущая сила F равна силе трения: $F = F_{\text{тр}}$.

Опыт показывает, что при движении сила трения меньше той силы, которую нужно приложить, чтобы привести в движение покоящееся тело. Эта сила называется *силой трения покоя*.

Силы трения проявляют себя в движущихся частях машин и механизмов. Чтобы уменьшить эти силы, используют машинные масла для смазки трущихся деталей. Однако чаще всего силы трения бывают полезны. Благодаря этим силам осуществляется сцепление колес транспортных средств с полотном дороги, надежная работа их тормозных систем. Не будь трения, люди не могли бы ходить, отталкиваясь от земли, предметы выскальзывали бы из рук, нельзя было бы вязать ткани, завязывать узлы, пользоваться ленточными транспортерами и во многих других случаях.

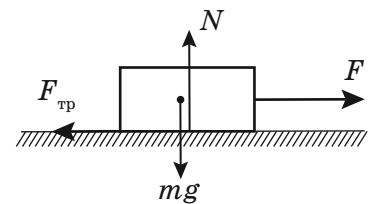


Рис. 1.17

1.2.6. Сила упругости

Деформацию стальной пружины или резинового жгута можно наблюдать, приложив к ним силу. Чем больше сила, тем большей будет деформация. Если при снятии нагрузки тело принимает первоначальную форму, деформация называется *упругой*. Исчезновение деформации обязано внутренней силе — *силе упругости*.

Сила упругости при упругой деформации пропорциональна величине деформации (закон Гука).

Для пружины, деформированной на величину x ,

$$F_{\text{упр}} = -kx. \quad (1.24)$$

Коэффициент пропорциональности k называется *жесткостью пружины* и зависит от ее формы и размеров. Знак «минус» указывает, что сила упругости $F_{\text{упр}}$ направлена в сторону, противоположную смещению тела, закрепленного на пружине (рис. 1.18).

Природа силы упругости заключается в том, что атомы твердых тел находятся друг от друга на некотором равновесном расстоянии. Попытка увеличить или уменьшить его путем растяжения или сжатия тела приводит к появлению межмолекулярных сил, стремящихся сохранить это расстояние неизменным. Тем же свойством обладают и жидкости, которые не имеют собственной формы, но имеют собственный объем.

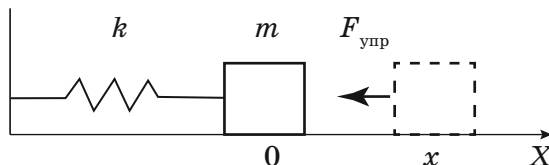


Рис. 1.18

Твердые тела и жидкости с большим трудом поддаются деформации, обнаружить которую можно, используя точные измерительные приборы. Так, стальной провод длиной 1 м и диаметром 1 мм под действием силы 100 Н (вес ведра воды) удлинится всего на 0,6 мм. Если нагрузка превышает некоторое предельное значение, деформация тела становится *неупругой*, т. е. остается после снятия нагрузки. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к разрушению тела.

Малая сжимаемость жидкостей используется в гидравлических приводах машин и механизмов для передачи движения на расстояние — в тормозных системах автомобилей, экскаваторах, самосвалах, самолетах, вертолетах и судах.

1.2.7. Сила тяжести. Закон всемирного тяготения

Тело, поднятое над Землей, падает вниз. Это происходит под действием *силы тяжести* или *гравитационной силы*. Она составляет вес тела P , который мы измеряем с помощью пружинных весов. Чем больше масса тела, тем больше эта сила. По второму закону Ньютона, ускорение, с которым падает тело, равно отношению этих величин:

$$a = \frac{P}{m}.$$

Опыт показывает, что все тела падают с одинаковым ускорением, называемым *ускорением свободного падения*, которое на поверхности Земли составляет $g = 9,8 \text{ м/с}^2$. Это значит, что **инертная и гравитационная массы тел равны друг другу**.

Притяжение тел к Земле вызвано природным свойством всех материальных тел притягиваться друг к другу — *гравитацией*. Закон, которому подчиняется сила гравитации, был открыт И. Ньютоном в XVII в.

Сила притяжения двух тел сферической формы (или точечных масс) пропорциональна произведению их масс m_1 и m_2 и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между их центрами:

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}. \quad (1.25)$$

Коэффициент пропорциональности $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ называется *гравитационной постоянной*, численное значение которой определяется экспериментально. Для этого измеряют силу взаимного притяжения двух тел с известными массами, находящихся на известном расстоянии друг от друга. В уравнении (1.25) неизвестной остается только гравитационная постоянная γ .

Чтобы обосновать свой закон, Ньютон заметил, что центростремительное ускорение Луны, находящейся на расстоянии $r = 384\,000 \text{ км}$ от центра Земли, в 3 600 раз меньше ускорения свободного падения на поверхности Земли на расстоянии от ее центра 6400 км (радиус Земли R). Это ускорение можно найти из уравнения (1.18) $a_{\text{ц}} = \frac{v^2}{r}$, вычислив скорость Луны на своей орбите. Для этого следует разделить длину орбиты $2\pi r$ на время, за которое Луна совершает один оборот — период ее обращения T :

$$v = \frac{2\pi r}{T}.$$

Сила тяжести на орбите Луны:

$$P_{\text{л}} = m a_{\text{ц}} = \gamma \frac{mM}{r^2}, \quad (1.26)$$

а на поверхности Земли:

$$P = mg = \gamma \frac{mM}{R^2}, \quad (1.27)$$

где M — масса Земли. Взяв отношение (1.26) к (1.27), видим, что отношение ускорений $\frac{a_{\text{ц}}}{g}$ обратно пропорционально отношению квадратов расстояний $\frac{r^2}{R^2}$, которое также составляет 3 600 единиц.

Сокращая в уравнении (1.27) массу тела m , можно найти массу Земли:

$$M = g \frac{R^2}{\gamma}.$$

Эксперимент по определению гравитационной постоянной γ , выполненный в 1798 г. английским физиком Г. Кавендишем, по существу является «взвешиванием» Земли. Сравнивая тем же способом массу Земли с массой Солнца, можно найти и его массу, а затем и массы обращающихся вокруг него планет, используя известные значения их расстояний от Солнца и периодов обращения вокруг него.

1.2.8. Импульс тела. Закон сохранения импульса

Импульсом тела (материальной точки) \vec{p} называется произведение его массы m на скорость \vec{v} :

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (1.28)$$

Единица измерения импульса:

$$[p] = \text{кг} \cdot \text{м/с}.$$

Для тела постоянной массы изменение импульса обусловлено изменением его скорости:

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

Пусть оно происходит под действием приложенных сил за короткий промежуток времени Δt . Разделив последнее равенство на Δt и учитывая уравнение (1.21), получим:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = m \vec{a} = \vec{F}_{\text{рез}},$$

Скорость изменения импульса тела со временем равна результирующей приложенных к нему сил:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}_{\text{рез}}. \quad (1.29)$$

Это уравнение выражает второй закон Ньютона в более общей формулировке, в которой предполагается, что может изменяться не только скорость, но и масса тела.

Из законов Ньютона следует закон сохранения импульса для замкнутой системы тел. **Замкнутой называют систему тел, на которые не действуют внешние силы.** Тела системы могут взаимодействовать только между собой.

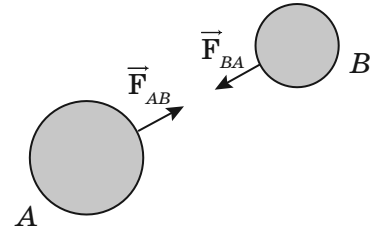


Рис. 1.19

Рассмотрим замкнутую систему, состоящую из двух тел A и B (рис. 1.19). Согласно третьему закону Ньютона, силы их взаимодействия:

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}.$$

По второму закону Ньютона $\vec{F}_{AB} = \frac{\Delta \vec{p}_A}{\Delta t}$, $\vec{F}_{BA} = \frac{\Delta \vec{p}_B}{\Delta t}$, поэтому $\frac{\Delta \vec{p}_A}{\Delta t} = -\frac{\Delta \vec{p}_B}{\Delta t}$, т. е. $\frac{\Delta(\vec{p}_A + \vec{p}_B)}{\Delta t} = 0$, откуда следует, что $\vec{p}_A + \vec{p}_B = \text{const}$.

Для системы n тел:

$$\sum_{i=1}^n \vec{p}_i = \text{const}. \quad (1.30)$$

Это уравнение выражает **закон сохранения импульса**:

Суммарный импульс замкнутой системы тел не изменяется со временем.

Векторное уравнение (1.30) распадается на три независимых уравнения для компонент импульса по осям координат:

$$\sum_{i=1}^n p_{xi} = \text{const}, \quad \sum_{i=1}^n p_{yi} = \text{const}, \quad \sum_{i=1}^n p_{zi} = \text{const}.$$

Если вдоль какого-либо направления на систему тел не действуют внешние силы, проекция ее суммарного импульса на это направление остается постоян-

ной. Это позволяет использовать закон сохранения импульса при решении задач механики.

Как показывает опыт, закон сохранения импульса выполняется при *любых взаимодействиях тел* внутри замкнутой системы. Так, соударение тел может быть упругим или неупругим, а тела могут взаимодействовать друг с другом посредством полей, т. е. на расстоянии.

Закон сохранения импульса является одним из фундаментальных законов физики. То обстоятельство, что для произведения $m\vec{v}$ массы тела на его скорость имеет место «закон сохранения», делает целесообразным дать ему специальное название — импульс \vec{p} .

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение массы, плотности тела и силы. Что такое инертная и гравитационная массы?
2. Приведите формулировку первого закона Ньютона и дайте определение инерциальной системы отсчета.
3. Сформулируйте второй и третий законы Ньютона и разъясните, почему они не выполняются в неинерциальных системах отсчета.
4. Какова природа сил трения и какими свойствами они обладают?
5. Что называется коэффициентом трения?
6. Какую роль играют силы трения в технике и повседневной жизни?
7. Когда возникает деформация тела? Что такое упругая деформация?
8. Как связаны величина деформации тела с упругой силой, возникающей в нем?
9. Какова природа силы упругости?
10. Каковы характерные свойства упругой деформации твердых тел и жидкостей? Где используются эти свойства?
11. Что такое гравитационная сила? Сформулируйте закон всемирного тяготения.
12. Как экспериментально найти массу Земли, Солнца и других планет солнечной системы?
13. Дайте определение импульса тела. Сформулируйте второй закон Ньютона, используя понятие импульса.
14. Что называется замкнутой системой тел? Осуществимы ли такие системы в земных условиях?
15. Сформулируйте закон сохранения импульса. Существуют ли ограничения применению этого закона?

1.3. РАБОТА И ЭНЕРГИЯ

Представление о работе, как и о силе, заимствованное из нашего повседневного опыта, имеет в физике вполне определенный смысл. Работу измеряют произведением силы, действующей на тело в направлении его перемещения, на модуль этого перемещения. Энергию измеряют работой, которую может произвести тело.

В механике вводятся понятия *кинетической* и *потенциальной энергии*. Их сумма при определенных условиях является постоянной величиной, т. е. сохраняется в процессе движения тел. Принцип сохранения механической энергии часто дает возможность обойтись без применения законов Ньютона и провести анализ движения механической системы простым и быстрым способом. Изложению этих и связанных с ними вопросов посвящен настоящий раздел.

1.3.1. Механическая работа и мощность

Пусть тело, на которое действует постоянная сила \vec{F} , двигаясь по прямой, проходит путь s (рис. 1.20).

Работой этой силы называется произведение модуля силы на перемещение s точки ее приложения и на косинус угла α между направлением силы и направлением перемещения:

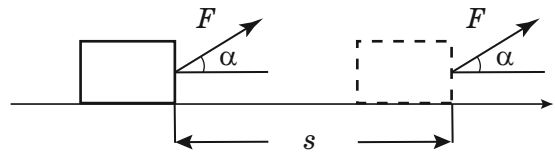


Рис. 1.20

$$A = F s \cos \alpha \quad (\vec{F} = \text{const}). \quad (1.31)$$

Единицей измерения работы в системе СИ служит *джоуль* (Дж). Это работа силы в 1 ньютон (Н) на пути в 1 метр (при $\alpha = 0$):

$$[A] = \text{Дж} = \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Мощностью называется работа, совершенная за единицу времени:

$$P = \frac{A}{t}. \quad (1.32)$$

Понятие мощности обычно применяется к устройствам, совершающим работу, т. е. к двигателям различной природы — тепловым, электрическим. Мощность двигателя составляет 1 Вт (*ватт*), если за 1 секунду он совершает работу в 1 джоуль:

$$[P] = \text{Вт} = \text{Дж/с}.$$

1.3.2. Кинетическая энергия

Кинетическая энергия тела измеряется работой, которую благодаря инерции может совершить движущееся тело при его торможении до полной остановки.

Кинетическая энергия равна половине произведения массы тела на квадрат его скорости:

$$K = \frac{mv^2}{2}. \quad (1.33)$$

Единица измерения кинетической энергии — *джоуль* (Дж) — совпадает с единицей измерения работы.

Из определения кинетической энергии следует, что работа, совершаемая действующей на тело результирующей силой, равна приращению его кинетической энергии:

$$A_{12} = K_2 - K_1, \quad (1.34)$$

где K_1 и K_2 — кинетическая энергия тела соответственно в начальной и конечной точках пути.

1.3.3. Консервативные и неконсервативные силы

В механике, наряду с кинетической энергией, вводится понятие *потенциальной энергии*. Тело может обладать потенциальной энергией, если на него действуют *консервативные силы*.

Дадим следующее определение: **если работа силы, действующей на тело, не зависит от формы траектории его движения, а определяется только координатами начала и конца пути, то эта сила называется консервативной.**

В частности, если тело, пройдя в поле консервативной силы по замкнутой траектории, возвращается в исходную точку, то работа этой силы на всем пути равна нулю.

К консервативным силам относятся все фундаментальные силы природы — *гравитационные, электромагнитные, ядерные и слабые*.

К *неконсервативным силам* относятся силы трения и так называемые *гироскопические силы* — сила Лоренца, действующая на заряд, движущийся в магнитном поле, и сила Кориолиса, возникающая во вращающихся системах отсчета. Обе эти силы направлены перпендикулярно вектору скорости тела и не совершают работы. Работа же сил трения всегда *отрицательна*.

1.3.4. Потенциальная энергия. Закон сохранения энергии в механике

Используя понятие консервативной силы, можно дать определение потенциальной энергии.

Какое-либо положение тела в пространстве условно принимается за нулевое. Работа, которую совершают консервативные силы при перемещении тела из данного положения 1 в нулевое, называется потенциальной энергией тела в данном положении:

$$U = A_{10}. \quad (1.35)$$

Потенциальная энергия — это запасенная энергия, которая может быть преобразована в работу, кинетическую энергию или другие виды энергии, не рассматриваемые в механике, например во внутреннюю (тепловую) энергию.

Из определения следует, что:

1. Потенциальная энергия при неизменных внешних условиях *зависит только от координат* тела (материальной точки):

$$U = U(x, y, z).$$

2. Потенциальная энергия определяется *не однозначно*, а с точностью до постоянного слагаемого, поскольку зависит от выбора нулевого положения. Физический смысл имеет *разность* потенциальных энергий тела в каких-либо двух точках пространства.

3. Работа консервативных сил при перемещении тела из одной точки пространства в другую равна *убыли* его потенциальной энергии:

$$A_{12} = U_1 - U_2 = -\Delta U. \quad (1.36)$$

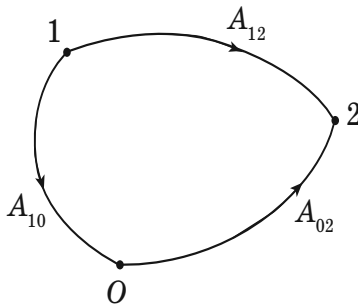


Рис. 1.21

Покажем это на примере. Пусть потенциальная энергия определена относительно точки O (рис. 1.21). В силу независимости работы от формы пути работа A_{12} при перемещении тела из точки 1 в точку 2 по короткому пути равна работе перемещения тела по пути, проходящему через точку O :

$$A_{12} = A_{10} + A_{02}.$$

Но $A_{10} = U_1$, а $A_{02} = -A_{20} = -U_2$, откуда и следует равенство (1.36).

Работу консервативных сил можно выразить и через изменение кинетической энергии тела. Согласно уравнению (1.34), эта работа равна *приращению* кинетической энергии тела: $A_{12} = K_2 - K_1$. Таким образом,

$$A_{12} = U_1 - U_2 = K_2 - K_1,$$

откуда следует, что:

$$K_1 + U_1 = K_2 + U_2. \quad (1.37)$$

Сумма кинетической и потенциальной энергий тела называется его *полной механической энергией*:

$$W = K + U. \quad (1.38)$$

Уравнение (1.37) выражает закон сохранения энергии в механике:

Если на тело действуют только консервативные силы, то его полная механическая энергия остается постоянной: могут происходить лишь превращения потенциальной энергии в кинетическую и обратно, но полный запас энергии тела измениться не может.

$$W = K + U = \text{const}. \quad (1.39)$$

Замкнутой системой называется совокупность тел, на которые не действуют внешние силы. Если между телами такой системы действуют только консервативные силы, то она называется *консервативной*.

Полная механическая энергия замкнутой консервативной системы тел сохраняется во времени.

Если движение тела сопровождается трением, то, как следует из уравнения (1.36), при переходе тела из положения 1 в положение 2 часть его потенциальной энергии пойдет на совершение работы по преодолению трения:

$$U_1 - U_2 = K_2 - K_1 + |A_{\text{тр}}|,$$

или

$$K_2 + U_2 = K_1 + U_1 - |A_{\text{тр}}|,$$

т. е. полная механическая энергия тела уменьшается на величину этой работы, которая превращается в тепло:

$$W_1 - W_2 = |A_{\text{тр}}|. \quad (1.40)$$

1.3.5. Потенциальная энергия тела в однородном поле тяжести

Всякое тело, находящееся в гравитационном поле, испытывает действие силы тяжести, являющейся консервативной силой, поэтому оно обладает потенциальной энергией.

Найдем потенциальную энергию $U_{\text{гр}}$ тела массой m , поднятого над Землей на высоту h . Если высота h мала по сравнению с радиусом Земли, силу тяжести mg можно считать постоянной. Согласно уравнению (1.35), потенциальная энергия тела равна работе, совершаемой силой тяжести при перемещении его с высоты h на поверхность Земли, которую мы выберем в качестве нулевого положения. Поскольку направление силы тяжести и направление перемещения совпадают ($\alpha = 0$ в уравнении (1.31)), эта работа равна их произведению: $A = mgh$. Следовательно,

$$U_{\text{гр}} = mgh. \quad (1.41)$$

1.3.6. Потенциальная энергия упругодеформированной пружины

Сила упругости, возникающая в теле при его деформации, обусловлена взаимодействием атомов, из которых состоит тело. Существует некоторое равновесное расстояние между атомами, при увеличении или уменьшении которого появляются силы, препятствующие этому. Эти силы имеют электромагнитное происхождение и являются консервативными. Следовательно, упругодеформированное тело обладает потенциальной энергией.

По *закону Гука*, при деформировании пружины в ней возникает сила упругости, пропорциональная деформации:

$$F_{\text{упр}} = -kx,$$

где k — жесткость пружины, x — ее деформация (см. рис. 1.18).

Растягивая пружину, мы совершаем работу, которая идет на увеличение ее потенциальной энергии. Эту работу можно найти, умножив среднее значение силы на отрезке $[0, x]$ на перемещение x точки ее приложения:

$$A = F_{\text{ср}} \cdot x = -\frac{1}{2} kx \cdot x = -\frac{kx^2}{2}.$$

Согласно равенству (1.36),

$$A = U(0) - U(x).$$

Приравнивая правые части и полагая потенциальную энергию недеформированной пружины равной нулю $U(0) = 0$, получим:

$$U_{\text{упр}}(x) = \frac{kx^2}{2}. \quad (1.42)$$

1.3.7. Простые механизмы. Коэффициент полезного действия простых механизмов

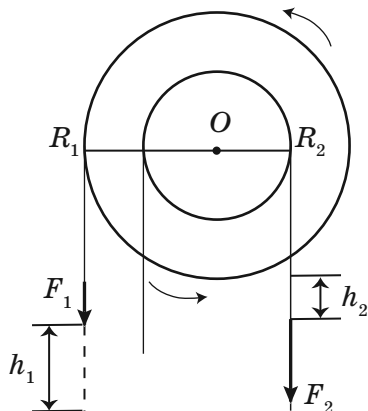


Рис. 1.22

В своей практической деятельности человеку приходится поднимать грузы, вес которых превышает предел, доступный его физической силе. Поэтому он использует для этих целей устройства, преобразующие силу. В их основе лежат простые механизмы, к которым относятся клин, винт, рычаг и блок (ворот). Принцип действия этих механизмов основан на законе сохранения энергии.

Колесо на неподвижной оси называется **неподвижным блоком**. Рассмотрим два скрепленных друг с другом соосных цилиндра радиусами R_1 и R_2 , которые образуют составной блок (рис. 1.22). На цилиндры намотаны нити, к которым приложены уравновешивающие друг друга силы F_1 и F_2 .

Повернем блок на один оборот против часовой стрелки. Сила F_1 совершит при этом работу $A_1 = F_1 \cdot h_1 = 2\pi R_1 \cdot F_1$, поскольку точка ее приложения переместится на расстояние h_1 , равное длине окружности большого цилиндра. Аналогично, сила F_2 совершит работу $A_2 = F_2 \cdot h_2 = 2\pi R_2 \cdot F_2$. При отсутствии трения эти работы равны друг другу. Отсюда получаются два условия:

$$F_1 \cdot R_1 = F_2 \cdot R_2, \quad (1.43, a)$$

$$F_1 \cdot h_1 = F_2 \cdot h_2. \quad (1.43, б)$$

Из первого условия следует, что **отношение сил, вращающих блок, обратно пропорционально отношению радиусов цилиндров** — чем меньше радиус, тем больше сила.

Второе условие гласит: **чем меньше сила, тем больший путь следует пройти, чтобы совершить необходимую работу**.

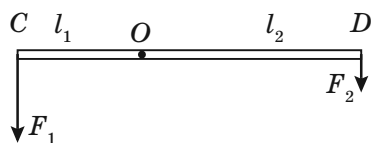


Рис. 1.23

Используя такой механизм, мы выигрываем в силе, но проигрываем в пути. Это утверждение известно как *«золотое правило механики»*.

Если мы хотим поднять тяжелый груз, мы должны подвесить его к цилиндру меньшего радиуса и вращать блок, прилагая усилие вдоль касательной к большему цилиндру.

Одиночный неподвижный блок не дает выигрыша в силе, а позволяет лишь изменить ее направление. Рассмотренный нами неподвижный блок, составленный из двух цилиндров разных радиусов, позволяет наиболее просто объяснить принцип работы **рычага**.

Рычаг — это жесткий стержень CD , закрепленный на оси вращения O , к концам которого приложены силы F_1 и F_2 (рис. 1.23). Отрезки длиной OC и OD , перпендикулярные направлениям действия этих сил, называются **плечами рычага**. Сила, приложенная к длинному плечу, меньше силы, приложенной к короткому, в соответствии с условием (1.43, а). При повороте рычага вокруг его оси вращения плечи уменьшаются, однако отношение их длин, как и отношение сил, остается неизменным.

Ось вращения может проходить через любую точку рычага, например, через его конец (рис. 1.24). В этом случае:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{OD}{OC} > 1.$$

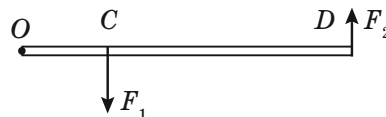


Рис. 1.24

Рычаг — частный случай твердого тела произвольной формы, закрепленного на оси, к которому приложено несколько сил (рис. 1.25). Каждая из них стремится повернуть тело вокруг этой оси. Равновесие достигается при равенстве *моментов сил*, вращающих тело в противоположных направлениях.

Моментом силы F называется произведение силы на ее плечо:

$$M = F \cdot l. \quad (1.44)$$

Плечом силы F относительно оси O называется кратчайшее расстояние l от линии действия силы до этой оси.

Условие равновесия тела: **сумма моментов сил, вращающих тело в направлении часовой стрелки, равна сумме моментов сил, вращающих его против часовой стрелки.**

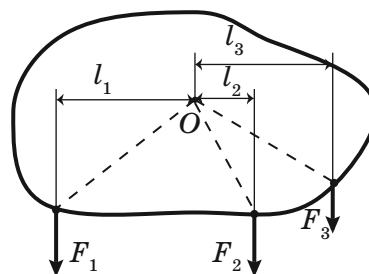


Рис. 1.25

Уравнение (1.43, а) может быть записано в виде:

$$M_1 = M_2.$$

Оно выражает условие равновесия рычага.

Разновидность рычага — *ворот*, который представляет собой барабан радиусом R с прикрепленной к нему длинной ручкой, идущей от его оси (рис. 1.26). Поскольку длина ручки l больше радиуса барабана, усилие F , прилагаемое к ее концу при вращении барабана, меньше веса груза P , подвешиваемого к нему на веревке.

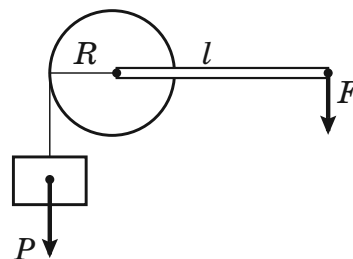


Рис. 1.26

Ворота используются при устройстве колодцев, для подъема вручную тяжелых грузов, якорей судов, рыболовецких сетей.

Рычагом с соотношением плеч 1:2 является *подвижный блок* (рис. 1.27). Ось его вращения может перемещаться в пространстве. Если тянуть за перекинутую через него веревку с силой F , то за один оборот блока его ось поднимется на высоту $2\pi R$, а точка приложения силы — на высоту вдвое бóльшую. Согласно уравнению (1.43, б), $2R \cdot F = R \cdot P$ и сила натяжения веревки вдвое меньше веса груза, висящего на оси блока: $F = \frac{P}{2}$. **Подвижный блок дает двойной выигрыш в силе.**

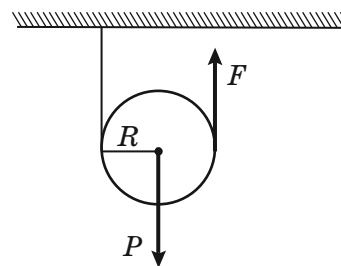


Рис. 1.27

Принцип работы простых механизмов — *клина* и *винта* — одинаков: используется наклонная плоскость, которую вдвигают под тело, которое хотят поднять (рис. 1.28). Сила F , действующая на клин в горизонтальном направлении, благодаря которой он перемещается на расстояние l ,

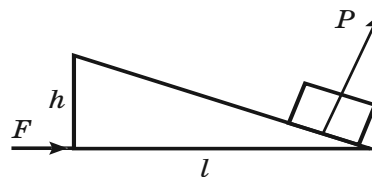


Рис. 1.28

меньше силы P , которая действует на тело, поднимая его на высоту h . Чтобы найти силу F , используем «золотое правило механики». Если считать, что трение отсутствует, работа силы F — $A_1 = F \cdot l$, а силы P — $A_2 = P \cdot h$. Из условия $A_1 = A_2$ находим:

$$F = P \cdot \frac{h}{l}. \quad (1.45)$$

Сила F , приложенная к клину для его продвижения, во столько раз меньше распирающей силы P , во сколько раз основание клина меньше его длины.

Клин, навитый на цилиндр радиусом R с длиной окружности $l = 2\pi R$ представляет собой *винт* (рис. 1.29). Шаг винта h — расстояние, на которое он перемещается вдоль своей оси за один оборот. Прикладывая к винту касательную силу F , мы создаем силу давления винта P , большую, чем сила F , согласно условию:

$$P = F \cdot \frac{2\pi R}{h}. \quad (1.46)$$

Винты с крупной резьбой прямоугольного сечения используются в домкратах, служащих для подъема тяжелых грузов, в приводах различных механизмов для преобразования вращательного движения в поступательное.

Работа рассмотренных здесь простых механизмов сопровождается трением, которое зависит от многих

факторов: характера трущихся поверхностей, площади их соприкасающихся частей, наличия смазки. Поэтому для оценки величины силы, которая требуется для выполнения работы, вводят понятие *коэффициента полезного действия* (КПД) механизма. Обозначив через $A_{\text{п}}$ полезную работу, необходимую для подъема груза, а через $A_{\text{з}}$ — работу, затраченную для этого фактически, получим КПД механизма, взяв их отношение:

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{з}}}. \quad (1.47)$$

Эту величину обычно выражают в процентах. Для этого правую часть (1.47) умножают на 100 %:

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{з}}} \cdot 100 \, \%.$$

КПД реальных механизмов всегда меньше единицы. Сила всегда превышает теоретическое ее значение. Чтобы оценить прилагаемую силу, необходимую для подъема груза, согласно уравнению (1.43, б) или уравнению (1.44), вес тела P следует разделить на η :

$$F = \frac{1}{\eta} P \cdot \frac{h}{l}. \quad (1.48)$$

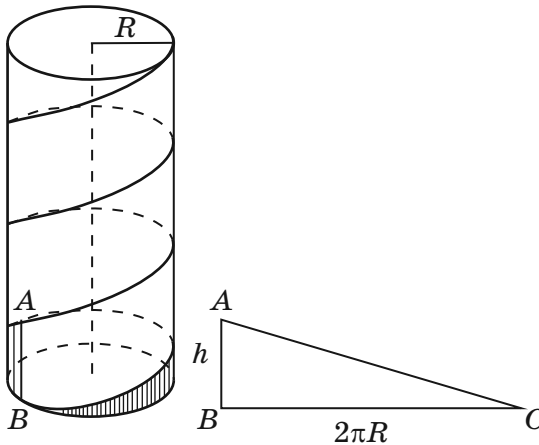


Рис. 1.29

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение работы постоянной силы и мощности и укажите единицы их измерения.
2. Дайте определение кинетической энергии тела и поясните ее физический смысл.
3. Какие силы называются консервативными? Приведите примеры консервативных сил, которые встречаются нам в повседневной жизни.
4. Что такое неконсервативные силы?
5. Дайте определение потенциальной энергии тела и перечислите ее свойства.
6. Что называется полной механической энергией тела? Приведите формулировку закона сохранения энергии в механике.
7. Запишите формулу потенциальной энергии тела в однородном поле тяжести.
8. Чему равна потенциальная энергия растянутой пружины?
9. Какие простые механизмы вы знаете? Для чего они предназначены?
10. Что называется неподвижным блоком? Для чего он служит?
11. Дайте определение момента силы.
12. Сформулируйте условие равновесия тела, закрепленного на оси.
13. Как устроен ворот и где он применяется?
14. Сформулируйте и поясните смысл «золотого правила механики».
15. Что такое подвижный блок? Какой выигрыш в силе он дает?
16. Объясните принцип действия клина и винта.
17. Что называется коэффициентом полезного действия простых машин?

1.4. ГИДРО- И АЭРОСТАТИКА

Рассматривая поступательное движение твердого тела, мы могли представить его в виде материальной точки, на которую действуют силы. Само это тело в результате притяжения к Земле действовало на другие тела с силой, точку приложения которой всегда можно было указать. В механике имеют дело не только с твердыми телами, но и с жидкостями и газами. Несмотря на то, что они, как и твердые тела, состоят из атомов или молекул, характер их взаимодействия с твердыми телами совершенно иной, поскольку первые из них (жидкости) не имеют собственной формы, а вторые (газы) и собственного объема, занимая весь объем сосуда, в котором находятся. Для описания этого взаимодействия вводится понятие *давления жидкости или газа* и формулируются специальные законы — *закон Паскаля* и *закон Архимеда*.

Разделы физики, рассматривающие неподвижные жидкости или газы, носят название *гидро- и аэростатики*.

1.4.1. Давление жидкостей

Возьмем цилиндрический сосуд с основанием площадью S и нальем в него жидкость плотностью ρ до высоты h от дна сосуда (рис. 1.30). Имея вес,

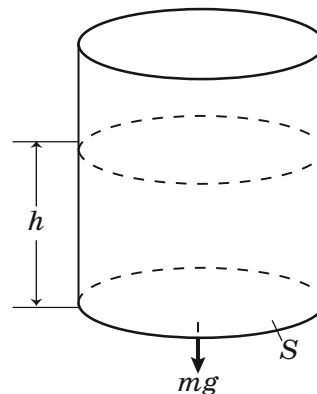


Рис. 1.30

жидкость будет давить на дно сосуда с силой, равномерно распределенной по его площади.

