

Федеральный государственный образовательный стандарт
Образовательная система «Школа 2100»

С.М. Андрюшечкин

ФИЗИКА

9 класс



МОСКВА

БАХАСС

2015

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я721
А65

Федеральный государственный образовательный стандарт
Образовательная система «Школа 2100»



Совет координаторов предметных линий Образовательной системы «Школа 2100» – лауреат премии Правительства РФ в области образования за теоретическую разработку основ образовательной системы нового поколения и её практическую реализацию в учебниках

На учебник получены положительные заключения по результатам научной экспертизы (заключение РАН от 29.09.2011 № 10106-5215/36), педагогической экспертизы (заключение РАН от 10.01.2014 № 000431) и общественной экспертизы (заключение НП «Лига образования» от 30.01.2014 № 204)

Руководитель издательской программы –
член-корр. РАО, доктор пед. наук, проф. *Р.Н. Бунеев*

А65 Андрюшечкин, С.М.
Физика. 9 кл. : учеб. для организаций, осуществляющих образовательную деятельность / С.М. Андрюшечкин. – М. : Баласс, 2015. – 320 с. : ил. (Образовательная система «Школа 2100»).

ISBN 978-5-85939-908-6

Учебник «Физика» для 9 класса соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту основного общего образования. Является составной частью комплекта учебников развивающей Образовательной системы «Школа 2100».

Учебник позволяет организовать изучение курса физики на основе деятельностного подхода, используя в качестве одного из основных методов проблемное обучение.

Может использоваться как учебное пособие.

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я721

Данный учебник в целом и никакая его часть не могут быть скопированы
без разрешения владельца авторских прав

ISBN 978-5-85939-908-6

© Андрюшечкин С.М., 2012
© ООО «Баласс», 2012

Обращение к ученику

Зачем мы будем учиться? В девятом классе вы завершаете изучение первой ступени школьного курса физики. Поэтому «Физика-9» – это одновременно и определённое подведение итогов, и продвижение вперёд. Вы уже изучали некоторые механические и электромагнитные явления. В девятом классе дополнительно изучите механические и электромагнитные колебания и волны. Вам уже известно, каково строение атома и атомного ядра. Теперь вам предстоит углубить свои знания и познакомиться с основами квантовой физики – современной физики, объясняющей свойства микромира¹.

Физика как учебный предмет предоставляет вам возможность:

- сформировать достоверные *научные представления* об окружающем мире;
- освоить знания об основных *методах* познания природы, физических явлениях и характеризующих эти явления *физических величинах*, а также *законах*, которым явления подчиняются;
- развить свои умственные и творческие *способности, умение применять* полученные знания на практике.

Приобретённые знания и умения позволят вам быть *более успешным и современным человеком*, будут являться основой при изучении других наук о природе и пригодятся в жизни. Эти умения (они называются универсальными, то есть пригодными для многих целей) развиваются при выполнении специальных заданий. Такие задания в учебнике обозначены кружками и фоном условных знаков разного цвета.

Каждый цвет соответствует определённой группе умений:

-   – организовывать свои действия: ставить цель, планировать работу, действовать по плану, оценивать результат;
-   – работать с информацией: самостоятельно находить, осмысливать и использовать её;
-   – общаться и взаимодействовать с другими людьми, понимать других, сотрудничать.

¹ Микромиром физики называют мир малых частиц (электронов, протонов, атомов).

Как мы будем учиться? Вы продолжаете изучение курса физики по учебнику Образовательной системы «Школа 2100». Цель Образовательной системы – помочь вам научиться:

- планировать и организовывать свои дела,
- мыслить и уметь работать с информацией,
- оценивать полученные результаты и разрешать возникающие противоречия.

На уроках точно так же, как и в жизни, вам придётся сталкиваться с противоречивыми фактами и суждениями, неожиданными результатами опытов и наблюдений. Так возникают проблемные ситуации. Чем лучше вы научитесь оценивать противоречивую информацию и формулировать проблему, чем больше приёмов и методов решения проблем освоите – тем успешнее обучение, тем вы ближе к достижению цели – получению образования.

Но можно ли добиться успеха в учёбе, если быть только сторонним наблюдателем и исполнителем? Вы, вероятно, согласитесь, что цель может быть достигнута только при вашем *активном деятельностном подходе* к учебной работе.

Что надо обязательно запомнить? Ни один человек не может знать и запомнить всё. В учебнике приведено много интересных сведений, предложено много заданий, решено много задач. Это максимум, который вы можете изучить и освоить при желании. Но есть и обязательный минимум, который должен освоить каждый.

В тематической тетради, которой вы будете пользоваться совместно с учебником, предложены обязательные (минимум) и дополнительные (максимум) домашние задания, опорные конспекты и справочник по физике (минимум).

Как работать с учебником и тематической тетрадью? Учебник «Физика-9» предназначен для работы под руководством учителя в течение всего учебного года. В тексте учебника то, на что вам нужно обратить внимание, выделено *курсивом*. То, что необходимо обязательно запомнить (желательно дословно), выделено **жирным шрифтом**.

Вашей успешной работе помогут:

Оглавление. Позволяет ориентироваться во всём учебнике.

Содержание раздела учебника. В нём дополнительно указаны названия отдельных частей параграфов. В тексте учебника названия отдельных частей параграфов выделены **цветом**.

Заключения к разделам учебника. В них кратко перечисляются основные физические понятия, изучавшиеся в данном разделе учебника.

P. S.¹ В постскриптурах упоминаются наиболее интересные проблемы, оставшиеся «за горизонтом» при изучении раздела.

Предметно-именной указатель. Позволяет быстро найти в учебнике значение того или иного понятия или сведения об учёном.

На переднем форзаце² учебника приведены планы ответов о физических понятиях. Научитесь работать по этим планам. Вы будете пользоваться ими и в дальнейшем (и не только на уроках физики). На заднем форзаце размещены справочные таблицы.

Обязательно обратите внимание на условные обозначения, использованные в учебнике.



– Вопрос, на который следует ответить, прежде чем дальше читать текст учебника.



– Формулировка проблемы.



– Работа в группе.



– Важнейшие понятия, которые необходимо обязательно знать.



– Основные понятия, изученные в параграфе.

Понятия, набранные жирным шрифтом, необходимо знать и уметь применять (минимум).

Понятия, набранные обычным шрифтом, относятся к максимуму.



– Материал для дополнительного чтения (максимум).

Каждый параграф учебника завершается заданиями, выполнение которых поможет вам лучше освоить изучаемый материал; задания содержатся также и в тематической тетради.

¹ P. S. – постскриптур (от латинского *post scriptum* – после написанного) – приписка к оконченному и подписанному письму, обыкновенно обозначаемая P. S.

² Форзац – двойной лист бумаги, соединяющий книгу с переплётом.

Приступая к выполнению задания, обратите внимание на условное обозначение, указывающее на характер задания.

● – Репродуктивное задание. Ответ на такое задание можно найти непосредственно в учебнике.

● – Продуктивное задание. Ответа на задание в готовом виде нет. Но текст и иллюстрации учебника позволяют «подобрать ключи» к выполнению задания. Такие задания проверяют, можете ли вы применять полученные знания.



– Задания с использованием компьютера (информационных технологий).



– Самостоятельная исследовательская работа.

Успехов!

Раздел 1. ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

В этом разделе учебника вы познакомитесь с тем, как производят расчёт координаты и скорости движущегося тела в простейших случаях неравномерного прямолинейного движения и равномерного движения по окружности. Вы изучите законы Ньютона, являющиеся основой механики, и выясните, как определяют силу всемирного тяготения, силу упругости и силу трения скольжения. В дополнение к уже известному вам закону сохранения энергии вы узнаете о законе, благодаря которому движутся космические ракеты, – законе сохранения импульса.



Вспомните понятия, изучавшиеся в курсе физики 7 класса, и ответьте на вопросы:

- Что такое механическое движение?
- Что называют траекторией? Чем различаются траектории движущихся тел?
- Что такое путь?
- Какое свойство механического движения характеризует физическая величина «скорость»?
- Что характеризует физическая величина «сила»? Какие виды механических сил вам известны?
- Что такое энергия? Какие виды механической энергии вам известны? Как формулируется закон сохранения энергии?
- Какими величинами – векторными или скалярными – являются путь, скорость, сила, энергия?
- В каких единицах измеряются путь, скорость, сила, энергия?

§ 1. Механическое движение. Равномерное движение

Механическое движение

Перемещение – векторная величина

Скорость равномерного движения

Примеры решения задач

§ 2. Неравномерное движение. Ускорение

Неравномерное движение

Ускорение равноускоренного движения

Перемещение тела при равноускоренном движении

§ 3. Решение задач по теме «Равноускоренное движение».

Лабораторная работа «Определение ускорения

равноускоренного движения»

Примеры решения задач

Лабораторная работа «Определение ускорения

равноускоренного движения»

- § 4. **Движение по окружности**
 - Криволинейное движение
 - Центростремительное ускорение
 - Период и частота вращения
 - Примеры решения задач
- § 5. **Законы Ньютона**
 - Из истории развития механики
 - Первый закон Ньютона
 - Второй закон Ньютона
 - Третий закон Ньютона
- § 6. **Решение задач с использованием законов Ньютона**
 - Алгоритм решения задач по механике
 - Примеры решения задач
- § 7. **Лабораторная работа «Проверка II закона Ньютона»**
 - Анализ движения тела
 - Лабораторная работа «Проверка II закона Ньютона»
- § 8. **Закон всемирного тяготения**
 - Закон всемирного тяготения
 - Сила тяжести. Ускорение свободного падения
 - Искусственные спутники Земли
- § 9. **Сила упругости**
 - Основные сведения о силе упругости
 - Лабораторная работа «Изучение силы упругости»
 - Вес тела. Невесомость
- § 10. **Сила трения**
 - Основные сведения о силе трения
 - Лабораторная работа «Изучение силы трения скольжения»
- § 11. **Импульс. Закон сохранения импульса**
 - Что такое законы сохранения
 - Импульс. Закон сохранения импульса
 - Значение закона сохранения импульса
 - Реактивное движение
 - Пример решения задачи
- § 12. **Лабораторная работа**
 - «Опытная проверка закона сохранения импульса»
- § 13. **Механическая энергия. Работа. Мощность**
 - Механическая энергия
 - Механическая работа
 - Мощность

§ 14. Вывод формул для расчёта механической энергии

Механическая работа и энергия

Кинетическая энергия

Потенциальная энергия при взаимодействии силой тяготения

Потенциальная энергия при упругой деформации

Обоснование закона сохранения механической энергии

Примеры решения задач

Самое важное в разделе «Основы механики»

P.S.

§ 1. МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ. РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ



Больше всего – пространство, ибо оно вмещает всё. Быстрее всего – мысль, ибо она бежит без остановки. Сильнее всех – необходимость, ибо она преодолевает всех. Мудрее всего – время, ибо оно обнаруживает всё.

*Фалес Милетский (ок. 625 – ок. 547 до н. э.),
древнегреческий мыслитель*

Вы знаете, что физика – наука о природе. В одном из разделов физики – механике – изучается механическое движение.

Механическое движение. Первый раздел учебника – «Основы механики». В этом разделе изложено содержание важнейших законов механического движения. Такое начало учебника не случайно – ведь и мы, и окружающие нас тела существуем в пространстве – времени, совершаем механическое движение.

Пространство и время – основные понятия всех разделов физики. Пространство выражает порядок сосуществования отдельных тел, а время – порядок смены явлений. Внутреннее содержание этих понятий раскрывается, углубляется и уточняется в ходе развития физики.

Механическое движение – это изменение положения тела в пространстве относительно других тел с течением времени.

Что нужно предпринять, приступая к изучению механического движения?



Рис. 1

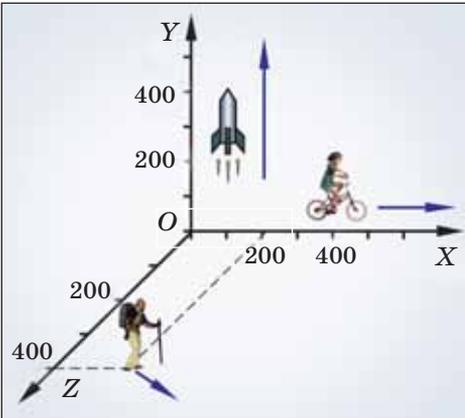


Рис. 2

будет определить, в какой момент времени движущееся тело находится в той или иной точке пространства.

Тело отсчёта, система координат и прибор для отсчёта времени образуют **систему отсчёта**.

В разных системах отсчёта механическое движение одного и того же тела различно. Так, относительно системы отсчёта, в которой за тело отсчёта принят рыбак (рис. 1), пассажир лодки движется. Относительно системы отсчёта, в которой за тело отсчёта принята сама лодка, этот же пассажир находится в покое. Как вы знаете, это свойство движения называется *относительностью механического движения*.

Во-первых, необходимо выбрать *тело отсчёта* – то есть тот предмет, относительно которого указывается положение движущегося тела. Например, при изучении движения лодки за тело отсчёта можно принять и мостик, и рыбака на берегу реки (рис. 1).

Во-вторых, необходимо выбрать *систему координат*. Это позволит указать направление движения и положение движущегося тела. Например, на рисунке 2 изображены движущиеся тела – ракета, турист и велосипедист. Ракета движется вдоль оси OY и имеет в некоторый момент времени координаты

$$x = 0 \text{ м}, y = 300 \text{ м}, z = 0 \text{ м}.$$

Координаты туриста:

$$x = 200 \text{ м}, y = 0 \text{ м}, z = 400 \text{ м}.$$



1.1. В каком направлении движется велосипедист и каковы его координаты (рис. 2)?

В-третьих, необходим *прибор для измерения времени*. Ведь без такого прибора (часов) нельзя

Изучая движение тела, например, определяя его координату, как правило, не берут во внимание размеры *самого* тела, считая его материальной точкой. **Материальной точкой называют тело, размеры которого можно не учитывать при анализе рассматриваемого движения.** Одно и то же тело не при всяком движении может быть принято за материальную точку. Например, если спортсмен движется по марафонской дистанции, то его можно считать материальной точкой, если же он выполняет приседания – то нет.

Перемещение – векторная величина. Пусть при движении автомобиль переместился из первоначальной точки A в последующую точку B (рис. 3). Напомним, что линия, по которой движется тело, называется *траекторией*, а длина траектории – *путь*, пройденный движущимся телом.

Соединим первоначальную точку A с последующей точкой B отрезком AB . Зададим направление этого отрезка – от точки A к точке B (рис. 3). Направленные отрезки в математике называют *векторами*. Обозначают векторы стрелкой, которую ставят над буквенным обозначением величины. Например, \vec{F} – вектор силы, \vec{v} – вектор скорости.

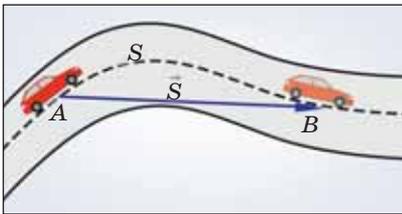


Рис. 3

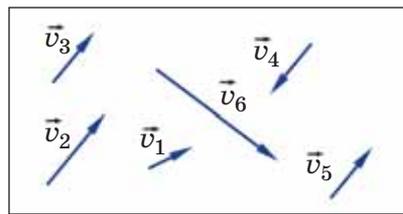


Рис. 4



1.2. Какие величины в математике называют скалярными?