Давлением p называется отношение силы, действующей со стороны жидкости на некоторую поверхность, к площади этой поверхности:

$$p = \frac{F}{S}. \quad (1.49)$$

Давление равно силе, действующей на единицу поверхности. В системе СИ давление измеряется в *паскалях* (Па):

$$[p] = \text{Па} = \text{Н/м}^2.$$

Давление в 1 Па оказывает сила в 1 Н на площадку в 1 м².

Найдем давление жидкости на дно сосуда, изображенного на рис. 1.30. Сила, действующая на него, равна весу этой жидкости: $P = mg = \rho Vg$, где g — ускорение свободного падения. Поскольку объем жидкости $V = S \cdot h$, получим после подстановки в формулу (1.49):

$$p = \rho gh. \quad (1.50)$$

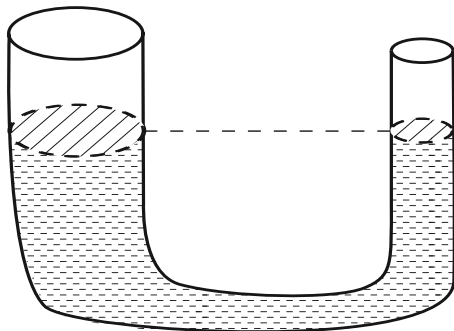


Рис. 1.31

Из этой формулы следует, что давление жидкости на некоторую площадку, расположенную на глубине h , пропорционально плотности жидкости, толщине слоя жидкости над площадкой и не зависит от ориентации этой площадки в пространстве. Поэтому если взять сообщающиеся сосуды произвольной формы и произвольного поперечного сечения, то уровни жидкости в них будут одинаковыми (рис. 1.31).

1.4.2. Атмосферное давление. Опыт Торричелли

Определение давления (1.49), приведенное для жидкостей, справедливо и для газов. Однако формулу (1.50) для них записать нельзя, т. к. плотность газа, например атмосферного воздуха, изменяется с высотой. Можно, однако, измерить это давление. Впервые опыт по измерению атмосферного давления был проделан итальянским физиком Евангелисто Торричелли в 1643 г. Он

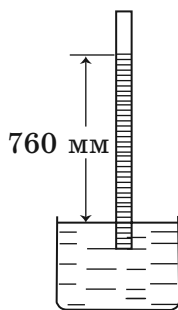


Рис. 1.32

использовал своеобразные сообщающиеся сосуды, одним из колен которых была стеклянная трубка длиной около метра, запаянная с одного конца и наполненная ртутью. Вторым коленом служил столб воздуха атмосферы Земли. Трубку он опускал открытым концом в чашку со ртутью, после чего высота столба ртути в трубке сама по себе понижалась до 760 мм над уровнем ртути в чашке (рис. 1.32). Давление атмосферного воздуха было равно давлению столба ртути, поскольку в трубке над ртутью воздух отсутствовал и не создавал

дополнительного давления на нее. Давление ртути, вычисленное по формуле (1.50), составляло приблизительно 10^5 Па. Трубка со ртутью в этом опыте играла роль *барометра* — прибора для измерения атмосферного давления.

Давление атмосферного воздуха с высотой уменьшается.

1.4.3. Закон Паскаля

Законы гидростатики используются в технике при создании разнообразных машин и механизмов. Передача движения на расстояние может осуществляться не только с помощью механических приводов (валов, тросов, зубчатых передач), но и с помощью трубопроводов, наполненных жидкостью или газом. Этот способ передачи механического движения очень удобен и часто является единственно возможным. Он используется там, где не требуется большой точности перемещения движущихся частей, но нужны большие усилия. Например, в тормозных системах автомобилей при передаче движения от педали тормоза к тормозным колодкам, в гидравлических прессах, гидроприводах. Аналогичные задачи выполняет и воздух, используемый в системах торможения поездов, тяжелых транспортных средств, троллейбусах и автобусах при устройстве пневматических входных дверей и во многих других случаях.

В основе применения жидкостей и газов в технике лежит **закон Паскаля**:

Давление, оказываемое на жидкость или газ, передается по всем направлениям одинаково.

Для иллюстрации этого закона рассмотрим два сообщающихся друг с другом сосуда — цилиндра с поршнями, — содержащих жидкость (рис. 1.33). Сила F_1 , действующая на первый поршень площадью S_1 , создает в жидкости дополни-

тельное давление $p = \frac{F_1}{S_1}$. Это давление, оказываемое жидкостью одинаково на любой участок поверхности соприкосновения ее со стенками сосудов, на втором поршне порождает силу $F_2 = p \cdot S_2$. Сила F_2 больше силы F_1 , поскольку площадь второго поршня S_2 больше площади S_1 первого:

$$F_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1}. \quad (1.51)$$

Уравнение (1.51) аналогично уравнению (1.43, а) для плеч рычага, а само устройство (с сообщающимися сосудами, использующее для передачи движения жидкость), подобно рычагу, может служить для преобразования силы. Для него выполняется «золотое правило механики». Опуская поршень первого цилиндра на глубину h_1 , мы заставляем часть жидкости объемом $V_1 = S_1 \cdot h_1$ перейти во второй цилиндр и поднять поршень на высоту h_2 . Поскольку жидкость практически несжимаема, $V_1 = V_2 = S_2 \cdot h_2$. Отсюда следует, что:

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{h_1}{h_2}.$$

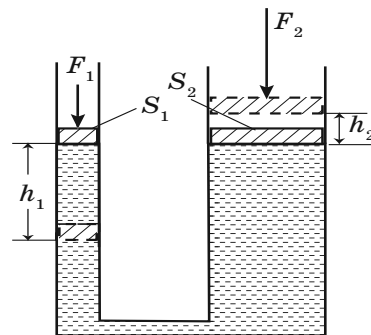


Рис. 1.33

Подставив в уравнение (1.51), получим:

$$F_2 = F_1 \frac{h_1}{h_2}. \quad (1.52)$$

Это уравнение выражает условие равенства работ, совершаемых первым и вторым поршнями ($A_1 = F_1 \cdot h_1$, $A_2 = F_2 \cdot h_2$, $A_1 = A_2$).

Описанное здесь устройство используется в гидравлических прессах. Предмет (тело), которое требуется сжать, помещают между большим поршнем и неподвижной массивной станиной. Используя цилиндры, многократно отличающиеся диаметрами, можно получить весьма большие усилия на рабочем цилиндре пресса, прикладывая сравнительно небольшую силу на его малом цилиндре. Малый поршень совершает повторяющиеся движения вдоль оси цилиндра и добавляет жидкость в большой цилиндр, восполняя из отдельной емкости ее убыль в малом цилиндре.

Гидравлические прессы широко используются в тяжелой и пищевой промышленности, книгоиздательском деле и других отраслях.

1.4.4. Закон Архимеда

Одни тела, опущенные в воду, плавают на ее поверхности, а другие тонут. Условие плавания тел определяется **законом Архимеда**:

На тело, погруженное в жидкость или газ, действует выталкивающая сила, равная весу жидкости или газа, вытесненных этим телом.

Доказать этот закон не представляет труда. Рассмотрим прямоугольный параллелепипед, помещенный в жидкость так, чтобы его нижняя и верхняя грани занимали горизонтальное положение (рис. 1.34). Согласно уравнению (1.50), давление, которое жидкость оказывает на верхнюю грань, находящуюся на глубине H : $p_1 = \rho g H$, а на нижнюю грань: $p_2 = \rho g(H + h)$, где h — высота параллелепипеда. Поскольку давление на нижнюю грань больше, чем на верхнюю, возникает выталкивающая сила F_A , равная разности сил, приложенных к этим граням:

$$F_A = \rho g[(H + h) - H]S = \rho g h \cdot S = \rho g V, \quad (1.53)$$

где ρ — плотность жидкости, S — площадь граней, $V = S \cdot h$ — объем параллелепипеда.

Эта сила, называемая силой Архимеда, уменьшает вес тела в жидкости по сравнению с весом его в воздухе (вакууме) на величину, равную весу P вытесненной телом жидкости ($P = mg = \rho Vg$). Если вес этой жидкости меньше веса тела, то оно не сможет плавать и пойдет ко дну. Поскольку вес тела

$P_t = \rho_t Vg$, это будет в том случае, когда его плотность больше плотности жидкости ($\rho_t > \rho$). В противном случае ($\rho_t < \rho$) сила Архимеда превысит вес тела и оно начнет подниматься вверх до тех пор, пока часть его не окажется над поверхностью жидкости. Объем погруженной части тела установится таким, чтобы вес вытесненной им жидкости стал равен весу всего тела.

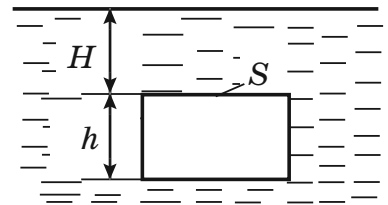


Рис. 1.34

Морские и речные суда, имеющие стальные корпуса, плавают благодаря тому, что изготавливаются полыми. Среднее значение плотности судна с перевозимым им грузом меньше плотности воды за бортом, и поэтому суда плавают, возвышаясь над водой и имея запас плавучести даже в штормовую погоду.

Сказанное в случае жидкостей справедливо и для газов.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение давления и поясните его физический смысл. В каких единицах оно измеряется?
2. Выведите формулу для давления жидкости на глубине h .
3. Каким свойством обладают сообщающиеся сосуды?
4. Опишите опыт Торричелли по измерению атмосферного давления.
5. Для чего служат барометры?
6. Сформулируйте закон Паскаля.
7. Какие способы передачи движения на расстояние вам известны? Какие преимущества присущи гидравлическим устройствам по сравнению с механическими?
8. Объясните принцип работы гидравлического пресса.
9. Дайте формулировку закона Архимеда. Выведите формулу для выталкивающей силы, действующей на тело, помещенное в жидкость или газ.
10. Сформулируйте и поясните условие плавания тел.

1.5. ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Колебательные процессы широко распространены в природе и технике. Примерами таких процессов служат качание маятника часов, волны на воде, переменный электрический ток, свет, звук. При движении маятника колеблется его центр тяжести. В случае переменного тока колеблются напряжение и ток в цепи. Эти два процесса различны по своей физической природе, однако их закономерности имеют между собой много общего.

Свойства колебательных процессов мы рассмотрим на примере механических колебаний, т. е. колебаний твердых тел. Колебательным движениям тел присущ общий признак, заключающийся в существовании некоторого устойчивого положения, в котором колеблющееся тело может пребывать сколь угодно долго — до тех пор, пока внешняя сила не выведет его из этого положения. Оно называется *положением равновесия*. У маятника это отвесное положение; у тела, закрепленного на пружине, — положение, когда пружина не деформирована. Если при отклонении от этого положения возникает сила, направленная к положению равновесия, то тело будет совершать колебательное движение. При небольших отклонениях сила пропорциональна отклонению и колебания будут *гармоническими*, т. е. такими, которые описываются синусом или косинусом.

1.5.1. Амплитуда, фаза, период и частота гармонических колебаний

Рассмотрим движение тела массой m , закрепленного на пружине и находящегося на гладкой горизонтальной поверхности. Такое устройство называется *пру-*

жинным маятником. В положении равновесия геометрический центр тела C расположен в точке $x = 0$ координатной оси X , вдоль которой происходит его движение (рис. 1.35).

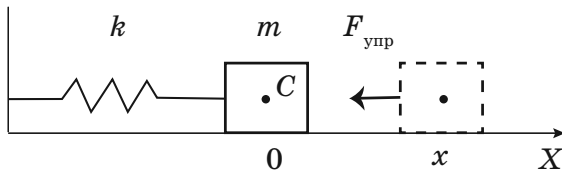


Рис. 1.35

Если пружину растянуть или сжать, сместив тело на небольшое расстояние A , возникает упругая сила $F_{\text{упр}}$, стремящаяся вернуть тело в исходное положение. При упругой деформации сила упругости пропорциональна величине деформации x :

$$F_{\text{упр}} = -kx, \quad (1.54)$$

где k — жесткость пружины.

Знак «минус» указывает на то, что сила упругости $F_{\text{упр}}$ направлена в сторону, противоположную смещению тела, т. е. к положению равновесия, и является возвращающей.

Силу, пропорциональную смещению тела от положения равновесия и направленную к положению равновесия, называют гармонической.

Под действием этой силы тело начинает двигаться. По мере приближения к положению равновесия сила ослабевает и обращается в нуль в точке $x = 0$.

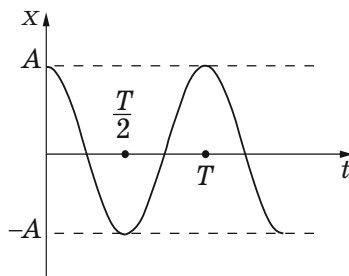


Рис. 1.36

Однако тело продолжает движение по инерции, имея в этой точке наибольшую скорость. При переходе через положение равновесия пружина начинает сжиматься и действует в обратную сторону. Она тормозит движение, в результате чего тело останавливается, отклонившись влево на расстояние A .

Движение тела возобновляется в обратном направлении аналогичным образом до тех пор, пока оно не вернется в исходную точку пути. Смещение тела в момент времени t — зависимость координаты его центра от времени — изображается здесь *косинусоидой* (рис. 1.36).

Тело совершает колебания, которые без воздействия внешних сил называются **свободными**.

Наибольшее смещение тела от положения равновесия A называется **амплитудой колебаний**.

Время, в течение которого совершается одно колебание, называется **периодом колебаний** T .

Если за время t происходит N колебаний, то период:

$$T = \frac{t}{N}. \quad (1.55)$$

Число колебаний, совершаемых за единицу времени, называется **частотой колебаний** ν .

Частота и период — взаимно обратные величины:

$$\nu = \frac{N}{t} = \frac{1}{T}. \quad (1.56)$$

В системе СИ период измеряется в *секундах* (с), а частота — в *герцах* (Гц):

$$1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}.$$

Период и частота колебаний определяются свойствами *колебательной системы* — чем больше жесткость пружины, тем выше частота; более массивное тело колеблется с бóльшим периодом. Каждая колебательная система имеет *собственную частоту* колебаний.

Пружинный маятник — это колебательная система, состоящая из тела и пружины, на которой оно закреплено. Первоначальный запас энергии мы сообщаем ей в виде потенциальной энергии растянутой пружины. Начало движения сопровождается постепенным ее превращением в кинетическую энергию тела. Через четверть периода (при переходе тела через положение равновесия) потенциальная энергия обращается в нуль, а кинетическая становится максимальной и равной первоначальному запасу потенциальной энергии. Здесь проявляется закон сохранения энергии, поскольку трение отсутствует, а между телом и точкой крепления пружины действует только сила упругости, являющаяся *консервативной*.

Во второй четверти периода колебаний происходит обратный переход кинетической энергии в потенциальную. При возвращении маятника к исходной точке этот процесс повторяется, так что за один период оба вида энергии дважды приобретают максимум и дважды обращаются в нуль. Сумма же их остается постоянной.

Гармонические колебания пружинного маятника можно представить в виде колебаний проекции на вертикальную ось X точки M , равномерно обращающейся по окружности радиуса A (рис. 1.37). Поскольку:

$$\sin \alpha = \frac{BM}{OM} = \frac{x}{A},$$

проекция радиуса OM на эту ось:

$$x = A \sin \alpha,$$

а угол α равномерно возрастает со временем.

Откладывая на графике функции $x = x(t)$ ее значения через одинаковые промежутки времени, получим изображенную на рис. 1.37 синусоиду.

Угол α между горизонтальной осью, соответствующей положению равновесия маятника, и радиусом OM называется **фазой колебаний**.

Фаза колебаний показывает, в какую сторону в данный момент времени отклонен маятник от своего положения равновесия и куда — вправо или влево — направлена его скорость.

Так, например, если значения α заключены в пределах первой четверти тригонометрического круга $\left(0 < \alpha < \frac{\pi}{2}\right)$, маятник смещен вправо от точки $x = 0$ на рис. 1.35 и движется тоже вправо. В четвертой четверти $\left(\frac{3\pi}{2} < \alpha < 2\pi\right)$ смещение положительно, а скорость отрицательна (маятник движется влево, приближаясь к положению равновесия).

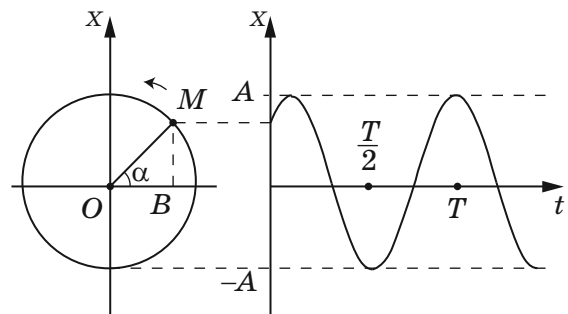


Рис. 1.37

Значение фазы колебаний в начальный момент времени $t = 0$ называется **начальной фазой**. Начальная фаза определяет сдвиг синусоиды вдоль оси t . Кривая, изображенная на рис. 1.36, соответствует начальной фазе, равной $\frac{\pi}{2}$.

Период колебаний пружинного маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (1.57)$$

где m — масса маятника, k — жесткость пружины.

Гармонические колебания совершает и *математический маятник*, который называют еще *нитяным*. Он представляет собой маленький шарик (материальную точку), подвешенный на длинной нити (рис. 1.38). Равнодействующая F приложенных к нему сил — силы тяжести mg и силы натяжения нити F_n — пропорциональна углу φ отклонения нити от вертикали и направлена к положению равновесия, т. е. является *гармонической силой*.

Период колебаний математического маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (1.58)$$

где l — длина маятника, g — ускорение свободного падения.

Движение маятника сопровождается переходом потенциальной энергии шарика в поле тяжести Земли в его крайних положениях в кинетическую энергию в нижней точке. Период его колебаний возрастает с увеличением длины нити.

Общее свойство маятников, совершающих гармонические колебания, — *изохронность* (независимость периода колебаний от амплитуды). Это свойство используется в механических часах.

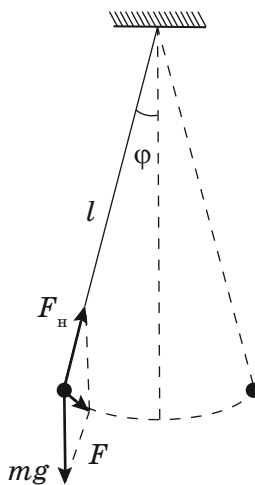


Рис. 1.38

1.5.2. Затухающие колебания

Выше мы рассматривали колебания, происходящие без потери энергии. На практике всякая колебательная система непрерывно отдает свою энергию среде. Вследствие этого колебания затухают, а их амплитуда уменьшается до тех пор, пока движение не прекратится полностью (рис. 1.39). Причины затухания обусловлены силами, тормозящими движение, например силой трения в пружинном маятнике (см. рис. 1.35) или силой сопротивления среды, действующей на математический маятник. К потере энергии приводит также внутреннее трение, возникающее при деформации пружины или изгибе нити.

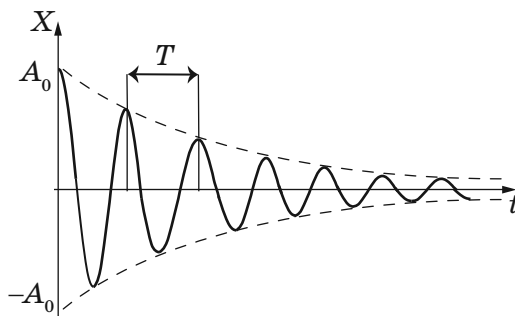


Рис. 1.39

Колебания маятника при наличии трения уже не будут периодическими, поскольку каждое следующее колебание отличается от предыдущего. Периодом таких колебаний можно условно считать промежуток времени между двумя последовательными моментами

наибольшего отклонения его от положения равновесия, совершаемого в одну и ту же сторону. Чаще всего, однако, потери энергии столь малы, что тело успевает совершить до остановки огромное число колебаний, так что их вполне можно считать свободными. Для этого стремятся уменьшить трение.

В механических часах энергия восполняется путем ее подвода от источника, например сжатой пружины, осуществляемого в определенные моменты времени синхронно с колебаниями маятника.

В технике нередко встречаются случаи, когда колебания наносят вред и их следует подавить. Например, в стрелочных электроизмерительных приборах подвижная часть соединяется для этого с металлической пластинкой, движущейся в магнитном поле постоянного магнита, на которую действует тормозящая сила благодаря возникающим в ней вихревым токам. Увеличивая тем или иным способом трение, можно достичь столь большого затухания, что система останавливается после первого же колебания или даже до перехода через положение равновесия. Такие сильно затухающие движения колебательной системы называются *апериодическими*.

1.5.3. Вынужденные колебания. Резонанс

Свободные гармонические колебания маятника происходят в результате взаимодействия частей колебательной системы друг с другом. В случае пружинного маятника это пружина и груз. Они характеризуются определенной частотой, зависящей от свойств самой системы. Однако колебательное движение может совершать любое тело, если к нему приложить периодически меняющуюся силу. Именно так движется игла швейной машины или поршни в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания. Как будет двигаться колебательная система, если на нее станет воздействовать такая внешняя сила?

Чтобы это установить, обратимся к экспериментальной установке, состоящей из пружинного маятника — грузика на пружине, прикрепленного к горизонтальному валу с прогибом (рис. 1.40). При вращении ручки вала точка крепления маятника движется по окружности радиуса, много меньшего его длины. При равномерном вращении колебания, совершаемые маятником, можно считать гармоническими. Период вращения ручки, очевидно, равен периоду действующей на него вынуждающей силы, а радиус окружности, по которой движется точка крепления маятника, — ее амплитуде.

Когда мы начинаем вращать ручку, грузик приходит в движение, которое после нескольких оборотов становится правильным периодическим колебанием. При этом установившиеся колебания грузика будут происходить с *частотой вынуждающей силы*. Колебания называются в этом случае *вынужденными*. Свободные колебания системы из-за наличия трения затухают. Вынужденные колебания являются периодическими колебаниями с неизменной амплитудой, поскольку энергия колебаний, затрачиваемая на трение, непрерывно восполняется за счет работы действующей на систему периодической силы.

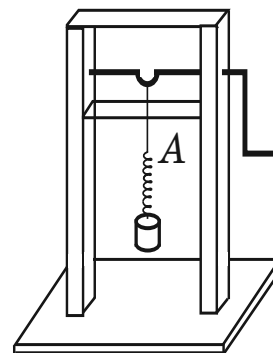


Рис. 1.40

Амплитуда вынужденных колебаний A существенно зависит от частоты вынуждающей силы. Если вращать ручку очень медленно, то грузик вместе с пружиной будет перемещаться вверх и вниз так же, как и точка ее крепления — при малых частотах амплитуда вынужденных колебаний совпадает с амплитудой вынуждающей силы.

Размах вынужденных колебаний становится очень большим (в несколько раз больше амплитуды вынуждающей силы), если частоту вращения ручки сделать близкой к частоте собственных колебаний грузика на пружине. При еще более быстром вращении ручки амплитуда вынужденных колебаний опять становится меньше и при очень быстром вращении уменьшается почти до нуля.

Этот опыт показывает, что при действии на колебательную систему периодической силы особенное значение имеет случай, когда частота изменения силы совпадает с собственной частотой колебаний системы. Такое совпадение частот называется *резонансом*. При резонансе амплитуда вынужденных колебаний достигает наибольшего значения.

Существующее в системе трение, обуславливающее затухание ее свободных колебаний, существенно влияет на эту амплитуду: при слабом трении наблюдается резко выраженный — острый — максимум амплитуды. Наоборот, амплитуда при резонансе ненамного превышает амплитуду вынуждающей силы, если трение велико (например, груз движется в воде). Зато при уходе от резонанса в ту или другую сторону уменьшение амплитуды происходит не так резко.

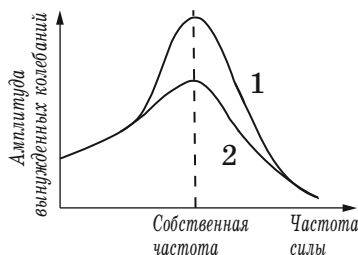


Рис. 1.41

На рис. 1.41 представлена зависимость амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы в случае, когда трение мало (кривая 1) и когда трение велико (кривая 2).

Явление резонанса часто проявляет себя при работе машин и механизмов и может привести к их поломке. История развития техники знает немало случаев, когда разрушались огромные мосты под действием ветра или роты марширующих в ногу солдат, ломались валы паровых турбин и крылья самолетов.

Поэтому при проектировании такого рода устройств вопросам безопасности уделяют особое внимание.

Явление резонанса находит практическое применение, например, в механических и акустических резонаторах, служащих для анализа звука. Простейшим механическим резонатором является струна с закрепленными концами или мембрана. Акустический резонатор — сосуд, сообщающийся с внешней средой через небольшое отверстие. В вибропреобразователях резонанс позволяет достигать значительных амплитуд упругих колебаний благодаря периодическому действию сравнительно слабой силы. В радиотехнике явление резонанса лежит в основе многочисленных способов фильтрации сигналов разных частот, обнаружения и приема слабых сигналов.

Вопросы для самопроверки

1. Приведите примеры колебательных процессов в окружающем нас мире.
2. Дайте определение амплитуды, фазы, периода и частоты гармонических колебаний.
3. Что называется математическим маятником?

4. Из чего складывается энергия пружинного маятника?
5. Постройте график затухающих колебаний. Являются ли затухающие колебания гармоническими? Как изменяется со временем амплитуда колебаний?
6. Нарисуйте график зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы. Дайте развернутую характеристику вынужденных колебаний при больших и малых частотах этой силы.
7. Что называется механическим резонансом? От чего зависит амплитуда колебаний при резонансе?
8. Приведите примеры явлений резонанса. Когда он играет положительную роль и когда с ним нужно бороться?

1.6. ВОЛНЫ В УПРУГОЙ СРЕДЕ

Если тело, совершающее колебательное движение, находится в упругой среде, оно приводит в движение частицы этой среды, и колебания распространяются в пространстве.

Процесс распространения колебаний называется **волной**. Примером служат волны на поверхности воды в озере или реке: когда в воду падает камень, волны от него идут в виде кругов. Поплавок, приводимый в движение прикрепленной к нему нитью, создает такие волны непрерывно.

Самыми распространенными среди упругих волн являются *звуковые волны* в воздухе. Их источниками могут быть капли дождя, шум прибоя, ветер, вспышка молнии или пение птиц, животные и сам человек. Источниками звука служат различные музыкальные инструменты.

Среда, передающая колебания от точки к точке, обладает упругостью на сжатие или сдвиг. Упругие свойства присущи газам, жидкостям и твердым телам. Воздух, заключенный внутри цилиндра под поршнем, стремится сохранить свой объем неизменным. Попытки сдвинуть поршень в ту или другую сторону оказываются безуспешными — поршень возвращается в исходное положение.

Жидкости гораздо сильнее, чем газы, сопротивляются изменению их объема, хотя так же, как и газы, не обладают сдвиговой упругостью, т. е. сдвиг одного слоя жидкости относительно другого не порождает сил, стремящихся вернуть его в первоначальное положение.

В газах и жидкостях могут распространяться лишь *волны сжатия* — *разрежения*, когда частицы среды колеблются вдоль направления распространения волны. Такие волны называются **продольными**.

В твердых телах, кроме продольных, могут распространяться и поперечные волны. Волна называется **поперечной**, если колебания частиц среды происходят в направлении, перпендикулярном направлению ее распространения.

Наглядным примером поперечной волны как раз и служат волны на поверхности жидкости, хотя механизм образования таких волн связан с действием на частицы жидкости силы тяжести, а не сдвиговой упругости.

Волны на поверхности жидкости хорошо иллюстрируют присущее всем волнам свойство — *распространяясь в пространстве, волна не переносит вещества*. Так, щепка, плавающая на водной поверхности озера, совершает колебания вверх-вниз, оставаясь на одном месте, в то время как волна беспрерывно перемещается.

Существование поперечных волн объясняется свойственной твердым телам сдвиговой упругостью. Если кубик из железа или другого металла закрепить одной гранью на горизонтальной поверхности, а противоположную грань немного сдвинуть, приложив к ней горизонтальную силу, то после снятия нагрузки кубик благодаря сдвиговой упругости восстановит свою форму. Пружина, растягиваясь или сжимаясь, демонстрирует нам сдвиговую упругость кручения.

1.6.1. Механизм образования волн в упругой среде

Тело, совершающее колебания в упругой среде, служит **источником волн**. От источника волны распространяются в пространстве.

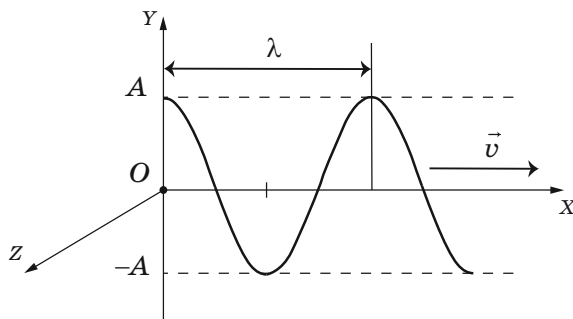


Рис. 1.42

Расстояние, проходимое фронтом волны за время, равное периоду колебаний источника T , называется **длиной волны** λ (рис. 1.42).

Следовательно, длина волны:

$$\lambda = vT.$$

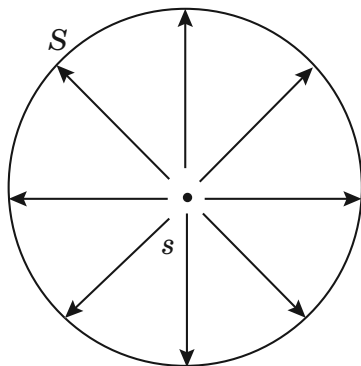


Рис. 1.43

Источник волн называется **точечным**, если он излучает волны по всем направлениям равномерно, а размеры его малы по сравнению с расстоянием от него до точки наблюдения.

Точечный источник s излучает волну, фронт которой в однородной среде имеет форму сферы (рис. 1.43). Волна в этом случае называется **сферической**.

На большом расстоянии r от источника сферическая поверхность S фронта волны вблизи точки наблюдения мало отличается от плоской.

Волну, фронтом которой является плоская поверхность, называют **плоской**.

Источником плоских волн может также служить колеблющаяся плоскость. Волна распространяется в перпендикулярном к ней направлении.

Чтобы пояснить механизм распространения волны, выберем в качестве модели упругой среды цепочку из одинаковых шариков, скрепленных друг с другом пружинками (не показанными на рис. 1.44). Смещение одного из шариков приводит в движение другие шарiki — возмущение передается по цепочке в виде волны. Рассмотрим **поперечную волну**.

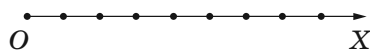


Рис. 1.44

За первую четверть периода первый шарик (источник волн), расположенный в точке $x = 0$, смещается от положения равновесия вдоль оси Y на

расстояние, равное амплитуде колебаний A (рис. 1.45, *a*). Под действием пружинок в том же направлении смещаются и соседние шарики, и возмущение распространяется по цепочке на расстояние $\frac{\lambda}{4}$.

Спустя еще четверть периода первый шарик возвращается в исходное положение, продолжая двигаться вниз. Волна распространяется еще на один отрезок $\frac{\lambda}{4}$ и приобретает вид, показанный на рис. 1.45, *б*.

Далее мы наблюдаем смещение первого шарика вниз на максимальное расстояние A и, наконец, возвращение его в исходное положение по истечении времени, равного периоду колебаний T . Соответствующие картины волнового процесса изображены на рис. 1.45, *в* и *г*.

В то время как волна распространяется в горизонтальном направлении — вдоль оси X — шарики (точки среды) совершают колебания в вертикальной плоскости. Благодаря взаимодействию шарики передают друг другу движение, происходящее в поперечном по отношению к оси X направлении. Сила, действующая на каждый из шариков со стороны его соседей, всегда направлена вверх

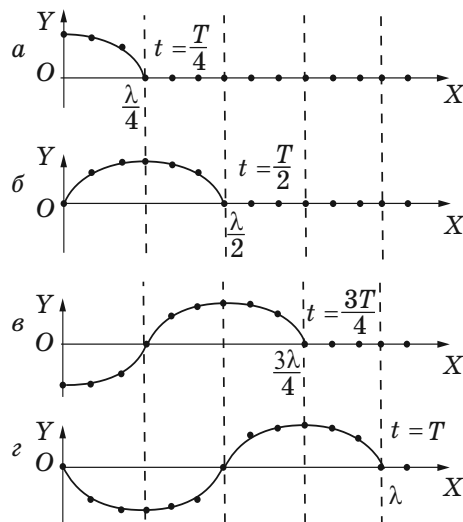


Рис. 1.45

или вниз — колебательная система обладает *сдвиговой упругостью*. При этом волна (волна возмущения) непрерывно смещается вправо.

В *продольной волне* колебания шариков (точек среды) происходят вдоль оси X , т. е. в направлении распространения волны. Картины волнового процесса в разные моменты времени, отличающиеся на четверть периода $\left(\frac{T}{4}\right)$, изображены на рис. 1.46. Синусоиды, идущие сверху вниз, показывают изменение

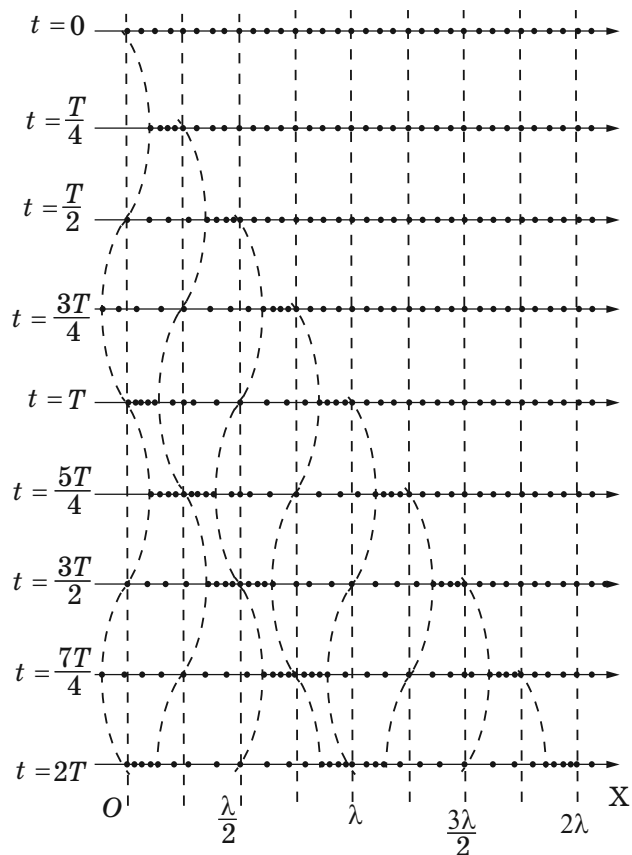


Рис. 1.46

с течением времени положения шариков, отстоящих друг от друга на расстоянии в четверть длины волны $\left(\frac{\lambda}{4}\right)$. Продольная волна на мгновенной фотографии выглядит как чередование сгущений и разрежений точек среды.

1.6.2. Звуковые волны

Звук обуславливается механическими колебаниями в упругих средах, частоты которых лежат в диапазоне примерно от 16 до 20 000 герц и которые способны воспринимать человеческое ухо. Колебания с этими частотами называются **звуковыми** или **акустическими** (акустика — учение о звуке).

Неслышимые механические колебания с частотами ниже звукового диапазона называются *инфразвуковыми*, а колебания с частотами выше звукового диапазона — *ультразвуковыми*.

Физическая акустика занимается изучением самих звуковых колебаний. В число ее задач входит выяснение свойств физических явлений, обуславливающих те или иные качества звука, воспринимаемые нашими органами слуха.

Мы различаем *музыкальные звуки* (пение, свист, звон, звучание струн, духовых музыкальных инструментов) и *шумы* (треск, стук, скрип, шипение). Отличие их в том, что музыкальные звуки более простые по форме, чем шумы: наложение музыкальных звуков может создать шум, но из шума нельзя извлечь музыку.

Звук, который мы слышим тогда, когда источник совершает гармонические колебания, называется *музыкальным тоном*. Каждый тон имеет два качества — *громкость* и *высоту*.

Громкость тона какой-либо данной высоты определяется амплитудой колебаний. Так, звук рояля после нажатия на клавишу постепенно затухает. Это происходит вместе с затуханием колебаний струны, т. е. с уменьшением их амплитуды. Ударив по клавише сильнее, т. е. сообщив колебаниям большую амплитуду, мы услышим более громкий звук, чем при слабом ударе. То же можно наблюдать с любым источником звука.

Высота тона определяется частотой колебаний — чем выше частота, тем более высокий звук мы слышим.

Если колебание не является гармоническим, то на слух оно имеет еще одно качество — *окраску звука* или *тембр*. По тембру мы легко распознаем звук голоса, звучание струны рояля, скрипичной струны, звук флейты, органа и т. д., даже если бы все эти звуки имели одну и ту же высоту и громкость.

Дело в том, что любое негармоническое колебание частотой ν можно представить в виде наложения (суперпозиции) гармонических колебаний с частотами ν , 2ν , 3ν и т. д. Первое из них — частотой ν — называется *основным тоном*, а остальные — *обертонами* или *гармониками*.

Возьмем в качестве источника звука струну длиной l . Колебания струны можно возбудить с помощью удара или щипка. Можно использовать для этого скрипичный смычок, натертый для создания трения канифолью. В спектре звучания струны будут присутствовать частоты:

$$\nu_n = n \frac{c}{2l},$$

где c — скорость звука в струне, зависящая от материала, из которого она изготовлена, ее толщины и силы натяжения.

Число n нумерует гармоники. Значение $n = 1$ соответствует основному тону. Амплитуда колебаний струны этой частоты A_1 имеет наибольшее значение в ее середине (рис. 1.47, *а*). Амплитуда колебаний первой гармоники A_2 максимальна в двух точках струны (рис. 1.47, *б*), амплитуда колебаний второй гармоники A_3 — в трех точках (рис. 1.47, *в*) и т. д. Амплитуды высших гармоник убывают по величине, а некоторые из гармоник могут и вовсе отсутствовать. Чем больше обертонов в спектре, тем богаче тембр звука в музыкальном отношении. В зависимости от соотношения их амплитуд окраска звука меняется. Высокие обертоны придают тембру «блеск», «яркость» и «металличность»; низкие дают характер «мощности» и «сочности».

Колебания с разными частотами накладываются друг на друга и дают результирующее колебание, форма которого (в развертке по времени) зависит от его состава. На рис. 1.48 изображены звуковые колебания, создаваемые струной рояля и кларнетом.

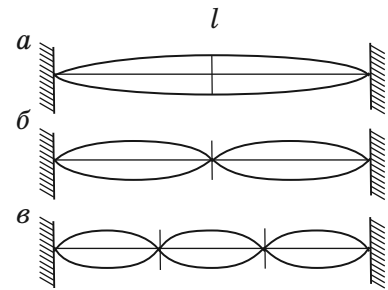


Рис. 1.47

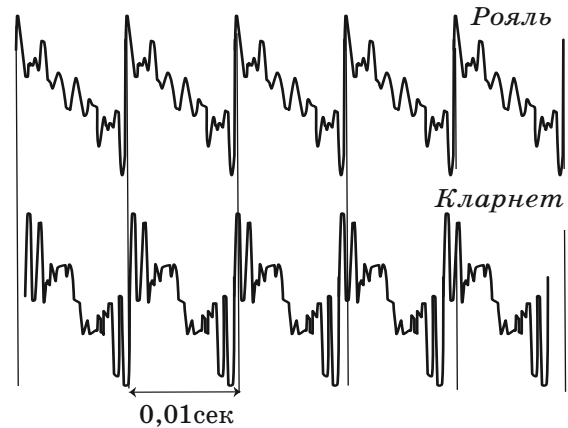


Рис. 1.48

Вопросы для самопроверки

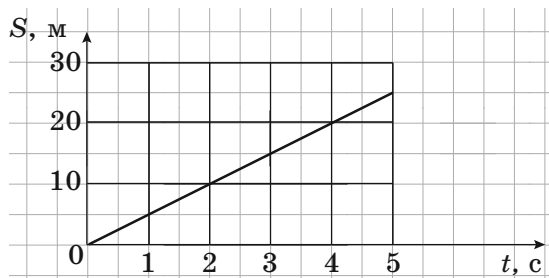
1. Что называется волной? Приведите примеры волновых процессов, наблюдаемых в окружающем нас мире.
2. Какое свойство характерно для любого волнового процесса? Переносит ли волна вещество?
3. Какие волны называются продольными? Где они могут распространяться?
4. Что такое поперечная волна? Какими свойствами должна обладать среда, чтобы в ней могли распространяться поперечные волны?
5. Поясните механизм распространения в упругой среде продольной волны; поперечной волны.
6. Что называется фронтом волны? Что такое сферическая и плоская волна?
7. Запишите формулу, связывающую длину волны с периодом колебаний частиц среды.
8. Что называется звуковыми колебаниями?
9. Поясните, в чем отличие музыкальных звуков от шумов.
10. Что такое музыкальный тон? Какими качествами он характеризуется?
11. Чем определяется громкость звука и его высота?
12. Дайте развернутое определение тембра звука.

Тренировочные тестовые задания к разделу «Механические явления»

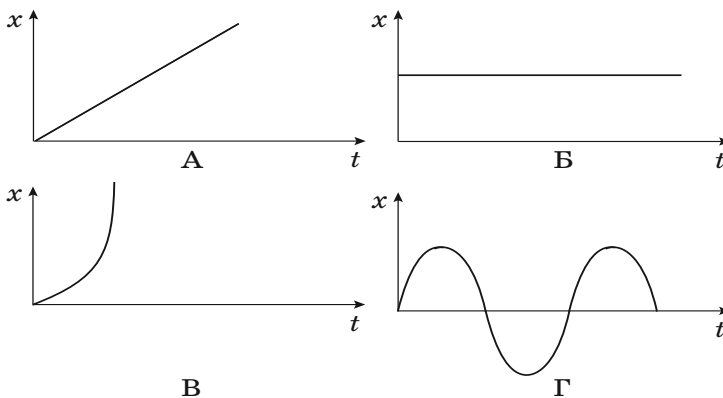
Тема 1.1. Кинематика

При выполнении заданий с выбором ответа обведите кружком номер правильного ответа.

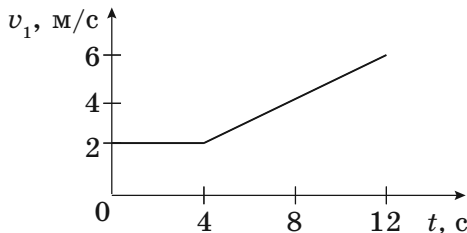
1. По графику пути равномерного движения определите путь, пройденный телом за 4 с после начала движения.



- 1) 5 м
2) 10 м
3) 20 м
4) 40 м
2. Какой из графиков описывает прямолинейное равномерное движение?

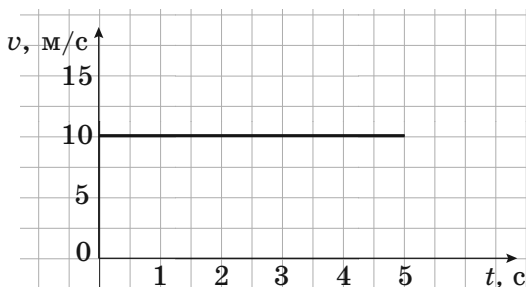


- 1) А
2) Б
3) В
4) Г
3. По графику скорости определите, сколько времени продолжалось равномерное движение тела.



- 1) 12 с
2) 6 с
3) 8 с
4) 4 с

4. По графику скорости равномерного движения определите скорость движения тела через 4 с после начала движения.



- 1) 2,5 м/с
2) 5 м/с
3) 10 м/с
4) 40 м/с
5. Один автомобиль, двигаясь со скоростью 54 км/ч, проехал мост за 30 с, а второй автомобиль, двигаясь равномерно, проехал его за 18 с. Какова была скорость второго автомобиля?
1) 65 км/ч
2) 75 км/ч
3) 90 км/ч
4) 105 км/ч
6. Две прямые улицы города пересекаются под прямым углом. Вдоль одной из них велосипедист проехал 2,5 км за 10 мин и, свернув на другую, проехал еще 1,5 км за 5 мин. Каково расстояние между начальной и конечной точками его пути и какова средняя скорость велосипедиста?
1) 2,7 км; 12 км/ч
2) 2,9 км; 16 км/ч
3) 3,1 км; 16 км/ч
4) 3,6 км; 18 км/ч
7. Радиус орбиты Луны 380 000 км, период обращения вокруг Земли — 27,3 суток. Каким будет перемещение Луны за 81,9 суток?
1) 1 140 000 м
2) 190 000 км
3) 85 000 км
4) 0 км
8. Даны два вектора \vec{a} и \vec{b} (рис. 1). Какой вектор на рис. 2 является их суммой?

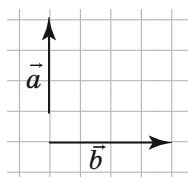


Рис. 1

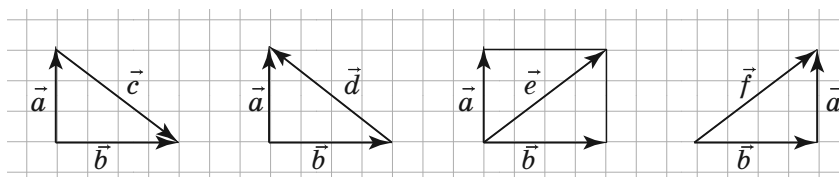
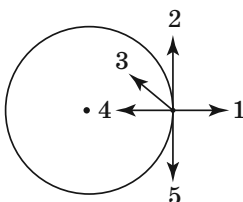


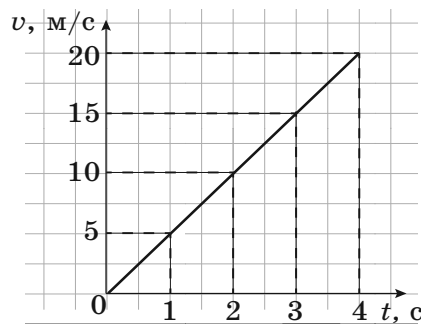
Рис. 2

- 1) только \vec{c}
2) только \vec{d}
3) только \vec{e}
4) \vec{e} и \vec{f}
9. Тело движется равномерно по окружности в направлении против часовой стрелки. Какая стрелка указывает направление вектора его ускорения?

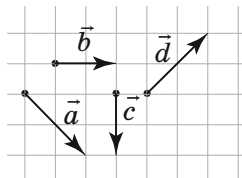
- 1) 1
2) 2
3) 4
4) 5



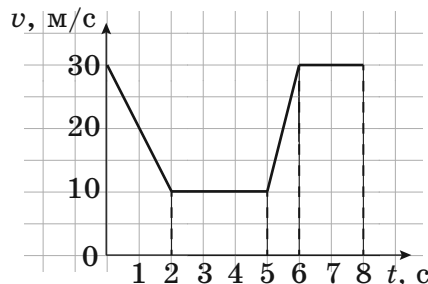
10. По графику зависимости скорости тела от времени определите его ускорение в момент времени 4 с.



- 1) $2,5 \text{ м/с}^2$
 2) 5 м/с^2
 3) $7,5 \text{ м/с}^2$
 4) 10 м/с^2
11. Велосипедист начинает движение из состояния покоя и движется равноускоренно прямолинейно. С каким ускорением он движется, если спустя 20 с его скорость становится равной 15 м/с?
- 1) $0,5 \text{ м/с}^2$
 2) $0,75 \text{ м/с}^2$
 3) $1,5 \text{ м/с}^2$
 4) 2 м/с^2
12. При равноускоренном прямолинейном движении скорость катера увеличилась с 10 м/с до 15 м/с за 10 с. Какой путь прошел катер за это время?
- 1) 75 м
 2) 100 м
 3) 125 м
 4) 150 м
13. На рисунке представлены четыре вектора. Какое равенство из приведенных ниже для этих векторов не выполняется?

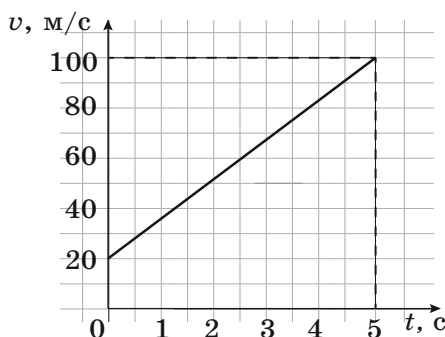


- 1) $\vec{b} - \vec{c} = \vec{d}$
 2) $\vec{d} + \vec{c} = \vec{b}$
 3) $\vec{a} - \vec{c} = \vec{b}$
 4) $\vec{a} + \vec{b} = \vec{c}$
14. На рисунке представлен график зависимости скорости тела от времени. За какой интервал времени тело прошло максимальный путь?



- 1) 0—2 с
 2) 2—5 с
 3) 5—6 с
 4) 6—8 с

15. Автомобиль, двигаясь со скоростью 10 м/с, начал торможение с ускорением 2 м/с². Какой путь он прошел за 5 с с момента начала торможения?
- 1) 10 м
 - 2) 15 м
 - 3) 20 м
 - 4) 25 м
16. Тело движется равномерно по окружности. Как изменится его центростремительное ускорение, если скорость возрастет вдвое, а радиус окружности вдвое уменьшится?
- 1) не изменится
 - 2) уменьшится в 4 раза
 - 3) уменьшится в 8 раз
 - 4) увеличится в 8 раз
17. По графику скорости определите модуль ускорения движения тела в интервале времени 0—5 с и путь, пройденный телом за это время.

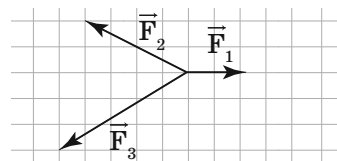


- 1) 10 м/с², 200 м
 - 2) 12 м/с², 240 м
 - 3) 14 м/с², 260 м
 - 4) 16 м/с², 300 м
18. Из крана капает капли воды. Вторая капля начала движение через 0,2 с после первой. Какова скорость движения второй капли относительно первой через 0,8 с после начала движения первой капли и в какую сторону направлен вектор этой скорости?
- 1) 6 м/с, вверх
 - 2) 6 м/с, вниз
 - 3) 2 м/с, вверх
 - 4) 2 м/с, вниз

Тема 1.2. Динамика

При выполнении заданий с выбором ответа обведите кружком номер правильного ответа.

19. Две силы $F_1 = 3$ Н и $F_2 = 4$ Н приложены к одной точке тела. Угол между векторами этих сил 90° . Определите модуль равнодействующей этих сил.
- 1) 1 Н
 - 2) 5 Н
 - 3) 7 Н
 - 4) 25 Н
20. К телу в одной точке приложены три силы, векторы которых лежат в одной плоскости. Модуль силы F_1 равен 10 Н. Чему равен модуль равнодействующей трех сил?
- 1) 15 Н
 - 2) 25 Н
 - 3) 35 Н
 - 4) 45 Н



21. Под действием силы 5 Н пружина удлинилась на 0,05 м. Какова жесткость пружины?
- 1) 0,01 Н/м
 - 2) 1 Н/м
 - 3) 10 Н/м
 - 4) 100 Н/м
22. Космический аппарат удаляется от Земли. Как изменится сила притяжения его к Земле, если его расстояние от центра Земли увеличится в 3 раза?
- 1) не изменится
 - 2) уменьшится в 3 раза
 - 3) уменьшится в 9 раз
 - 4) уменьшится в $\sqrt{3}$ раз
23. Векторы скорости тела \vec{v} и силы \vec{F} , действующей на него, изображены на рис. 1. Какой из векторов, изображенных на рис. 2, совпадает по направлению с вектором ускорения тела?

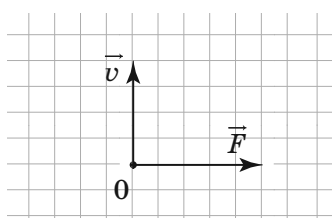


Рис. 1

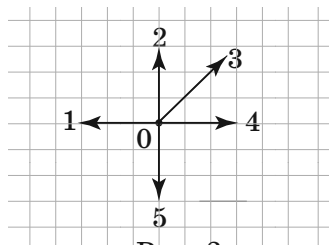


Рис. 2

- 1) 1
- 2) 2
- 3) 3
- 4) 4

При выполнении заданий с кратким ответом необходимо записать ответ в указанном в тексте задания месте.

24. Чугунный шар весит 8 Н и имеет объем 125 см³. Сплошной или полый этот шар? (Плотность чугуна $\rho = 7,4 \text{ г/см}^3$.)
 Ответ: _____.
25. На тело массой 3 кг действует сила тяжести и горизонтальная сила 40 Н. Найдите ускорение тела.
 Ответ: _____.
26. Из винтовки массой 4 кг вылетает пуля массой 10 г со скоростью 700 м/с. Какова скорость отдачи винтовки при выстреле?
 Ответ: _____.
27. Какую силу надо приложить к вагону, стоящему на рельсах, чтобы вагон стал двигаться равноускоренно и за время 30 с прошел путь 11 м? (Масса вагона 16 т, коэффициент трения его о рельсы равен 0,05.)
 Ответ: _____.
28. Тело массой 10 кг тянут по горизонтальной поверхности с силой 40 Н. Если эта сила приложена к телу под углом 60° к горизонту, оно движется равномерно. Найдите коэффициент трения тела о поверхность.
 Ответ: _____.

Тема 1.3. Работа и энергия

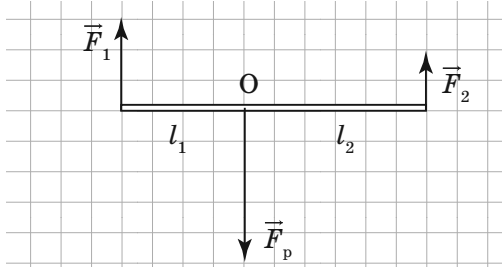
При выполнении заданий с выбором ответа обведите кружком номер правильного ответа.

29. Какая из приведенных ниже формул выражает кинетическую энергию тела?
 1) mg 3) mgh
 2) mv 4) \vec{a}
30. Среди приведенных ниже формул укажите ту, которая выражает потенциальную энергию упруго деформированной пружины.
 1) kx 3) $\frac{kx^2}{2}$
 2) mg 4) mgh
31. Какова кинетическая энергия автомобиля массой 1000 кг, движущегося со скоростью 72 км/ч?
 1) $7,2 \cdot 10^4$ Дж 3) $3,6 \cdot 10^5$ Дж
 2) $2 \cdot 10^5$ Дж 4) $1,8 \cdot 10^5$ Дж
32. Пружина жесткостью 10^3 Н/м растянута на 2 см. Какова потенциальная энергия упругой деформации пружины?
 1) 0,2 Дж 3) 1,6 Дж
 2) 0,8 Дж 4) 2,4 Дж
33. Горизонтальный однородный стержень, к концам которого приложены силы F_1 и F_2 ($F_1 > F_2$), находится в равновесии. l_1 и l_2 — расстояния от концов стержня до точки O приложения равнодействующей силы. Среди перечисленных ниже утверждений укажите правильное.
- 1) $\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_1}{l_2}$

2) $\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$

3) $F_1 - F_2 = F_p$

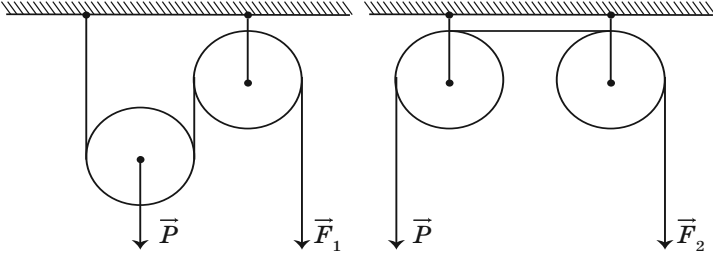
4) $l_1 > l_2$


34. Камень массой 0,2 кг брошен вертикально вверх со скоростью 10 м/с. На какой высоте его кинетическая энергия уменьшится в 2 раза?
 1) 1,5 м 3) 3 м
 2) 2,5 м 4) 3,5 м
35. Для поднятия груза весом P используются две системы блоков (см. рисунок). Пренебрегая весом блоков и силой трения, среди приведенных ниже утверждений укажите правильное.
- 1) $F_1 > F_2$

2) $F_1 = F_2$

3) $F_1 = P$

4) $F_1 = \frac{P}{2}, F_2 = P$



При выполнении заданий с кратким ответом необходимо записать ответ в указанном в тексте задания месте.

36. Пуля массой 10 г попадает в деревянный брусок массой 0,5 кг и застревает в нем. Какова будет кинетическая энергия бруска с пулей, если пуля летела со скоростью 200 м/с?
 Ответ: _____.
37. Человек массой 60 кг на льду ловит мяч массой 0,5 кг, который летит горизонтально со скоростью 20 м/с. На какое расстояние откатится человек с мячом на горизонтальной поверхности льда, если коэффициент трения равен 0,05?
 Ответ: _____.

Тема 1.4. Гидро- и аэростатика

При выполнении заданий с выбором ответа обведите кружком номер правильного ответа.

38. Выталкивающая сила, действующая на тело, погруженное в жидкость, выражается формулой
- | | |
|--------------|-------------------|
| 1) mgh | 3) ρgh |
| 2) ρVg | 4) $\frac{mg}{S}$ |
39. Силы F_1 и F_2 , действующие на поршни гидравлического пресса, и площади поршней S_1 и S_2 связаны уравнением
- | | |
|------------------------------------|--|
| 1) $F_1 : F_2 = S_1 : S_2$ | 3) $F_2 : F_1 = S_1 : S_2$ |
| 2) $F_1 \cdot S_1 = F_2 \cdot S_2$ | 4) $\frac{F_1}{S_2} = \frac{F_2}{S_1}$ |

При выполнении заданий с кратким ответом необходимо записать ответ в указанном в тексте задания месте.

40. Плотность дерева, из которого изготовлен кубик $\rho = 520 \text{ кг/м}^3$, а плотность воды $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$. На сколько сантиметров кубик погрузится в воду, если длина его ребра $a = 10 \text{ см}$?
 Ответ: _____.
41. Кусок стекла падает в воде с ускорением $5,8 \text{ м/с}^2$. Найдите плотность стекла, если плотность воды 1 г/см^3 . (Сопротивлением среды можно пренебречь.)
 Ответ: _____.
42. В сообщающиеся сосуды разного сечения налита ртуть. Поверх нее в одной из трубок находится столб воды высотой 0,8 м, а в другой — столб керосина высотой 0,2 м. Определите разность уровней ртути. (Плотность воды — 1 г/см^3 , керосина — $0,8 \text{ г/см}^3$, ртути — $13,6 \text{ г/см}^3$.)
 Ответ: _____.

Темы 1.5—1.6. Механические колебания и волны. Звук

При выполнении заданий с выбором ответа обведите кружком номер правильного ответа.

43. Маленький шарик, подвешенный на длинной нити, совершая колебания, проходит через положение равновесия с интервалом 1 с. Какова частота его колебаний?
- 1) 2 Гц
2) 1 Гц
3) 0,5 Гц
4) 0,1 Гц
44. Тело совершает гармонические колебания с амплитудой 0,05 м. Какой путь оно проходит за 12 колебаний?
- 1) 0,6 м
2) 1,2 м
3) 2,4 м
4) 4,8 м
45. Длину нити математического маятника увеличили в 4 раза. Как и во сколько раз изменилась частота его колебаний?
- 1) увеличилась в 4 раза
2) увеличилась в 2 раза
3) уменьшилась в 4 раза
4) уменьшилась в 2 раза
46. Как и во сколько раз изменится период колебаний пружинного маятника, если шарик на пружине заменить другим шариком, радиус которого вдвое меньше, а плотность — в два раза больше?
- 1) увеличится в 4 раза
2) увеличится в 2 раза
3) уменьшится в 4 раза
4) уменьшится в 2 раза
47. Какое расстояние за один период колебаний пройдет фронт звуковой волны частотой 1200 Гц? (Скорость звука в воздухе 340 м/с.)
- 1) 0,14 м
2) 0,28 м
3) 0,56 м
4) 1,12 м
48. Эхолот зарегистрировал звук, посланный катером и отраженный от дна морского залива, через 0,02 с. Найдите глубину залива. (Скорость звука в воде 1400 м/с.)
- 1) 7 м
2) 14 м
3) 28 м
4) 56 м

При выполнении заданий с кратким ответом необходимо записать ответ в указанном в тексте задания месте.

49. Гиря, подвешенная на пружине, колеблется с амплитудой 3 см. Жесткость пружины 980 Н/м. Каково наибольшее значение кинетической энергии гири?
 Ответ: _____.
50. Математический маятник совершает колебания с амплитудой 0,03 м. Определите наибольшую скорость, которой обладает груз маятника, если период колебаний 3,9 с.
 Ответ: _____.

2. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

- Знать:**
- смысл понятий: атом и молекула, твердое, жидкое и газообразное состояние вещества, межмолекулярное взаимодействие, тепловой процесс;
 - смысл физических величин: температура, внутренняя энергия и количество теплоты, удельная теплоемкость, удельная теплота плавления и парообразования, удельная теплота сгорания топлива, влажность воздуха;
 - смысл первого и второго начал термодинамики.
- Уметь:**
- объяснить и описать физические явления и процессы:
 - диффузия и теплопроводность;
 - конвекция;
 - испарение и конденсация;
 - кипение;
 - плавление и кристаллизация.

2.1. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

Молекулярная физика и термодинамика исследуют тепловые свойства тел. При изучении механики мы видели, что благодаря трению между телами их механическая энергия переходит в тепловую. Механика не рассматривает внутреннее строение тел и не конкретизирует понятие их *внутренней* (или *тепловой*) энергии. Это понятие вводится в термодинамике и молекулярной физике, составляющих единый раздел физики.

Молекулярная, или статистическая, физика, называемая еще *молекулярно-кинетической теорией*, использует конкретные модели строения тел и опирается на три основанных на опыте положения:

1. Все тела состоят из атомов или молекул.
2. Атомы или молекулы, из которых состоят тела, находятся в непрерывном движении, скорость которого возрастает с температурой.
3. Молекулы взаимодействуют между собой. Взаимодействие носит характер притяжения на больших расстояниях и отталкивания — на малых.

В этом разделе мы рассмотрим строение тел, характер движения молекул в них и введем понятие температуры.

2.1.1. Строение вещества. Газы, жидкости и твердые тела

Молекулой называется мельчайшая частица вещества, сохраняющая его химические свойства. Роль молекул могут выполнять и атомы (неделимые частицы вещества). Таковы, например, одноатомные молекулы инертных газов — гелия, аргона, неона и др. Металлы также состоят из атомов. В дальнейшем мы будем говорить о молекулах, имея в виду и атомы.

Характер движения молекул в разных телах различен. В *твердых телах* молекулы занимают определенные положения в пространстве, образуя так называемую *кристаллическую решетку*, и совершают вблизи этих положений колебательные движения. Твердые тела имеют собственную форму и объем.

На рис. 2.1 изображена кристаллическая решетка поваренной соли NaCl — самая простая из существующих в природе решеток. Она имеет кубическую форму и состоит из чередующихся друг с другом ионов натрия и хлора.

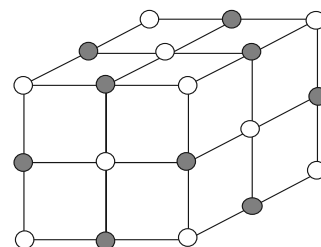


Рис. 2.1

Для кристаллов характерен *дальний порядок* в расположении их атомов. Если мысленно перемещаться вдоль прямой, соединяющей соседние атомы, то, отсчитав целое число отрезков длиной, равной расстоянию между ними, мы обнаружим в этом месте атом. Места расположения атомов в кристалле называются *узлами* кристаллической решетки. Несмотря на большое разнообразие существующих в природе кристаллических тел, всем им присуща указанная здесь закономерность — существование дальнего порядка.

В *жидкостях* дальний порядок отсутствует, а их молекулы могут хаотически перемещаться в пространстве, однако при этом среднее расстояние между молекулами сохраняется неизменным. Жидкости не имеют собственной формы, но имеют собственный объем. Схематически жидкость изображена на рис. 2.2.