Векторные величины характеризуются длиной вектора (модулем вектора) и его направлением. Векторы равны между собой, если равны модули векторов и совпадают направления векторов. Так, из векторов, изображённых на рисунке 4, равны между собой только векторы \vec{v}_3 и \vec{v}_5 :

$$\vec{v}_3 = \vec{v}_5.$$

Вектор, соединяющий начальное положение тела с его последующим положением, называют перемещением тела \vec{S} .

Различаются ли такие понятия, как путь, пройденный телом S , и перемещение \vec{S} ? Конечно же, да. Ведь путь S – это скалярная величина, а перемещение \vec{S} – величина векторная. Путь характеризуется только численным значением, а перемещение – и численным значением, и направлением.

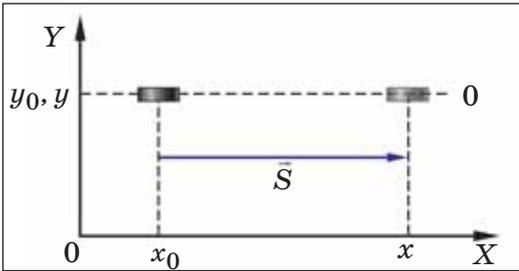


Рис. 5

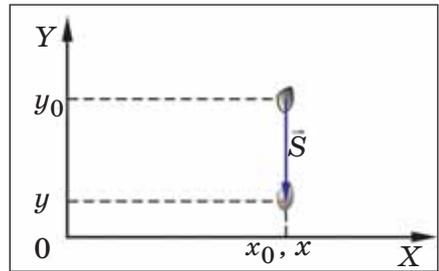


Рис. 6

В дальнейшем мы чаще всего будем рассматривать *прямолинейное движение*, когда траекторией движущегося тела является прямая линия.

Например, шайба, скользящая по горизонтальному льду, или камень, падающий вертикально вниз, движутся прямолинейно (рис. 5, 6). В случае прямолинейного движения перемещение тела направлено вдоль траектории движения.

Обратимся к рисунку 5. Из начала вектора \vec{S} опустим перпендикуляр на ось X – перпендикуляр пересекает ось в точке x_0 . Точку x_0 назовём проекцией начала вектора. Из конца вектора \vec{S} опустим перпендикуляр на ось X – перпендикуляр пересекает ось в точке x . Точку x назовём проекцией конца вектора.

Отрезок от проекции начала вектора до проекции конца вектора называют **проекцией вектора на данную ось**. Причём если координата проекции конца вектора больше координаты начала вектора, то проекция вектора считается положительной. Если же координата проекции конца вектора меньше координаты начала вектора, то проекция вектора считается отрицательной.

Чему же равны проекция вектора \vec{S} на ось X и проекция вектора \vec{S} на ось Y (рис. 5)? Проекция S_x (читается: эс икс) вектора \vec{S} на ось X равна

$$S_x = x - x_0. \quad (1.1)$$

Проекция S_y (читается: эс игрек) вектора \vec{S} на ось Y равна

$$S_y = y - y_0.$$

В рассматриваемом случае

$$S_y = 0.$$



1.3. Рассмотрите рисунок 6. Чему равна проекция вектора \vec{S} на ось X ? Положительна или отрицательна проекция вектора \vec{S} на ось Y ?

Проекция вектора – скалярная величина. Как правило, решая физические задачи и проводя вычисления, определяют скалярные величины – проекции векторов. Зная же проекции вектора, при необходимости легко определить и величину (модуль) вектора, и направление вектора.

Скорость равномерного движения. Напомним, что скорость – физическая величина, характеризующая быстроту механического движения. Наиболее просто определить скорость для случая равномерного движения. **Равномерным называют такое движение, при котором тело за любые равные между собой промежутки времени совершает одинаковые перемещения** (рис. 7).

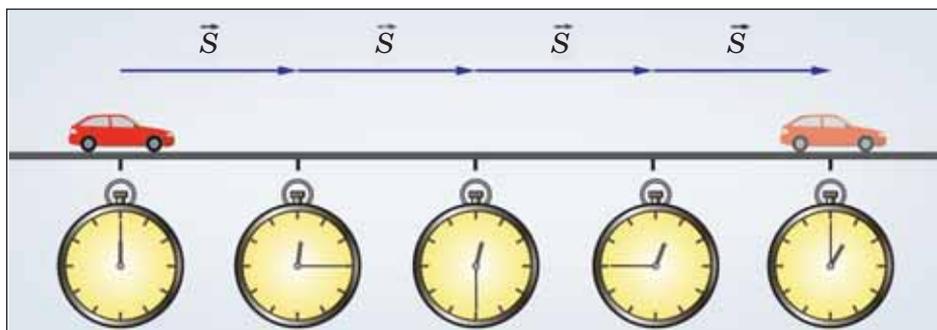


Рис. 7



1.4. Почему только прямолинейное движение может быть равномерным? (Подсказка. Вспомните, когда два вектора равны между собой.)

Скорость равномерного движения – это величина, равная перемещению тела за единицу времени.

$$\vec{v} = \frac{\vec{S}}{t} \quad (1.2)$$

Проекции v_x и v_y вектора скорости на оси X и Y при этом вычисляются по формулам:

$$v_x = \frac{S_x}{t} \quad (1.3)$$

$$v_y = \frac{S_y}{t} \quad (1.4)$$

Совместим направление оси X с направлением перемещения (рис. 8). Тогда $S_y = 0$ (почему?) и $v_y = 0$ (почему?).

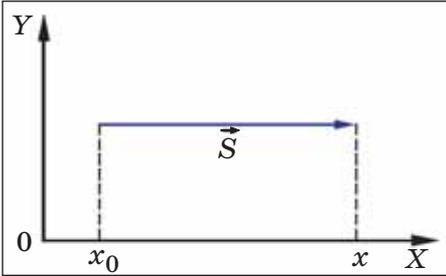


Рис. 8

При таком выборе направления осей координат тело перемещается только вдоль *одной* координатной оси. В формулах (1.1), (1.3) *можно не указывать, что проекции векторов определяются именно на ось X*. В этом случае записи выражений, содержащих проекции векторов, упростятся. Так, выражения (1.1), (1.3) можно записать в виде

$$S = x - x_0, \quad (1.5)$$

$$v = \frac{S}{t}. \quad (1.6)$$

Подставив выражение (1.5) в (1.6), имеем

$$v = \frac{x - x_0}{t}. \quad (1.7)$$

Последняя формула позволяет определить проекцию скорости равномерного движения.

Зная начальную координату x_0 и проекцию скорости v , нетрудно определить координату x равномерно движущегося тела в любой момент времени t .

Действительно,

$$v = \frac{x - x_0}{t},$$

$$\frac{x - x_0}{t} = v,$$

$$x - x_0 = vt,$$

$$x = x_0 + vt. \quad (1.8)$$

Изобразим графически зависимость координаты тела x от времени t . Пусть тело движется в направлении оси X со скоростью 10 м/с из точки с координатой 30 м.

$$x_0 = 30 \text{ м}, v = 10 \text{ м/с}.$$

$$x = 30 + 10t.$$

Заполним таблицу:

$t, \text{ с}$	0	2	4	6	8	10
$x, \text{ м}$	30	50	70	90	110	130

Строим график: по горизонтальной оси отложим время движения t , а по вертикальной оси – координату тела x (рис. 9).

Как видно, графиком зависимости координаты тела x от времени t при равномерном движении является прямая линия.

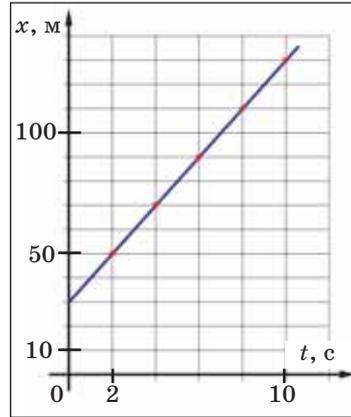


Рис. 9

Примеры решения задач.

Задача 1. Сколько времени скользила шайба по гладкому горизонтальному льду, если начальная координата шайбы 2 м, конечная координата 26 м (рис. 5)? Скорость шайбы 12 м/с.

Дано:

$$x_0 = 2 \text{ м}$$

$$x = 26 \text{ м}$$

$$v = 12 \text{ м/с}$$

$$t - ?$$

Решение:

Движение шайбы можно считать равномерным (почему?).

Тогда

$$v = \frac{x - x_0}{t}.$$

Отсюда

$$t = \frac{x - x_0}{v}.$$

(Дальнейшие действия по решению задачи выполните самостоятельно.)

Ответ: $t = 2 \text{ с}$.

Задача 2. Зависимость координаты x от времени движения t для двух тел задана уравнениями:

$$x_1 = 10 + 3t, \quad x_2 = 15 - 2t.$$

Каков характер движения тел? Встретятся ли эти тела? Если встретятся, то где и в какой момент времени?

Дано:

Два тела

$$x_1 = 10 + 3t$$

$$x_2 = 15 - 2t$$

$$x_{\text{встр}} - ?$$

$$t_{\text{встр}} - ?$$

Решение:

Координата и первого, и второго тела прямо пропорциональна времени. Следовательно, тела движутся равномерно. Допустим, что встреча произошла. Это значит, что координаты тел одинаковы:

$$x_1 = x_2,$$

$$10 + 3t = 15 - 2t.$$

Выясним, имеет ли решение это уравнение.

$$5t = 15 - 10.$$

$$t = 1(\text{с}).$$

Таким образом, встреча действительно произошла, и время встречи определено:

$$t_{\text{встр}} = 1 \text{ с.}$$

Выясним, где встретятся тела.

$$x_1 = 10 + 3 \cdot 1 = 13 \text{ (м)},$$

$$x_2 = 15 - 2 \cdot 1 = 13 \text{ (м)}.$$

Координата встречи определена: $x_{\text{встр}} = 13 \text{ м}$.

Ответ: $x_{\text{встр}} = 13 \text{ м}$, $t_{\text{встр}} = 1 \text{ с}$.



Задача 3. Автомобиль со скоростью 20 м/с двигался до перекрёстка 15 с. На перекрёстке автомобиль повернул под прямым углом и проехал ещё 400 м (рис. 10). Определите модуль перемещения автомобиля.

Дано:
Автомобиль

$$v_x = 20 \text{ м/с}$$

$$t = 15 \text{ с}$$

$$S_y = 400 \text{ м}$$

$$|\vec{S}| - ?$$

Решение:

Из рисунка 10 видно, что модуль вектора перемещения $|\vec{S}|$ равен гипотенузе AB прямоугольного треугольника ABC .

$$|\vec{S}| = AB. \quad (1.9)$$

В этом треугольнике катет AC – модуль перемещения автомобиля за первые 15 с движения, а катет CB – модуль последующего перемещения.

По теореме Пифагора

$$AB = \sqrt{AC^2 + CB^2}. \quad (1.10)$$

Катет AC легко определить:

$$AC = S_x,$$

$$S_x = v_x t.$$

Следовательно,

$$AC = v_x t. \quad (1.11)$$

Катет CB известен:

$$CB = S_y. \quad (1.12)$$

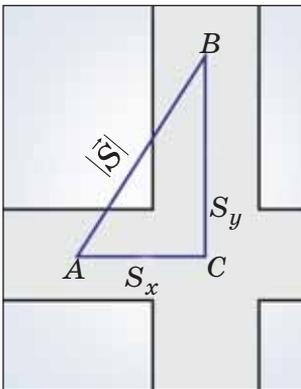


Рис. 10

Из соотношений (1.9) – (1.12) окончательно имеем

$$|\vec{S}| = \sqrt{(v_x t)^2 + S_y^2},$$

$$|\vec{S}| = \sqrt{(20 \text{ м/с} \cdot 15 \text{ с})^2 + (400 \text{ м})^2}.$$

$$|\vec{S}| = 500 \text{ м}.$$

Ответ: $|\vec{S}| = 500 \text{ м}$.

Механическое движение, система отсчёта, материальная точка, перемещение тела, $S = x - x_0$, прямолинейное движение, равномерное движение, скорость равномерного движения $v = \frac{S}{t}$, график зависимости координаты тела от времени при равномерном движении, $x = x_0 + vt$.

1.1 ● Подготовьте ответ о механическом движении по плану ответа о физическом явлении. Подготовьте ответ о скорости равномерного движения по плану ответа о физической величине.

1.2 ● Определите проекции векторов перемещения \vec{S}_1 , \vec{S}_2 , \vec{S}_3 на координатные оси (рис. 11).

1.3 ● Двигаясь по прямолинейному шоссе, автомобиль первые 10 мин ехал со скоростью 25 м/с, а следующие 10 мин – со скоростью 90 км/ч. Является ли движение автомобиля равномерным? Ответ обосновать.

1.4 ● Знаменитому немецкому физику-теоретику, одному из создателей квантовой физики М. Борну (1882–1970) принадлежит следующее высказывание: «Всё-таки странно, что существует слово для обозначения того, чего, строго говоря, не существует в природе, – именно покоя». Прокомментируйте это высказывание.

1.5 ● На рисунке 12 изображены графики зависимости координат двух тел, движущихся вдоль оси X , от времени. Равномерно ли движутся тела? Ответ обосновать. Скорость какого из тел больше и во сколько раз? Запишите уравнение зависимости координаты тела x от времени t для каждого из тел.

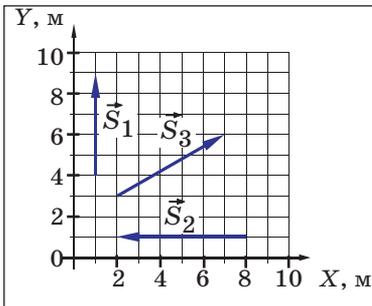


Рис. 11

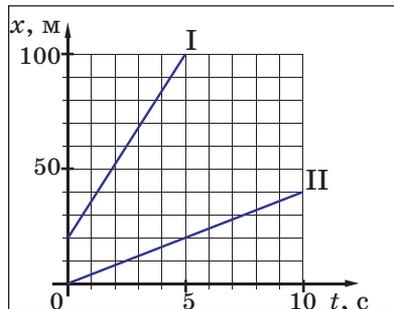


Рис. 12

§ 2. РАВНОУСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ. УСКОРЕНИЕ



Следующий шаг на пути к уравнениям движения – это введение величины, которая связана с изменением скорости движения.

*Из книги выдающегося американского физика
Р. Фейнмана (1908–1988)
«Фейнмановские лекции по физике»*

Вы уже умеете рассчитывать координату тела, движущегося равномерно, в любой момент времени.

Неравномерное движение. Равномерное движение, которое мы изучали в предыдущем параграфе, встречается крайне редко. В большинстве случаев тела движутся неравномерно, увеличивая или уменьшая скорость. Так, при движении автомобиль то разгоняется, то притормаживает – скорость меняется. С переменной скоростью движется бегун на дистанции, поезд в метро и так далее.



Каким же образом рассчитывать скорость, перемещение и координату тела при неравномерном движении?

Быстрота неравномерного движения определяется *мгновенной скоростью* тела. Мгновенная скорость – это скорость, которую тело имеет в определённый момент времени в соответствующей этому моменту точке траектории. Мгновенную скорость вычисляют по формуле

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{S}}{\Delta t},$$

где $\Delta \vec{S}$ – перемещение тела за малый интервал времени Δt .