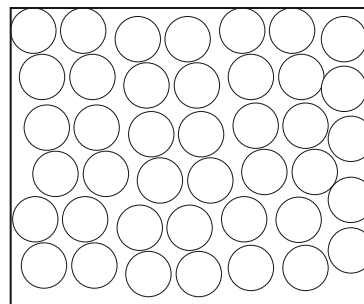


Рис. 2.2

Движение молекул жидкости было обнаружено при наблюдении *броуновского движения* — движения взвешенных в ней очень мелких частиц твердого вещества. Каждая частица непрерывно совершает скачкообразные перемещения в произвольных направлениях, описывая траектории в виде ломаной линии. Такое поведение частиц можно объяснить, считая, что они испытывают удары молекул жидкости одновременно с разных сторон. Различие в числе этих ударов с противоположных направлений приводит к движению частицы, поскольку ее масса соизмерима с массами самих молекул. Движение таких частиц впервые обнаружил в 1827 г. английский ботаник Броун, наблюдая под микроскопом частицы цветочной пыльцы в воде, почему оно и было названо броуновским движением.

Расстояния между молекулами *газов* намного превышают их размер, поэтому большую часть времени они движутся свободно, изредка сталкиваясь друг с другом и со стенками содержащего их сосуда. Газы не имеют ни собственной формы, ни объема. Они занимают весь объем того сосуда, в котором находятся (рис. 2.3).

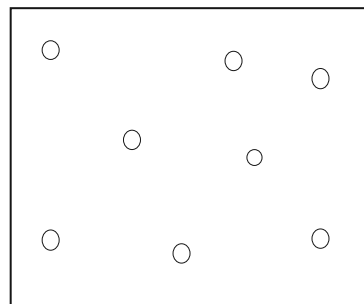


Рис. 2.3

Принадлежность тела к газообразным, жидким или твердым телам зависит от его природы, а также от давления и температуры. Всякое тело может находиться в любом из перечисленных агрегатных состояний. Переходы из одного состояния в другое,

т. е. из жидкой фазы в газообразную или из твердой в жидкую и обратно, называются *фазовыми переходами*.

Движение молекул в газах, жидкостях и твердых телах проявляет себя также и в явлении диффузии, которое можно наблюдать в любом из них.

Диффузией называется проникновение молекул какого-либо вещества в среду, состоящую из молекул другого вещества.

Открыв флакон с таким летучим веществом, как эфир, мы почувствуем его резкий запах. Очень быстро, спустя несколько минут, этот запах распространится по всей комнате, даже если воздух в ней остается неподвижным.

Бросим теперь в чистую воду синий кристаллик медного купороса. Растворившись, он окрасит в синий цвет нижний слой воды, прилегающий ко дну сосуда. Спустя сутки мы заметим, что синий цвет приобрела и вся находящаяся в сосуде вода. Это случилось благодаря диффузии, приводящей к выравниванию концентрации примеси во всем объеме сосуда.

Описанные явления объясняются хаотическим движением молекул газов и жидкостей. Любая молекула независимо от ее природы, вовлеченная в процесс столкновения с другими молекулами, перемещаясь в произвольных направлениях, оказывается, в конечном счете, далеко от того места, где находилась в начале процесса. Диффузия в газах — самый быстрый процесс, в жидкостях он протекает гораздо медленнее, но может наблюдаться даже в твердых телах. Опыт показывает, что, соединив гладко отполированными поверхностями два бруска из разных металлов, например из меди и алюминия, и оставив их в таком положении на длительное время (на 4—5 лет), мы обнаружим их сращивание за счет проникновения атомов меди в алюминиевый образец и, наоборот, проникновения атомов алюминия в медный.

Процессы диффузии идут быстрее при увеличении температуры, что указывает на возрастание скорости хаотического движения атомов и молекул, из которых состоят тела, подтверждая второе из названных выше положений, на которых основывается молекулярно-кинетическая теория вещества.

2.1.2. Внутренняя энергия и температура

С точки зрения кинетической теории, **внутренняя энергия тела — это энергия движения и взаимодействия друг с другом атомов или молекул, из которых оно состоит.** Наиболее просто найти внутреннюю энергию *идеального газа*.

Идеальным называется газ, суммарный объем молекул которого пренебрежимо мал по сравнению с объемом содержащего этот газ сосуда, а расстояние, на котором молекулы взаимодействуют друг с другом, много меньше среднего расстояния между ними.

Из опыта следует, что все существующие в природе газы при комнатной температуре и атмосферном давлении можно считать идеальными.

Поскольку молекулы идеального газа не взаимодействуют друг с другом на расстоянии, а столкновения их упругие, внутренняя энергия газа равна сумме их кинетических энергий и зависит только от температуры. Внутреннюю энергию называют еще *тепловой*.

Температурой газа θ (энергетической температурой) принято считать $\frac{2}{3}$ средней кинетической энергии поступательного движения его молекул:

$$\theta = \frac{2}{3} \cdot \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{2}{3} \bar{K}, \quad (2.1)$$

где m_0 — масса молекулы, v — ее скорость.

Такое определение температуры возможно, поскольку, если смешать, например, два разных газа, средние значения кинетических энергий молекул этих газов сравниваются: $\bar{K}_1 = \bar{K}_2$. Молекулы газа, имеющие меньшую массу, будут двигаться с большей скоростью и наоборот. Кинетические же энергии молекул будут одинаковыми. Таким же свойством обладает и температура — опыт показывает, что тела, приведенные в контакт друг с другом, приобретают одинаковую температуру.

Температура, определенная равенством (2.1), измеряется в *джоулях*. Однако в физике ее измеряют в *градусах*. По шкале Цельсия за нуль градусов принимается температура замерзания чистой воды ($t_0 = 0^\circ\text{C}$), а температура кипения воды при атмосферном давлении 760 мм рт. ст. принимается за 100 градусов ($t_{\text{кип}} = 100^\circ\text{C}$). Градус — одна сотая часть разности этих температур.

Температура любого тела не может опуститься ниже $-273,15^\circ\text{C}$. При такой температуре движение молекул полностью прекращается. Кельвин ввел другую шкалу температур (рис. 2.4), на которой за нуль принята именно эта температура, а «размер» градуса остался прежним и в системе СИ получил название *кельвин* (К). Температура T по шкале Кельвина и температура t по шкале Цельсия связаны уравнением:

$$T = t + 273. \quad (2.2)$$

Все температуры по шкале Кельвина положительны, поэтому она называется *абсолютной*, а температура T — *абсолютной температурой*.

Температуру по шкале Кельвина можно найти, вводя обозначение $\theta = kT$. Переводной коэффициент $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К называется *постоянной Больцмана* (единица измерения — *джоуль на кельвин*). Она показывает, какая часть джоуля содержится в одном кельвине.

Из сказанного следует, что повышение температуры газа означает увеличение средней скорости хаотического движения его молекул. Аналогично с повышением температуры возрастает скорость перемещения молекул жидкости и возрастает амплитуда колебаний атомов твердых тел. При достижении *температуры плавления* амплитуда возрастает настолько, что атомы уже не могут удерживаться в узлах кристаллической решетки и твердое тело превращается в жидкость. Эта температура зависит от природы тела.

При *температуре кипения* молекулы жидкости приобретают такую скорость, что покидают жидкость, преодолевая силы межмолекулярного притяжения и становясь молекулами пара. Каждой жидкости присуща своя температура кипения, однако она существенно зависит от давления окружающего воздуха. Так, в горах на высоте несколько километров, где его давление гораздо ниже, вода начинает кипеть при $70\text{—}80^\circ\text{C}$, что не позволяет альпинистам приготовить полно-

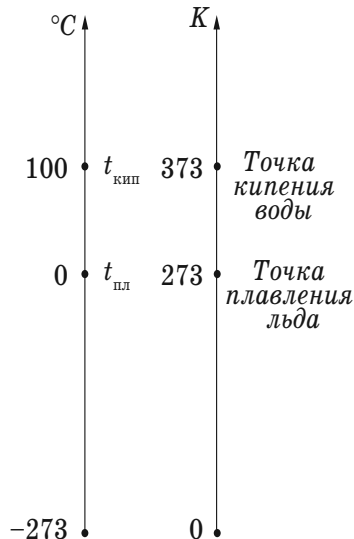


Рис. 2.4

ценный обед. Для этих целей они используют герметически закрывающуюся посуду, в которой создается давление, превышающее атмосферное на этой высоте.

Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте основные положения молекулярно-кинетической теории вещества.
2. Опишите характер движения молекул в газах, жидкостях и твердых телах. От чего зависит принадлежность тела к газообразным, жидким или твердым телам?
3. Что называется фазовым переходом? Приведите примеры таких переходов.
4. Что такое броуновское движение? Как его наблюдают и о чем оно свидетельствует?
5. В чем заключается явление диффузии? Где она может происходить и что влияет на ее скорость?
6. Что называется идеальным газом? Дайте его развернутую характеристику.
7. Что такое внутренняя энергия тела? Чему равна внутренняя энергия идеального газа?
8. Как вводится понятие температуры? Каков физический смысл постоянной Больцмана?
9. Дайте характеристику температурных шкал Цельсия и Кельвина. Как они связаны друг с другом?

2.2. ТЕРМОДИНАМИКА

Термодинамика, или общая теория теплоты — один из важнейших разделов физики. Термодинамика как наука возникла из потребностей практики, когда перед человеком встала задача создания устройства, преобразующего энергию сжигаемого топлива в механическую работу. Теплота в термодинамике есть форма энергии, а потому она эквивалентна некоторой работе. Термодинамика — наука об энергии и ее свойствах.

Термодинамика не конкретизирует строение макроскопических тел, поэтому выводы ее имеют общий характер, т. е. применимы для любых тел. Она опирается на два *принципа*, или *начала* термодинамики, являющихся обобщением опытных фактов.

Первое начало термодинамики выражает закон сохранения энергии. Устройство, непрерывно совершающее работу без затраты энергии, называется *вечным двигателем (perpetuum mobile)*. **Первое начало утверждает, что *perpetuum mobile* невозможно.** Смысл второго начала термодинамики мы раскроем ниже. Кроме того, в этом разделе мы дадим определение количества теплоты, теплоемкости тел и рассмотрим принцип работы тепловой машины.

2.2.1. Количество теплоты. Удельная теплоемкость тел

Одним из понятий, используемых в термодинамике, является рассмотренная в предыдущем разделе *внутренняя энергия*. Это энергия движения и взаимодействия друг с другом молекул вещества, зависящая от температуры.

Как показывает опыт, изменить температуру, а следовательно, и внутреннюю энергию тела, можно двумя способами — совершая над ним механическую работу

или приводя его в контакт с горячим или холодным телом. В первом случае его можно нагреть с помощью трения о другое тело, а газ — путем его сжатия. Работа внешних сил идет на увеличение внутренней энергии тел.

Изменение внутренней энергии при втором — контактном — способе происходит без совершения работы, а благодаря *теплообмену* — передаче энергии теплового движения молекул «горячего» тела молекулам «холодного». В силу исторических причин в этом случае говорят, что к телу подводится или от него отводится некоторое количество теплоты.

Количество теплоты Q представляет собой энергию, передаваемую от одного тела к другому при их контакте.

Работа, внутренняя энергия и количество теплоты измеряются в одних и тех же единицах — *джоулях* (Дж).

В тепловых измерениях в качестве единицы количества теплоты раньше использовалась особая единица энергии — *калория* (кал), равная количеству теплоты, необходимому для нагревания 1 грамма воды на 1 градус (точнее, от 19,5 до 20,5 °C). Опытным путем установлен *механический эквивалент теплоты* — соотношение между калорией и джоулем:

$$1 \text{ кал} = 4,2 \text{ Дж}.$$

Количество теплоты Q , которое получило тело, определяется массой тела, разностью температур в начале и конце процесса и его удельной теплоемкостью.

Удельной теплоемкостью называется количество теплоты ΔQ , необходимое для повышения температуры единицы массы вещества на один кельвин:

$$c = \frac{1}{m} \frac{\Delta Q}{\Delta T}. \quad (\Delta T = T_2 - T_1). \quad (2.1)$$

Единица ее измерения в системе СИ:

$$[c] = \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Количество теплоты, необходимое для нагревания вещества массой m , имеющего температуру T_1 , до температуры T_2 :

$$Q = cm(T_2 - T_1) = cm(t_2 - t_1), \quad (2.2)$$

где $T = t + 273$ — абсолютная температура, t — температура по шкале Цельсия.

При охлаждении тело отдает теплоту окружающим ее телам, а величина Q становится *отрицательной*.

Передать телу тепло можно разными способами. Можно привести его в контакт с более горячим телом. Опыт показывает, что горячее тело «остынет», а холодное — «нагреется» и оба они будут иметь одинаковую температуру, находясь в *состоянии теплового равновесия*. Процесс передачи тепла называется в этом случае **теплопроводностью**.

Теплопроводности разных тел сильно отличаются друг от друга. Наилучшую теплопроводность имеют металлы (серебро, медь, алюминий), а теплопроводность газов самая низкая.

Переход в состояние теплового равновесия в газах и жидкостях значительно ускоряется за счет *конвекции* — перемешивания, которое происходит благодаря изменению их плотности с изменением температуры.

Мысленно выделим в жидкости некоторый объем, содержащий единицу ее массы, например один грамм. При нагревании этот объем увеличивается —

жидкость расширяется, а ее плотность уменьшается. По закону Архимеда, на тело меньшей плотности действует выталкивающая сила, направленная вверх, в результате чего возникает движение нагретых слоев жидкости в том же направлении — когда чайник с водой стоит на газовой плите, нагревание ее во всем объеме происходит благодаря конвекции. Подобным образом ведут себя и газы.

Еще один способ передачи тепла — с помощью обмена *излучением*. Все тела излучают и поглощают инфракрасные тепловые лучи. Из двух тел более горячее излучает большую мощность. Разогретое до нескольких сотен градусов, оно светится красным светом. Помещенные в откачанный сосуд с хорошо отражающими стенками тела приобретают одинаковую температуру.

Пример нагревания тел с помощью излучения — поглощение солнечных лучей, которые приходят на Землю, преодолев десятки миллионов километров в пустом пространстве, лишенном вещества — вакууме.

2.2.2. Закон сохранения энергии в тепловых процессах

Процессы, связанные с изменением внутренней энергии тел, называются **тепловыми**. Это нагревание и охлаждение тел, плавление и отвердевание, испарение и конденсация, выделение тепла при трении тел друг о друга. Указанные процессы наблюдаются в природе и протекают естественным путем. Характерной их чертой является превращение механической энергии в тепловую и переход в состояние теплового равновесия.

Человек поставил перед собой задачу создать устройства, позволяющие облегчить его физический труд. Такие устройства должны были производить механическую работу, затрачивая на это тепловую энергию, выделяющуюся при сжигании органического топлива: угля, древесины, продуктов перегонки нефти. В свое время — примерно двести лет назад — исследования на эту тему позволили понять, при каких условиях можно решить эту задачу.

Опытным путем было установлено, что в основе всех природных процессов лежит закон сохранения энергии. Обобщая закон сохранения механической энергии, рассмотренный нами выше, можно сформулировать более общий закон.

Суммарная энергия тел, составляющих замкнутую систему, остается постоянной при любых процессах, протекающих в ней.

К кинетической и потенциальной энергиям тел здесь следует добавить внутреннюю энергию, энергию химических и ядерных реакций, энергию излучения и другие известные науке ее виды. Простейший пример взаимопревращения видов энергии — падение тела на Землю с некоторой высоты. Первоначальный запас потенциальной энергии превращается в кинетическую энергию движения тела, а затем — в тепловую (внутреннюю) энергию, проявляющую себя в нагревании тела. Часть ее может пойти на работу по разделению тела на отдельные осколки, если падение с высоты сопровождается его разрушением.

При бомбардировке флуоресцирующего экрана электронами возникает световое излучение, энергия которого берется из запаса кинетической энергии электронов. Сжигание топлива порождает свет и тепло, черпающие свою энергию в химических превращениях молекул.

Превращение внутренней энергии тела в механическую работу, согласно сказанному, — это один из возможных путей осуществления таких превращений. Этот способ, однако, требует создания соответствующих условий, которых нет в природе. Человек сумел создать их и получил в свои руки устройства — *тепловые машины*, заменившие его физический труд.

2.2.3. Принцип работы тепловой машины

Устройство, преобразующее теплоту в механическую работу, называется **тепловой машиной**.

Первое начало термодинамики, выражающее закон сохранения энергии для тепловых процессов, не накладывает никаких ограничений на превращение энергии из одного вида в другой. Согласно первому началу, всегда имеется возможность превратить работу в теплоту или теплоту в работу, если общее количество теплоты эквивалентно общему количеству работы. Это справедливо, когда мы хотим *работу превратить в теплоту* — тело можно нагреть, например, с помощью трения.

Выясним теперь условия, при которых возможно преобразование *теплоты в работу*. В системе тел, находящихся в тепловом равновесии, без внешнего вмешательства никаких процессов происходить не может. Нельзя выполнить и работу, поскольку она связана с направленным движением макроскопических тел, а тепловое движение молекул хаотично и не имеет никакого преимущественного направления. Для получения механической работы, очевидно, надо иметь два тела с разными температурами и прибегнуть к помощи третьего тела, которое и будет эту работу совершать. Например, можно взять идеальный газ, заключенный в цилиндре с подвижным поршнем (рис. 2.5), стенки которого обладают хорошей теплопроводностью.

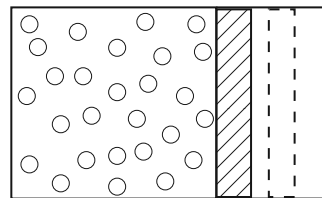


Рис. 2.5

Пусть первоначально газ в цилиндре имеет температуру окружающего воздуха, а давление газа равно атмосферному. Если цилиндр привести в контакт с телом, нагретым до более высокой температуры, газ внутри цилиндра расширится, поглотив у этого тела некоторое количество теплоты и совершив работу. Чтобы вернуть поршень в исходное положение и подготовить систему к повторному выполнению работы, нужно охладить газ, приведя цилиндр в контакт с более холодным телом, например, с тем же окружающим воздухом. При обратном ходе поршня, сопровождающем охлаждение газа, совершается работа обратного знака. Поскольку работа расширения превосходит работу сжатия, т. к. температура нагретого тела выше температуры холодного, такое устройство позволяет часть теплоты, полученной при сжигании топлива, преобразовать в механическую работу.

Из сказанного следует, что тепловая машина должна иметь три составные части (рис. 2.6):

- 1) *нагреватель* — «горячее» тело с температурой T_1 ;
- 2) *рабочее тело*, в качестве которого можно взять газ в цилиндре с поршнем;
- 3) *охладитель* — тело, имеющее температуру T_2 , более низкую, чем у нагревателя.

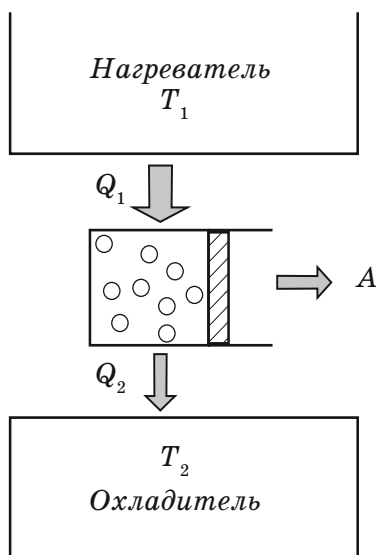


Рис. 2.6

Это машина периодического действия. За один период (цикл) газ в цилиндре сначала расширяется, совершая работу A и получая при этом от нагревателя количество теплоты Q_1 , затем вновь сжимается, отдавая часть тепла Q_2 охладителю. Если обе величины Q_1 и Q_2 считать положительными, то по закону сохранения энергии:

$$A = Q_1 - Q_2 \quad (2.3)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) тепловой машины равен отношению работы A , совершаемой ею за один цикл, к количеству теплоты Q_1 , получаемой рабочим телом за один цикл от нагревателя:

$$\eta = \frac{A}{Q_1}. \quad (2.4)$$

КПД обычно измеряют в процентах, так что правую часть этого равенства следует умножить на 100%.

Поскольку теплота, полученная при сжигании топлива, не полностью превращается в работу, *КПД тепловой машины не может равняться 100 %*.

Рассматривая принцип работы тепловой машины, мы приходим к заключению, что второй процесс — превращение теплоты целиком в работу — осуществить нельзя. Чтобы совершить такое превращение, *часть тепла нужно передать телу, имеющему более низкую температуру — охладителю*. Если бы такого ограничения не было, можно было бы построить машину, которая путем охлаждения окружающих ее тел превращала бы в работу всю взятую у них теплоту. Такую машину называют *вечным двигателем второго рода*, поскольку запасы тепловой энергии, содержащиеся в земле, атмосфере и мировом океане, практически неограниченны, и эта машина могла бы работать весьма длительное время. **Возможность построения *perpetuum mobile* второго рода исключает второе начало термодинамики.**

Вопросы для самопроверки

1. Что изучает термодинамика?
2. Что такое вечный двигатель? Каково содержание первого начала термодинамики?
3. Что называется внутренней энергией тела? От чего она зависит?
4. Разъясните смысл понятия «количество теплоты».
5. Что называется удельной теплоемкостью вещества?
6. Как найти количество теплоты, идущей на нагревание тела?
7. Какие способы передачи тепла вам известны?
8. Что такое конвекция?
9. Какие процессы называются тепловыми? Приведите их примеры.
10. Сформулируйте закон сохранения энергии.
11. Каковы условия, при которых возможно превращение теплоты в механическую работу?

12. Что называется тепловой машиной? Какие составные части она имеет?
13. Дайте определение коэффициента полезного действия тепловой машины.
14. Что такое вечный двигатель второго рода?
15. Что утверждает второе начало термодинамики?

2.3. ИЗМЕНЕНИЕ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ ТЕЛ

Существование в природе твердых, жидких и газообразных тел обусловлено большим разнообразием веществ, которое мы наблюдаем в окружающем нас мире. Многие из них могут быть жидкими, твердыми или газообразными в зависимости от условий, в которых находятся. Такое распространенное в природе вещество, как вода, при температуре ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ превращается в лед, а при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ не может быть жидкостью. Процессы плавления металлов, выпадения росы в летнее время года и множество других, связанных с изменением агрегатного состояния вещества, называются *фазовыми переходами*.

Природные явления, связанные с переходом воды в твердое или газообразное состояние, играют важную роль в поддержании на Земле пригодных для жизни климатических условий. Другие процессы такого рода широко используются человеком в своей практической деятельности, научных исследованиях, лежат в основе работы, например, холодильных установок, в технологических процессах.

В настоящем разделе мы обсудим фазовые переходы с точки зрения термодинамики и приведем их количественные характеристики.

2.3.1. Испарение и конденсация. Кипение жидкости

Наш повседневный опыт показывает, что любая жидкость, налитая в сосуд с открытой поверхностью, *испаряется*. Процесс испарения связан с переходом ее молекул из жидкой среды в газообразную. Окружающий воздух уносит их вдаль, и процесс испарения продолжается, пока вся жидкость не испарится. Если этот процесс ускорить, создав поток воздуха у поверхности жидкости, то ее температура начнет падать. Летучую жидкость, например эфир, можно таким способом даже заморозить — перевести в твердое состояние. Это говорит о том, что с поверхности жидкости уходят самые быстрые молекулы. Следовательно, чтобы ускорить испарение, нужно жидкость нагреть и подводить к ней тепло по мере ее испарения.

С ростом температуры наступает момент, когда жидкость начинает кипеть (при температуре, характерной для каждой жидкости и зависящей от давления окружающего воздуха). При кипении наблюдается образование во всем объеме жидкости пузырьков газа, которые по мере всплывания увеличиваются в размерах и создают бурное ее перемешивание. Испарение жидкости при кипении происходит внутри этих пузырьков, поэтому с повышением атмосферного давления темпера-

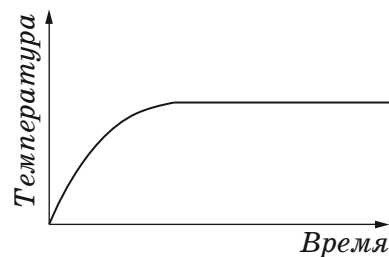


Рис. 2.7

тура кипения возрастает. Процесс кипения ускоряется по мере увеличения мощности источника тепла, подводимого к сосуду с жидкостью.

Простой опыт позволяет установить, что для перевода жидкости в пар требуется затратить определенную энергию, называемую *теплотой парообразования*.

Поставим на газовую горелку колбу с водой и будем измерять ее температуру через определенные промежутки времени. График зависимости температуры от времени, полученный в этом опыте, изображен на рис. 2.7. Из него видно, что по мере поглощения тепла газовой горелки температура жидкости растет, а при достижении температуры кипения остается постоянной. Теплота, подводимая к жидкости, расходуется теперь на испарение жидкости — парообразование, при котором разрушаются связи между молекулами, часть которых покидает ее. Количество необходимой для этого теплоты тем больше, чем больше масса жидкости m :

$$Q = Lm, \quad (2.5)$$

где L — удельная теплота парообразования. Численно она равна количеству теплоты, необходимому для превращения 1 кг жидкости в пар при температуре кипения.

С точки зрения термодинамики это означает, что внутренняя энергия пара больше внутренней энергии такой же массы жидкости, которая превращается в пар.

Удельная теплота парообразования измеряется в *джоулях на килограмм*:

$$[L] = \text{Дж/кг}.$$

У воды ее численное значение $2,3 \cdot 10^6$ Дж/кг — самое большое по сравнению с другими жидкостями, существующими в природе (у спирта она равна $0,9 \cdot 10^6$ Дж/кг, эфира — $0,3 \cdot 10^6$ Дж/кг, ртути — $0,2 \cdot 10^6$ Дж/кг). Это обстоятельство существенно для поддержания на Земле температуры в пределах, в которых могут существовать известные нам растения и животные.

Испарение воды происходит с поглощением тепла и препятствует росту температуры. Выпадение росы, наоборот, сопровождается выделением тепла, при котором температура воздуха не может сильно понизиться. В пустынях, где нет влаги, колебания температуры между ее дневным и ночным значениями очень велики, а на спутнике Земли — Луне и вовсе достигает 270 градусов — 120 градусов тепла на освещенной ее стороне и 150 градусов мороза в тени от Солнца.

2.3.2. Влажность воздуха

Представление о влажности атмосферного воздуха возникло из нашего повседневного опыта. При большой влажности или очень сухом воздухе мы испытываем определенные неудобства — плохо сохнут влажные вещи или, наоборот, пересыхает горло. В физике влажность воздуха определяется количественно.

Как было сказано выше, с открытой поверхности воды при любой температуре происходит ее испарение, при котором самые быстрые молекулы покидают ее и переходят в газовую среду. Если закрытый сосуд частично заполнить водой, можно заметить, что испарение воды вскоре прекратится, о чем будет свидетельствовать неизменность уровня воды, оставшейся в сосуде. Вода и ее пар будут

находиться в *состоянии динамического равновесия*, когда число молекул, переходящих из воды в воздух, в среднем равно числу молекул, которые переходят из воздуха в воду. Водяной пар в сосуде в этом случае становится *насыщенным*, имеющим при данной температуре максимальную плотность $\rho_{\text{нас}}$.

Плотность водяного пара $\rho = \frac{m}{V}$, показывающая, сколько граммов воды содержится в одном кубическом метре воздуха, называется его **абсолютной влажностью**. Единица ее измерения:

$$[\rho] = \text{г/м}^3.$$

Одно и то же количество водяного пара в воздухе может создавать ощущение влажного воздуха при низких температурах и сухого — при высоких. Поэтому вводится понятие **относительной влажности воздуха D** , равной отношению плотности водяного пара ρ , фактически содержащегося в воздухе, к плотности насыщенного пара $\rho_{\text{нас}}$ при той же температуре, выраженному в процентах:

$$D = \frac{\rho}{\rho_{\text{нас}}} \cdot 100 \%. \quad (2.6)$$

С ростом температуры плотность насыщенного пара возрастает, поскольку при большей температуре воздух способен вобрать в себя больше воды.

Зимой воздух в помещениях часто оказывается очень сухим, и мы вынуждены его увлажнять, используя сосуды с открытой водной поверхностью. Пересушенность воздуха объясняется тем, что в помещение попадает воздух «с улицы», относительная влажность которого бывает в пределах 70—80 % при температуре, характерной для зимнего периода, т. е. морозной. В помещении количество содержащейся в нем влаги составит при комнатной температуре гораздо более низкую относительную влажность, т. к. плотность насыщенного пара $\rho_{\text{нас}}$ при этой температуре в несколько раз выше (при повышении температуры воздуха от 0 °С до 20 °С она возрастает вчетверо, а при повышении ее от 0 °С до 40 °С — в 12 раз).

Летом в утренние часы, когда земля и воздух успеют за ночь остыть до 12—14 °С, на траве выпадает роса. Конденсация влаги из воздуха происходит потому, что содержащийся в нем водяной пар при такой температуре становится насыщающим. Эта температура называется *точкой росы*.

Как уже было сказано, выпадение росы сопровождается выделением тепла, которое препятствует дальнейшему понижению температуры.

2.3.3. Плавление и кристаллизация

Плавление твердых тел и отвердевание жидкостей — один из видов фазовых переходов и, наряду с испарением и конденсацией, играет большую роль в природных явлениях. Таяние снега и установление ледяного покрова на водоемах — один из природных факторов, способствующих поддержанию жизни на Земле.

Вода замерзает, превращаясь в лед при температуре 0 °С. Он образуется на поверхности озер и рек под влиянием холодного атмосферного воздуха. Остывание воды в них происходит, главным образом, за счет конвекции, но, в отличие от рассмотренного выше процесса прогрева воды, здесь происходит перемещение более тяжелых холодных слоев воды вниз. Результатом должно было стать

замерзание воды в водоеме и гибель всего живого в нем. Однако природа позаботилась о живых обитателях водоемов, обеспечив им надежную защиту.

Вода — уникальная жидкость. Плотность воды увеличивается до тех пор, пока ее температура не понизится до 4 °С. При дальнейшем понижении температуры (до 0 °С) плотность воды уменьшается и конвекция прекращается — вода в водоеме не замерзает, оставаясь при температуре 4 °С. Увеличение толщины слоя льда при сильных морозах происходит теперь лишь благодаря теплопроводности. Этот процесс медленный, достаточно глубокие водоемы не успевают промерзнуть до самого дна и жизнь в них сохраняется.

Плавление и отвердевание — процессы, имеющие, подобно испарению и конденсации, скрытую теплоту. Нагревая на газовой горелке кусок льда и, измеряя его температуру, можно заметить, что при температуре плавления тающий лед и образовавшаяся при этом вода будут иметь эту температуру до тех пор, пока весь лед не растает (рис. 2.8). Энергия, получаемая их смесью от газовой горелки, расходуется на разрушение кристаллической решетки льда.

Количество теплоты, необходимое для плавления 1 кг вещества при температуре плавления, называется **удельной теплотой плавления**:

$$\lambda = \frac{Q}{m}. \quad (2.7)$$

Единица ее измерения — *джоуль на килограмм*:

$$[\lambda] = \text{Дж/кг}.$$

Чтобы расплавить тело массой m , требуется количество теплоты:

$$Q = \lambda m. \quad (2.8)$$

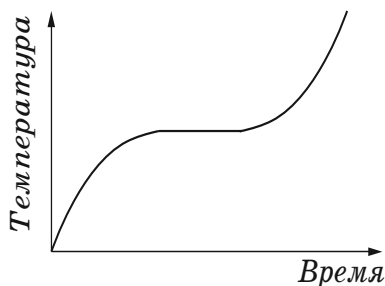


Рис. 2.8

При плавлении внутренняя энергия тела увеличивается — жидкость той же массы имеет бóльшую внутреннюю энергию, чем твердое тело. При отвердевании энергия, затраченная на разрушение твердого тела — упорядоченного расположения в пространстве его атомов или молекул — выделяется в виде тепла. Это тепло следует отводить, используя проточную воду или воздушный поток. В холодильных установках при замораживании продуктов для этих целей используется специальный хладагент — фреон.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется фазовым переходом? Приведите примеры фазовых переходов.
2. Опишите процесс испарения жидкости. Почему при интенсивном испарении температура жидкости понижается?
3. Как происходит кипение жидкости? Почему температура кипения зависит от давления окружающего воздуха?
4. Дайте определение удельной теплоты парообразования.
5. Какую роль играет скрытая теплота парообразования в поддержании на Земле стабильной температуры?

6. Что называется абсолютной влажностью? В каких единицах она измеряется?
7. Дайте определение относительной влажности воздуха.
8. Опишите механизм пересушивания воздуха в помещениях в зимнее время года.
9. Что такое точка росы?
10. Как изменяется плотность воды с температурой? Опишите особое свойство воды, благодаря которому вода в пресноводных водоемах в зимнее время года не замерзает.
11. Что такое скрытая теплота плавления? Как ее обнаружить опытным путем?
12. Дайте определение удельной теплоты плавления вещества.
13. Как найти количество теплоты, необходимое для того, чтобы расплавить данную массу вещества?

Тренировочные тестовые задания к разделу «Тепловые явления»

При выполнении заданий с выбором ответа обведите кружком номер правильного ответа.

1. Каков характер движения молекул в твердых телах?
 - 1) движутся хаотически
 - 2) неподвижны
 - 3) совершают колебания
 - 4) движутся поступательно
2. Процесс плавления льда сопровождается
 - 1) повышением его температуры
 - 2) повышением его внутренней энергии
 - 3) понижением его температуры
 - 4) понижением его внутренней энергии
3. Процесс испарения воды называется
 - 1) диффузией
 - 2) теплопроводностью
 - 3) фазовым переходом
 - 4) вязкостью
4. Газ, температура которого составляла 300 К, был нагрет до 600 К. Во сколько раз повысилось среднее значение скорости теплового движения его молекул?
 - 1) в 2 раза
 - 2) в 3 раза
 - 3) в $\sqrt{2}$ раз
 - 4) в $\sqrt{3}$ раз
5. Воздух состоит из молекул азота и кислорода. Средние значения их кинетических энергий K_N и K_O связаны соотношением
 - 1) $K_N : K_O = 14 : 16$
 - 2) $K_N : K_O = 7 : 4$
 - 3) $K_N : K_O = 1 : 1$
 - 4) $K_N : K_O = 7 : 2$
6. Какой процесс играет главную роль при нагревании воды в чайнике на газовой горелке?
 - 1) теплопроводность
 - 2) диффузия
 - 3) излучение
 - 4) конвекция
7. Железный котел массой 60 кг наполнен водой массой 200 кг. Какое количество теплоты требуется для нагревания котла с водой на 50 °С?
 - 1) $1,8 \cdot 10^7$ Дж
 - 2) $2,7 \cdot 10^7$ Дж
 - 3) $3,8 \cdot 10^7$ Дж
 - 4) $4,3 \cdot 10^7$ Дж

При выполнении заданий с кратким ответом необходимо записать ответ в указанном в тексте задания месте.

8. При нагревании воды массой 1,5 кг, взятой при температуре 20 °С, ей сообщили $6,5 \cdot 10^5$ Дж тепла. Найдите массу выкипевшей воды, если удельная теплота парообразования равна $22,6 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Ответ: _____.

9. Медный шарик держали над огнем газовой горелки 10 с и его температура увеличилась на 28°C . На сколько градусов за такое же время нагреется свинцовый шарик того же радиуса?

Ответ: _____.

10. Металлический цилиндр массой 60 г нагрели в кипятке до 100°C и опустили в воду, масса которой 300 г, а температура 24°C . Температура воды и цилиндра стала равной 27°C . Найдите удельную теплоемкость металла, из которого изготовлен цилиндр.

Ответ: _____.

11. Температура воздуха в комнате объемом 150 м^3 равна 6°C , относительная влажность воздуха 80 %. Сколько воды нужно испарить в этой комнате, чтобы при температуре 18°C относительная влажность стала равной 60 %? (Плотность насыщенного пара при 6°C составляет $7,3\text{ г/м}^3$, при 18°C — $15,4\text{ г/м}^3$.)

Ответ: _____.

12. При понижении температуры воздуха от 16°C до 10°C из каждого кубического метра воздуха выделяется по 1,5 г воды. Какова была относительная влажность воздуха? (Плотность насыщенного пара при 16°C составляет $13,6\text{ г/м}^3$, при 10°C — $9,4\text{ г/м}^3$.)

Ответ: _____.

3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

- Знать:**
- смысл понятий: электрическое поле, проводники и диэлектрики, индуцированный заряд, электрический ток, магнитное поле, электромагнитная волна, луч света;
 - смысл физических величин: электрический заряд, напряжение, сила тока, электрическое сопротивление, электропроводность и удельное сопротивление проводника, работа и мощность электрического тока, показатель преломления луча света, фокусное расстояние и оптическая сила линзы;
 - смысл закона сохранения заряда, законов Ома и Джоуля-Ленца, прямолинейного распространения, отражения и преломления света.
- Уметь:** объяснить и описать физические явления и процессы:
- электризация тел;
 - взаимодействие электрических зарядов;
 - взаимодействие постоянных магнитов;
 - действие магнитного поля на проводник с током;
 - тепловое действие тока;
 - явление электромагнитной индукции;
 - отражение, преломление и дисперсия света;
 - явление полного внутреннего отражения;
 - прохождение света через собирающую и рассеивающую линзы.

3.1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Электростатика — раздел физики, изучающий неподвижные заряды и не изменяющиеся во времени электрические поля.

Электрические явления известны человеку с давних времен. Это электризация тел при трении, молния. Систематическое изучение электрических явлений начато в XVIII в. В России этим занимались М. В. Ломоносов и Г. Рихман, в Америке — Б. Франклин. М. В. Ломоносов установил природу молнии, Б. Франклин — два рода электричества. Франклин предложил считать, что стекло, натертое кожей, заряжается положительно, а янтарь, натертый шерстью, — отрицательно. С точки зрения современной науки, отрицательно заряженное тело содержит избыток электронов. Если у тела забрать часть электронов, то оно заряжается положительно. Следовательно, отрицательный знак заряда электрона — условное понятие, связанное с произвольным выбором Б. Франклина.

3.1.1. Электризация тел. Два рода зарядов

Любому телу можно сообщить электрический заряд, т. е. *наэлектризовать* его. Для этого его нужно привести в контакт с источником зарядов. С древних времен человеку было известно, что кусок янтаря (затвердевшей смолы хвойных деревьев), натертый шерстью, притягивает к себе мелкие кусочки сухих листьев дерева, соринки. Позже было обнаружено, что аналогичной способностью обладает и стекло, натертое кожей. Эти явления были названы *электрическими* (от лат. «электрон» — янтарь). Такие тела могут служить *источниками* зарядов.

В наше время, в век господства синтетических материалов, мы повседневно сталкиваемся с проявлением статического электричества: трение одежды из синтетики о кожу человека сопровождается треском искр, видимых в темноте.

Чтобы обнаружить заряд какого-либо тела, нужно воспользоваться *пробным зарядом* — другим заряженным телом малых размеров (точечным зарядом). На пробный заряд со стороны нашего тела будет действовать сила. Если источник пробного заряда и тела один и тот же (янтарь или стекло), это будет *отталкивающая* сила, если же их источники разные (у одного янтарь, а у другого стекло), то пробный заряд будет *притягиваться* к нему.

Этот опыт указывает на существование в природе зарядов двух родов — *положительного* и *отрицательного*. Носителями положительного заряда являются *протоны*, входящие в состав ядер атомов (сам протон — это ядро простейшего из них — атома водорода). Отрицательный заряд имеют *электроны*, обращающиеся вокруг ядер атомов. Электроны могут переходить с одного тела на другое при их трении друг о друга, нарушая баланс зарядов, в результате чего одно тело приобретает отрицательный заряд, а другое — положительный. Так, янтарь при трении о шерсть забирает у нее часть электронов.

В системе СИ заряд измеряется в *кулонах* (Кл).

Наличие зарядов у электрона и протона — присущее им природное свойство. Электрон — легкая частица, имеющая массу $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, в 1840 раз меньшую массы протона. Заряды этих частиц противоположны по знаку, но равны по модулю и составляют

$$q = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Несмотря на кажущуюся малость численного значения, кулон — очень крупная единица заряда. Сила электрического отталкивания двух протонов в 10^{34} раз превышает силу их гравитационного притяжения. Два заряда в 1 Кл каждый, находящиеся на расстоянии одного метра друг от друга, отталкиваются с силой, равной весу груза в 900 тыс. т.

3.1.2. Закон сохранения заряда

С помощью экспериментов установлено, что суммарный заряд тел, составляющих замкнутую систему, не может изменяться самопроизвольно, т. е. остается постоянным во времени. Это утверждение выражает один из фундаментальных законов природы — *закон сохранения заряда*. Под замкнутой системой здесь понимается совокупность тел, не обменивающихся веществом с окружающими телами. Закон сохранения заряда был открыт в 1747 г. Б. Франклином.

Закон сохранения заряда является естественным следствием того, что вещество, представленное в данном случае электронами и протонами, нельзя уничтожить. Если совокупность нескольких тел, названных замкнутой системой, изолировать от других тел, то сумма зарядов содержащихся в них электронов и протонов тоже будет неизменной.

3.1.3. Электрическое поле

Действие на данный заряд других зарядов можно представить как взаимодействие его с *электрическим полем*. Электрическое поле возникает в пространстве вокруг заряженных тел. Понятие электрического поля вводится для удобства

определения силы, действующей на выбранный заряд, поскольку зарядов, с которыми он взаимодействует, может быть много. Существование электрического поля можно обнаружить с помощью пробного заряда, который для определенности принято брать *положительным*, — на этот заряд в поле действует сила.

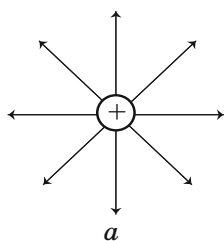


Рис. 3.1

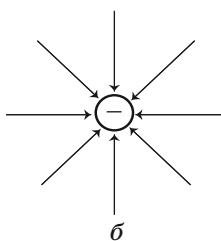
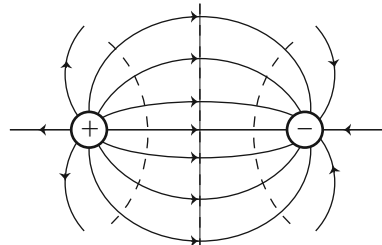


Рис. 3.2



Электрическое поле изображают *силовыми линиями*. Сила, действующая на пробный заряд, направлена по касательной к силовой линии. Поскольку одноименные заряды отталкиваются, а разноименные — притягиваются, ясно, что силовые линии начинаются на положительных зарядах (рис. 3.1, а) и оканчиваются на отрицательных (рис. 3.1, б).

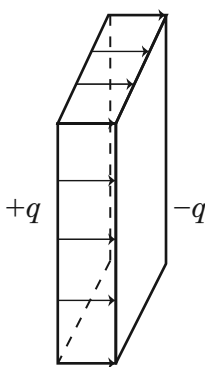


Рис. 3.3

Направление силовых линий указывает направление силы, действующей на пробный заряд, а густота линий качественно характеризует интенсивность поля — чем гуще линии, тем сильнее поле.

На рис. 3.2 изображена картина силовых линий поля, созданного двумя одинаковыми зарядами противоположного знака, а на рис. 3.3 — поле плоского конденсатора — двух параллельных пластин, имеющих одинаковые по модулю, но противоположные по знаку заряды. Это поле является *однородным*, т. е. таким, линии которого в каждой его точке параллельны друг другу, а интенсивность поля всюду одинакова.

3.1.4. Проводники и диэлектрики

Проводниками называются вещества, в которых имеются свободные заряды, способные перемещаться по всему объему проводника. Проводниками являются все металлы, растворы электролитов, ионизованные газы. Далее мы будем рассматривать только металлы. Свободные заряды в металлах — электроны.

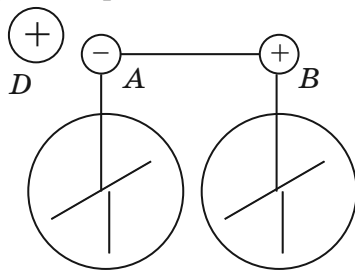


Рис. 3.4, а

Наличие в проводниках свободных зарядов можно продемонстрировать на следующем опыте. Соединим два электроскопа А и В металлическим проводником и приблизим к первому из них заряженное тело D (рис. 3.4, а). Стрелки электроскопов отклонятся, что свидетельствует о наличии на них зарядов. Если проводник, соединяющий электроскопы, убрать, то и после удаления тела D электроскопы остаются заряженными, причем заряд одного из них *положительный*,

а другого — *отрицательный* (рис. 3.4, б). Это свидетельствует о перераспределении зарядов, имеющих в свободном состоянии в металлических частях электроскопов и в проводнике. Описанный процесс зарядки называется *электризацией через влияние* («по индукции»).

Наличие свободных зарядов в проводниках приводит к тому, что *электрическое поле внутри проводников отсутствует*. Если проводник внести в электрическое поле, он будет искажать его благодаря появлению на поверхности проводника *индуцированных зарядов*. Свободные электроны, имеющие отрицательный заряд, смещаются в направлении, противоположном направлению внешнего поля. На другом конце проводника при этом образуется избыточный положительный заряд ионов кристаллической решетки (рис. 3.5). Эти заряды располагаются так, что созданное ими электрическое поле полностью компенсирует внешнее поле. В противном случае нескомпенсированное электрическое поле, воздействуя на свободные электроны, привело бы их в движение, которое продолжалось бы до тех пор, пока поле внутри проводника не исчезло.

Это свойство используется для защиты от внешних электрических полей — *экранировки*. Приборы или устройства, которые нужно защитить, окружают проводящей оболочкой, которую соединяют с Землей, являющейся хорошим проводником. Избыточный заряд, возникающий на этой оболочке, уходит в Землю.

Диэлектриками называются вещества, не проводящие электрический ток. Если в проводниках имеются свободные заряды, способные перемещаться по всему объему проводника, то в *диэлектриках таких зарядов нет*.

Рассмотрим опыт, доказывающий это. Поместим в электрическое поле плоского конденсатора проводник *A* и диэлектрик *B* (рис. 3.6, а). Разделим затем каждый из них на две части и выключим поле. Обе части проводника заряжаются по индукции и приобретают заряды противоположных знаков (рис. 3.6, б). Обе части диэлектрика остаются незаряженными, что и подтверждает сказанное.

К диэлектрикам относится большинство веществ, встречающихся в повседневной жизни. Это сухое дерево, пластмассы, различные полимеры, минералы, чистые жидкости.

Диэлектрики являются хорошими изоляторами, и это их свойство используется в электрических приборах, для изготовления конденсаторов, предназначенных для накопления электрической энергии, в разнообразных электронных устройствах: радиоприемниках, телевизорах, компьютерах.

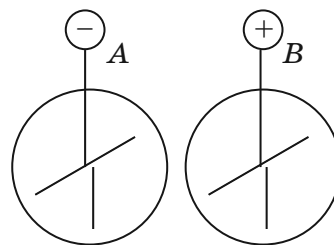


Рис. 3.4, б

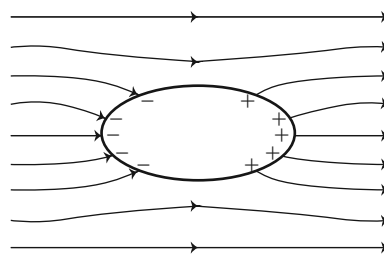


Рис. 3.5

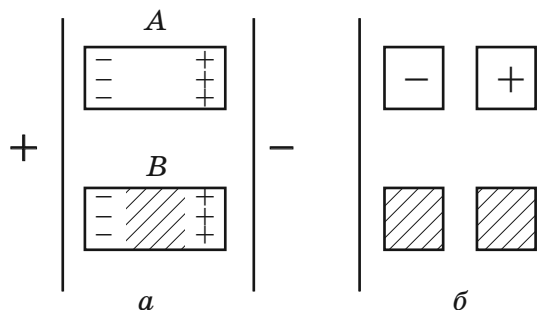


Рис. 3.6

Вопросы для самопроверки

1. Что изучает электростатика?
2. Что может служить источником зарядов?
3. В чем заключается электризация тела?
4. Какие два рода зарядов существуют в природе и какие элементарные частицы являются их носителями?
5. Как взаимодействуют друг с другом одноименные и разноименные заряды?
6. Сформулируйте закон сохранения заряда.
7. Чем создается электрическое поле и как его можно обнаружить?
8. Как строятся силовые линии электрического поля и что они показывают?
9. Изобразите линии электрического поля, созданного двумя одинаковыми зарядами противоположного знака.
10. Какое поле называется однородным? Нарисуйте линии поля плоского конденсатора.
11. Что такое проводники и каковы их электрические свойства? Почему поле внутри проводников отсутствует?
12. Какие вещества называются диэлектриками? Где они используются?

3.2. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Электрическим током называется упорядоченное движение зарядов. Постоянный ток течет в проводнике, внутри которого существует электрическое поле, созданное источником тока. В учении о токах движущиеся заряды называются *носителями тока*. В разных телах носители тока имеют разную природу: в металлах и полупроводниках носители тока — электроны, в растворах электролитов — положительные и отрицательные ионы, в газах — положительные ионы и электроны, в вакууме — термоэлектроны, испускаемые нагретым катодом.

Для существования тока необходимо:

- наличие замкнутой цепи, в которой есть источник тока;
- наличие носителей тока.

За направление тока принято направление движения положительных зарядов, хотя в проводниках первого рода — металлах — фактически перемещаются отрицательные электроны в направлении, обратном направлению тока. В дальнейшем мы будем рассматривать только электропроводность металлов.

В настоящем разделе мы определим величины, характеризующие электрический ток, и сформулируем законы постоянного тока.

3.2.1. Сила тока

Схема замкнутой цепи изображена на рис. 3.7. Она состоит из источника тока \mathcal{E} и сопротивления нагрузки R — внешнего участка цепи.

Источник тока — устройство, имеющее два полюса (клеммы источника), на одном из которых поддерживается избыточный положительный заряд, а на другом — избыточный отрицательный, благодаря чему внутри проводника, присоединен-

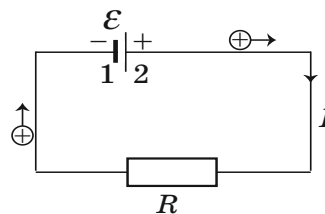


Рис. 3.7

ного к полюсам, постоянно существует электрическое поле, приводящее в движение заряды — носители тока.

Ток на внешнем участке течет от положительного полюса источника к отрицательному.

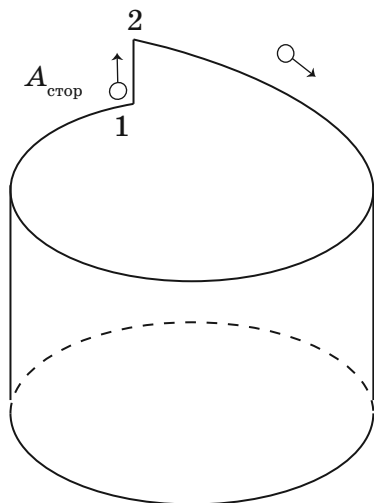


Рис. 3.8

На рис. 3.8 изображена механическая модель замкнутой цепи. По наклонному желобу под действием силы тяжести (электрического поля, созданного внутри проводника источником тока) шарики (положительные носители тока) движутся из точки 2 в точку 1. На рис. 3.7 такой желоб — это внешний участок цепи (сопротивление R).

Внутри источника электрическое поле направлено от «плюса» к «минусу», т. е. навстречу движущимся носителям тока, поэтому перенос зарядов из точки 1 в точку 2 внутри источника осуществляется под действием сил неэлектрического происхождения — так называемых *сторонних сил*. Сторонние силы могут иметь разную природу: химическую — в гальванических элементах и аккумуляторах, механическую — в роторных генераторах электрического тока, тепловую — в термоэлектрических источниках, оптическую — в солнечных батареях. В механической модели, изображенной на рис. 3.8, работа сторонних сил совершается на участке 1—2.

Силой тока I называют величину заряда, протекающего через поперечное сечение проводника за единицу времени:

$$I = \frac{q}{t}. \quad (3.1)$$

Сила тока измеряется в *амперах*:

$$[I] = \text{А} = \frac{\text{Кл}}{\text{с}}.$$

В системе СИ единица силы тока — ампер — является одной из основных единиц и определяется с помощью магнитной силы взаимодействия токов.

3.2.2. Закон Ома для участка цепи

Заряд в электрическом поле испытывает действие силы, направленной вдоль силовой линии поля. Предоставленный самому себе, он начинает двигаться, и его кинетическая энергия возрастает благодаря работе, совершаемой электрической силой. Эта работа тем больше, чем более резко изменяется интенсивность поля при переходе из одной его точки в другую и чем больше величина переносимого заряда. **Отношение работы к заряду не зависит от величины заряда и называется напряжением электрического поля между двумя его точками:**

$$U = \frac{A}{q}. \quad (3.2)$$

Напряжение в системе СИ измеряется в *вольтах*:

$$[U] = \text{В} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}.$$

Напряжение равно 1 В, если при переносе заряда в 1 Кл из первой точки поля во вторую совершается работа в 1 Дж.

Закон Ома был открыт экспериментально в 1827 г. Немецкий физик Г. Ом дал следующую формулировку своего закона:

Отношение напряжения на концах проводника к силе тока в нем не зависит от силы тока для проводников первого рода — металлов.

Отношение напряжения к силе тока называется электрическим сопротивлением проводника:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (3.3)$$

Сопротивление измеряется в *омах* (Ом):

$$[R] = \text{Ом} = \frac{\text{В}}{\text{А}}.$$

Сопротивление проводника составляет 1 Ом, если при напряжении в 1 В по проводнику течет ток силой в 1 А.

Сопротивление однородного проводника пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади поперечного сечения S (рис. 3.9):

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (3.4)$$

Коэффициент пропорциональности ρ называется *удельным сопротивлением* проводника, характеризующим свойства материала, из которого он изготовлен.

Удельное сопротивление ρ численно равно сопротивлению проводника, у которого отношение $\frac{l}{S}$ равно единице (1 м^{-1}).

Единица измерения удельного сопротивления:

$$[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м}.$$

Сопротивление металлов зависит от температуры — с увеличением температуры оно возрастает по закону:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad (3.5)$$

где α — температурный коэффициент сопротивления, t — температура в градусах Цельсия.

Другая формулировка закона Ома:

Напряжение U на участке цепи равно произведению сопротивления этого участка на силу протекающего по нему тока:

$$U = IR. \quad (3.6)$$

Отсюда следует, что если участок цепи состоит из нескольких последовательно соединенных проводников, то на концах каждого из них напряжение тем выше, чем больше его сопротивление. Напряжение на всем участке равно сумме напряжений на каждом из проводников.

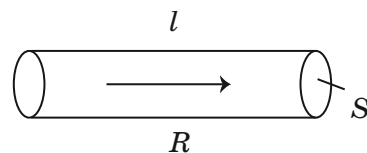


Рис. 3.9

3.2.3. Соединение проводников

Найдем сопротивление участка цепи при последовательном и параллельном соединениях проводников.

1. Последовательное соединение. Возьмем участок цепи, составленный из двух проводников сопротивлениями R_1 и R_2 (рис. 3.10). Напряжение U на этом участке равно сумме напряжений на каждом из проводников:

$$U = U_1 + U_2. \quad (3.7)$$

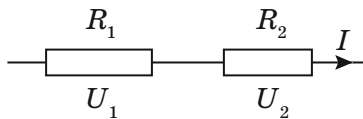


Рис. 3.10

По закону Ома $U = IR$, где R — полное сопротивление цепи. Поскольку ток I , текущий по каждому из проводников, один и тот же, напряжение на первом из них: $U_1 = IR_1$, а на втором: $U_2 = IR_2$. Подставляя U , U_1 и U_2 в формулу (3.7) и сокращая I , получим:

$$R = R_1 + R_2.$$

В случае N последовательно соединенных проводников:

$$R = \sum_{i=1}^N R_i. \quad (3.8)$$

Сопротивление участка цепи при последовательном соединении проводников равно сумме сопротивлений каждого из них.

2. Параллельное соединение. Чтобы найти сопротивление участка цепи, составленного из параллельно соединенных проводников сопротивлениями R_1 и R_2 (рис. 3.11), заметим, что напряжение U на каждом из проводников одно и то же. Поэтому ток, текущий по первому проводнику: $I_1 = \frac{U}{R_1}$, а ток, текущий по второму проводнику: $I_2 = \frac{U}{R_2}$. Общий ток:

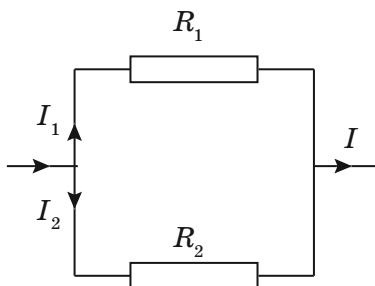


Рис. 3.11

$$I = I_1 + I_2. \quad (3.9)$$

Поскольку ток в цепи I определяется общим сопротивлением цепи: $R \left(I = \frac{U}{R} \right)$, подставляя в формулу (3.9) токи I , I_1 и I_2 и сокращая U , получим:

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

В случае N параллельно соединенных проводников:

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}. \quad (3.10)$$

Величина, обратная сопротивлению проводника, называется его **электрической проводимостью**:

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

Единица ее измерения — *сименс* (См):

$$[G] = 1/\text{Ом} = \text{См}.$$

Проводимость участка цепи при параллельном соединении проводников равна сумме проводимостей каждого из проводников:

$$G = \sum_{i=1}^N G_i. \quad (3.11)$$

Удельной проводимостью σ или **электропроводностью** вещества, из которого изготовлен проводник, называется величина, обратная его удельному сопротивлению ρ :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad ([\sigma] = \text{См/м}). \quad (3.12)$$

3.2.4. Работа и мощность тока. Закон Джоуля—Ленца

Рассмотрим участок цепи сопротивлением R , по которому течет ток I (рис. 3.12). Падение напряжения на этом участке $U = IR$. При переносе заряда q по проводнику электрическое поле за время t совершает *работу*:

$$A = qU = It \cdot U.$$

Отсюда *мощность* электрического тока, т. е. работа, совершаемая за единицу времени:

$$P = \frac{A}{t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (3.13)$$

При движении внутри проводника заряды (электроны) соударяются с атомами кристаллической решетки и отдают им свою энергию. Энергия колебаний атомов решетки увеличивается, и температура проводника возрастает.

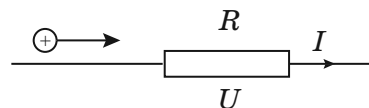


Рис. 3.12

Количество теплоты, выделяемое в проводнике за время t , равно произведению квадрата силы тока на сопротивление проводника и время:

$$Q = I^2 R t. \quad (3.14)$$

Это уравнение выражает *закон Джоуля—Ленца*.

Выделение тепла в проводниках с током используется в нагревательных приборах в быту и на производстве. С другой стороны, нагревание проводов оказывается вредным, поскольку приводит к потерям электроэнергии при передаче ее от источника к потребителю. Для уменьшения этих потерь силу тока уменьшают, повышая напряжение источника с тем, чтобы передаваемая мощность осталась прежней. Чтобы избежать электрического пробоя изоляции проводов, их поднимают на большую высоту на мачтах высоковольтных линий электропередач, связывающих крупные электростанции с городами и поселками, отстоящими от них на десятки и сотни километров.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется электрическим током?
2. Перечислите условия существования постоянного тока.
3. Какие частицы служат носителями тока в металлах, полупроводниках, растворах электролитов, газах?
4. Дайте определение силы тока.
5. Какова роль источника тока в замкнутой цепи?
6. Что такое электрическое сопротивление проводника?
7. Что называется проводимостью проводника? Электропроводностью вещества?
8. Сформулируйте закон Ома для участка цепи.
9. Выведите формулы сопротивления цепи при параллельном и последовательном соединении проводников.
10. Чему равна работа и мощность тока?
11. Сформулируйте закон Джоуля—Ленца.

3.3. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

В VI в. до н. э. был обнаружен минерал, способный притягивать к себе железные предметы. Он состоит из смеси оксидов железа и входит в состав железных руд, которые человек добывает для получения из них железа и стали, используемых в промышленном производстве. Кусок такой руды представляет собой природный магнит, имеющий *два полюса*. На этих полюсах могут скапливаться железные опилки, если магнит поместить в их среду.

Подвешенный на нити магнит располагается так, что одним своим концом указывает на север, а противоположным концом — на юг.

Стальной стержень, предварительно помещенный внутрь длинной катушки из провода, по которому пропускают ток, приобретает те же свойства в гораздо большей степени, чем природный образец, и называется *постоянным магнитом*. Постоянным магнитом является стрелка компаса, указывающая направления стран света, поскольку наш земной шар тоже является большим магнитом. Действие его на маленькую магнитную стрелку осуществляется благодаря *магнитным силам*. Магнитными силами объясняется взаимодействие двух прямых параллельных проводников, по которым текут электрические токи.

Подобно тому, как покоящийся электрический заряд действует на другой заряд посредством электрического поля, электрический ток действует на другой ток посредством *магнитного поля*. Действие магнитного поля на постоянные магниты сводится к действию его на заряды, движущиеся в атомах вещества и создающие микроскопические круговые токи.

Учение об электромагнетизме основано на двух положениях:

- магнитное поле действует на движущиеся заряды и токи;
- магнитное поле возникает вокруг токов и движущихся зарядов.

В настоящем разделе мы рассмотрим некоторые явления электромагнетизма. В частности, явление электромагнитной индукции, играющее принципи-

альную роль в возникновении электромагнитного излучения, каковым является и видимый свет.

3.3.1. Взаимодействие магнитов. Магнитное поле

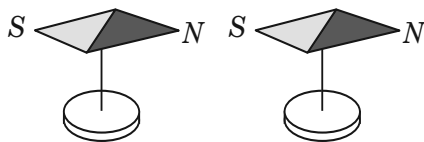


Рис. 3.13

магнита друг к другу, заметим, что одноименные их полюсы отталкиваются, а разноименные — притягиваются (рис. 3.13).

Если разделить полюса, разрезав постоянный магнит на две части, то мы обнаружим, что каждая из них тоже будет иметь два полюса, т. е. будет постоянным магнитом (рис. 3.14). Оба полюса — северный и южный, — неотделимые друг от друга, равноправны.

Магнитное поле, создаваемое Землей или постоянными магнитами, изображается, подобно электрическому полю, *магнитными силовыми линиями*. Картину

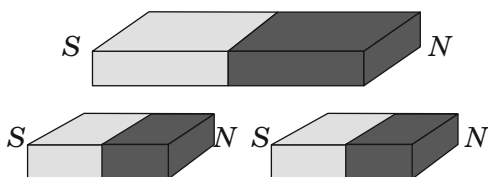


Рис. 3.14

и южный полюсы. Противоположные полюсы стремятся сблизиться друг с другом, но этому мешает трение опилок о бумагу. Если постучать по бумаге пальцем, трение уменьшится и опилки притянутся друг к другу, образуя цепочки, изображающие линии магнитного поля.

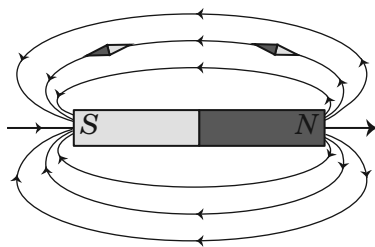


Рис. 3.15

На рис. 3.15. показано расположение в поле прямого магнита опилок и маленьких магнитных стрелок, указывающих *направление* линий магнитного поля. За это направление принято направление северного полюса магнитной стрелки. Из рисунка видно, что линии магнитного поля выходят из его северного полюса и входят в южный.

3.3.2. Опыт Эрстэда. Магнитное поле тока

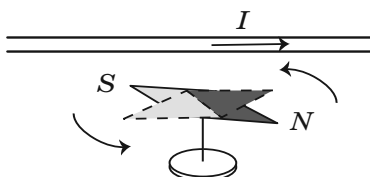


Рис. 3.16

В начале XIX в. датский ученый Эрстэд сделал важное открытие, обнаружив действие электрического тока на постоянные магниты. Он поместил длинный провод вблизи магнитной стрелки. При пропускании по проводу тока стрелка поворачивалась, стремясь расположиться перпендикулярно

ему (рис. 3.16). Это можно было объяснить возникновением вокруг проводника магнитного поля.

Магнитные силовые линии поля, созданного прямым проводником с током, представляют собой концентрические окружности, расположенные в перпендикулярной к нему плоскости, с центрами в точке, через которую проходит ток (рис. 3.17). Направление линий определяется *правилом правого винта*:

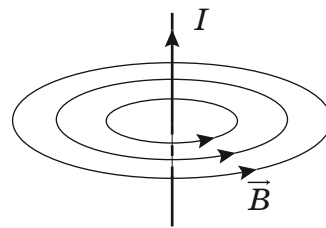


Рис. 3.17

Если винт вращать по направлению линий поля, он будет двигаться в направлении тока в проводнике.