Результат вычисления будет тем точнее, чем меньше интервал времени Δt .

Зная мгновенную скорость \vec{v} , можно определить перемещение $\Delta \vec{S}$ за малый интервал времени Δt :

$$\Delta \vec{S} = \vec{v} \Delta t$$

и проекцию перемещения ΔS :

$$\Delta S = v \Delta t. \quad (2.1)$$

Ускорение равноускоренного движения. Наиболее простым случаем неравномерного движения является равноускоренное движение.

Равноускоренным называют такое движение, при котором скорость тела за любые равные между собой промежутки времени изменяется на одну и ту же величину.

Примером равноускоренного движения является движение мяча, брошенного вертикально вниз (или вертикально вверх), а также брошенного под углом к горизонту. Чем отличается одно равноускоренное движение от другого? В первую очередь быстротой изменения скорости. Так, например, при одном равноускоренном движении скорость может ежесекундно увеличиваться на 2 м/с, при другом – на 5 м/с, а при третьем – уменьшаться на 10 м/с. Быстрота изменения скорости равноускоренного движения характеризуется физической векторной величиной – ускорением равноускоренного движения.

Ускорение равноускоренного движения – величина, равная изменению скорости равноускоренного движения за единицу времени.

Рассмотрим пример. Пусть тело движется *прямолинейно* и равноускоренно. Пусть в начальный момент времени скорость тела 5 м/с, а через 2 с скорость увеличилась до 25 м/с. Чему в этом случае равно численное значение ускорения тела? За 2 с скорость тела изменилась на 25 м/с – 5 м/с = 20 м/с. Ускорение – изменение скорости за единицу времени (за секунду). Обозначим ускорение буквой a .

Тогда

$$a = \frac{20 \text{ м/с}}{2 \text{ с}} = 10 \text{ м/с}^2.$$

(Читается: ускорение равно десять метров на секунду в квадрате.)



2.1. Какой величиной – скалярной или векторной – является ускорение?

Итак, если в начальный момент времени скорость тела \vec{v}_0 , а через время t скорость составляет \vec{v} , то ускорение тела \vec{a} равно

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}. \quad (2.2)$$



2.2. Какова единица измерения ускорения?

Определим, как изменяются с течением времени скорость и проекция скорости при равноускоренном движении.

$$\begin{aligned}\vec{a} &= \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}, \\ \vec{v} - \vec{v}_0 &= \vec{a}t, \\ \vec{v} &= \vec{v}_0 + \vec{a}t.\end{aligned}$$

Запишем последнюю формулу в проекции на ось OX :

$$v = v_0 + at. \quad (2.3)$$

При равноускоренном движении проекция скорости тела прямо пропорциональна времени его движения. Если проекция ускорения положительна, то проекция скорости с течением времени увеличивается. Если же проекция ускорения отрицательна, то в этом случае проекция скорости с течением времени уменьшается (часто такое движение называют равнозамедленным).

Изобразим графически зависимость проекции скорости тела v от времени движения t для случая равноускоренного движения. Такой график называют *графиком скорости*.

Пусть, к примеру, $v_0 = 5$ м/с, $a = 10$ м/с².

$$v = 5 + 10t.$$

Заполним таблицу:

$t, \text{с}$	0	2	4	6	8	10	12	14
$v, \text{м/с}$	5	25	45	65	85	105	125	145

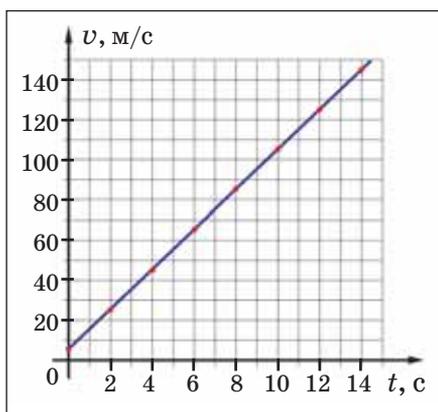


Рис. 13

Строим график: по горизонтальной оси отложим время t , а по вертикальной оси – проекцию скорости v (рис. 13). Из графика видно, что в случае равноускоренного движения графиком скорости является прямая линия.



2.3. Какой вид будет иметь график скорости равноускоренного движения в случае, если проекция ускорения отрицательна?

Перемещение тела при равноускоренном движении. Рассмотрим график скорости равномерного движения. При равномерном движении тела проекция скорости с течением времени не меняется. Поэтому график скорости – прямая линия, параллельная оси t (рис. 14).



2.4. Как рассчитывается проекция перемещения тела при его равномерном движении?

Проекцию перемещения тела при равномерном движении легко определить:

$$S = vt.$$

С другой стороны, проекция перемещения численно равна площади прямоугольника под графиком скорости (рис. 14). Действительно, одна сторона прямоугольника численно равна проекции скорости v , а другая сторона – времени движения t .

Рассмотрим график скорости равноускоренного движения (рис. 15). Начальная скорость тела v_0 , через время t скорость составляет v .

Фигура под графиком скорости – трапеция. Можно доказать, что и в случае равноускоренного движения проекция перемещения численно равна площади под графиком скорости. Следовательно, для определения проекции перемещения необходимо вычислить площадь трапеции (рис. 15).

Приведём (без вывода) формулу для расчёта проекции перемещения при равноускоренном движении.

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

(2.4)



2.5. Что необходимо знать, чтобы определить проекцию перемещения при равноускоренном движении?

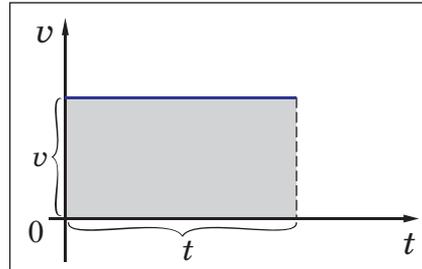


Рис. 14

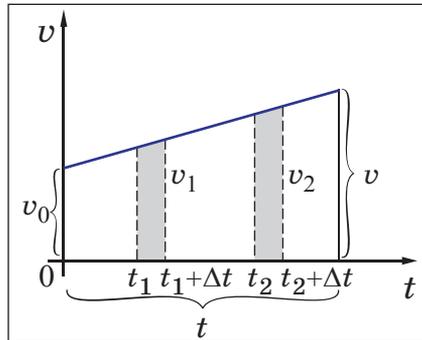


Рис. 15

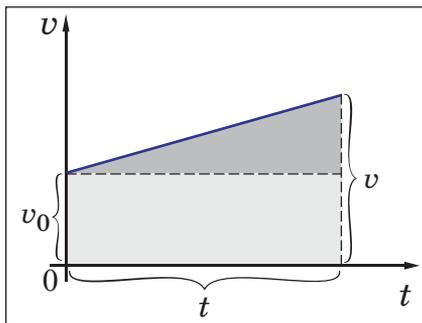


Рис. 16



Вывод формулы для расчёта перемещения при равноускоренном движении. Пусть в некоторый момент времени t_1 проекция мгновенной скорости тела v_1 . Тогда проекция перемещения ΔS_1 за малый интервал времени Δt равна [смотрите формулу (2.1)]

$$\Delta S_1 = v_1 \Delta t.$$

В случае *малого интервала времени* Δt проекция перемещения ΔS_1 численно равна площади прямоугольника со сторонами v_1 и Δt (рис. 15).

В другой момент времени t_2 проекция перемещения тела ΔS_2 за малый интервал времени Δt будет равна

$$\Delta S_2 = v_2 \Delta t,$$

где v_2 – мгновенная скорость тела в момент времени t_2 .

Из рисунка 15 вновь видно, что проекция перемещения ΔS_2 численно равна площади прямоугольника со сторонами v_2 и Δt .

Что необходимо сделать, чтобы определить проекцию перемещения тела S за всё время движения t ? Очевидно, что нужно сложить *все* перемещения ΔS_1 , ΔS_2 и так далее за *все* малые интервалы времени Δt :

$$S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \dots$$

Но каждое перемещение – ΔS_1 , ΔS_2 и так далее – численно равно площади соответствующего прямоугольника под графиком скорости. Следовательно, проекция перемещения S за всё время движения t будет равна площади всех прямоугольников под графиком скорости. Площадь же *всех малых* прямоугольников есть площадь трапеции под графиком скорости.

Таким образом, доказано, что *проекция перемещения при равноускоренном движении равна площади фигуры (трапеции) под графиком скорости.*



2.5. Как рассчитывается площадь трапеции?

Вычислим проекцию перемещения S . Для этого необходимо определить площадь трапеции, имеющей основания v_0 и v , а высоту, равную t (рис. 16):

$$S = \frac{v_0 + v}{2} \cdot t. \quad (2.5)$$



2.6. Как вычисляется проекция ускорения равноускоренного движения?

$$a = \frac{v - v_0}{t},$$

отсюда $v - v_0 = at, v = v_0 + at.$

Тогда формула (2.5) примет вид

$$S = \frac{v_0 + v_0 + at}{2} \cdot t,$$

$$S = \frac{2v_0t + at^2}{2},$$

$$S = v_0t + \frac{at^2}{2}.$$

Если нам известна формула для расчёта проекции перемещения, легко определить и координату тела, движущегося равноускоренно. Величина проекции вектора на координатную ось определяется значениями координат конца вектора и начала вектора [смотрите, например, соотношение (1.5)].

Из соотношения

$$S = x - x_0$$

имеем

$$x = x_0 + S.$$

С учётом формулы (2.4)

$$x = x_0 + v_0t + \frac{at^2}{2}. \quad (2.6)$$

Изобразим графически зависимость координаты тела x от времени t для случая равноускоренного движения. Пусть, к примеру,

$$x_0 = 10 \text{ м}, v_0 = 5 \text{ м/с}, a = 4 \text{ м/с}^2.$$

$$x = 10 + 5t + 2t^2.$$

Заполним таблицу:

$t, \text{с}$	0	2	4	6	8
$x, \text{м}$	10	28	62	112	178

Строим график. Из графика (рис. 17) видно, что в случае равноускоренного движения графиком зависимости координаты тела от времени является ветвь параболы.

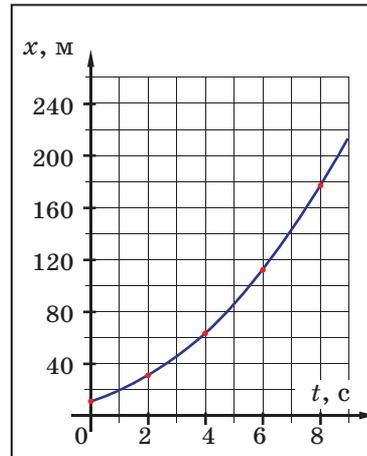


Рис. 17

Равноускоренное движение, ускорение равноускоренного движения, $a = \frac{v - v_0}{t}$, $v = v_0 + at$, график скорости, проекция перемещения равна площади фигуры под графиком скорости, $S = v_0t + \frac{at^2}{2}$, $x = x_0 + v_0t + \frac{at^2}{2}$, график зависимости координаты тела от времени при равноускоренном движении – ветвь параболы.

- 2.1** ● Вычислите ускорение при разгоне автомобиля, если, трогаясь с места, он набирает скорость 100 км/ч за 5,0 с. Считать движение автомобиля при разгоне равноускоренным. Ответ дать в м/с².
- 2.2** ● С каким ускорением движется лифт при торможении, если он останавливается через 7 с после начала торможения? Начальная скорость движения лифта 3,5 м/с. Движение кабины лифта при торможении считать равноускоренным.
- 2.3** ● Двигаясь равноускоренно, велосипедист съехал с горки за 6 с. Определите длину склона. Ускорение велосипедиста 0,5 м/с², а скорость в начале спуска 5 м/с.
- 2.4** ● Альпинист уронил камешек в ущелье, который ударился о дно ущелья через 3 с. Какова глубина ущелья? Камешек падает равноускоренно (ускорение 9,8 м/с²).
- 2.5** ● Зависимость скорости движущегося тела – материальной точки – от времени задана уравнением (численные значения величин указаны в единицах СИ)

$$v = 4 + 6t.$$

Докажите, что тело движется равноускоренно. Определите начальную скорость тела и его ускорение. Запишите зависимость координаты x движущегося тела от времени t . Определите координату тела в момент времени 4 с. Начальная координата тела равна 10 м.

§ 3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «РАВНОУСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ».

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ»



Человек создан для действия.

*Вольтер (1694–1778),
французский писатель и философ*

Вы уже знаете, как рассчитывается перемещение тела, движущегося равноускоренно.

Примеры решения задач.

Задача 1. Для измерения ускорения движущейся тележки используют прибор акселерометр (рис. 18, а, б). При ускоренном движении тележки (вправо) маятник ввиду своих инертных свойств первоначально «отстаёт» от тележки и смещается относительно тележки (влево). При этом маятник сдвигает подвижный указатель на шкале прибора.

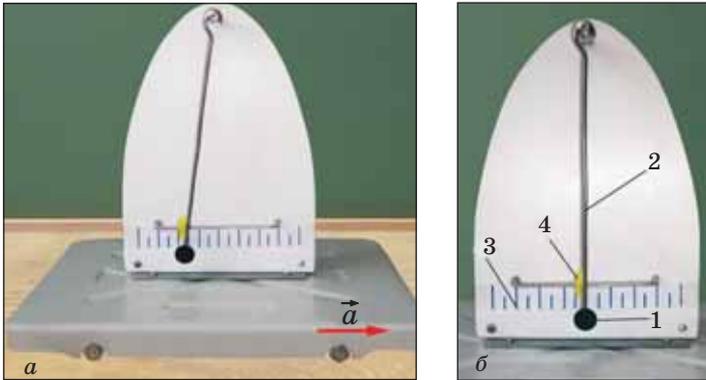


Рис. 18. Тележка, движущаяся ускоренно, и акселерометр:

- 1 – шарик маятника;
- 2 – стержень маятника;
- 3 – шкала акселерометра;
- 4 – подвижный указатель

Определите ускорение тележки, которая, двигаясь из состояния покоя, перемещается за 2 с на 3 м. Чему равна цена деления прибора (рис. 18, б), если подвижный указатель оказался сдвинут на третье деление шкалы?



3.1. Что необходимо знать, чтобы определить перемещение тела S при его равноускоренном движении?

Дано:

Акселерометр

$S = 3$ м

$t = 2$ с

$v_0 = 0$

$a = ?$

Цена деления – ?

Решение:

Запишем формулу для расчёта перемещения S тележки при равноускоренном движении:

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

Так как первоначально тележка покоилась ($v_0 = 0$), то

$$S = \frac{at^2}{2}.$$

$$at^2 = 2S,$$

$$a = \frac{2S}{t^2}.$$

$$a = \frac{2 \cdot 3 \text{ м}}{(2 \text{ с})^2} = 1,5 \text{ (м/с}^2\text{)}.$$

Отсюда

Ответ: $a = 1,5 \text{ м/с}^2$. При движении тележки указатель смещён на третье деление, значит, цена деления акселерометра составляет $0,5 \text{ м/с}^2$.