Силовой характеристикой магнитного поля является *вектор магнитной индукции* \vec{B} . В каждой точке он направлен по касательной к линии поля. Линии электрического поля начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных, а сила, действующая в этом поле на заряд, направлена по касательной к линии в каждой ее точке. В отличие от электрического, линии магнитного поля *замкнуты*, что связано с отсутствием в природе «магнитных зарядов».

Магнитное поле тока принципиально ничем не отличается от поля, созданного постоянным магнитом. В этом смысле аналогом плоского магнита является *длинный соленоид* — катушка из провода, длина которой значительно больше

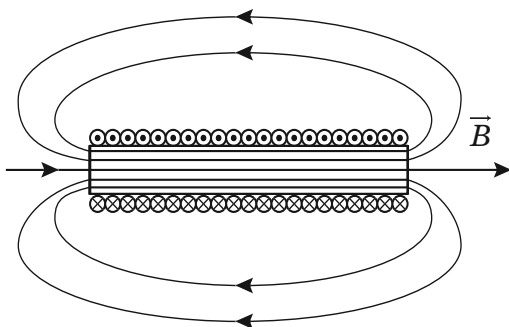


Рис. 3.18

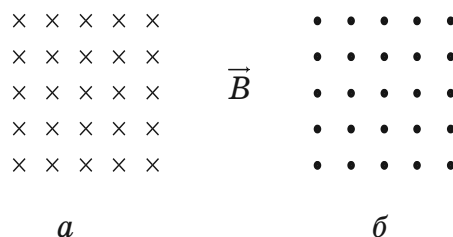


Рис. 3.19

ее диаметра. Схема линий созданного им магнитного поля, изображенная на рис. 3.18, аналогична таковой для плоского магнита (рис. 3.15). Кружочками обозначены сечения провода, образующего обмотку соленоида. Токи, текущие по проводу *от наблюдателя*, обозначены *крестиками*, а токи противоположного направления — *к наблюдателю* — обозначены *точками*. Такие же обозначения приняты и для линий магнитного поля, когда они перпендикулярны плоскости чертежа (рис. 3.19 а, б).

Направление тока в обмотке соленоида и направление линий магнитного поля внутри него также связаны *правилом правого винта*, которое в этом случае формулируется так:

Если смотреть вдоль оси соленоида, то текущий по направлению часовой стрелки ток создает в нем магнитное поле, направление которого совпадает с направлением движения правого винта (рис. 3.20).

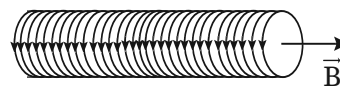


Рис. 3.20

Исходя из этого правила, легко сообразить, что у соленоида, изображенного на рис. 3.18, северным полюсом служит правый его конец, а южным — левый.

Магнитное поле внутри соленоида является *однородным* — вектор магнитной индукции имеет там постоянное значение ($\vec{B} = \text{const}$). В этом отношении соленоид подобен плоскому конденсатору, внутри которого создается однородное электрическое поле (см. рис. 3.3).

3.3.3. Сила, действующая в магнитном поле на проводник с током

Опытным путем было установлено, что на проводник с током в магнитном поле действует сила. В однородном поле прямолинейный проводник длиной l , по которому течет ток I , расположенный *перпендикулярно вектору поля \vec{B}* , испытывает действие силы:

$$F = IlB. \quad (3.15)$$

Направление силы определяется *правилом левой руки*:

Если четыре вытянутых пальца левой руки расположить по направлению тока в проводнике, а ладонь — перпендикулярно вектору \vec{B} , то отставленный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник (рис. 3.21).

Следует отметить, что сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, направлена не по касательной к его силовым линиям, подобно электрической силе, а перпендикулярна им. На проводник, расположенный вдоль силовых линий, магнитная сила не действует.

Уравнение (3.15) позволяет дать количественную характеристику индукции магнитного поля. Отношение

$$B = \frac{F}{I \cdot l}$$

не зависит от свойств проводника и характеризует само магнитное поле.

Модуль вектора магнитной индукции \vec{B} численно равен силе, действующей на расположенный перпендикулярно к нему проводник единичной длины, по которому течет ток силой один ампер.

В системе СИ единицей индукции магнитного поля служит *тесла* (Тл):

$$[B] = \text{Тл} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

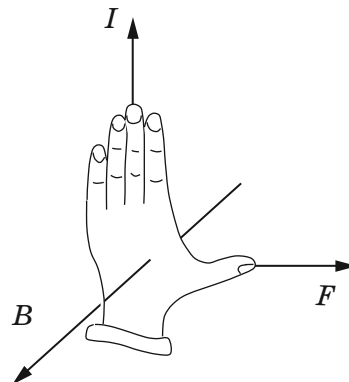


Рис. 3.21

3.3.4. Явление электромагнитной индукции. опыты Фарадея

Явление электромагнитной индукции заключается в возникновении электрического тока в замкнутом проводнике в результате изменения магнитного поля, в котором он находится.

Это явление открыл английский физик М. Фарадей в 1831 г. Суть его можно пояснить несколькими простыми опытами.

Первый опыт заключается в следующем. Катушку из провода соединяют с *гальванометром* — прибором, измеряющим ток, и они образуют замкнутую цепь (рис. 3.22). Внутри катушки вносят постоянный магнит. Во время его движения стрелка прибора отклоняется, показывая, что в цепи течет электрический ток. При выдвигении магнита стрелка отклоняется в противоположную сторону, указывая на обратное направление тока.

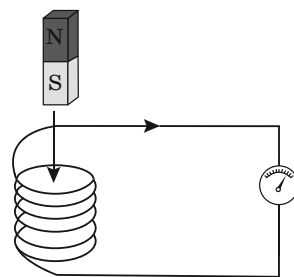


Рис. 3.22

Те же явления происходят, если вместо постоянного магнита использовать катушку с током, которая, как мы знаем, тоже создает вокруг себя магнитное поле.

Ток в цепи, составленной из катушки и гальванометра, возникает и в том случае, если эту катушку быстро повернуть, изменив ее ориентацию относительно магнитного меридиана Земли.

Во всех трех случаях наблюдается общая закономерность — ток возникает только в тот момент, когда *изменяется взаимное расположение* источника магнитного поля (постоянного магнита, катушки с током или Земли) и приемника — катушки, которая в соединении с гальванометром играет роль источника тока в замкнутой цепи.

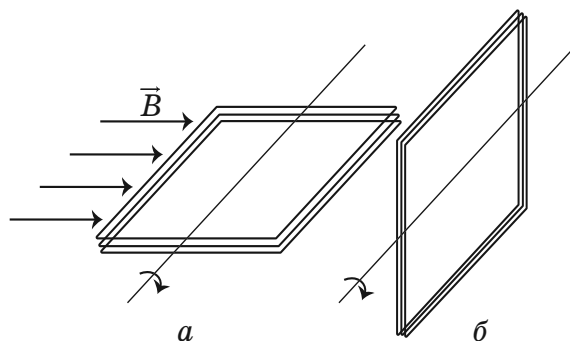


Рис. 3.23

Постоянный магнит и катушка с током создают *неоднородное магнитное поле*, поэтому перемещение их в катушке-приемнике равносильно *изменению* магнитного поля, в котором она находится. Чем быстрее изменяется поле, тем больше амплитудное значение тока.

В последнем из рассмотренных опытов поворот катушки, находящейся в магнитном поле Земли, с точки зрения наблюдателя, связанного с катушкой, можно рассматривать как *изменение направления* магнитного поля.

Если катушку равномерно вращать вокруг оси, перпендикулярной линиям магнитного поля и ее собственной оси, число этих линий, пересекающих площадь ее поперечного сечения, будет периодически изменяться от нуля (рис. 3.23, а) до максимального значения (рис. 3.23, б), что эквивалентно изменению поля \vec{B} в катушке. Подобным образом изменяется и ток, возникающий в катушке вследствие явления электромагнитной индукции.

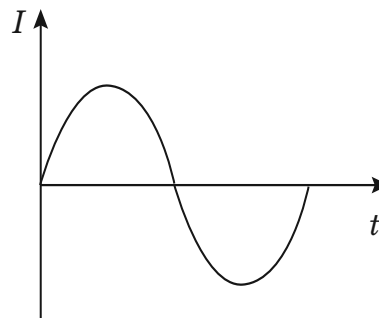


Рис. 3.24

Во второй половине периода ток будет течь в противоположном направлении, поскольку плоскость катушки поворачивается к линиям магнитного поля своей обратной стороной. Кривая зависимости силы тока от времени — *синусоида* — изображена на рис. 3.24.

Описанный здесь принцип получения переменного тока используется в индукционных генераторах, вырабатывающих электрическую энергию на тепловых или гидроэлектростанциях. Сопротивление вращению ротора генератора, возникающее при взаимодействии индукционного тока с магнитным полем, преодолевается за счет работы паровой или гидротурбины, вращающей ротор. Такие генераторы преобразуют механическую энергию в энергию электрического тока.

3.3.5. Вихревые токи, или токи Фуко

Если массивный проводник поместить в переменное магнитное поле, то в этом проводнике благодаря явлению электромагнитной индукции возникают вихревые индукционные токи, называемые *токами Фуко*.

Вихревые токи возникают также при движении массивного проводника в постоянном, но неоднородном в пространстве магнитном поле. **Токи Фуко имеют такое направление, что действующая на них в магнитном поле сила тормозит движение проводника.** Маятник в виде сплошной металлической пластинки из немагнитного материала, совершающий колебания между полюсами электромагнита (рис. 3.25), резко останавливается при включении магнитного поля.

Токи Фуко находят применение в вакуумной технике для прогрева металлических частей приборов, находящихся внутри откачиваемого сосуда, при извлечении с их поверхности остаточных газов; в микроволновых печах для разогрева или приготовления пищи. Выделение тепла при протекании в проводнике вихревых токов используется в электрометаллургии для плавки металлов с целью получения высококачественных сплавов. Для этого расплавляемый металл помещают в ванну, имеющую форму кольца, обвитого по длине проводом, по обмотке которого пропускают переменный электрический ток. Тормозящее действие магнитного поля используют для устройства магнитных успокоителей (демпферов) в гальванометрах, сейсмографах и других приборах.

Однако во многих случаях нагревание, вызываемое токами Фуко, оказывается вредным, и с ним приходится бороться. Сердечники трансформаторов, роторы электродвигателей набирают из отдельных железных пластин, разделенных слоями изолятора, препятствующего развитию больших индукционных токов, а сами пластины изготавливают из сплавов, имеющих высокое удельное сопротивление.

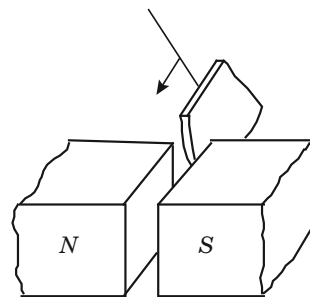


Рис. 3.25

3.3.6. Электромагнитное поле

Электрическое поле, созданное неподвижными зарядами, является статическим и действует на заряды. Постоянный ток вызывает появление постоянного во времени магнитного поля, действующего на движущиеся заряды и токи. Электрическое и магнитное поля существуют в этом случае независимо друг от друга.

Явление электромагнитной индукции демонстрирует взаимодействие этих полей, наблюдаемое в веществах, в которых есть свободные заряды, т. е. в проводниках. Переменное магнитное поле создает переменное электрическое поле, которое, действуя на свободные заряды, создает электрический ток. Этот ток, будучи переменным, в свою очередь порождает переменное магнитное поле, создающее электрическое поле в том же проводнике, и т. д.

Совокупность переменного электрического и переменного магнитного полей, порождающих друг друга, называется электромагнитным полем. Оно может существовать и в среде, где нет свободных зарядов, и распространяется в пространстве в виде *электромагнитной волны*.

Учение об электромагнитном поле было развито в 60-х гг. XIX в. английским физиком Дж. Максвеллом и получило название *классической электродинамики*.

Классическая электродинамика — одно из высших достижений человеческого разума. Она оказала огромное влияние на последующее развитие человеческой цивилизации, предсказав существование электромагнитных волн. Это привело в дальнейшем к созданию радио, телевидения, телекоммуникационных систем, спутниковых средств навигации, а также компьютеров, промышленных и бытовых роботов и прочих атрибутов современной жизни.

Краеугольным камнем теории Максвелла явилось утверждение, что источником магнитного поля может служить одно только переменное электрическое поле, подобно тому, как источником электрического поля, создающим в проводнике индукционный ток, служит *переменное магнитное поле*. Наличие проводника при этом не обязательно — электрическое поле возникает и в пустом пространстве. Линии переменного электрического поля, аналогично линиям магнитного поля, *замкнуты*. Электрическое и магнитное поля электромагнитной волны равноправны.

Как и световая волна, электромагнитная волна *поперечна*. Колебания совершают вектор напряженности электрического поля \vec{E} и вектор индукции магнитного поля \vec{B} . (*Напряженностью электрического поля \vec{E} называется сила, действующая в этом поле на единичный положительный заряд: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$.*) Оба вектора перпендикулярны направлению распространения волны (вектору скорости \vec{v}) и лежат во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 3.26). Электромагнитная волна распространяется со скоростью света, которая в вакууме составляет 300 тыс. км/с.

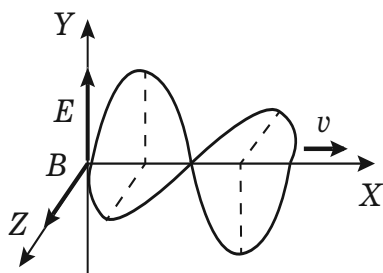


Рис. 3.26

Излучение и прием электромагнитных волн впервые осуществил в 80-х гг. XIX в. немецкий физик Г. Герц, который обнаружил у них свойства, присущие свету, — отражение от проводящих поверхностей, преломление при переходе из одной среды в другую.

Сходство электромагнитных волн со световыми позволило предположить, что световые волны являются электромагнитными. Впоследствии стало ясно, что видимый свет, имеющий длины волн в диапазоне от 0,4 до 0,7 мкм, занимает лишь небольшой участок шкалы электромагнитных волн, которые наблюдаются в природных явлениях и которые

человек научился получать сам (рис. 3.27). К первым относятся инфракрасные и ультрафиолетовые лучи, испускаемые Солнцем, ко вторым — радиоволны, рентгеновские и γ -лучи.

На рис. 3.27 греческой буквой μ (мю) обозначена единица длины — микрон (микрометр): $1\mu = 10^{-6}$ м.

1 миллимикрон ($m\mu$) = 0,001 м = 10^{-6} мм.

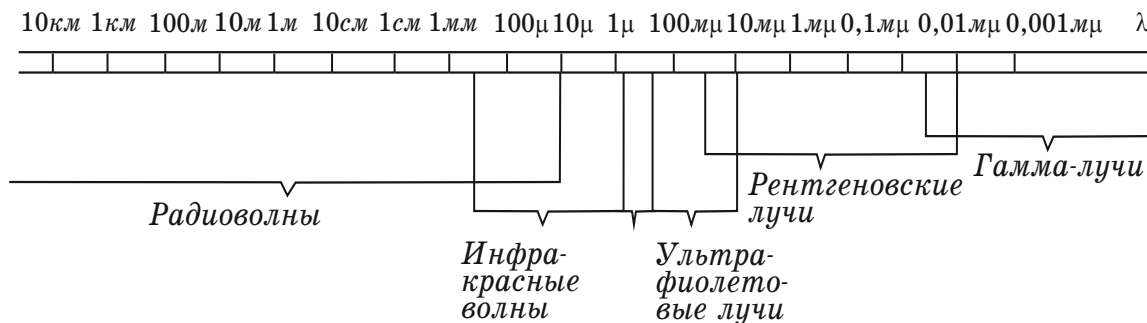


Рис. 3.27

Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте основные положения, лежащие в основе учения об электромагнетизме.
2. Опишите магнитные свойства постоянных магнитов. Как взаимодействуют они между собой?
3. Изобразите картину силовых линий магнитного поля, созданного плоским магнитом.
4. Какое открытие совершил Эрстэд, продемонстрировав свой опыт? Дайте описание этого опыта.
5. Какая величина является силовой характеристикой магнитного поля? Назовите единицу ее измерения.
6. Нарисуйте линии магнитного поля тока, текущего по прямолинейному проводнику.
7. Сформулируйте правило левой руки, с помощью которого можно определить направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле.
8. Что называется длинным соленоидом? Изобразите картину силовых линий магнитного поля, возникающего при протекании тока по его обмотке.
9. Что называется однородным магнитным полем?
10. Как формулируется правило правого винта?
11. В чем заключается явление электромагнитной индукции? Опишите опыты, демонстрирующие это явление.
12. Опишите принцип работы генератора переменного тока.
13. Что называется электромагнитным полем? Опишите механизм его возникновения.
14. Изобразите взаимное расположение векторов электрического и магнитного полей в электромагнитной волне.
15. Назовите диапазоны длин волн, составляющих спектр электромагнитного излучения.

3.4. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Оптика — раздел физики, в котором изучаются свойства света и взаимодействие его с веществом. Видимый свет, о котором речь шла в предыдущем разделе, представляет собой электромагнитные волны, воспринимаемые глазом человека, длины которых, лежащие в пределах от 0,4 до 0,7 мкм, очень малы в сравнении с размерами тел, встречающихся в повседневной жизни. Поэтому волновая природа света не проявляет себя, и мы обнаруживаем свойства света в виде характерных для него *прямолинейного распространения* и *резких теней*, отбрасываемых предметами, освещаемыми точечными источниками света.

Законы отражения и преломления света на границе двух сред составляют предмет *геометрической оптики*. Она позволяет получить важные практические результаты, пользуясь простыми правилами построения изображений предметов в оптических системах.

3.4.1. Прямолинейное распространение света

В разделе 1.6 мы ввели понятие *фронта волны* как поверхности, которая разделяет область пространства, где происходят колебания, от области, в которой колебания еще не начались. Фронт волны может иметь плоскую или сферическую форму и перемещается в пространстве в перпендикулярном ему направлении.

Линия, пересекающая фронт волны под прямым углом и показывающая направление его перемещения, называется лучом света.

Луч света в воздухе или воде можно сделать видимым, если внести в их среду примесь в виде табачного дыма, капли молока или мыльного раствора. Наблюдение за ходом лучей становится удобным и позволяет выявить закономерности, которым они подчиняются. Сам луч света, исходящий от источника, например лампы накаливания, можно сделать тонким, воспользовавшись системой диафрагм — непрозрачных экранов с отверстиями или щелями.

Опыт показывает, что в **однородной среде луч света распространяется по прямой линии.**

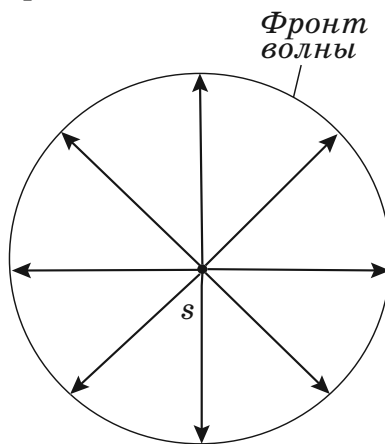


Рис. 3.28

Отклонения от этого закона наблюдаются в неоднородных средах. Например, лучи света, идущие с небосклона, искривляются в разогретом воздухе вблизи поверхности асфальтированной дороги настолько, что мы видим вблизи неё полоску неба.

Лучи, изображающие плоскую волну, параллельны между собой. В случае сферической волны они расходятся, имея общую исходную точку — *точечный источник света s* (рис. 3.28). Пропустив свет через отверстие *AA*, можно видеть его изображение *A'A'* на экране *FF* (рис. 3.29, *a*). Если источник света имеет конечные размеры, края изображения размываются. Образовавшиеся полутени (рис. 3.29, *б*) не опровергают, а лишь подтвержда-

ют закон прямолинейного распространения света, поскольку каждая точка светящейся поверхности источника посылает на экран прямые лучи, которые, складываясь, дают полную освещенность только в тех его местах, откуда видны все точки источника.

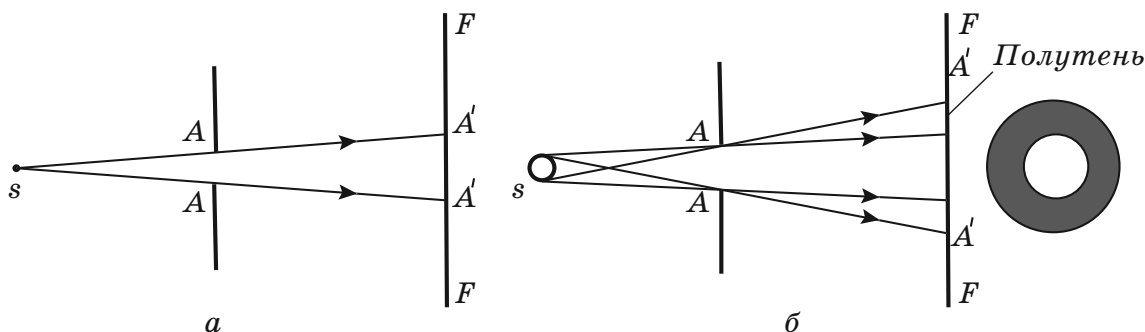


Рис. 3.29

3.4.2. Отражение и преломление света

Световые лучи являются геометрическими понятиями. Рассматривая распространение света в виде направленных лучей, мы пренебрегаем его волновой природой. Такое приближение упрощает задачу описания этого процесса и позволяет сформулировать правила, по которым можно решать практические задачи построения изображений предметов, которые дают оптические приборы — *линза, микроскоп, телескоп*.

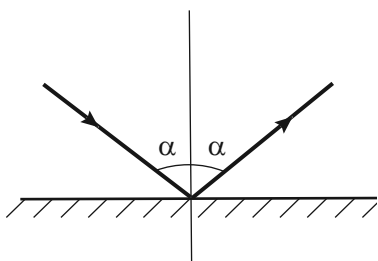


Рис. 3.30

Самый простой случай — падение света на отражающую поверхность зеркала. Отражательная способность хорошо отполированных металлов очень высока и приближается к 100 %. Известные нам в быту зеркала изготавливают, нанося слой металла на стеклянную поверхность.

Луч, отраженный от плоского зеркала, падающий луч и нормаль к поверхности в точке падения лежат в одной плоскости, а углы, образованные этими лучами с нормалью, равны (рис. 3.30).

Этот установленный опытным путем *закон отражения света* позволяет строить изображения предметов в плоском зеркале.

Изображение материальной точки A , находящейся на некотором расстоянии от него, будет видно в точке A' за зеркалом, на продолжении произвольно взятых лучей 1 и 2 (рис. 3.31). Из равенства углов падения и отражения легко заключить, что эта точка находится на том же расстоянии a от поверхности зеркала BC , что и точка A , если это расстояние откладывать вдоль нормали к этой поверхности.

Изображение протяженного объекта можно построить, откладывая такие расстояния для каждой из его точек. На рис. 3.32 в качестве примера показано изображение прямолинейного отрезка AB в плоском зеркале.

Оба рассмотренных изображения — точки A и отрезка AB — называются *мнимыми изображениями*, т. к. они образуются на продолжении лучей за плоскость зеркала, где их фактически нет.

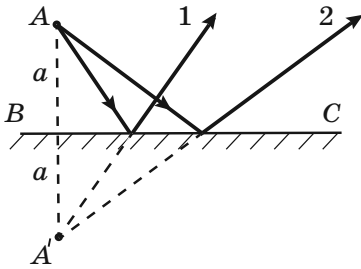


Рис. 3.31

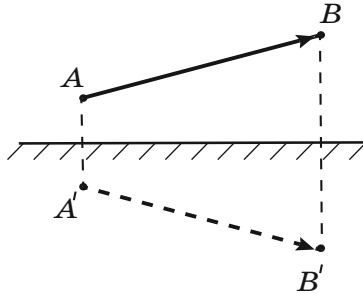


Рис. 3.32

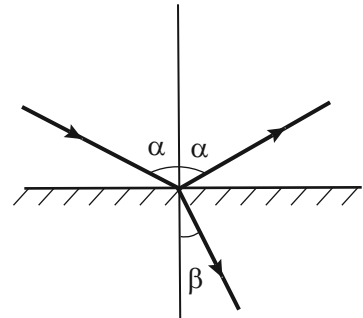


Рис. 3.33

Опытным путем установлено также, что если луч света переходит через границу раздела двух прозрачных сред, то он изменяет свое направление — *преломляется* (рис. 3.33). При этом выполняется *закон преломления света*:

Луч падающий, луч преломленный и нормаль к поверхности раздела сред лежат в одной плоскости, а углы падения и преломления связаны соотношением.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n, \quad (3.16)$$

где n — показатель преломления второй среды относительно первой, α — угол падения, β — угол преломления.

Величина n постоянна для данных граничащих сред и не зависит от угла падения. Если первая среда — вакуум или воздух, величина n называется *абсолютным показателем преломления*.

Обозначив показатель преломления первой среды через n_1 , а второй — через n_2 , уравнение (3.16) можно записать в виде:

$$n_{12} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (3.17)$$

Среда, обладающая бóльшим показателем преломления, называется *оптически более плотной*. При переходе в такую среду угол, составленный лучом и нормалью, *уменьшается*, при обратном переходе — *увеличивается*.

Оптические схемы, изображающие ход лучей при отражении и преломлении, сохраняют свой вид, если направления всех лучей изменить на противоположные. Это следует из обратимости хода лучей света, установленной экспериментально: **луч, идущий в обратном направлении, выбирает тот же путь, что и при прямом ходе.**

При переходе света из среды в воздух (или оптически менее плотную среду) наблюдается явление *полного внутреннего отражения*. Из рис. 3.34 видно, что с увеличением угла β угол α тоже увеличивается и для некоторого значения β_0 должен составить 90° , т. е. луч должен пойти вдоль поверхности раздела сред. Однако в действительности он направляется во вторую среду, отразившись от этой поверхности *зеркально* (лучи 2 и 2' на рис. 3.34). Все лучи, идущие под

большими углами ($\beta > \beta_0$), в первую среду *не выходят* (рис. 3.35 иллюстрирует это явление).

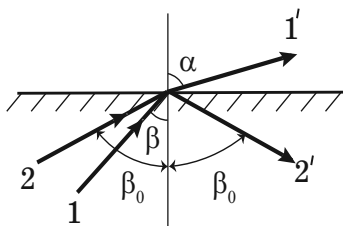


Рис. 3.34

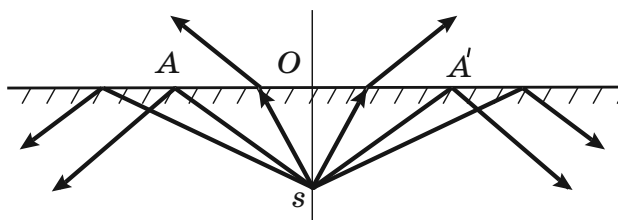


Рис. 3.35

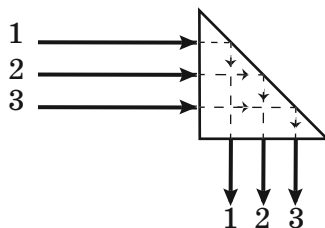
Точечный источник света s расположен под слоем воды на некоторой глубине. Наблюдатель, перемещаясь вдоль ее поверхности от центра картины O вправо или влево, заметит «исчезновение» источника при переходе через точку A или A' .

Угол полного внутреннего отражения для данного вещества относительно вакуума находится из уравнения (3.17), в котором $\sin \alpha = 1$, $n_1 = 1$. Тогда:

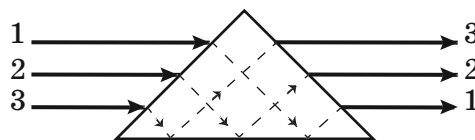
$$\sin \beta_0 = \frac{1}{n}, \quad (3.18)$$

где n — его абсолютный показатель преломления.

Явление полного внутреннего отражения используется в поворотных (а) и отражающих (б) призмах, изображенных на рис. 3.36. Они более просты в изготовлении по сравнению с зеркалами, т. к. не требуют нанесения на стеклянную поверхность слоя металла и отличаются стабильностью свойств, поскольку не подвержены влиянию атмосферного кислорода, окисляющего металл.



а



б

Рис. 3.36

3.4.3. Дисперсия света

Дисперсией света называется зависимость показателя преломления света от его длины волны.

Согласно соотношению (3.16), это означает, что лучи света разных цветов — от красного до фиолетового — при переходе границы раздела сред отклоняются от первоначального направления на разные углы. Опыт показывает, что лучи видимого света с наиболее короткими длинами волн (фиолетовые) преломляются сильнее всего.

Рассмотрим явление дисперсии света на примере, имеющем практическое значение, — при прохождении света через треугольную призму (рис. 3.37). Сечение призмы — равнобедренный треугольник. Луч света AB падает на ее левую боко-

вую грань и при переходе через нее отклоняется вправо на угол, равный разности угла падения и угла преломления. Пройдя через призму, луч падает на правую боковую грань призмы и подобным образом снова отклоняется. Можно показать, что вышедший из нее луч CD направлен по отношению к лучу AB под углом:

$$\delta = (n - 1)\theta, \quad (3.18)$$

где θ — угол при вершине призмы, n — показатель преломления стекла, из которого она изготовлена.

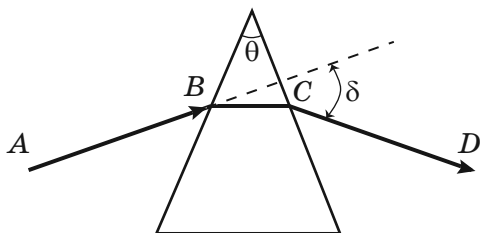


Рис. 3.37

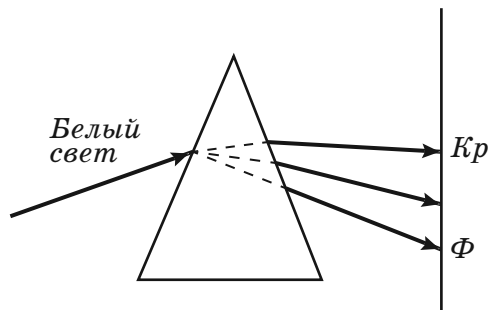


Рис. 3.38

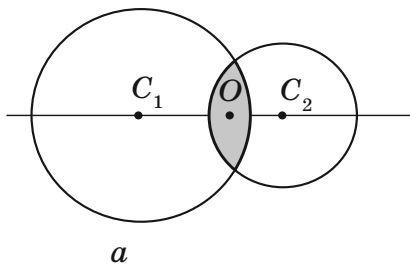
Отклонение лучей разных цветов на разные углы свидетельствует о зависимости показателя преломления от длины волны. Белый свет, исходящий от Солнца или лампы накаливания, содержит лучи всех длин волн и дает на экране разноцветную полосу из непрерывно переходящих друг в друга цветов радуги (рис. 3.38). Это цвета: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый.

Стеклянная призма используется в спектральных приборах, предназначенных для анализа света, излучаемого разными источниками — от светящихся газов в газоразрядной трубке до света далеких звезд.

3.4.4. Линза

Линза является основным элементом оптических приборов: *микроскопа, телескопа, бинокля, фото- и телекамеры*. Она представляет собой круглое стеклянное тело, ограниченное сферическими поверхностями. Сечение линзы плоскостью, проходящей через ось ее симметрии, изображено на рис. 3.39, *а*. Точка O в ее центре называется **оптическим центром линзы**.

На рис. 3.39, *б* показано условное обозначение линзы на оптических схемах, которыми мы будем пользоваться.



а

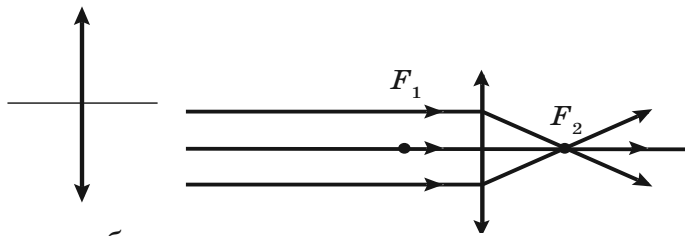


Рис. 3.40

Рис. 3.39

Верхняя и нижняя половины сечения линзы идентичны и своей формой напоминают сечение треугольной призмы. Поэтому лучи, идущие параллельно оси симметрии линзы C_1C_2 , будут отклоняться в сторону этой оси (рис. 3.40). Они сходятся в точке, называемой **фокусом линзы F** . Линза имеет два фокуса — слева и справа от нее.

Расстояние от центра линзы до фокуса называется ее **фокусным расстоянием**, также обозначаемым буквой F .

Лучи, проходящие через оптический центр линзы, *не испытывают преломления*. Соответствующие прямые называются **оптическими осями** линзы. Таких осей существует бесконечно много.

Ось, совпадающая с осью симметрии линзы, называется **главной оптической осью**.

Пучок параллельных лучей, идущих вдоль одной из оптических осей, проходя через линзу, собирается в одной точке P в ее *фокальной плоскости*, перпендикулярной главной оптической оси и расположенной на расстоянии F от центра линзы (рис. 3.41).

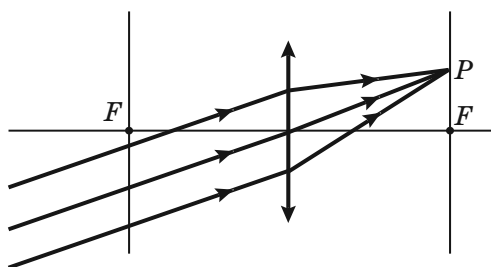


Рис. 3.41

Фокусное расстояние линзы зависит от степени кривизны ее поверхностей — линза с более выпуклыми поверхностями имеет меньшее фокусное расстояние. Она преломляет лучи сильнее и обладает большей *оптической силой*.

Оптической силой линзы называется величина, обратная ее фокусному расстоянию:

$$D = \frac{1}{F}. \quad (3.19)$$

Единица ее измерения называется *диоптрией* (дптр) ($1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}$). Одна диоптрия — это оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м.

Оптическая сила системы из двух соприкасающихся линз равна сумме этих величин каждой из линз.

3.4.5. Построение изображений предметов в собирающей линзе

Линза с двумя выпуклыми поверхностями называется **собирающей**. Такая линза позволяет получить изображение предмета — светящегося или отражающего падающий на него свет. Для построения изображения используются правила, основанные на рассмотренных выше закономерностях прохождения света через линзу. Таких правил два:

1. Луч света, параллельный оптической оси линзы, пройдя через нее, пересекает точку фокуса линзы.
2. Луч, идущий через оптический центр линзы, не изменяет своего направления.

Чтобы построить изображение точки, достаточно найти точку пересечения двух лучей, испущенных ею в двух разных направлениях. Протяженный пред-

мет можно разбить на отдельные точки и, построив изображения каждой из них, найти изображение предмета.

Изображения предмета в собирающей линзе могут быть двух типов — *действительные* и *мнимые*. Действительные изображения образуются лучами, посланными каждой точкой предмета, а затем вновь сошедшимися в соответствующей точке. Этот случай изображен на рис. 3.42.

Предмет AB в виде стрелки расположен слева от линзы на расстоянии a , превышающем фокусное расстояние F ($a > F$, предмет «за фокусом» линзы).

Чтобы найти его изображение $A'B'$, достаточно найти изображение его концов — точек A и B . Изображение точки B лежит на пересечении луча, параллельного оптической оси, и луча, проходящего через оптический центр линзы, и находится в точке B' . Оба эти луча, идущие от точки A , совпадают, поэтому для отыскания положения точки A' требуются дополнительные построения. Они приводят к формуле, связывающей расстояние a от предмета до линзы с расстоянием a' от линзы до изображения и величиной фокусного расстояния F :

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{F}. \quad (3.20)$$

Эта формула называется *формулой линзы*. Из нее следует, что отношение расстояний a и a' для любой из точек отрезка AB одинаково, следовательно, изображение нашего предмета, т. е. отрезок $A'B'$, будет параллельным самому предмету AB .

Размер изображения может быть как больше, так и меньше размера предмета в зависимости от соотношения между a и a' . Это будет действительное перевернутое изображение, которое можно наблюдать на экране, поместив его на расстоянии a' от линзы.

Этот случай реализуется в фото- и кинокамерах, проекционных аппаратах, когда мы записываем или воспроизводим на экране картинку, видимую невооруженным глазом.

Второй случай, когда мы получаем мнимое изображение предмета, осуществляется, если предмет поместить «перед фокусом» линзы ($a < F$; рис. 3.43).

Лучи, один из которых проходит через оптический центр линзы, а другой — параллельно ее оптической оси, *расходятся*. Продолжения этих лучей пересекаются в точке B' . Это будет мнимое изображение точки B предмета.

Формула линзы (3.20) в этом случае приобретает вид:

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{a'} = \frac{1}{F}, \quad (3.21)$$

где расстояние a' от линзы до изображения берется со знаком минус, поскольку это *мнимое изображение*.

Из формулы (3.21) следует, что и в этом случае изображение $A'B'$ параллельно предмету AB .

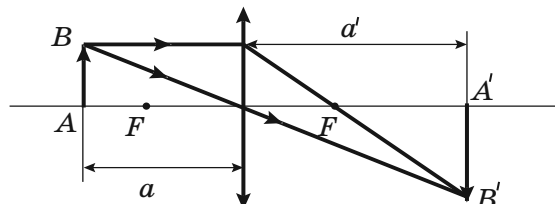


Рис. 3.42

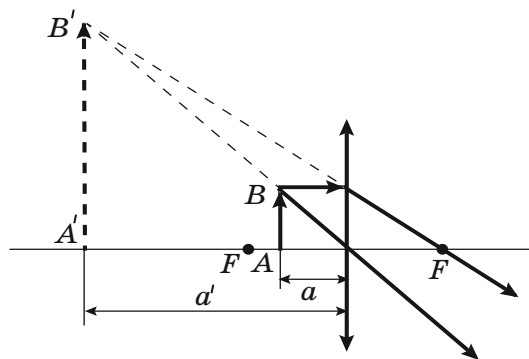


Рис. 3.43

Увеличенное мнимое изображение мы наблюдаем, когда рассматриваем предмет через лупу, которую используют, чтобы лучше разглядеть мелкие детали.

3.4.6. Рассеивающая линза

Кроме собирающих линз, изготавливают также и *рассеивающие* линзы. Тело таких линз ограничено двумя вогнутыми сферическими поверхностями (рис. 3.44, а). Условное их обозначение на оптических схемах показано на рис. 3.44, б).

Отличие рассеивающей линзы от собирающей состоит в том, что лучи, идущие параллельно ее оптической оси, отклоняются линзой во внешнюю сторону — рассеиваются (рис. 3.45). Мнимый фокус F' лежит на продолжении этих лучей. При построении изображения предмета в рассеивающей линзе лучи, параллельные ее оптической оси, следует направить так, как будто они выходят из точки F' (рис. 3.46). Лучи, проходящие через ее оптический центр, не изменяют своего направления.

Рассеивающая линза всегда дает *мнимое изображение*, независимо от того, где находится предмет — перед фокусом или за ним. Это изображение *уменьшенное* и *прямое* (не перевернутое). Из рис. 3.46 видно, что его размер меньше размера предмета в $\frac{a'}{a}$ раз, где a' — расстояние от линзы до мнимого изображения. Его можно найти из формулы линзы, которая для рассеивающей линзы имеет вид:

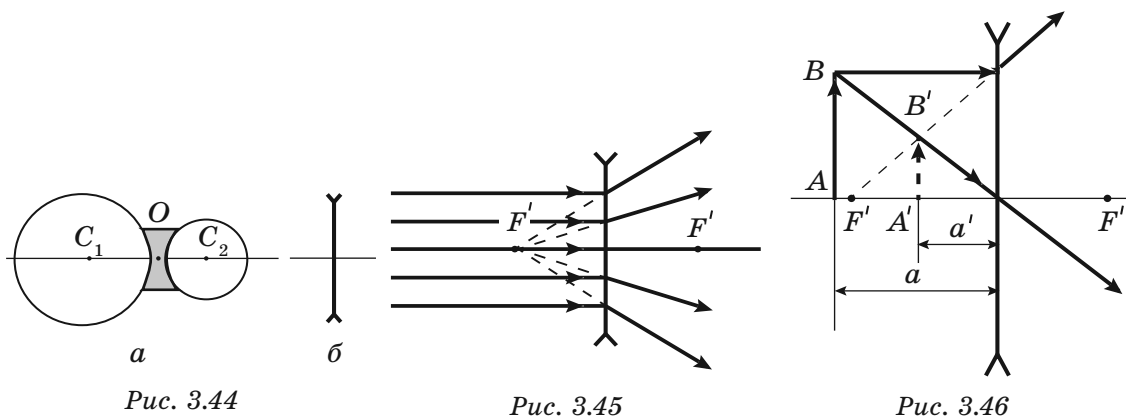


Рис. 3.44

Рис. 3.45

Рис. 3.46

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{a'} = -\frac{1}{F'}. \quad (3.22)$$

Мнимое изображение предмета, даваемое рассеивающей линзой, доступно наблюдению благодаря тому, что глаз человека, имеющий собирающую линзу в виде хрусталика, делает расходящийся пучок света сходящимся, сфокусированным на светочувствительной оболочке глаза — сетчатке.

Оптическая сила рассеивающей линзы *отрицательна*. Так, например, рассеивающая линза с фокусным расстоянием 50 см имеет оптическую силу: $D = -\frac{1}{0,5} = -2$ диоптрии.

Рассеивающие линзы используются в качестве компонентов объективов и окуляров микроскопов, телескопов и других оптических приборов. Их роль

закключается в исправлении дефектов изображения, возникающих в простых линзах.

3.4.7. Глаз как оптическая система

Глаз человека представляет собой довольно сложную оптическую систему (рис. 3.47). Глазное яблоко диаметром примерно 2,5 см в передней своей части имеет прозрачную *роговую оболочку*, или *роговицу*. За нею расположена *радужная оболочка*, окрашенная у разных людей в разные цвета и имеющая в середине отверстие — *зрачок*. Радужная оболочка способна деформироваться и менять размер зрачка. Это происходит рефлекторно без участия сознания. При ярком освещении диаметр зрачка равен 2 мм а при слабом доходит до 8 мм.

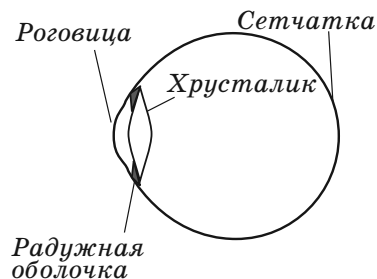


Рис. 3.47

Падающие световые лучи сначала преломляются на поверхности роговой оболочки глаза, а затем — на двух поверхностях *хрусталика*, напоминающего своей формой линзу. Пройдя сквозь глазную жидкость, наполняющую глаз, лучи собираются на его сетчатой оболочке — *сетчатке*.

Сетчатая оболочка состоит из очень мелких светочувствительных элементов размером меньше 0,01 мм. Каждый элемент является окончанием нерва, по которому световое ощущение передается в мозг. На сетчатой оболочке получается действительное перевернутое изображение предметов, находящихся перед глазом. Правильное впечатление о них — в неперевернутом виде — создается за счет работы мозга.

При помощи специальных мускулов хрусталик может менять свою кривизну, что позволяет видеть предметы резкими. Эта способность глаза называется *аккомодацией*.

Аккомодация позволяет глазу видеть предметы отчетливо только до некоторого расстояния, ближе которого фокусировка невозможна или может осуществляться на короткое время за счет большого напряжения его мускулов. Это расстояние, равное примерно 25 см и называемое *расстоянием наилучшего зрения*, с возрастом увеличивается, поскольку хрусталик теряет свою эластичность. Лучи вследствие малой кривизны хрусталика фокусируются *за сетчаткой*, и глаз делается *дальнозорким*. Для исправления этого недостатка служат очки с выпуклыми линзами. Они позволяют получить изображение на самой сетчатой оболочке глаза.

Другой недостаток — *близорукость* — заключается в слишком большой выпуклости хрусталика, так что изображения предметов фокусируются *перед сетчаткой*. Он исправляется очками с вогнутыми стеклами, отдаляющими действительное изображение, перенося его на сетчатку.

Видимый размер предмета определяется размером его изображения на сетчатке глаза, который в свою оче-

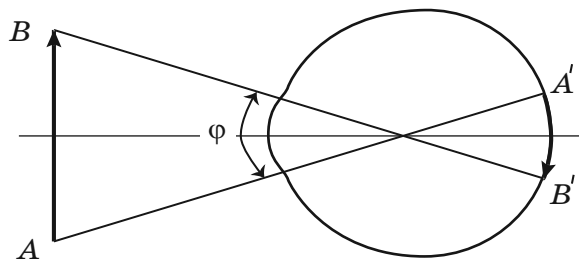


Рис. 3.48

редь определяется *углом зрения* — углом между крайними лучами, попадающими в глаз от рассматриваемого предмета (рис. 3.48).

Угол зрения зависит от размеров предмета и от его расстояния до глаза — чем ближе предмет, тем больше угол зрения. Приближая предметы до расстояния наилучшего зрения, соответствующего наилучшим условиям наблюдения, мы можем увеличивать их кажущиеся размеры, чтобы видеть более мелкие детали. Однако если предмет настолько мал, что его изображение на сетчатке глаза меньше 0,01 мм, то форму этого предмета уже нельзя будет различить — изображение предмета уложится на одном ее светочувствительном элементе и даст ощущение одной точки. Как показывает опыт, угол зрения при этом равен примерно одной минуте ($\sim 1'$), что соответствует отрезку длиной 1 см, находящемуся на расстоянии 34 м от глаза.

Благодаря указанному ограничению человеческий глаз не пригоден ни для рассматривания близких, но очень маленьких предметов, ни для рассматривания больших, но очень удаленных предметов. И в том, и в другом случае необходимо использовать приборы, увеличивающие углы зрения, под которыми видны предметы.

3.4.8. Оптические приборы

По своему назначению оптические приборы можно разбить на две большие группы:

1. Приборы, служащие для рассматривания очень мелких предметов (лупа, микроскоп). Эти приборы как бы «увеличивают» рассматриваемые предметы.

2. Приборы, предназначенные для наблюдения удаленных объектов (зрительные трубы, бинокль, телескоп). Они как бы «приближают» эти объекты.

В каждом случае эти приборы и глаз образуют единую оптическую систему, существенным элементом которой является хрусталик глаза. Вся эта система в целом дает изображение предмета на сетчатке глаза, и кажущаяся величина предмета оценивается нами по величине этого изображения.

Простейшим оптическим прибором является *лупа*, рассмотрением которой мы и ограничимся.

Лупой называется собирающая линза, через которую рассматривается предмет, располагаемый между линзой и ее главным фокусом.

В качестве лупы применяются собирающие линзы с фокусным расстоянием от 10 до 100 мм.

Лупа помещается перед глазом вблизи него, а рассматриваемый предмет — на расстоянии, немного меньшем фокусного расстояния лупы. Построение изображения в лупе приведено на рис. 3.43. В этих условиях она дает *мнимое, прямое, увеличенное* изображение.

На рис. 3.49 показан ход лучей при рассматривании небольшого предмета AB через лупу. Лучи, исходящие из точки B предмета длиной l , преломляются сначала в лупе, затем в преломляющих средах глаза и собираются в точке B'' на сетчатке. В той же точке B'' собрались бы лучи, если бы лупы не было, а источник находился в точке B' , т. е. если бы глаз непосредственно рассматривал предмет $A'B'$ увеличенных размеров l' , представляющий мнимое изображение предмета, даваемое лупой.

Отношение длины изображения на сетчатке в случае вооруженного глаза l' к длине изображения в случае невооруженного глаза l называется **увеличением оптического прибора**.

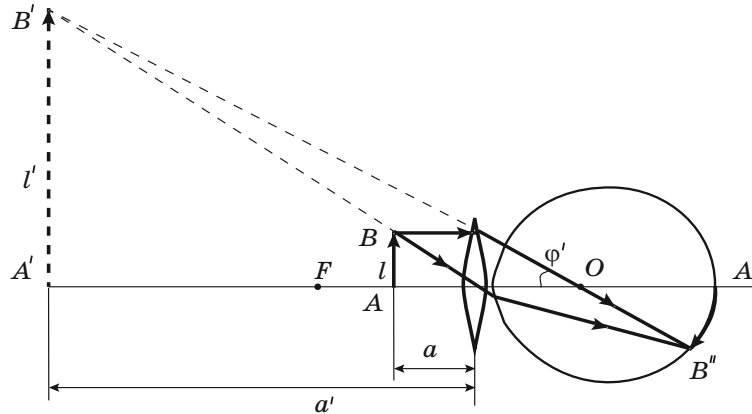


Рис. 3.49

Увеличение лупы N равно также отношению угла зрения ϕ' при рассматривании через нее предмета (рис. 3.49) к углу зрения ϕ для невооруженного глаза, когда прибор расположен на расстоянии наилучшего зрения $d \approx 25$ см (рис. 3.50):

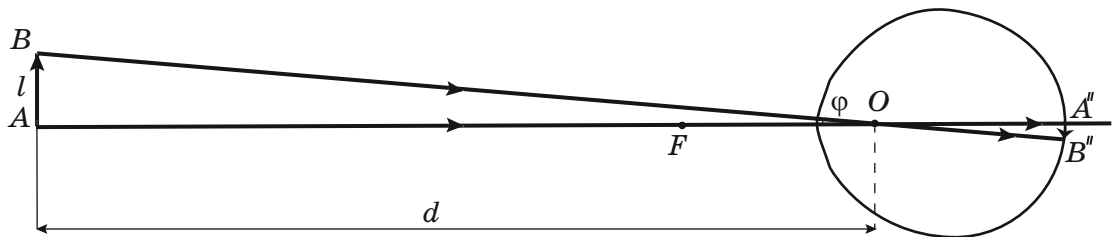


Рис. 3.50

$$N = \frac{l'}{l} = \frac{\phi'}{\phi}. \quad (3.23)$$

Можно показать, что увеличение лупы вычисляется по формуле:

$$N = \frac{250}{F}, \quad (3.24)$$

где F — фокусное расстояние лупы, выраженное в миллиметрах.

При $F = 50$ мм лупа имеет пятикратное увеличение, и оно возрастает с уменьшением фокусного расстояния. Однако лупы с очень малым фокусным расстоянием имеют большую кривизну преломляющей поверхности и могут быть только малого диаметра. Пользоваться ими практически невозможно, поэтому лупы с увеличением более 40 не применяются.

Вопросы для самопроверки

1. Что изучает геометрическая оптика?
2. Дайте определение луча света.
3. Сформулируйте закон прямолинейного распространения света. При каких условиях он выполняется?

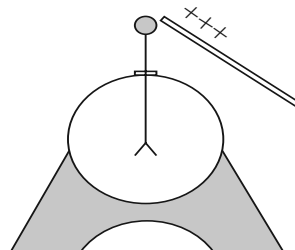
4. Изобразите ход лучей на границе раздела двух прозрачных сред. Что называется зеркальным отражением света?
5. Как формулируется закон отражения света?
6. Постройте мнимое изображение предмета в плоском зеркале.
7. Дайте определение показателя преломления света.
8. Опишите явление полного внутреннего отражения света. Где оно используется?
9. Что такое дисперсия света? Изобразите оптическую схему для наблюдения дисперсии.
10. Какие бывают линзы? Дайте определение оптической оси, оптического центра и фокуса линзы.
11. Что называется оптической силой линзы? Как найти оптическую силу совокупности линз?
12. Сформулируйте правила построения изображения предметов в линзах.
13. Запишите формулу линзы для собирающей и рассеивающей линзы.
14. Постройте изображение предмета в собирающей и рассеивающей линзах. Когда наблюдается мнимое изображение?
15. Опишите строение человеческого глаза. Что такое аккомодация глаза?
16. В чем заключается дальновзоркость и близорукость глаза? Что такое расстояние наилучшего зрения?
17. Изобразите ход лучей в лупе. Как найти увеличение лупы?
18. Какие оптические приборы служат для расширения возможностей наблюдения очень мелких и очень удаленных предметов?

Тренировочные тестовые задания к разделу «Электромагнитные явления»

При выполнении заданий с выбором ответа обведите кружком номер правильного ответа.

1. Закончите утверждение: если к шарiku электроскопа прикоснуться палочкой, заряженной положительно, то его листочки...

- 1) получают положительный заряд
- 2) получают отрицательный заряд
- 3) получают положительный заряд и разойдутся
- 4) не получают заряда, поскольку зарядится только шарик



2. При натирании шерстью эбонитовой палочки она зарядилась. Это произошло потому, что:

- 1) часть электронов перешла с палочки на шерсть
- 2) часть протонов перешла с палочки на шерсть
- 3) часть электронов перешла с шерсти на палочку
- 4) часть протонов перешла с шерсти на палочку

3. Атом, лишенный двух своих электронов, имеет заряд:

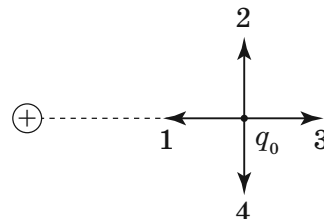
- | | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 1) $+1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл | 3) $-1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл |
| 2) $+3,2 \cdot 10^{-19}$ Кл | 4) $-3,2 \cdot 10^{-19}$ Кл |

4. Два одинаковых шарика заряжены одноименными зарядами $-1,5$ нКл и -12 нКл. На каком шарике больше лишних электронов и во сколько раз?

- | | |
|-----------------------|----------------------|
| 1) на первом в 18 раз | 3) на первом в 8 раз |
| 2) на втором в 18 раз | 4) на втором в 8 раз |

5. Электрическое поле создано положительно заряженным шариком. Какой из векторов на рисунке указывает направление силы, действующей на положительный заряд q_0 , помещенный в это поле?

- 1) вектор 1
- 2) вектор 2
- 3) вектор 3
- 4) вектор 4



6. Упорядоченным движением каких частиц создается электрический ток в металлах?

- 1) положительных ионов
- 2) отрицательных ионов
- 3) электронов
- 4) положительных и отрицательных ионов

7. Как называется единица измерения силы тока?

- | | |
|----------|---------|
| 1) вольт | 3) Ом |
| 2) ампер | 4) ватт |

8. Как называется единица измерения электрического сопротивления?

- | | |
|-----------|----------|
| 1) джоуль | 3) ампер |
| 2) вольт | 4) Ом |

9. Какой формулой выражается закон Ома для участка цепи?

1) $A = U \cdot I \cdot t$

$$3) \quad I = \frac{U}{R}$$

$$2) \quad P = I \cdot U$$

4) $Q = I^2 \cdot R \cdot t$

10. Каково напряжение на участке электрической цепи сопротивлением 20 Ом при силе тока 4 А?

1) 0,2 B

3) 40 B

2) 5 B

4) 80 В

11. Какова мощность электрического тока в электрической плите при напряжении 220 В и силе тока 2,2 А?

1) 242 B_T

3) 484 B_T

2) 322 B_T

4) 624 B_T

12. Какое количество теплоты выделяется в проводнике сопротивлением 20 Ом за 10 мин при силе тока в цепи 2 А?

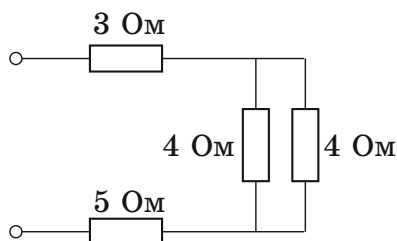
1) 2,4 ДЖ

3) 12 КДЖ

2) 400 Дж

4) 48 кДж

13. Каково общее электрическое сопротивление цепи, схема которой представлена на рисунке?



1) 5 O_M

2) 10 O_M

3) 16 O_M

4) 6 O_M

14. Каково электрическое сопротивление алюминиевого провода длиной 10 м диаметром 1 мм? (Удельное сопротивление алюминия $0,028 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.)

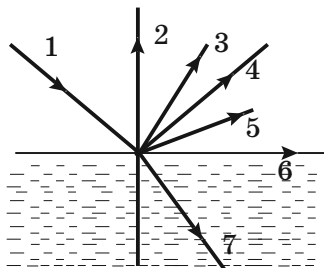
1) 0,018 O_M

3) 1,8 O_M

2) 0,36 O_M

4) 3,6 O_M

15. При падении луча света 1 из воздуха на стекло возникают отраженный и преломленный лучи. В каком направлении пойдет отраженный луч?



1) 2

2) 3

3) 4

4) 5

16. Оптическая сила глаза человека 58 дптр. Каково его фокусное расстояние?

1) 58 M

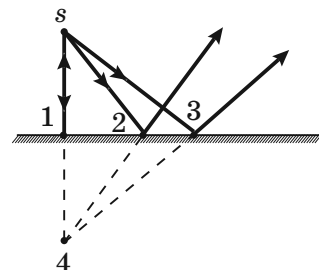
3) 17 CM

2) 0,017 M

4) 1,7 MM

17. Источник света s находится перед плоским зеркалом. Какая точка является изображением источника s в зеркале?

- 1) только 1
- 2) 1, 2, 3
- 3) только 4
- 4) 1, 2, 3, 4

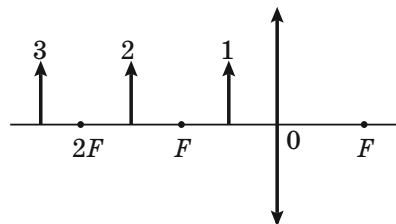


18. Какое расстояние получается на сетчатке глаза человека?

- 1) действительное, прямое
- 2) мнимое, прямое
- 3) действительное, перевернутое
- 4) мнимое, перевернутое

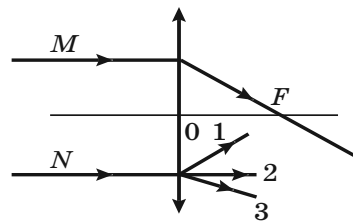
19. На рисунке представлено расположение собирающей линзы и трех предметов 1, 2 и 3 перед ней. Изображение какого из предметов будет действительным, увеличенным, перевернутым?

- 1) только 1
- 2) только 2
- 3) только 3
- 4) всех трех



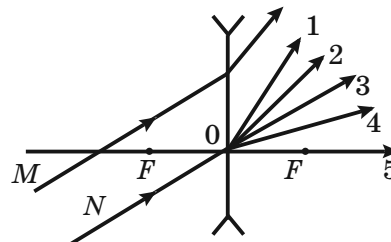
20. На собирающую линзу падают два параллельных луча M и N . Ход луча M после прохождения линзы показан на рисунке. По какому направлению пойдет луч N после линзы?

- 1) 1
- 2) 2
- 3) 3
- 4) может пойти по любому из трех



21. На рассеивающую линзу падают два параллельных луча M и N . Ход луча M после прохождения линзы показан на рисунке. По какому направлению пойдет луч N после линзы?

- 1) 2
- 2) 3
- 3) 4
- 4) 5



При выполнении заданий с кратким ответом необходимо записать ответ в указанном в тексте задания месте.

22. Два одинаковых металлических шарика имеют заряды 2 нКл и -6 нКл. Каковы будут их заряды после соединения их тонким металлическим проводником?

Ответ: _____.

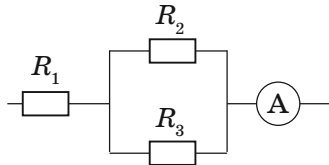
23. Замкнутую систему образуют заряженные частицы, заряды которых -1 нКл, $+8$ нКл и -5 нКл. Найдите заряд системы.

Ответ: _____.

24. Сила тока в электрическом утюге $4,5$ А. Сколько электронов проходит через утюг за 5 мин?

Ответ: _____.

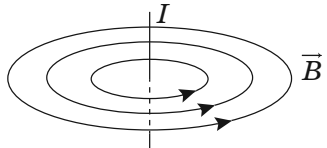
25. Амперметр, включенный в цепь, схема которой представлена на рисунке, показывает 10 А. Найдите напряжение и силу тока, протекающего через каждый из резисторов, если $R_1 = 1$ Ом, $R_2 = 2$ Ом, $R_3 = 6$ Ом.



Ответ: _____.

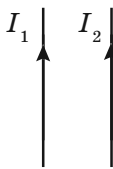
26. Укажите направление тока в проводнике, если известно направление силовых линий магнитного поля, созданного этим проводником.

Ответ: _____.



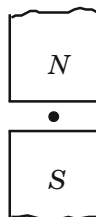
27. Как взаимодействуют два параллельных проводника с токами, направления которых обозначены на рисунке стрелками?

Ответ: _____.



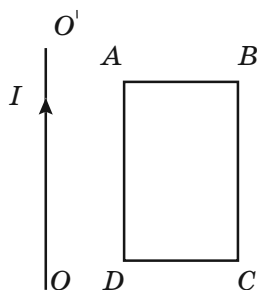
28. Как располагаются две магнитные стрелки, помещенные рядом друг с другом?

Ответ: _____.



29. В каком направлении будет действовать сила на проводник с током, поперечное сечение которого обозначено на рисунке кружочком?

Ответ: _____.

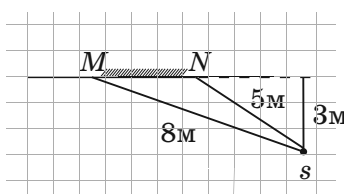


30. Прямоугольный контур $ABCD$ перемещается поступательно в магнитном поле тока, текущего по прямолинейному длинному проводу OO' . Определите направление тока, индуцированного в контуре, если виток удаляется от провода.

Ответ: _____.

31. Источник света s и плоское зеркало MN расположены, как показано на рисунке. Каково расстояние от источника s до его изображения в зеркале MN ?

Ответ: _____.



32. Человек, стоявший прямо перед зеркалом, приблизился к нему на расстояние 20 см. На сколько он приблизился к своему изображению?

Ответ: _____.

4. КВАНТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

- Знать:**
- смысл понятий: атом и ядро атома, нуклоны, изотопы, радиоактивность;
 - смысл физических величин: период полураспада ядер атомов, массовое число, энергия связи ядер, коэффициент размножения нейтронов;
 - смысл закона смещения при радиоактивном распаде ядер.
- Уметь:**
- объяснить и описать физические явления и процессы:
 - радиоактивное превращение ядер;
 - цепная ядерная реакция;
 - термоядерная реакция.

4.1. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

В середине XX в. человечество овладело мощным источником энергии — делением ядер атомов, при котором выделяется мощность, в миллион раз превосходящая мощность химических реакций горения топлива, являющихся и до настоящего времени главным источником энергии, потребляемой человеком. Наряду с оружием огромной разрушительной силы, использующим деление ядер, была создана сеть электростанций, называемых атомными, которые вырабатывают значительную часть всей производимой человечеством электроэнергии. Достижения физики в области изучения атомного ядра, как и в других ее областях, нашли здесь свое практическое применение, явившееся составной частью общего прогресса в развитии человеческой цивилизации, который стал особенно заметным во второй половине XX в. — эпохе, называемой научно-технической революцией.

В настоящем разделе рассматриваются основные свойства ядер атомов и принципы, лежащие в основе их практического применения.

4.1.1. Опыты Резерфорда по рассеянию α -частиц веществом. Планетарная модель атома

Представление об атоме как мельчайшей частице вещества сформировалось в науке еще в XVIII в. и основывалось на достижениях в области химии. Строение же атома долгое время оставалось загадкой. В 1897 г. Дж. Дж. Томсон открыл существование электрона, входящего в его состав, и позднее предложил модель атома в виде «пудинга с изюмом», роль изюма в которой играли электроны.

Модель атома Томсона требовала экспериментальной проверки, которая была осуществлена Э. Резерфордом с сотрудниками Х. Гейгером и Э. Марсденом. Они поместили тонкую металлическую фольгу на пути узкого пучка α -частиц, источником которых служил радиоактивный препарат (рис. 4.1). α -частицы имеют положительный

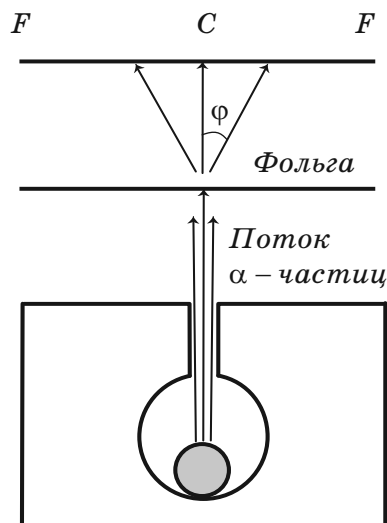


Рис. 4.1

заряд, вдвое превышающий заряд электрона, и массу, вчетверо бóльшую массы атома водорода. По современным представлениям, α -частицы являются ядрами атома гелия.