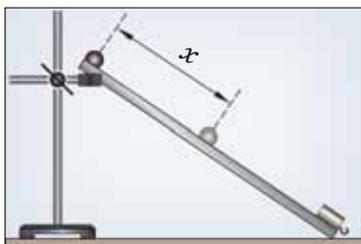


Рис. 19



Задача 2. При изучении движения шарика по наклонному жёлобу были измерены координаты шарика в различные моменты времени (рис. 19).

Данные опыта приведены в таблице, где указаны координаты x шарика, движущегося по наклонному жёлобу в различные моменты времени t .

t , с	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
x , см	0	12,5	50,0	112,5	200,0	312,5

Начальная скорость шарика равна нулю. Является ли движение шарика равноускоренным?



3.2. Как определить координату тела, если известны его начальная координата и проекция перемещения?

3.3. Какова математическая зависимость проекции перемещения тела от времени при равноускоренном движении?

3.4. Какова математическая зависимость координаты тела от времени при равноускоренном движении?

3.5. Какова математическая зависимость координаты тела от времени при равноускоренном движении в случае, если тело начинает двигаться из состояния покоя и его начальная координата равна нулю?

3.6. Как выглядит график зависимости координаты тела от квадрата времени при равноускоренном движении? (Начальные координата и скорость тела равны нулю.)

Решение:

Если движение шарика является равноускоренным, то его координата с течением времени должна меняться по закону

$$x = \frac{at^2}{2}.$$

(Учтено, что $x_0 = 0$, $v_0 = 0$.)

Для того, чтобы проверить, выполняется ли данная зависимость, построим график зависимости координаты x шарика от *квадрата* времени t^2 .

Заполним таблицу:

t , с	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
t^2 , с ²	0	0,25	1,0	2,25	4,0	6,25
x , см	0	12,5	50,0	112,5	200	312,5

По данным, приведённым в таблице, построим график; по горизонтальной оси отложим квадрат времени t^2 , а по вертикальной оси – координату x (рис. 20).

Мы видим, что графиком является прямая линия. Следовательно, координата x движущегося шарика прямо пропорциональна квадрату времени t^2 . Это и является доказательством того, что шарик совершает равноускоренное движение по наклонному жёлобу.

Обратите внимание на приём, использованный при решении задачи. Успешное решение задачи оказалось возможным благодаря выбору удачной системы координат для построения графика исследуемой зависимости. Это позволило сразу же сделать вывод о характере движения тела.

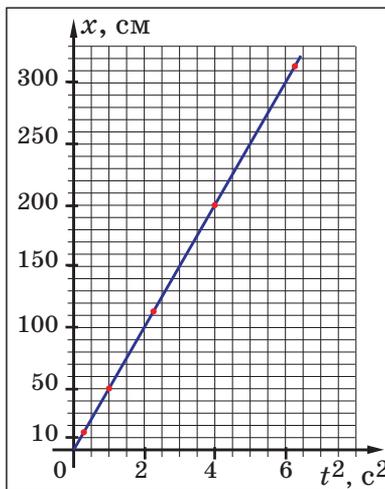


Рис. 20

Лабораторная работа

«Определение ускорения равноускоренного движения»

Оборудование: жёлоб лабораторный, шарик, цилиндр металлический, секундомер, лента измерительная.

Указания к работе

Известно, что шарик по наклонному жёлобу (рис. 19) движется равноускоренно. При равноускоренном движении без начальной скорости проекция перемещения S равна

$$S = \frac{at^2}{2},$$

где a – проекция ускорения;

t – время движения.

Отсюда

$$\frac{at^2}{2} = S,$$

$$a = \frac{2S}{t^2}.$$

Проекцию перемещения S и время движения t шарика по жёлобу нетрудно определить, используя измерительную ленту и секундомер.



Задание 1. Соберите установку по рисунку 19, выбрав такой наклон жёлоба, чтобы шарик проходил жёлоб примерно за 2 с.

Установите металлический цилиндр (ограничитель) и измерьте проекцию перемещения шарика. Измерьте время движения шарика по жёлобу (от начальной точки до цилиндра-ограничителя). Для уменьшения случайной ошибки измерения проводите несколько раз и определите среднее значение времени движения.

Вычислите проекцию ускорения шарика.

Вычислите проекцию мгновенной скорости v шарика в момент его удара о цилиндр-ограничитель:

$$v = at.$$



Задание 2. Увеличьте наклон жёлоба так, чтобы шарик проходил жёлоб примерно за 1,5 с. Вновь вычислите ускорение и мгновенную скорость шарика. Сделайте вывод о том, как изменяется ускорение шарика при изменении наклона жёлоба.

Акселерометр.

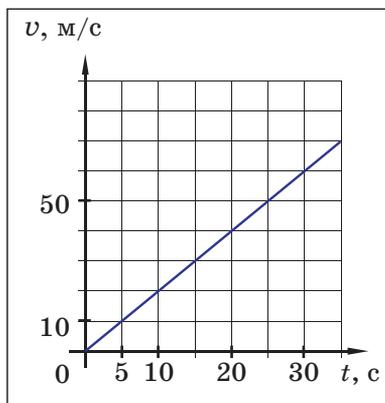


Рис. 21

3.1 Шарик скатывается по наклонному жёлобу с ускорением $0,2 \text{ м/с}^2$. Запишите уравнение зависимости скорости и координаты шарика от времени. Вычислите мгновенную скорость шарика и его перемещение в момент времени 5 с. В начальный момент времени шарик находился в покое в точке с координатой 30 см.

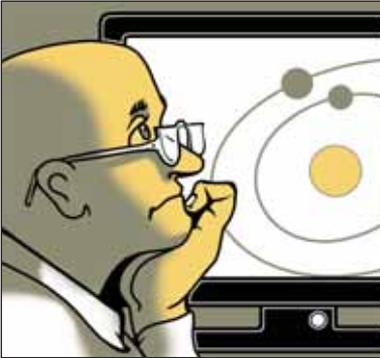
3.2 На рисунке 21 изображён график зависимости проекции скорости тела от времени. Определите ускорение, с которым движется тело, и перемещение тела за первые 20 с. Чему при этом равна средняя скорость движения?

3.3 При выстреле из лука стрела вылетает вертикально вверх со скоростью 30 м/с . Сколько времени будет длиться подъём стрелы? Какова высота подъёма? Ускорение, с которым движется стрела, составляет 10 м/с^2 .

3.4 При формировании железнодорожных составов используют так называемую горку – наклонный участок пути. Какова должна быть длина такой горки, чтобы вагон, двигаясь из состояния покоя, в конце горки имел бы скорость 5 км/ч ? Ускорение, с которым могут двигаться вагоны, не должно превышать $0,01 \text{ м/с}^2$.

3.5 На какой дистанции автомобиль разгонится от скорости 72 до 144 км/ч , двигаясь с ускорением 2 м/с^2 ?

§ 4. ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ



Ближайшая к Солнцу планета – Меркурий – вращается вокруг своей оси и обращается вокруг Солнца таким образом, что за трое меркурианских «суток» проходит два меркурианских «года».

Астрономический справочник

Вам известно, что механические движения различаются по форме траектории.

Криволинейное движение. В предыдущих параграфах вы изучили некоторые математические соотношения, которые позволяют определять такие физические величины, как перемещение, координата, скорость движущегося тела. Но эти соотношения применимы только в случае прямолинейного движения – равномерного или равноускоренного.

В большинстве случаев траектории движущихся тел не являются прямыми линиями. В природе и в технике чаще всего тела движутся криволинейно. Так, к примеру, движется Земля вокруг Солнца и искусственный спутник вокруг Земли, автомобиль на повороте и ребёнок на карусели. При криволинейном движении направление вектора скорости движущегося тела в каждой точке траектории изменяется.



4.1. Каково направление мгновенной скорости в каждой точке траектории при криволинейном движении?

На этот вопрос ответить легко. Вспомните, как движутся, например, кусочки грязи, отлетевшие от вращающегося колеса автомобиля (рис. 22). Вспомните, как движутся искры – раскалённые частички металла и точильного камня, возникающие при обработке детали на электроточиле (рис. 23).



Рис. 22



Рис. 23

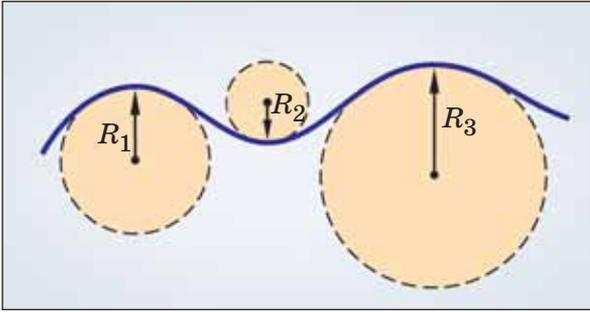


Рис. 24

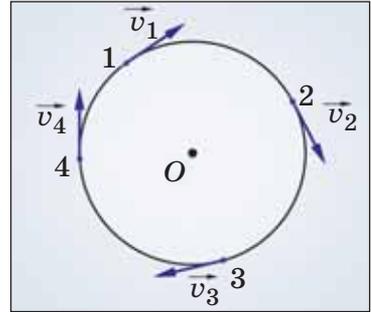


Рис. 25

При криволинейном движении мгновенная скорость тела направлена по касательной к его траектории.

Наиболее важным случаем криволинейного движения является случай движения по окружности. Действительно, любое криволинейное движение можно представить как сочетание движений по окружностям различного радиуса (рис. 24). Поэтому если изучить движение по окружности, то полученные результаты можно будет применить и при рассмотрении любого криволинейного движения.

Наиболее простым случаем движения по окружности является движение с постоянной по модулю скоростью. Примером такого движения является движение стрелок часов, лопастей вентилятора и так далее.



4.2. Какой величиной – скалярной или векторной – является скорость?

Интересно, что движение тела по окружности с постоянной по модулю скоростью – это движение с *переменной скоростью*. Почему? Скорость – величина векторная, и при движении тела по окружности *направление вектора скорости изменяется* (рис. 25).

Следовательно, перемещаясь по дуге окружности, тело совершает ускоренное движение. Конечно, это ускоренное движение не является движением равноускоренным. Ведь равноускоренное движение – это всегда движение прямолинейное.

Центростремительное ускорение. Обсудим, как рассчитать ускорение при движении тела по окружности с постоянной по модулю скоростью. Ускорение – это величина, характеризующая быстроту изменения скорости.

Пусть за малый интервал времени Δt при движении тела по окружности вектор скорости изменился на $\Delta \vec{v}$. Тогда ускорение \vec{a} равно

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

Теоретически можно доказать, что вектор ускорения \vec{a} в каждой точке окружности перпендикулярен вектору мгновенной скорости \vec{v} . (Доказательство этого утверждения в учебнике не приводится.)



4.3. Чему равен угол между касательной к окружности и радиусом, проведённым в точку касания?

Вектор ускорения \vec{a} при движении тела по окружности с постоянной по модулю скоростью направлен к центру окружности (рис. 26). По этой причине ускорение называют *центростремительным*.

Движение тела по дуге окружности с постоянной по модулю скоростью – это движение с центростремительным ускорением.

Как определить величину центростремительного ускорения (будем обозначать: $a_{ц}$)? Модуль центростремительного ускорения равен

$$a_{ц} = \left| \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \right|. \quad (4.1)$$

Строгий математический расчёт (он в учебнике не приводится) позволяет получить следующую формулу для вычисления центростремительного ускорения:

$$a_{ц} = \frac{v^2}{R}. \quad (4.2)$$

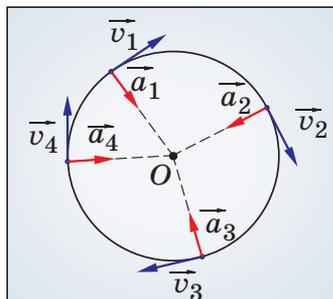


Рис. 26



Точный расчёт значения (4.2) достаточно сложен, но результат можно оценить из следующих соображений:

1. Чем быстрее тело движется по окружности, тем и вектор скорости быстрее изменяет свое направление. Следовательно, тем больше центростремительное ускорение.

2. Чем больше радиус окружности, по которой движется тело, тем медленнее происходит изменение направления вектора скорости. Следовательно, тем меньше центростремительное ускорение.

От других физических величин центростремительное ускорение не зависит. Значит, в формулу для расчёта центростремительного ускорения $a_{ц}$ должны входить только величины скорости v и радиуса окружности R .

Выпишем единицы измерения этих величин.

Центростремительное ускорение $a_{ц}$	Скорость v	Радиус R
м/с ²	м/с	м

Единица измерения ускорения (м/с^2) получается, если единицу измерения скорости (м/с) возвести в квадрат и разделить на единицу измерения радиуса (м). Следовательно, используя знак прямо пропорциональной зависимости, можно записать

$$a_{ц} \sim \frac{v^2}{R} .$$

Чтобы представить это математическое выражение в виде равенства, необходимо ввести коэффициент пропорциональности между его левой и правой частями. В данном случае он равен 1. То есть

$$a_{ц} = \frac{v^2}{R} .$$

Период и частота вращения. Рассмотрим ещё две физические величины, которые характеризуют вращательное движение, это период вращения и частота вращения.

Время, за которое вращающееся тело совершает один полный оборот, называют **периодом вращения**.

Так, например, период вращения минутной стрелки механических часов составляет 60 мин, а период вращения секундной стрелки – 1 мин. Период вращения обозначают T (читается: тэ большое) и измеряется в секундах (с).

Другая величина, характеризующая вращательное движение, – *частота вращения*.

Частота вращения – это число оборотов, совершаемых вращающимся телом за единицу времени.

Частоту вращения обозначают ν (читается: ню). Единица измерения частоты $1/\text{с}$ (с^{-1}).

Пусть, к примеру, электродвигатель совершает 1200 оборотов в минуту. Тогда период вращения T электродвигателя равен

$$T = \frac{60 \text{ с}}{1200} = 0,05 \text{ с} .$$

Частота вращения ν электродвигателя равна

$$\nu = \frac{1200}{60 \text{ с}} = 20 \text{ с}^{-1} .$$

Если тело, вращаясь, делает N оборотов за время t , то период вращения T и частота вращения ν будут соответственно равны

$$T = \frac{t}{N} , \tag{4.3}$$

$$v = \frac{N}{t} . \quad (4.4)$$



4.4. Как определить частоту вращения ν , если известен период вращения T ?

Из соотношений (4.3) и (4.4) легко установить связь между двумя величинами – периодом T и частотой ν :

$$\nu = \frac{1}{t} . \quad (4.5)$$

Действительно, чтобы определить число оборотов за одну секунду – частоту вращения, необходимо промежуток времени в одну секунду разделить на время одного оборота – период.



4.5. Во сколько раз изменится период вращения при увеличении частоты вращения в два раза?

Примеры решения задач.

Задача 1. Определите скорость и центростремительное ускорение тела, расположенного на экваторе Земли. Экваториальный радиус Земли $R_З$ равен 6380 км.

Дано:
 Земля
 $R_З = 6380$ км

 $v - ?$
 $a_ц - ?$

СИ:
 $6,38 \cdot 10^6$ м

Решение:

Тело на экваторе Земли вращается вместе с Землёй по окружности радиусом, равным экваториальному радиусу Земли $R_З$. Период вращения T составляет одни сутки – время оборота Земли вокруг своей оси.

$$T = 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ с}, \quad T = 86\,400 \text{ с}.$$

За сутки тело на экваторе, совершая один оборот, проходит путь l , равный длине окружности:

$$l = 2\pi R_З.$$

Мгновенная скорость тела на экваторе, очевидно, равна

$$v = \frac{l}{t},$$

$$v = \frac{2\pi R_З}{T} . \quad (4.6)$$

Центростремительное ускорение равно

$$a_{ц} = \frac{v^2}{R_3}$$

или с учётом соотношения (4.6)

$$a_{ц} = \frac{4\pi^2 R_3}{T^2}.$$

(Дальнейшие действия по решению задачи выполните самостоятельно.)

Ответ: $v = 460$ м/с, $a_{ц} = 0,034$ м/с².

Направление мгновенной скорости тела при его криволинейном движении,

центростремительное ускорение, $a_{ц} = \frac{v^2}{R}$, метод оценки физического результата, период вращения, частота вращения, $T = \frac{t}{N}$, $v = \frac{N}{t}$, $v = \frac{1}{t}$.

4.1 ● Автомобиль проходит середину выпуклого моста радиусом 40 м со скоростью 72 км/ч. Чему равно центростремительное ускорение автомобиля в этот момент?

4.2 ● Турбина гидроэлектростанции за 5 мин совершает 469 оборотов. Вычислите период и частоту вращения турбины.



Рис. 27

4.3 ● Длина минутной стрелки часов на Спасской башне Московского кремля 3,27 м (рис. 27). Определите величину мгновенной скорости конца стрелки. Укажите направление скорости в моменты времени, когда конец стрелки совпадает с цифрой XII и с цифрой VI.

4.4 ● Центростремительное ускорение точек на рабочей поверхности наждачного диска не должно превышать 8 км/с². Какой может быть максимальная частота вращения электродвигателя, на валу которого закреплён такой наждачный диск? Диаметр диска 230 мм.

4.5 ● Два резиновых диска закреплены на осях и плотно прижаты друг к другу (рис. 28). При вращении левого диска с периодом 2 с правый диск вращается без проскальзывания с периодом 0,5 с. Определите мгновенную скорость точек на ободе левого диска, если его радиус 20 см. Чему равна мгновенная скорость точек на ободе правого диска? Чему равен радиус правого диска?

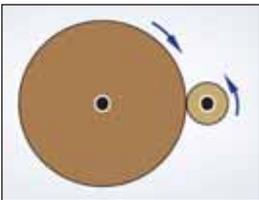
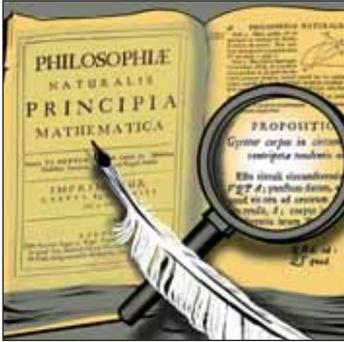


Рис. 28

§ 5. ЗАКОНЫ НЬЮТОНА



Сочинение это нами предлагается как математические основания физики. Вся трудность физики, как будет видно, состоит в том, чтобы по явлениям движения распознать силы природы, а затем по этим силам объяснить остальные явления.

*Из основного труда И. Ньютона
«Математические начала
натуральной философии»*

Вам уже известно, что механика – раздел физики, изучающий механическое движение.



Из истории развития механики. Основой механики являются законы движения, сформулированные великим английским учёным **И. Ньютоном** (1643–1727). В 1687 году был опубликован его главный научный труд – «Математические начала натуральной философии». (На современный язык название этой книги может быть переведено как «Математические основания физики».) Книга Ньютона является выдающимся произведением научной мысли. Именно она превратила физику в ту область человеческих знаний, которая стала играть главенствующую роль в развитии науки, техники, промышленности.

Историки науки утверждают, что если бы «Математические начала...» не были бы написаны, то иным был бы ход развития человечества. Сам же Ньютон говорил: «Если я видел дальше других, то потому, что стоял на плечах гигантов». Кто же эти гиганты науки, внёсшие свой вклад в развитие механики? Перечислим их.

Аристотель (4 век до н.э.). Выдающийся мыслитель древности. Им была создана первая научная картина мира, соответствующая уровню науки того времени, разработано учение о движении.

Архимед (3 век до н.э.). Великий механик и математик. Им была создана теория рычага, установлены основные законы гидростатики.

Николай Коперник (1473–1543). Знаменитый астроном, создатель современной системы мира. Именно он отказался от принятого в течение многих веков учения о неподвижности Земли и объяснил наблюдаемое астрономами движение планет их вращением вокруг Солнца.

Иоганн Кеплер (1571–1630). Один из создателей астрономии нового времени. Обобщив данные астрономических наблюдений, Кеплер установил законы движения планет.

Галилео Галилей (1564–1642). Один из основоположников научного естествознания. В своих исследованиях механического движения применил экспериментальный метод, соединив его с логикой¹ и математикой.

¹ Логика – наука о способах доказательств и опровержений.

Христиан Гюйгенс (1629–1695). Выдающийся физик, астроном и математик. Установил законы колебаний маятника, заложил основы теории удара упругих шаров.

Ньютон, обобщив работы своих предшественников, дополнив их множеством своих научных результатов, создал завершённую теорию механического движения. Это теория в настоящее время носит название классической механики. Ядром механики являются сформулированные Ньютоном три закона.

Первый закон Ньютона. Первый закон, включённый Ньютоном в систему законов механики, часто называют законом инерции. Честь открытия этого закона принадлежит Г. Галилею. Галилей изучал равноускоренное движение. Так, к примеру, движется шар по наклонному жёлобу. Ускорение шара тем больше, чем больше угол наклона жёлоба (рис. 29).

Сообщим шару начальную скорость так, чтобы он катился вверх по жёлобу (рис. 30). Движение шара также будет ускоренным, но скорость шара при этом будет уменьшаться.

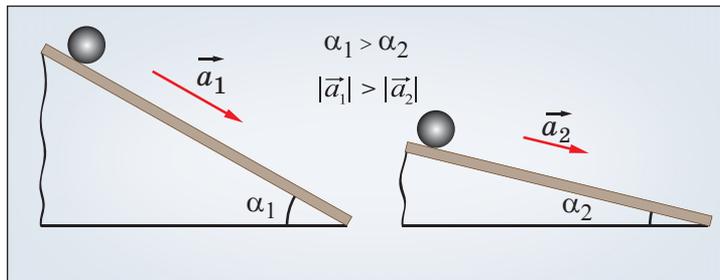


Рис. 29

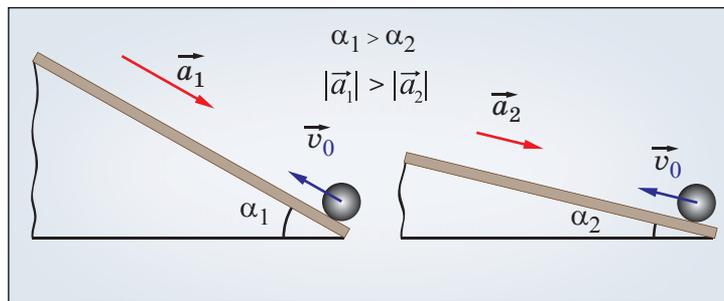


Рис. 30

Представим себе, что мы делаем наклон жёлоба все меньше и меньше. Тогда и величина ускорения – быстрота изменения скорости – будет становиться всё меньше и меньше. Как же будет двигаться шар в случае, если жёлоб расположен горизонтально (вообразим, что жёлоб очень длинный и гладкий – трения нет)? Ясно, что в этом случае шар не будет ни уменьшать, ни увеличивать скорость своего движения.

То, что движение шара по гладкому жёлобу будет происходить (сколь угодно долго) равномерно прямолинейно, не вызывает сомнения. Но, может быть, причиной этого движения являются Земля и упругий жёлоб, действующие на шар?



5.1. Как будет двигаться свободное тело, то есть такое тело, на которое не действуют никакие другие тела?

Ответ на этот вопрос и составляет содержание I закона Ньютона:

Всякое тело продолжает удерживаться в своём состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.

Как вы знаете, справедливость любого физического закона должна быть обязательно подтверждена экспериментально. Но как поставить опыт по проверке данного утверждения Галилея и Ньютона? Ведь свободных тел в природе нет! На любое тело действуют, например, силой тяготения далёкие звёзды. Всякое тело, которое мы считаем свободным, является таковым лишь приближённо, с некоторой точностью.

В такой ситуации воспользуемся известным приёмом доказательства «от противного». Во всех известных нам случаях *неравномерного движения* легко обнаружить, что *неравномерно движущееся тело несвободно*. Например, при торможении шайбы по льду, при падении камня на Землю, при вращении Луны вокруг Земли, при ускоренном движении груза, прикрепленного к пружине, всегда выясняется, что движущееся неравномерно тело несвободно. Следовательно, если бы тело было свободным, то оно бы двигалось равномерно и прямолинейно либо находилось бы в покое.



5.2. Совокупность каких элементов образует систему отсчёта?

Как вы знаете, любое механическое движение рассматривается относительно определённой системы отсчёта. Ведь при изучении движения нам необходимо уметь вычислить (или измерить) координату движущегося тела в любой момент времени.

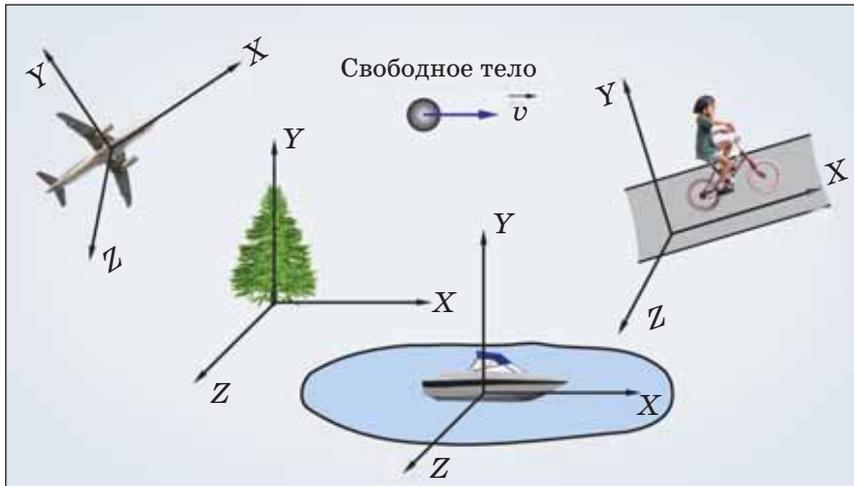


Рис. 31

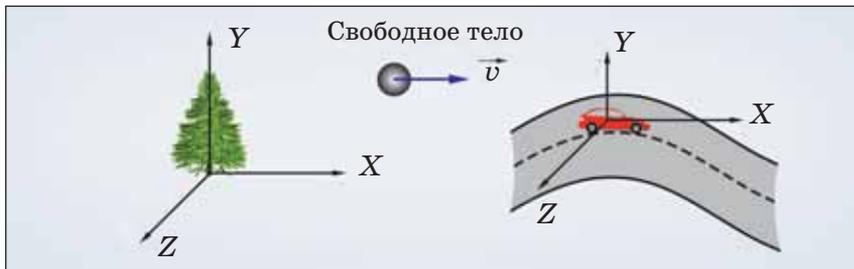


Рис. 32

Вообразим свободное тело, которое в соответствии с I законом Ньютона движется относительно Земли прямолинейно и равномерно¹. Точно так же это свободное тело будет двигаться прямолинейно равномерно и относительно других систем отсчёта:

- равномерно движущийся (относительно Земли) велосипедист;
- равномерно движущаяся (относительно Земли) лодка;
- равномерно движущийся (относительно Земли) самолёт.

Эти системы отсчёта изображены на рисунке 31.

Но можно представить и другие системы отсчёта – системы отсчёта, которые движутся относительно Земли ускоренно. Например, в качестве такой системы отсчёта выберем автомобиль, движущийся (относительно Земли) криволинейно и ускоренно (рис. 32).

¹ При этом мы не будем учитывать суточное вращение Земли вокруг своей оси и годичное движение Земли вокруг Солнца.

Относительно такой системы отсчёта свободное тело будет двигаться криволинейно и ускоренно.

Следовательно, в таких «ускоренных» системах отсчёта закон инерции выполняться не будет. Таким образом, все системы отсчёта можно разделить на два класса:

1. *Инерциальные системы отсчёта.* В инерциальных системах отсчёта выполняется I закон Ньютона.

2. *Неинерциальные системы отсчёта.* В неинерциальных системах отсчёта не выполняется I закон Ньютона.

В этой связи содержание I закона Ньютона может быть изложено следующим образом:

Существуют такие системы отсчёта, их называют инерциальными, относительно которых свободное тело либо покоится, либо движется прямолинейно и равномерно.

В дальнейшем при изучении механического движения нами будут использоваться только инерциальные системы отсчёта. В связи с этим возникает вопрос – равноценны ли инерциальные системы между собой? Иными словами, одинаковым ли законам подчиняется механическое движение в различных инерциальных системах отсчёта? Ответ был дан Галилеем, который выдвинул *принцип¹ относительности*. Используя понятие инерциальной системы отсчёта, принцип относительности можно сформулировать следующим образом:

Законы механики одинаковы во всех инерциальных системах отсчёта².

Второй закон Ньютона. I закон Ньютона, как нам теперь ясно, определяет движение *свободного тела*. Мы выяснили, что в инерциальных системах отсчёта свободное тело либо покоится, либо движется прямолинейно и равномерно. Каков же будет характер движения *несвободного тела*? Опыт убеждает нас, что если тело несвободно, то есть взаимодействует с другими телами, то движение тела изменяется, изменяется скорость тела.

¹ Принцип – основное исходное положение какой-либо теории, науки. Физические принципы подтверждают опытными фактами.

² Ньютон сформулировал принцип относительности в качестве одного из следствий к законам движения следующим образом: *относительные движения друг по отношению к другу тел, заключённых в каком-либо пространстве, одинаковы, покоится ли это пространство или движется равномерно и прямолинейно без вращения.*

Величину действия одного тела на другое характеризуют *силой*. Как писал Ньютон, «приложенная сила есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения».

Единица измерения силы – ньютон (сокращённо обозначается Н).

Ньютон, формулируя II закон, использовал понятие «количество движения», понимая под этим произведение массы тела на его скорость. Мы же сформулируем II закон, как это принято в настоящее время, используя понятие «ускорение тела».

Наблюдения, наш повседневный опыт свидетельствуют, что **ускорение тела тем больше, чем больше сила, действующая на него**. Действительно, мяч получает тем большее ускорение (в результате приобретает большую скорость), чем сильнее ударять по нему. Стрела при выстреле из лука получает тем большее ускорение (в результате приобретает большую скорость), чем сильнее изогнут лук, чем больше сила упругости.

Одновременно ускорение тела зависит от инертных свойств тела, от его массы. **Ускорение, приобретаемое телом под действием силы, тем меньше, чем больше масса тела**. Представьте, какое ускорение будет иметь при ударе футболиста не мяч, а пушечное ядро, не стрела при вылете из лука, а копьё.

Обобщение таких наблюдений позволяет сформулировать II закон Ньютона.