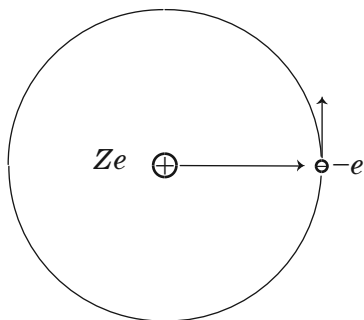


Рис. 4.2

Экран FF был покрыт слоем сернистого цинка, фосфоресцирующего под действием падающих на него заряженных частиц. Каждая частица при попадании на экран давала вспышку света. Интенсивность пучка α -частиц была столь малой, что можно было визуально наблюдать отдельные вспышки, отмечая места их возникновения относительно средней точки C , куда первоначально направлялся пучок. Оказалось, что некоторые из частиц отклоняются от прямолинейного пути на значительный угол φ так, как будто встречаются с тяжелыми рассеивающими центрами очень малых размеров.

Обработка результатов наблюдений позволила установить, что этими центрами являются положительно заряженные ядра атомов, размеры которых примерно в 10^5 раз меньше размера самого атома. Атом представляет собой по существу пустое пространство с крошечным ядром, сосредоточивающим в себе практически всю его массу (рис. 4.2). Если земной шар принять за атом, то его ядро будет размером с большой многоэтажный дом.

Тяжелое, положительно заряженное ядро атома и электроны, окружающие его, — суть модели атома, предложенной Резерфордом на основании опытов.

4.1.2. Заряд, масса и размер ядер атомов

Ядро атома несет положительный заряд, численно равный суммарному заряду электронов, обращающихся вокруг ядра.

Простейшее из ядер — ядро атома водорода — называется **протоном**. Его масса в 1836 раз больше массы электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Заряд протона положителен и по величине равен заряду электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Ядра атомов других элементов содержат еще и **нейтроны** — частицы, аналогичные протону, но не имеющие заряда. Протоны и нейтроны носят название **нуклонов**.

Число протонов Z в ядре определяет *заряд* ядра (в единицах заряда протона e) и атомный номер элемента в периодической системе элементов Менделеева.

Ядро атома характеризуется *массой* M и *массовым числом* A , равным числу нуклонов в ядре. Ядра с одинаковыми Z , но разными A , т. е. с разным числом нейтронов $N = A - Z$, называются **изотопами**.

Размер ядра по порядку величины в 10^5 раз меньше размера атома. Считая ядро сферическим, его радиус можно найти по формуле:

$$R_{\text{я}} = 1,3 \cdot 10^{-15} A^{\frac{1}{3}} \text{ м},$$

из которой следует, что объем ядра пропорционален числу содержащихся в нем нуклонов, а плотность ядра приблизительно одинакова для всех ядер.

Протоны и нейтроны связаны друг с другом силами, называемыми *ядерными*, имеющими малый радиус действия, сравнимый с размером ядра ($\sim 10^{-15}$ м).

Ядерные силы намного превосходят силы электростатического отталкивания протонов и служат залогом стабильности ядер большинства атомов.

Ядра атомов обозначают тем же символом, что и соответствующий химический элемент, указывая слева от него сверху число нуклонов, а внизу — число протонов: ${}^A_Z\text{X}$. Так, например, изотопы урана имеют обозначение ${}^{238}_{92}\text{U}$ и ${}^{235}_{92}\text{U}$. Часто, однако, значение Z не приводится, поскольку оно однозначно определяется химическим символом элемента, и тогда пишут ${}^{238}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$.

4.1.3. Радиоактивность

В 1896 г. французский физик А. Беккерель открыл *радиоактивность* урана. Спустя два года М. Склодовская-Кюри и П. Кюри выделили из урановой руды два новых радиоактивных элемента — *полоний* и *радий*. Радиоактивность их проявляется в почернении фотоэмульсии, ионизации газов, свечении флуоресцирующих веществ под действием испускаемых ими невидимых лучей. Такими лучами могут быть:

- 1) α -лучи — поток ядер атома гелия;
- 2) β -лучи, представляющие собой поток электронов;
- 3) γ -лучи, являющиеся электромагнитным излучением с длинами волн, меньшими рентгеновских.

Разделение этих лучей происходит в магнитном поле, силовые линии которого направлены перпендикулярно скорости частиц (рис. 4.3). Положительно заряженные α -частицы отклоняются влево, отрицательно заряженные β -частицы — вправо, а их траектории, поскольку это более легкие частицы, искривляются сильнее.

Суть явления радиоактивности заключается в распаде ядер атомов с образованием элементов, расположенных в таблице Менделеева ближе к ее началу. Образовавшиеся вещества тоже могут быть радиоактивными и в свою очередь испытывать радиоактивные превращения.

В природе существуют три ряда превращений, родоначальниками которых являются ${}^{238}\text{U}$ (ряд урана), ${}^{232}\text{Th}$ (ряд тория) и ${}^{235}\text{U}$ (ряд актиноурана). Конечными продуктами во всех трех случаях являются изотопы свинца — соответственно ${}^{206}\text{Pb}$, ${}^{208}\text{Pb}$ и ${}^{207}\text{Pb}$. Впоследствии были найдены природные изотопы других элементов, также испытывающие распад. Радиоактивные изотопы могут быть получены и искусственным путем — бомбардировкой веществ α -частицами или нейтронами.

Радиоактивные превращения ядер приводят к изменению химических свойств веществ, которые могут быть предугаданы на основе *закона смещения*. Согласно ему, при α -распаде образуется элемент, стоящий в таблице Менделеева на два места ближе к ее началу, т. к. α -частица уносит двойной положительный заряд (в единицах элементарного заряда e) и заряд дочернего ядра оказывается меньше заряда ядра исходного элемента на две единицы.

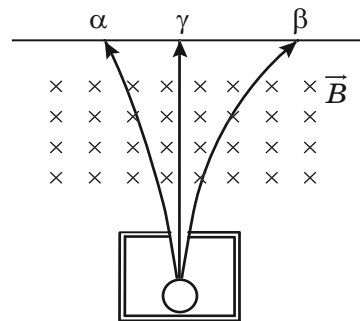


Рис. 4.3

При β -распаде образуется элемент, стоящий на одно место дальше, поскольку покидающий ядро электрон уносит отрицательный заряд, что равносильно увеличению положительного заряда ядра на единицу. Последовательное испускание одной α -частицы и двух β -частиц приводит к элементу с тем же зарядом ядра, т. е. с тем же атомным номером, что и исходный элемент, но с массовым числом, на четыре единицы меньшим.

Радиоактивные свойства веществ характеризуются **периодом полураспада** — промежутком времени, в течение которого распадается половина из имеющихся в данный момент радиоактивных ядер. Период полураспада — свойство ядер, не зависящее от физических условий, в которых находится вещество (таких как температура, давление или агрегатное состояние). Периоды полураспада известных в настоящее время радиоактивных ядер сильно разнятся, принимая значения от $3 \cdot 10^{-7}$ с до $5 \cdot 10^{15}$ лет.

4.1.4. Энергия связи ядер

В то время как заряд атомного ядра равен сумме зарядов входящих в него протонов, масса ядра меньше суммы масс отдельных нуклонов. Дело в том, что нуклоны в ядре сильно связаны между собой, и, чтобы освободить все протоны и нейтроны, нужно затратить энергию, которая называется *энергией связи ядра* $W_{\text{св}}$. При образовании ядра из свободных нуклонов эта энергия должна выделяться. Согласно теории относительности, между энергией и массой m существует соотношение $W = mc^2$ (где c — скорость света). Поэтому выделение энергии приводит к уменьшению массы образовавшегося ядра на величину $\Delta m = \frac{W_{\text{св}}}{c^2}$, называемую *дефектом массы*.

Обозначая массу протона m_p , массу нейтрона — m_n , а массу ядра атома — $m_{\text{я}}$, получим формулу дефекта массы:

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_{\text{я}}.$$

Сравнивая массу ядра с суммой масс содержащихся в нем протонов и нейтронов, можно определить его энергию

связи. Оказалось, что энергия связи ядер примерно пропорциональна числу содержащихся в них нуклонов.

В ядерной физике энергию частиц — протонов, нейтронов, γ -лучей — измеряют в специальных единицах — *мегаэлектронвольтах* (МэВ):

$$1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}.$$

Удельная энергия связи — энергия, приходящаяся на один нуклон $\frac{W_{\text{св}}}{A}$, для средних и тяжелых ядер, начи-

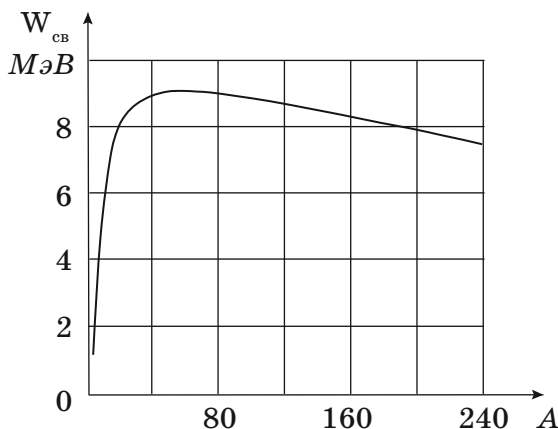


Рис. 4.4

ная с $A = 25—30$, равна $7—8$ МэВ. Для сравнения укажем, что энергия связи валентных электронов в атомах в 10^6 , т. е. в миллион раз меньше.

На рис. 4.4 изображен график, показывающий зависимость удельной энергии связи от массового числа A . Она быстро растет у ядер с малыми A , а затем медленно убывает у тяжелых ядер. Такой ход кривой показывает, что с энергетической точки зрения возможны два процесса преобразования ядер атомов — *деление тяжелых ядер* на несколько более легких и *слияние (синтез) легких ядер* с образованием более тяжелого ядра. Оба эти процесса должны сопровождаться выделением большого количества энергии. Первый из них используется человеком для получения электроэнергии и в военных целях, второй находится в стадии разработки и не нашел пока практического применения в мирных целях.

4.1.5. Получение ядерной энергии. Цепная ядерная реакция

Процессы, в которых участвуют частицы, взаимодействующие друг с другом с помощью ядерных сил (сильных взаимодействий), называются **ядерными реакциями**. К таким частицам относятся нуклоны и ядра атомов. Подобно химическим реакциям, позволяющим получить новые вещества, ядерные реакции приводят к образованию ядер, отличающихся от исходных своим составом. Примером таких реакций, протекающих в природных условиях, служит распад ядер радиоактивных элементов — урана, радия, тория, при котором в исходном образце количество этих ядер уменьшается, а вместо них образуются ядра других элементов, в частности, свинца.

За годы исследования атомных ядер были найдены искусственные способы осуществления ядерных реакций — путем бомбардировки ядер α -частицами, протонами, нейтронами, γ -лучами. Это позволило получить множество не встречающихся в природе радиоактивных изотопов. Эксперименты такого рода с использованием нейтронов привели к открытию *цепной ядерной реакции*, нашедшей практическое применение.

В 1938 г. немецкие физики О. Ганн и Ф. Штрассман обнаружили, что при облучении нейтронами атомов урана они делятся на две части. «Осколками» деления были элементы из середины таблицы Менделеева — барий и лантан. Осколки порождали два или три свободных нейтрона на каждый акт деления ядра изотопа ^{235}U (рис. 4.5). Эти нейтроны могли поглощаться ядрами других атомов урана, приводя к их делению. Реакция поддерживала сама себя «по цепочке» — от атома к атому, отчего и получила название цепной. Поскольку при делении одного ядра урана выделяется энергия примерно 200 МэВ, осуществление *управляемой* цепной реакции решает проблему использования огромной энергии, заложенной природой в атомных ядрах.

Часть нейтронов, освобождающихся при делении ядер урана, покидает образец, другая их часть участвует

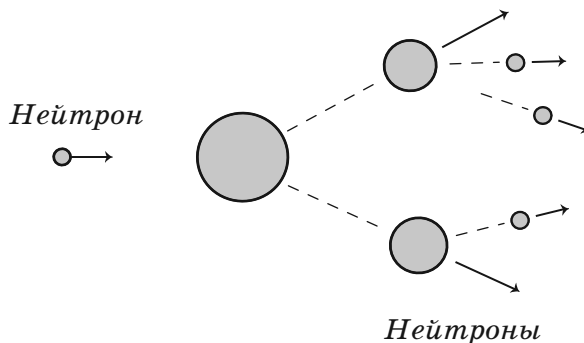


Рис. 4.5

в поддержании цепной реакции, приводя к появлению следующего поколения нейтронов в результате деления новых ядер.

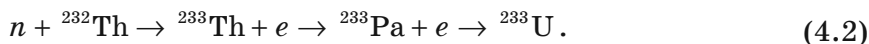
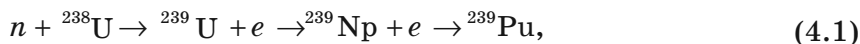
Отношение среднего числа нейтронов, образовавшихся в n -м поколении, к среднему числу нейтронов в предыдущем поколении называется *коэффициентом размножения нейтронов*:

$$k = \frac{N_n}{N_{n-1}}.$$

Если это число меньше единицы, цепная реакция будет затухать. При $k > 1$ реакция идет с нарастанием мощности, выделяющейся в виде тепла, и приводит к взрыву, поскольку время жизни одного поколения нейтронов очень мало и составляет от 10^{-8} до 10^{-4} с.

Для осуществления *управляемой* цепной реакции нужно поддерживать коэффициент размножения, равным единице. Условием ее начала является наличие такого количества делящегося вещества, чтобы на пути нейтронов, образующихся при делении ядер, число ядер, с которыми они встретятся, в следующем поколении было не меньше числа таких ядер в предыдущем поколении. Отсюда возникает понятие о *критическом объеме* делящегося вещества. Для урана-235 это шар радиусом $R_{кр} = 9,2$ см. Масса содержащегося в нем урана — *критическая масса* — $m_{кр} \approx 62$ кг (плотность урана $\rho = 18,9$ г/см³). Режим реакции называется *критическим*, если $k = 1$, и *надкритическим* при $k > 1$.

Цепная реакция деления осуществима на трех изотопах — изотопах урана ^{235}U и ^{233}U , а также на изотопе плутония ^{239}Pu . Первый из них встречается в природе, а два других можно изготовить в промышленных масштабах с помощью реакций под действием нейтронов:



Указанные здесь промежуточные вещества — нептуний Np и протактиний Pa — имеют малые периоды полураспада и распадаются с испусканием электронов.

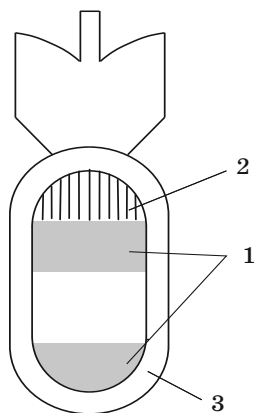


Рис. 4.6

Надкритический режим осуществляется при взрыве *атомной бомбы*. В качестве взрывчатого вещества в ней берется уран-235 или плутоний-239. Общая его масса, превышающая критическую, разделена в бомбе на две или несколько частей с массами, меньшими критической (1 на рис. 4.6). Для их объединения используется обычное взрывчатое вещество — запал 2, с помощью которого одной частью вещества выстреливают в другую. Оболочка 3 из тяжелого металла обеспечивает плотное их соединение и одновременно служит отражателем нейтронов. Несмотря на это, во время взрыва успевает прореагировать только часть ядерного заряда.

При взрыве освобождается огромная энергия, а температура в его эпицентре превышает миллионы градусов. Взрыв атомной бомбы эквивалентен взрыву десятков тысяч тонн обычного

взрывчатого вещества — тротила. Опасность атомного взрыва усугубляется тем, что, кроме разрушений и пожаров, он оставляет много радиоактивных остатков на месте взрыва и в атмосфере. Эти остатки возникают как в виде радиоактивных продуктов деления ядер, так и в виде наведенной активности ядер окружающей среды, поглотивших нейтроны, выделяющиеся при взрыве в огромном количестве.

4.1.6. Ядерные реакторы

Управляемая цепная реакция осуществляется в *ядерных реакторах*. В качестве делящегося вещества в них используется природный уран или уран, обогащенный изотопом ^{235}U или торием ^{233}Th . В природном уране содержится 99,3 % изотопа ^{238}U и 0,7 % изотопа ^{235}U . Вторичные нейтроны, образовавшиеся в результате деления его ядер, имеют энергию $W \geq 1$ МэВ и относятся к разряду *быстрых* нейтронов. *Медленными* (или *тепловыми*) являются нейтроны, энергия которых соответствует температуре окружающей среды ($T = 300$ К). Изотоп урана-235 делится под действием как быстрых, так и медленных нейтронов, изотоп урана-238 — под действием только быстрых. Однако гораздо чаще ядра этого изотопа поглощают нейтроны без деления и превращаются в изотоп плутония-239 согласно реакции (4.1).

В ядерных реакторах, предназначенных для получения тепловой энергии, нейтроны, образовавшиеся в процессе деления ядер урана, нужно замедлить до тепловых скоростей, прежде чем они вступят во взаимодействие с новыми атомами урана. Для этого используют *замедлитель* — вещество, которому они отдают большую часть своей энергии. Наиболее подходящими для этой роли являются ядра, масса которых соизмерима с массой нейтрона, поскольку, по законам механики, в этом случае обмен энергией происходит наиболее эффективно. В идеале это ядра атомов водорода. Однако они сильно поглощают нейтроны, превращаясь в ядра изотопа тяжелого водорода — дейтерия D, состоящие из протона и нейтрона. Поэтому в качестве замедлителя используется тяжелая вода D_2O , служащая одновременно и теплоносителем, предназначенным для отвода выделяющегося в реакции тепла.

В ядерных реакторах, построенных в СССР, использовался графит — углерод ^{12}C , тщательно очищенный от примесей, поглощающих нейтроны.

Горючее вещество ядерного реактора (уран) изготавливается в виде цилиндрических стержней — тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), которые располагаются в его теле на некотором расстоянии друг от друга (рис. 4.7). Между ними находится замедлитель. Потеря нейтронов в замедлителе, ядрах урана-238 и продуктах деления заставляет строить реакторы, обладающие надкритиче-

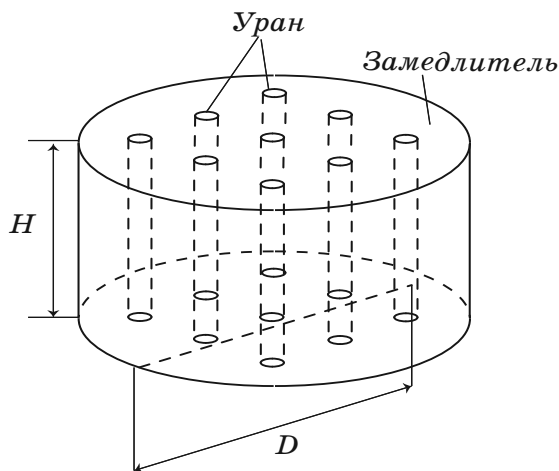


Рис. 4.7

скими размерами, способными вырабатывать излишек нейтронов (диаметр такого реактора цилиндрической формы составляет приблизительно 6 м, высота — 5,5 м). Излишек нейтронов устраняется добавочно вводимыми в реактор поглотителями в виде стержней из *бора* или *кадмия* (не показанных на рисунке). Перемещение стержней в активной зоне реактора позволяет регулировать скорость цепной реакции, поддерживая ее на постоянном уровне. Стержни, а также шарики из этих материалов используются для быстрого прекращения реакции в случае аварии.

Реактор не работает, когда стержни — поглотители нейтронов — достаточно глубоко вдвинуты в его тело. Для начала работы стержни нужно выдвинуть, чтобы обеспечить возрастание потока нейтронов. Тепловые нейтроны имеют скорость 2—3 км/с. С момента образования и до момента поглощения каждого нейтрона проходит время $\sim 10^{-3}$ с. При возрастании числа нейтронов в следующем поколении всего на 0,5 % и времени жизни одного поколения 10^{-3} с мощность реактора за 1 с возрастает в $(1,005)^{1000} \approx 150$ раз, поэтому никакая регулировка здесь неосуществима. Однако природа дала человеку возможность избежать этого. Часть нейтронов (около 0,7 %), испускаемых осколками деления, появляется не мгновенно, а спустя время от 0,1 до 10 с. Это позволяет производить плавную регулировку скорости цепной реакции и обеспечивать безопасность ядерного реактора.

Теплоноситель, используемый в реакторе для отвода тепла, циркулирует в его теле по трубам, а затем в теплообменнике нагревает воду, которая, превращаясь в пар, вращает лопасти паровой турбины, соединенной с генератором, вырабатывающим электроэнергию. В качестве теплоносителя вместо тяжелой воды часто используют расплавленный металлический натрий или его смесь с калием.

Промышленные ядерные реакторы атомных электростанций работают на природном уране, как правило, обогащенном изотопом ^{235}U до концентрации 5 %. Изотоп ^{238}U составляющий основную массу природного урана, в процессе работы реактора превращается в плутоний-239, который по своим радиоактивным свойствам аналогичен урану-235. Ядерные реакторы на быстрых нейтронах, называемые *реакторами-размножителями*, работают без замедлителя. Выделение плутония из продуктов реакции — сравнительно несложная задача, поскольку производится химическим путем. В результате весь добываемый уран может использоваться для производства электрической энергии, стоимость которой оказывается ниже стоимости энергии, вырабатываемой на тепловых станциях.

Атомные станции экологически более безопасны, так как гораздо меньше загрязняют окружающую среду, но они несут большую угрозу жизни в случае аварии.

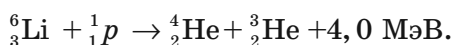
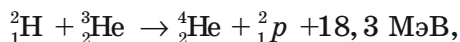
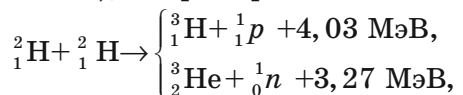
4.1.7. Термоядерные реакции. Проблема управляемого термоядерного синтеза

Ядерные реакции, в которых легкие ядра путем их слияния превращаются в более тяжелые, называются **реакциями синтеза**. В природе они широко распространены — в недрах Солнца и звезд изотопы водорода ^2_1H и ^3_1H (*дейтерий* и *тритий*) «сгорают» с образованием атомов гелия ^4_2He . При этом образу-

ются нейтроны, а выделяющаяся энергия примерно в четыре раза превосходит энергию, которую можно получить в реакциях распада тяжелых ядер (в расчете на одно ядро):



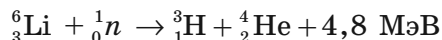
Существует много других *эндотермических* ядерных реакций синтеза (происходящих с выделением тепла), например:



Все они осуществляются по одному принципу — соединение ядер происходит под действием ядерных сил, которые проявляют себя на коротких расстояниях $r_{\min} \sim 10^{-13}$ м, соизмеримых с размерами самих ядер, поэтому ядра атомов нужно сблизить до этого расстояния. Поскольку все ядра несут положительный заряд, между ними действуют электрические силы отталкивания, тем большие, чем больше этот заряд. Легче всего осуществить сближение ядер изотопов водорода ($Z = 1$). Это возможно сделать, если газ из них нагреть до температуры, при которой кинетической энергии ядер будет достаточно, чтобы совершить работу по преодолению этих сил и сблизиться до расстояния r_{\min} .

Для изотопов водорода (реакция (4.3)) эта температура составляет примерно 150 млн градусов. В силу этого ядерные реакции синтеза называются *термоядерными реакциями*. Столь высокие температуры наблюдаются в недрах звезд. В земных условиях термоядерная реакция впервые была осуществлена при испытании водородной бомбы в 1953 г. в СССР. В качестве «запала» использовался взрыв атомной бомбы, при котором также развивается высокая температура. Мощность водородной бомбы принципиально ничем не ограничена и достигает 100 мегатонн в тротиловом эквиваленте. (Для сравнения укажем, что мощность атомных бомб, использованных США против Японии в городах Хиросима и Нагасаки в 1945 г., составляла по 20 килотонн каждая.)

Осуществление управляемой термоядерной реакции является проблемой, над которой уже более полувека работают ученые разных стран мира. Привлекательность ее связана с тем, что запасы тяжелого водорода — дейтерия — в воде Мирового океана практически неисчерпаемы. Он входит в состав молекул тяжелой воды D_2O или DNO , концентрация которой составляет 0,015 % (D — дейтерий ${}^2_1\text{H}$). Тяжелый водород — тритий ${}^3_1\text{H}$ — имеет период полураспада $T = 12,3$ года и поэтому в природе не встречается. Однако он может быть получен искусственно в реакции



путем облучения изотопа лития ${}^6_3\text{Li}$ нейтронами ядерного реактора. Запасов лития на Земле хватит на сотни тысяч лет. Кроме того, продукты ядерных реакций синтеза не радиоактивны.

Сложность термоядерной проблемы заключается в том, что при очень высоких температурах вещество находится в ионизированном состоянии — в виде *плаз-*

мы. В этом состоянии электроны отделены от атомов и существуют наряду с ядрами атомов в виде отдельных частиц. Несмотря на то, что оба вида частиц плазмы несут заряды, в целом плазма электронейтральна.

Для осуществления термоядерной реакции требуется создать плазму достаточно высокой плотности, нагреть ее до температуры сотни миллионов градусов и поддерживать в подвешенном состоянии достаточно большое время (~ 1 с), не давая соприкасаться со стенками сосуда, в котором она находится. При этом нужно еще осуществить отвод выделившейся энергии и добиться, чтобы ее количество превышало количество энергии, затраченной на запуск реакции. Несмотря на достигнутые здесь успехи, осуществить управляемую термоядерную реакцию, имеющую промышленное значение, человечеству пока не удалось.

Вопросы для самопроверки

1. Опишите строение атома. Каковы размеры атома и атомного ядра?
2. Из чего состоит атомное ядро? Что такое массовое число, заряд ядра?
3. Что называется изотопами? Как принято обозначать ядра атомов?
4. Что такое радиоактивность? Какими явлениями сопровождается распад радиоактивных атомов?
5. Разъясните суть закона смещения.
6. Что называется периодом полураспада ядер атомов? От чего он зависит?
7. Что такое ядерные силы? Каковы их свойства и как определяется энергия связи ядра?
8. Что называется ядерными реакциями? При каких воздействиях на ядро они могут протекать?
9. Поясните суть цепной ядерной реакции. Что такое критическая масса делящегося вещества и коэффициент размножения нейтронов?
10. Какие изотопы участвуют в цепной ядерной реакции? Как протекает неуправляемая цепная реакция?
11. Разъясните принцип работы ядерного реактора. Для чего нужен замедлитель нейтронов и какие вещества могут использоваться для этих целей?
12. При каких условиях осуществляется ядерная реакция синтеза? Почему такая реакция называется термоядерной?
13. Каковы преимущества ядерных реакций синтеза перед реакциями деления ядер?
14. Где в природе происходят термоядерные реакции? Какие проблемы стоят на пути осуществления управляемого термоядерного синтеза?

Тренировочные тестовые задания к разделу «Квантовые явления»

При выполнении заданий с выбором ответа обведите кружком номер правильного ответа.

1. Ядра атомов состоят из ...
 - 1) протонов
 - 2) нейтронов
 - 3) протонов и нейтронов
 - 4) протонов, нейтронов и электронов

2. Атомное ядро висмута ${}_{83}^{214}\text{Bi}$ в результате ряда радиоактивных превращений превратилось в ядро свинца ${}_{82}^{210}\text{Pb}$. Какие виды радиоактивных превращений оно испытало?
 - 1) α -распад
 - 2) β -распад
 - 3) α -распад и β -распад
 - 4) β -распад, α -распад, β -распад

3. Какие частицы, входящие в состав атомов, несут положительный заряд?
 - 1) электроны
 - 2) протоны
 - 3) нейтроны
 - 4) фотоны

4. Какие частицы участвуют в поддержании цепной ядерной реакции?
 - 1) электроны
 - 2) протоны
 - 3) α -частицы
 - 4) нейтроны

5. Определите второй продукт X ядерной реакции:
$${}_{13}^{27}\text{Al} + n \rightarrow {}_{11}^{23}\text{Na} + X.$$
 - 1) α -частица
 - 2) нейтрон
 - 3) протон
 - 4) электрон

Ответы

Раздел 1

1. 3; 2. 1; 3. 4; 4. 3; 5. 3; 6. 2; 7. 4; 8. 4; 9. 3; 10. 2; 11. 2; 12. 3; 13. 4; 14. 4; 15. 4; 16. 4;
17. 4; 18. 3; 19. 2; 20. 3; 21. 4; 22. 3; 23. 4; 24. Полый; 25. $1,7 \text{ м/с}^2$; 26. $v_2 = \frac{m_1}{m_2} v_1 = 1,75 \text{ м/с}$;
27. $F = m \left(\mu g + \frac{2S}{t^2} \right) = 8,4 \text{ кН}$; 28. $\mu = \frac{F \cdot \cos \alpha}{mg - F \cdot \sin \alpha} = 0,3$; 29. 4; 30. 3; 31. 3; 32. 1;
33. 2; 34. 2; 35. 4; 36. $K = \frac{m^2 v^2}{2(M + m)} = 4 \text{ Дж}$; 37. $S = \left(\frac{m}{M} \right)^2 \frac{v^2}{2\mu g} = 28 \text{ см}$; 38. 2; 39. 1;
40. $h = \frac{\rho}{\rho_b} a = 5,2 \text{ см}$; 41. $\rho = \rho_b \cdot \frac{g}{g - a} = 2,45 \text{ г/см}^3$; 42. $h = \frac{\rho_b h_b - \rho_k h_k}{\rho_{pt}} = 4,7 \text{ см}$; 43. 3;
44. 3; 45. 4; 46. 4; 47. 2; 48. 2; 49. $K = \frac{1}{2} k A^2 = 0,44 \text{ Дж}$; 50. $v = \frac{2\pi A}{T} = 0,048 \text{ м/с}$

Раздел 2

1. 3; 2. 2; 3. 3; 4. 3; 5. 3; 6. 4; 7. 4; 8. $m_1 = \frac{Q - cm\Delta t}{L} = 0,07 \text{ кг}$; 9. $\Delta t_c = \frac{c_m \rho_m}{c_c \rho_c} \Delta t = 64 \text{ }^\circ\text{C}$;
10. $c = \frac{m_b (\Theta - t_b)}{m(100 - \Theta)} c_b = 0,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C}}$; 11. $m = 510 \text{ г}$; 12. $D_1 = 80 \text{ \%}$.

Раздел 3

1. 3; 2. 3; 3. 2; 4. 4; 5. 3; 6. 3; 7. 2; 8. 4; 9. 3; 10. 4; 11. 3; 12. 4; 13. 2; 14. 2; 15. 3; 16. 3;
17. 2; 18. 3; 19. 2; 20. 1; 21. 2; 22. $q_1 = q_2 = -4 \text{ нКл}$; 23. $q = +2 \text{ нКл}$; 24. $N = \frac{I \cdot t}{e} = 8,44 \cdot 10^{21}$;
25. $U_1 = 10 \text{ В}$, $I_1 = 10 \text{ А}$; $U_2 = 15 \text{ В}$, $I_2 = 7,5 \text{ А}$; $U_3 = 15 \text{ В}$, $I_3 = 2,5 \text{ А}$; 26. Ток течет снизу
вверх; 27. Проводники притягиваются друг к другу; 28. Вдоль линии, соединяющей их
центры, разноименными полюсами друг к другу; 29. Влево, перпендикулярно линиям
магнитного поля; 30. Индукционный ток будет течь по направлению хода часовой стрел-
ки; 31. 6 м; 32. На 40 см.

Раздел 4

1. 3; 2. 3; 3. 2; 4. 4; 5. 1.

**ЭФФЕКТИВНАЯ
ПОДГОТОВКА
К ОГЭ**

ОГЭ



ПОЛУЧИ ВЫСШИЙ БАЛЛ НА ОГЭ!

ИЗДАНИЕ ПОМОЖЕТ:

- сократить время подготовки к ОГЭ;
- повторить все темы курса;
- отработать навыки выполнения заданий разных типов.

ФИЗИКА

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СПРАВОЧНИК

В серии «ОГЭ. Универсальный справочник» выходят пособия по основным школьным предметам: русскому языку, литературе, математике, истории, обществознанию, биологии, информатике, химии и физике.