Ускорение, приобретаемое телом при действии на него силы, прямо пропорционально силе, действующей на тело, и обратно пропорционально массе тела.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} . \quad (5.1)$$

Убедимся в справедливости закона на опыте. Закрепим на тележке уже известный нам прибор для измерения ускорения – акселерометр (рис. 18). К тележке прикрепим пружину и снабдим тележку линейкой для измерения растяжения пружины (рис. 33). Если пружину растянуть, то на тележку будет действовать сила упругости и тележка, разгоняясь, будет увеличивать свою скорость (приобретёт ускорение). При изменении растяжения пружины будет изменяться и сила, приложенная к тележке.

Для удобства проведения опыта прикрепим к свободному концу пружины нить с грузом и перекинем нить через блок.

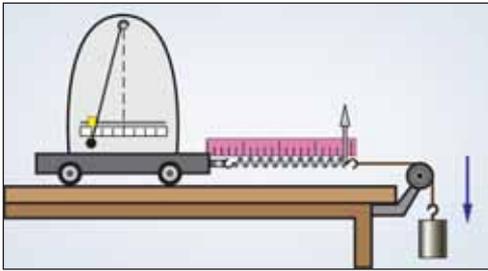


Рис. 33

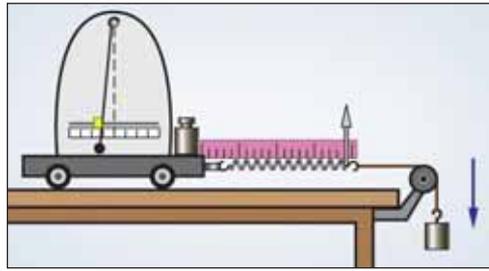


Рис. 34

Отпустим груз. Груз под действием силы тяжести движется вниз, и при этом пружина растягивается, действуя определённой силой на тележку. Измерим ускорение тележки. Прикрепим к нити дополнительный груз так, чтобы пружина растянулась в два раза больше. Сила упругости, приложенная к тележке, возрастает в два раза. При этом акселерометр показывает, что ускорение в 2 раза больше первоначального. Следовательно, действительно, ускорение тела прямо пропорционально силе, действующей на тело:

$$a \sim F.$$

Увеличим массу тележки, поставив на неё груз, например, такой же массы, как и масса самой тележки (рис. 34). Проведя опыт, мы обнаружим, что при увеличении массы тела в 2, 3 раза ускорение, приобретаемое тележкой под действием определённой силы, уменьшается соответственно в 2, 3 раза.

Следовательно, действительно, ускорение, приобретаемое телом под действием силы, обратно пропорционально массе тела:

$$a \sim \frac{1}{m}.$$

II закон Ньютона позволяет рассчитать ускорение тела:

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

Если же известно ускорение тела \vec{a} , то можно определить мгновенную скорость тела \vec{v} , а также его координату x в любой момент времени. Например, в случае равноускоренного движения

$$v = v_0 + at,$$

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

Благодаря II закону Ньютона можно рассчитать движение любых тел. Движение капли дождя и движение груза, совершающего колебания под действием пружины. Движение лыжника, скатывающегося по склону горы, и движение космического корабля. Движение Луны вокруг Земли и движение гигантских галактик, взаимодействующих между собой. Совпадение результатов расчётов, проводимых на основе II закона Ньютона, с наблюдаемым на практике механическим движением является наилучшим и самым убедительным доказательством правильности законов Ньютона.

Как следует из II закона Ньютона, для определения ускорения необходимо знать силу, действующую на тело. Но, как правило, на тело действует не одна, а несколько сил.



5.3. Как применять II закон Ньютона, если на тело действует несколько сил?

В этом случае, чтобы применить II закон Ньютона, нужно вычислить *равнодействующую силу*.

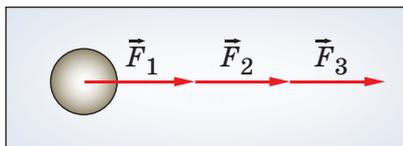


Рис. 35

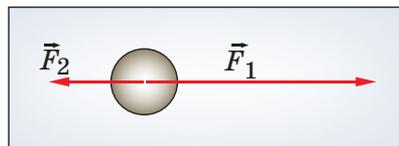


Рис. 36



5.4. Как вычисляют равнодействующую силу, если на тело действует несколько сил, направленных по одной прямой в одну сторону (рис. 35)?

5.5. Как вычисляют равнодействующую силу, если на тело действует несколько сил, направленных по одной прямой в противоположные стороны (рис. 36)?

Сила – векторная величина. Сложение векторов производят по определённым правилам, например, по правилу параллелограмма (рис. 37).

Для сложения векторов \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , имеющих общее начало (точка O), необходимо представить, что силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 – это стороны параллелограмма. Мысленно достроим параллелограмм, отметим «недостающую» вершину – точку C .

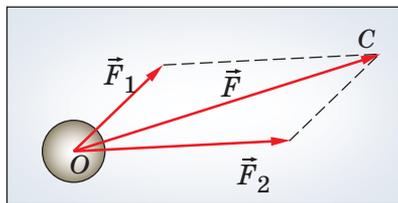


Рис. 37

Проведём диагональ из общего начала векторов – точки O к вершине параллелограмма – точке C .

Равнодействующая сила \vec{F} – сумма векторов \vec{F}_1 и \vec{F}_2 – это вектор, направленный вдоль диагонали параллелограмма, построенного на векторах \vec{F}_1 и \vec{F}_2 . Модуль вектора равнодействующей силы \vec{F} равен длине этой диагонали.

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



5.6. Чему равна равнодействующая сила, если на тело действуют две силы 30 и 40 Н? Силы направлены под углом 90° друг к другу (рис. 38).

5.7. Чему равна равнодействующая сила, если на тело действуют две равные по величине силы по 25 Н? Направлены силы под углом 120° друг к другу (рис. 39).

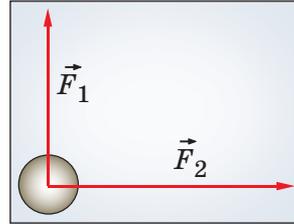


Рис. 38

Если известно ускорение \vec{a} , с которым движется тело массой m , то можно определить равнодействующую силу \vec{F} , вызывающую такое ускорение. Из формулы II закона Ньютона имеем

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

Это выражение позволяет установить связь единицы измерения силы – ньютона с основными единицами СИ – килограмм, метр и секунда.

$$1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

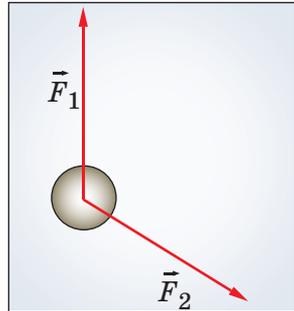


Рис. 39

Третий закон Ньютона. III закон был сформулирован Ньютоном следующим образом:

Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе – взаимодействия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны.

Иными словами, тела взаимодействуют с силами, равными по величине и противоположными по направлению.

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

Так, на рисунке 40 показаны силы, возникающие при взаимодействии мяча и ноги футболиста.



Рис. 40

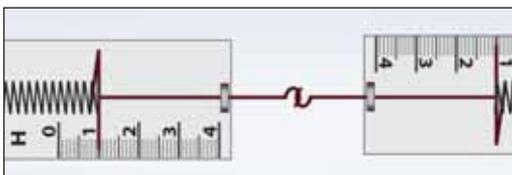


Рис. 41

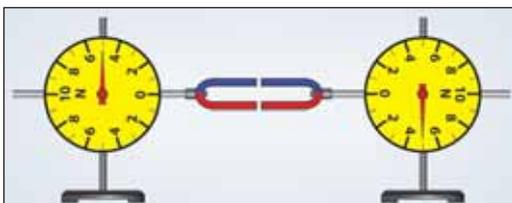


Рис. 42

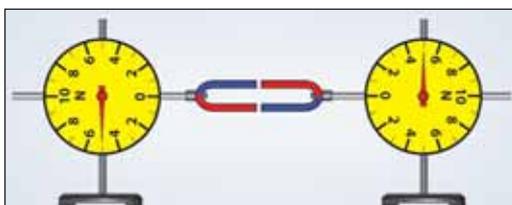


Рис. 43

Вновь поднесём магниты друг к другу, но теперь разноимёнными полюсами (рис. 43). Мы наблюдаем, что магниты притягиваются с равными по модулю силами, направленными противоположно:

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



5.8. Человек, стоя на полу, действует на него с силой 490 Н.

С какой силой пол действует на человека?

С какой силой Земля притягивает человека?

Какова масса человека?

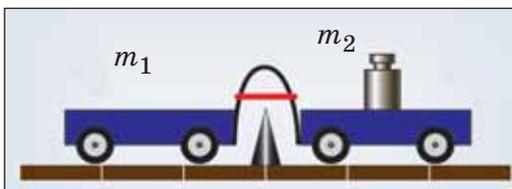


Рис. 44

Этот закон подтверждается наблюдениями. Возьмём лабораторные динамометры, сцепим крючки динамометров между собой и растянем пружины приборов (рис. 41). Динамометры покажут равные силы. С какой силой правый динамометр действует на левый, с такой же силой и левый динамометр действует на правый.

Прикрепим к демонстрационным динамометрам дуговые магниты и поднесём магниты друг к другу одноимёнными полюсами (рис. 42). Магниты будут отталкиваться.

В соответствии с III законом Ньютона магниты отталкиваются с силами, равными по модулю и противоположными по направлению:

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

Прикрепим к тележке упругую пластинку. Пластинку изогнём и свяжем ниткой. Рядом с тележкой по другую сторону от изогнутой пластины расположим другую тележку, «нагруженную» гирей (рис. 44).

После пережигания нити тележки под действием сил приобретут ускорение и изменят свои скорости (рис. 45).



Рис. 45

В соответствии со II законом Ньютона

$$\vec{F}_1 = m_1 \vec{a}_1, \quad \vec{F}_2 = m_2 \vec{a}_2.$$

По III закону Ньютона

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2 \quad \text{и} \quad m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2,$$

где a_1 – ускорение левой тележки;

a_2 – ускорение правой тележки.

Если $m_1 > m_2$,

то $a_2 < a_1$.

Следовательно, при взаимодействии тело бóльшей массы приобретёт меньшее ускорение и меньше изменит свою скорость.

Как вы знаете, именно на *сравнении изменения скорости при взаимодействии тел* основан один из способов измерения массы тел. Во сколько раз второе тело меньше изменяет свою скорость, во столько раз его масса больше по сравнению с первым телом.

Именно этот метод позволяет учёным определять массы небесных тел, взаимодействующих силой всемирного тяготения. Например, астрономам известно большое число двойных звёзд. Двойная звезда – это две близко расположенных звезды, которые вращаются вокруг общего центра. Измерив период вращения двойной звезды, который, как правило, составляет десятки, а то и сотни лет, и определив расстояние между двумя звёздами, составляющими двойную звезду, астрономам удаётся рассчитать массу звёзд.

Применяя III закон Ньютона, необходимо помнить, что хотя *силы взаимодействия* \vec{F}_1 и \vec{F}_2 равны по величине и противоположны по направлению, но они *не могут уравновесить друг друга*. Почему? Обратимся в качестве примера к рисунку 45. Сила \vec{F}_1 – это сила, действовавшая на левую тележку массой m_1 , а сила \vec{F}_2 – это сила, действовавшая на правую тележку массой m_2 . То есть *силы взаимодействия* \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , о которых идёт речь в III законе Ньютона, *приложены к разным телам*.

Первый закон Ньютона, инерциальная система отсчёта, неинерциальная система отсчёта, принцип относительности Галилея, **второй закон Ньютона**, $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$, **равнодействующая сила**, $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$, правило параллелограмма сложения векторов, $1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$, **третий закон Ньютона**, динамический метод измерения массы взаимодействующих тел.

5.1 ● В 1632 г. вышел знаменитый труд Г. Галилея «Диалог о двух главнейших системах мира – птолемеевой и коперниковой». В этой книге Галилей пишет: «Уединитесь с кем-либо из друзей в просторное помещение под палубой какого-нибудь корабля, запаситесь мухами, бабочками и другими подобными мелкими летающими насекомыми... подвесьте, далее, наверху ведёрко, из которого вода будет капать капля за каплей в другой сосуд с узким горлышком, подставленный вниз. Пока корабль стоит неподвижно, наблюдайте прилежно, как мелкие летающие животные с одной и той же скоростью движутся во все стороны помещения;



Рис. 46

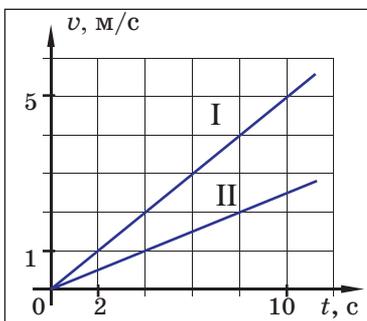


Рис. 47

... все падающие капли попадут в подставленный сосуд, и вам, бросая другу какой-нибудь предмет, не придётся бросать его с большей силой в одну сторону, чем в другую, если расстояния будут одни и те же... Заставьте теперь корабль двигаться с любой скоростью, и тогда (если только движение будет равномерным и без качки в ту и другую сторону) во всех названных явлениях вы не обнаружите ни малейшего изменения и ни по одному из них не сможете установить, движется ли корабль или стоит неподвижно...» Содержание какого физического принципа излагается Г. Галилеем в данном примере?

5.2 ● Покупательская тележка массой 12 кг движется под действием силы 6 Н (рис. 46). Определите её ускорение.

5.3 ● Определите массу мяча, который под действием силы 24 Н движется с ускорением 60 м/с^2 .

5.4 ● На рисунке 47 изображены графики зависимости проекции скорости двух тел от времени. На какое из тел действует большая сила, если массы тел равны?

5.5 ● На рисунке 48 изображены графики зависимости проекции скорости двух тел от времени. Какое из тел имеет большую массу, если равнодействующие сил, приложенных к телам, равны?

5.6 ● Шарик массой 50 г отпустили без начальной скорости с высоты 19,6 м. С каким ускорением будет двигаться шарик? Чему будет равна его мгновенная скорость через 1 с после начала движения? Какое расстояние пролетит шарик за первую секунду падения? Через сколько времени шарик достигнет земли? Какова будет скорость шарика в момент его падения на землю? Силой сопротивления, действующей на шарик, при расчётах пренебречь.

5.7 ● Два лёгких шарика подвесили на нитях одинаковой длины и сообщили шарикам электрические заряды (рис. 49). Заряд левого шарика в два раза меньше заряда правого. На левый шарик действует сила электрического отталкивания 3 мН. Какая сила электрического отталкивания действует на правый шарик?

5.8 ● Два спортсмена стоят вплотную друг к другу на гладком горизонтальном льду (рис. 50). Левый спортсмен отталкивает правого с силой 30 Н в течение 1 с. С каким ускорением будет двигаться при этом правый спортсмен, если его масса 60 кг? На какое расстояние он сместится и какую скорость приобретёт за время взаимодействия? С каким ускорением будет двигаться при взаимодействии левый спортсмен, если его масса 50 кг? На какое расстояние сместится левый спортсмен и какую скорость он приобретёт за время взаимодействия? Как будут двигаться спортсмены после того, как они разъедутся и прекратят отталкивать друг друга?

5.9 ● На одной чашке весов находится стакан с водой, а на другой гири. Весы уравновешены. Нарушится ли равновесие весов, если в воду опустить палец, не притрагиваясь к стакану и весам (рис. 51)?

5.10 ● В преподавании физики существует знаменитая задача «про лошадь». «В соответствии с III законом Ньютона с какой силой лошадь действует на телегу, с такой же по величине, но противоположно направленной силой и телега действует на лошадь. Почему же лошадь может тащить телегу?» Ответьте на вопрос задачи.

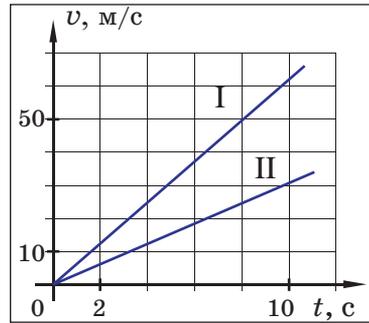


Рис. 48

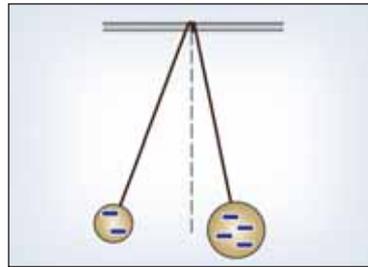


Рис. 49



Рис. 50



Рис. 51

§ 6. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАКОНОВ НЬЮТОНА



Deliberando discitur Sapientia.

(Раздумья всех нас учат мудрости.)

Вам уже известны I, II, III законы Ньютона.



Алгоритм решения задач по механике. При решении задач по механике рекомендуется придерживаться следующего алгоритма:

1. Выполните чертёж, укажите все силы, действующие на тело, движение которого рассматривается.

2. Запишите формулу II закона Ньютона в виде

$$m\vec{a} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots$$

3. Выберите систему отсчёта, укажите направление осей координат.

4. Определите проекции каждой силы на выбранные оси координат.

5. Запишите формулу II закона Ньютона в проекции на каждую из осей координат:

$$\begin{cases} ma_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + \dots, \\ ma_y = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} + \dots \end{cases} \quad (6.1)$$

6. При необходимости дополните систему уравнений (6.1) кинематическими соотношениями. Например,

– для равноускоренного движения:

$$v_x = v_{0x} + a_x t, \quad (6.2)$$

$$S_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}, \quad (6.3)$$

$$x = x_0 + S_x; \quad (6.4)$$

– для движения по окружности с постоянной по величине скоростью:

$$a_u = \frac{v^2}{R}, \quad (6.5)$$

$$v = \frac{2\pi R}{T}. \quad (6.6)$$

7. Решите систему уравнений и получите ответ. Проанализируйте полученный ответ.

Типичный случай. Рассмотрим, какие силы действуют на тела, как выбирают направление осей координат в некоторых случаях.

Случай 1. Движение шайбы по горизонтальному льду (рис. 52).

Какие силы действуют на шайбу? Сила тяжести $\vec{F}_{тяж}$ со стороны Земли; сила упругости (её называют силой реакции \vec{N}) и сила трения $\vec{F}_{тр}$ со стороны льда. Сила тяжести направлена вертикально вниз, сила реакции направлена вверх перпендикулярно опоре – льду, а сила трения – против направления движения. Укажем силы на чертеже (рис. 52, а).

Выберем направление осей координат: ось X направим горизонтально по направлению скорости шайбы, ось Y – вертикально (рис. 52, б). При таком направлении осей координат проекция¹ силы реакции N на ось X равна нулю, а проекция на ось Y положительна и равна модулю этой силы:

$$N_x = 0,$$

$$N_y = N.$$

Несложно определить и проекции векторов $\vec{F}_{тр}$ и $\vec{F}_{тяж}$:

$$F_{тр\ x} = -F_{тр},$$

$$F_{тр\ y} = 0.$$

$$F_{тяж\ x} = 0,$$

$$F_{тяж\ y} = -F_{тяж}.$$

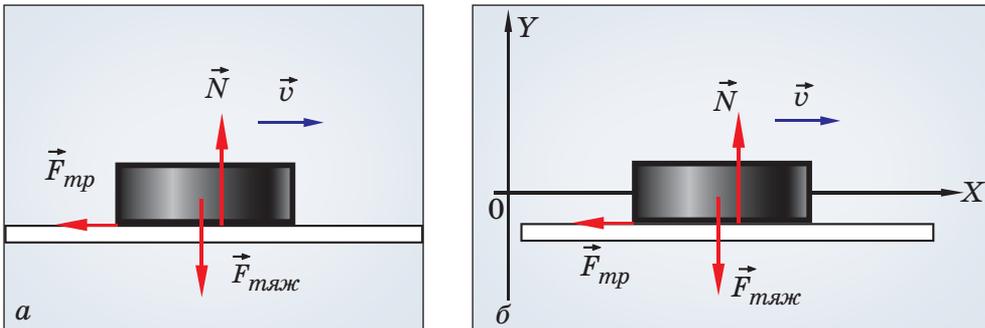


Рис. 52

¹ Правило вычисления проекции вектора на ось координат приведено в § 1 учебника.

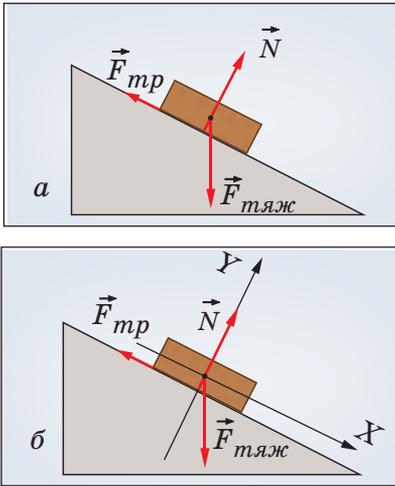


Рис. 53



6.1. Укажите знаки проекций векторов \vec{N} и $\vec{F}_{тр}$ на ось X и ось Y (рис. 53, б).

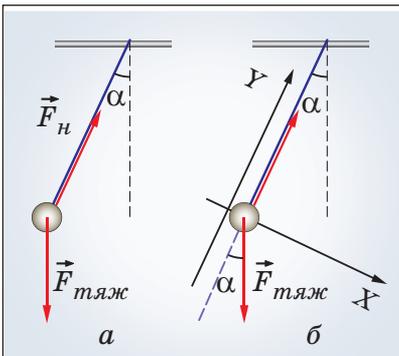


Рис. 54



6.2. Определите проекции силы тяжести $\vec{F}_{тяж}$ на ось X и ось Y в тот момент, когда маятник отклонён от равновесия на угол α (рис. 54, б). (Подсказка. Вам известно, как вычислить модуль силы тяжести:

$$F_{тяж} = mg.$$

Вспомните также, как вычисляются катеты прямоугольного треугольника, если известны гипотенуза треугольника и значения синуса и косинуса острого угла прямоугольного треугольника.)

Случай 2. Брусок скользит вниз по наклонной плоскости (рис. 53).

Какие силы действуют на брусок? Сила тяжести $\vec{F}_{тяж}$ (направлена вертикально вниз). Сила реакции \vec{N} (направлена перпендикулярно опоре – наклонной плоскости), сила трения $\vec{F}_{тр}$ (направлена против движения). Укажем силы на чертеже (рис. 53, а).

Выберем направление осей координат: ось X направим вдоль наклонной плоскости по направлению движения, ось Y – перпендикулярно наклонной плоскости (рис. 53, б).



Случай 3. Движение маятника (рис. 54).

Какие силы действуют на груз, подвешенный на нити? Сила тяжести $\vec{F}_{тяж}$ (направлена вертикально вниз), сила натяжения нити \vec{F}_n (направлена вдоль нити). Укажем силы на чертеже (рис. 54, а).

Выберем направление осей координат: ось X направим в сторону равновесия маятника перпендикулярно нити, ось Y – в сторону точки подвеса маятника вдоль нити (рис. 54, б).

Примеры решения задач.

Задача 1. На тело массой 20 кг действуют две силы – 30 и 40 Н, направленные под прямым углом друг к другу. Определите модуль ускорения, с которым движется тело.

Дано:

Тело
 $m = 20$ кг
 $F_1 = 30$ Н
 $F_2 = 40$ Н
 $\alpha = 90^\circ$

$|\vec{a}| = ?$

Решение:

Выполним чертёж, укажем все силы, действующие на тело (рис. 55, а).

Запишем II закон Ньютона:

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

Или $m\vec{a} = \vec{F}$,

где \vec{F} – равнодействующая сила.

За направление оси координат возьмём направление равнодействующей силы \vec{F} . Направление равнодействующей силы и её величину определим по правилу параллелограмма (рис. 55, б).

Проекция равнодействующей силы \vec{F} на ось X будет положительна и равна

$$F_x = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} , \quad (6.7)$$

так как \vec{F}_1 и \vec{F}_2 – катеты прямоугольного треугольника с гипотенузой \vec{F} .

Запишем II закон Ньютона в проекции на ось X .

$$ma_x = F_x .$$

Отсюда

$$a_x = \frac{F_x}{m} ,$$

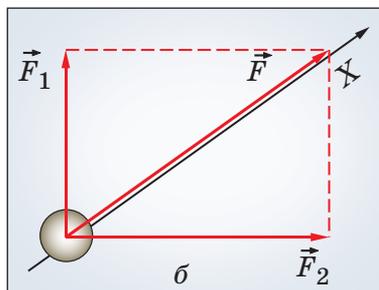
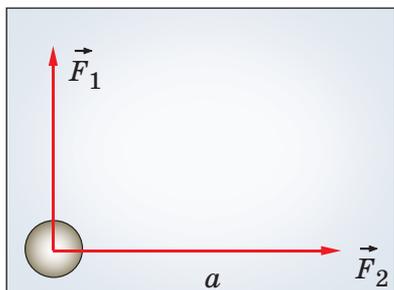


Рис. 55

или с учётом соотношения (6.7) имеем

$$a_x = \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2}}{m}.$$

$$a_x = \frac{\sqrt{30^2 + 40^2}}{20} = 2,5 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right).$$

В соответствии со II законом Ньютона направление ускорения тела \vec{a} совпадает с направлением равнодействующей силы \vec{F} . В данном случае равнодействующая сила направлена вдоль оси X , следовательно, и ускорение тела \vec{a} направлено вдоль оси X .

$$|\vec{a}| = a_x.$$

Ответ: $|\vec{a}| = 2,5 \text{ м/с}^2$.

Задача 2. Какую силу, направленную горизонтально, необходимо приложить к тележке, чтобы она, двигаясь из состояния покоя, переместилась на 3 м за 2 с? Масса тележки 0,5 кг. Трение не учитывать.

Дано:
Тележка
 $v_0 = 0$
 $S_x = 3 \text{ м}$
 $t = 2 \text{ с}$
 $m = 0,5 \text{ кг}$

$F = ?$

Решение:

Укажем все силы, действующие на тележку (рис. 56). Обратите внимание, мы не указываем силу трения, считая её малой в сравнении с другими силами, действующими на тележку.

Запишем II закон Ньютона:

$$m \vec{a} = \vec{N} + \vec{F}_{\text{тяж}}.$$

Выберем направление осей координат следующим образом: ось OX направим горизонтально вдоль направления силы \vec{F} ось OY – вертикально вверх перпендикулярно оси OX . Определим проекции сил \vec{N} , $\vec{F}_{\text{тяж}}$, \vec{F} на ось X и ось OY .

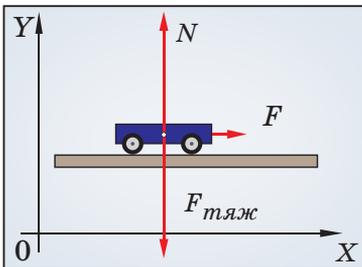


Рис. 56

$$N_x = 0,$$

$$N_y = N.$$

$$F_{\text{тяж}x} = 0,$$

$$F_{\text{тяж}y} = -F_{\text{тяж}}.$$

$$F_x = F,$$

$$F_y = 0.$$

Запишем II закон Ньютона в проекции на каждую из осей координат:

$$ma_x = N_x + F_{тяж\ x} + F_x,$$

$$ma_y = N_y + F_{тяж\ y} + F_y.$$

Или

$$ma_x = F, \quad (6.8)$$

$$ma_y = N - F_{тяж}. \quad (6.9)$$

Вдоль оси Y скорость тела не изменяется,

$$a_y = 0.$$

Следовательно, из соотношения (6.9) имеем

$$N - F_{тяж} = 0,$$

$$N = F_{тяж}.$$

Для определения силы F из выражения (6.8) дополнительно используем кинематическое соотношение (6.3):

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

Так как начальная скорость тележки равна нулю, то

$$S_x = \frac{a_x t^2}{2}.$$

$$\frac{a_x t^2}{2} = S_x.$$

$$a_x t^2 = 2S_x.$$

$$a_x = \frac{2S_x}{t^2}. \quad (6.10)$$

Подставив полученное соотношение (6.10) в выражение (6.8), окончательно имеем

$$F = \frac{2mS_x}{t^2}.$$

$$F = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 3}{2^2} = 0,75 \text{ (Н)}.$$

Действия с единицами измерений:

$$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} = \text{Н}.$$

Ответ: $F = 0,75 \text{ Н}$.

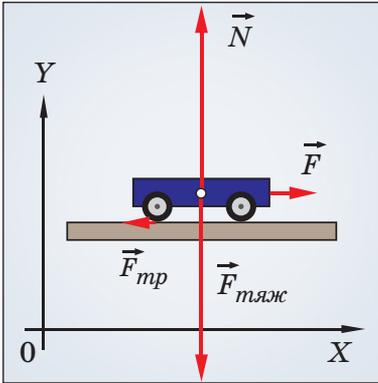


Рис. 57

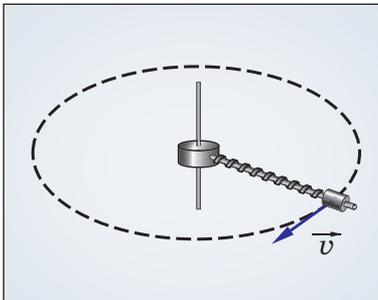


Рис. 58

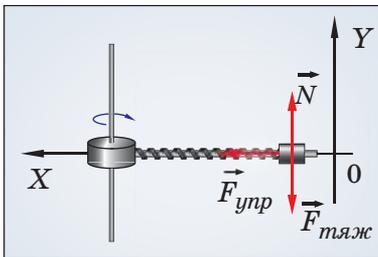


Рис. 59



Задача 3. Как изменится ответ предыдущей задачи, если при движении тележки на неё действует сила трения 0,05 Н?

Решение:

Укажем все силы, действующие на тележку при её движении (рис. 57). Запишем II закон Ньютона:

$$m\vec{a} = \vec{N} + \vec{F}_{тяж} + \vec{F} + \vec{F}_{тр}.$$

Определим проекции силы трения $\vec{F}_{тр}$ на ось X и ось Y:

$$F_{тр\ x} = -F_{тр},$$

$$F_{тр\ y} = 0.$$

(Проекции остальных сил определены при решении предыдущей задачи.)

Запишем II закон Ньютона в проекции на ось X:

$$ma_x = F - F_{тр\ x}.$$

Отсюда

$$F = ma_x + F_{тр}.$$

С учётом соотношения (6.10) имеем

$$F = \frac{2mS_x}{t^2} + F_{тр}.$$

$$F = 0,8 \text{ Н.}$$

Ответ: $F = 0,8 \text{ Н.}$

Задача 4. Один конец пружины закреплён на оси стержня (рис. 58), способного вращаться в горизонтальной плоскости. К другому концу пружины прикреплен цилиндрический груз, который может скользить по стержню без трения. Масса груза 400 г. Какая сила упругости будет действовать на груз при его вращении со скоростью 5 м/с? Радиус вращения груза при такой скорости движения равен 20 см.

Дано:	СИ
Груз	
$m = 400$ г	0,4 кг
$v = 5$ м/с	
$R = 20$ см	0,2 м
$F_{\text{упр}} - ?$	

Решение:
Укажем все силы, действующие на цилиндр (рис. 59).

Запишем II закон Ньютона:

$$m\vec{a} = \vec{F}_{\text{упр}} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тяж}}.$$

Выберем направление осей координат следующим образом: ось X направим горизонтально вдоль направления силы упругости, ось Y – вертикально вверх перпендикулярно оси X .

Запишем II закон Ньютона в проекции на ось X :

$$ma_x = F_{\text{упр}}.$$



6.3. Есть ли необходимость при решении данной задачи записывать II закон Ньютона в проекции на ось Y ?

Цилиндр вращается по окружности с постоянной по величине скоростью, следовательно, он движется с центростремительным ускорением:

$$a_x = a_u.$$

Таким образом,

$$F_{\text{упр}} = ma_u. \quad (6.11)$$

Центростремительное ускорение a_u определим, используя соотношение (6.5). Тогда выражение (6.11) примет вид

$$F_{\text{упр}} = \frac{mv^2}{R}.$$

$$F_{\text{упр}} = \frac{0,4 \cdot 5^2}{0,2} = 50 \text{ (Н)}.$$

Действия с единицами измерений:

$$\frac{\text{кг} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)^2}{\text{м}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{м} \cdot \text{с}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} = \text{Н}.$$

Ответ: $F_{\text{упр}} = 50$ Н.

Алгоритм решения задач по механике.

6.1 ● Парашютист в начале прыжка испытывает силу сопротивления воздуха 330 Н. Земля его притягивает с силой 980 Н. С каким ускорением движется парашютист, если его масса 100 кг?

6.2 ● На рисунке 60 показан график зависимости величины скорости тела v от времени t . Чему равна равнодействующая сила в промежутке времени от 0 до 6 с? от 6 до 10 с? Масса тела 10 кг.

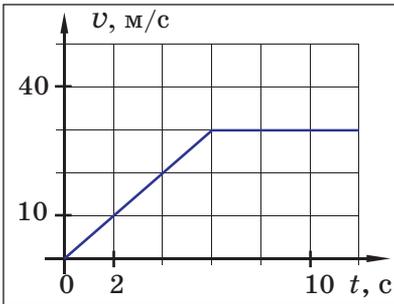


Рис. 60

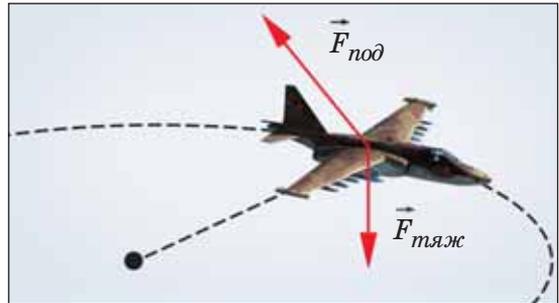


Рис. 61

6.3 ● Самолёт совершает вираж, двигаясь в горизонтальной плоскости с центростремительным ускорением 6 м/с^2 (рис. 61). Чему равна при этом подъёмная сила $\vec{F}_{\text{под}}$, действующая на самолёт со стороны воздуха? Масса самолёта 14 т . (Подсказка. Укажите на чертеже силы, действующие на самолёт; укажите равнодействующую силу. Запишите II закон Ньютона применительно к данному случаю.)

6.4 ● Два вагона сцеплены между собой и движутся по горизонтальным рельсам. С каким ускорением движутся вагоны, если на них со стороны локомотива действует горизонтально направленная сила F , равная 10 кН ? С какой силой растянута при этом сцепка? Масса первого, ближнего к локомотиву вагона $m_1 = 27,5 \text{ т}$, масса второго вагона $m_2 = 22,5 \text{ т}$.

6.5 ● Маятник представляет собой шарик массой 50 г , подвешенный на лёгкой нерастяжимой нити длиной $0,5 \text{ м}$. С какой силой растянута нить маятника в момент прохождения им нижней точки? Скорость шарика в этом момент составляет 2 м/с .

§ 7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ПРОВЕРКА II ЗАКОНА НЬЮТОНА»



Мы никогда не будем умны чужим умом.

*Н. М. Карамзин (1766–1826),
русский писатель, историк*

Вам уже известен алгоритм применения II закона Ньютона.

Анализ движения тела. Изготовим маятник, закрепив небольшой груз на нити. Возьмём нить пальцами у точки подвеса и будем вращать её (рис. 62). При этом можно добиться того, что груз будет двигаться по окружности определённого радиуса с постоянной по величине скоростью.

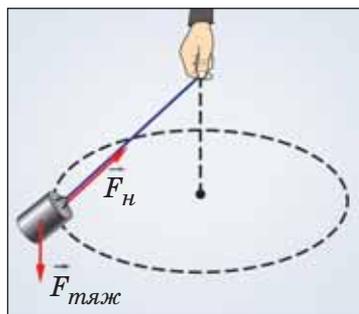


Рис. 62

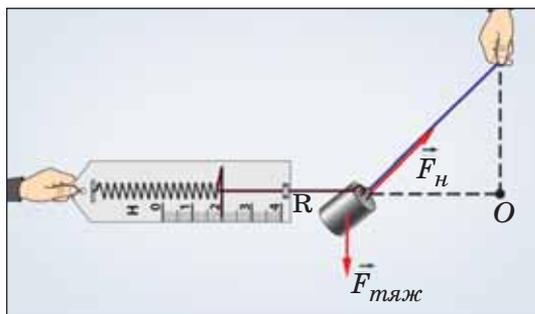


Рис. 63

Какие силы действуют на груз при его движении по окружности? Груз взаимодействует с Землёй (сила тяжести) и нитью (сила упругости – сила натяжения нити). Эти силы изображены на рисунке 62. Равнодействующая сила \vec{F} равна

$$F = F_n + mg.$$

По II закону Ньютона

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (7.1)$$

Определим равнодействующую силу и ускорение. Величину равнодействующей силы \vec{F} легко измерить. Прикрепим к грузу динамометр и, смещая динамометр, отклоним маятник от вертикали на расстояние, равное радиусу окружности (рис. 63). Так как в этом случае тело покоится, то сила натяжения \vec{F}_n и сила тяжести $m\vec{g}$ уравновешиваются силой $\vec{F}_{дин}$, действующей на тело со стороны пружины динамометра. Таким образом, равнодействующая сила \vec{F} численно равна показанию динамометра $F_{дин}$:

$$F = F_{дин}. \quad (7.2)$$

Центростремительное ускорение вычисляется по формуле

$$a_u = \frac{v^2}{R}, \quad (7.3)$$

где v – скорость груза при его вращении по окружности радиусом R .

Скорость v легко определить (смотрите решение задачи 1 из § 4):

$$v = \frac{2\pi R}{T}, \quad (7.4)$$

где T – период вращения.

Если за время t груз совершает N оборотов, то

$$T = \frac{t}{N}. \quad (7.5)$$

Из соотношений (7.3) – (7.5) имеем

$$a_{ц} = \frac{4\pi^2 N^2 R}{t^2}. \quad (7.6)$$

При проведении экспериментальной проверки II закона Ньютона необходимо убедиться, что

$$a \sim F.$$

Иными словами, если на тело действует сила, то тело движется с ускорением a , которое прямо пропорционально равнодействующей силе F .

Лабораторная работа «Проверка II закона Ньютона»

Оборудование: груз массой 100 г, нить, лента измерительная, динамометр лабораторный, секундомер, лист бумаги в форме круга радиусом 20 см.



Указания по выполнению работы

1. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений и вычислений.

Длина нити l , см	70	55	45	35	30
Равнодействующая сила F , Н					
Время движения груза t , с					
Центростремительное ускорение $a_{ц}$, м/с ²					

2. Изготовьте маятник, закрепив груз на нити длиной около 75–80 см.

3. Отмерьте необходимую длину нити 70 см. Положите на середину стола лист бумаги, имеющий форму круга радиусом $R = 0,20$ м. Расположите маятник так, чтобы точка его подвеса находилась *над центром круга* (рис. 62, нить маятника в точке подвеса удерживается непосредственно рукой).

4. Удерживая точку подвеса маятника над центром круга, измерьте динамометром величину равнодействующей силы F (рис. 63).

5. Приведите маятник во вращение так, чтобы груз описывал окружность радиусом $R = 0,20$ м. Измерьте время t , за которое груз совершает $N = 50$ оборотов. Вычислите центростремительное ускорение.

6. Проведите измерения при длине нити 55, 45, 35 и 30 см. Заполните таблицу.

7. Постройте график зависимости ускорения тела от величины равнодействующей силы. По горизонтальной оси отложите значения силы, выбрав масштаб в 1 см – 0,1 Н. По вертикальной оси отложите значения ускорения, выбрав масштаб в 1 см – 0,1 м/с². При построении графика учтите, что в результате опыта значения равнодействующей силы и ускорения тела получены вами с некоторой погрешностью. Поэтому при построении график не ведут «от точки к точке», а проводят плавную линию. При этом руководствуются правилом, что примерно одинаковое число экспериментальных точек графика должно быть «над линией» и «под линией».

8. Сделайте вывод, пропорционально ли ускорение тела равнодействующей силе.



7.1. Зависимость между какими физическими величинами, по вашему мнению, ещё следует исследовать при экспериментальной проверке II закона Ньютона?

7.1 ● Лыжник, скатившись со склона горы, далее движется по горизонтальной поверхности и через некоторое время останавливается. Сила трения, действующая на лыжника на горизонтальном участке его траектории, равна 30 Н. Определите ускорение лыжника, время его торможения и путь, пройденный до остановки. Скорость лыжника после спуска со склона составляет 12 м/с. Масса лыжника 60 кг.

7.2 ● К первоначально покоившемуся телу массой 2 кг приложили силу 10 Н. Запишите уравнения зависимости координаты и скорости тела от времени. Начертите графики данных зависимостей. Начальную координату тела x_0 считать равной нулю.

7.3 ● Стрела массой 30 г выпущена из лука вертикально вверх со скоростью 20 м/с. На стрелу в полёте действует равнодействующая сила 0,3 Н, направленная вертикально вниз. Вычислите время подъёма стрелы до максимальной высоты и максимальную высоту подъёма стрелы.

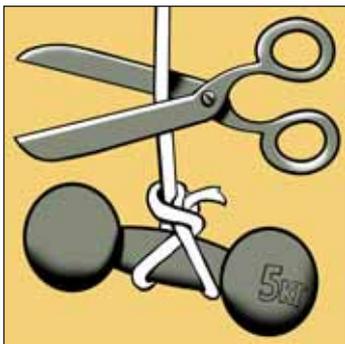
7.4 ● Автомобиль движется по выпуклому мосту радиусом кривизны 100 м с постоянной по величине скоростью 72 км/ч. С какой силой автомобиль действует на мост, находясь на середине моста? Масса автомобиля 1,5 т. (Подсказка 1. В соответствии с III законом Ньютона автомобиль действует на мост с такой же по величине силой, что и мост действует на автомобиль (сила реакции). Подсказка 2. Рассмотрите силы, действующие на автомобиль в верхней точке моста. Учтите, что автомобиль движется с центростремительным ускорением.)

7.5 ● Координата x тела массой 2 кг изменяется с течением времени по закону

$$x = 12 + 6t^2.$$

Чему равна равнодействующая сила? Какова будет скорость тела через 5 с после начала движения?

§ 8. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ



Вышивая свой узор, Природа пользуется лишь самыми длинными нитями.

Р. Фейнман, выдающийся американский физик, лауреат Нобелевской премии

Вам уже известно, что в природе существуют силы всемирного тяготения.

Закон всемирного тяготения. Если бросить мяч, то через некоторое время он упадёт на землю. Это результат действия на мяч силы со стороны Земли. Луна вращается вокруг Земли, двигаясь с центростремительным ускорением. Следовательно, со стороны Земли на Луну действует сила – сила всемирного тяготения. Земля и другие планеты вращаются вокруг Солнца под действием силы всемирного тяготения. Действительно, если на планеты не действовала бы сила тяготения, то эти тела были бы свободными. Тогда в соответствии с I законом Ньютона – законом инерции – планеты двигались бы прямолинейно и равномерно. Но планеты вращаются вокруг Солнца; это возможно только в том случае, когда на них со стороны Солнца действует сила. В соответствии с III законом Ньютона тела *взаимодействуют*. Это значит, что не только Солнце притягивает планету, но планета с такой же по величине силой притягивает Солнце. Не только Земля притягивает Луну, но и Луна притягивает Землю.

Ньютон предположил, что *все тела* во Вселенной притягиваются друг к другу с силами всемирного тяготения. (Эти силы ещё называют гравитационными силами – от латинского слова *gravitas* – тяжесть.) Им был установлен **закон всемирного тяготения**.

Два тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

Математически закон выражается формулой

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (8.1)$$

где m_1 и m_2 – массы взаимодействующих тел;
 r – расстояние между телами.

Коэффициент G называют постоянной всемирного тяготения (гравитационной постоянной), она равна

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

Гравитационная постоянная была определена специальными опытами.

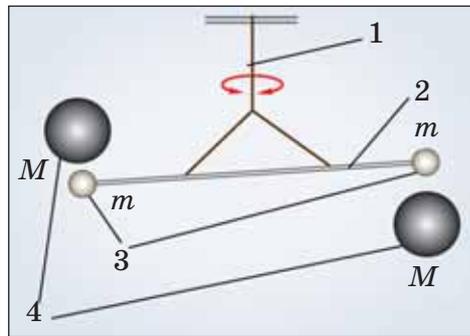


В подобных опытах можно применить крутильный маятник, устройство которого схематически изображено на рисунке 64.

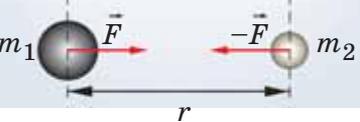
Лёгкое коромысло с двумя одинаковыми грузами массой m подвешено на длинной и тонкой упругой нити. Если слегка повернуть коромысло в горизонтальной плоскости, то крутильный маятник будет совершать колебания. К грузам с равных сторон коромысла подводят, а затем убирают в такт колебаниям шары массой M . За счёт сил тяготения между грузами m и шарами M размах колебаний увеличивается. Это и позволяет в итоге по результатам опыта рассчитать численное значение гравитационной постоянной G .

Рис. 64. Схема опыта по определению гравитационной постоянной:

- 1 – нить подвеса;
- 2 – коромысло;
- 3 – грузы, закреплённые на коромысле;
- 4 – массивные шары, подводимые к грузам то с одной, то с другой стороны коромысла



В каком случае расчёт гравитационных сил непосредственно по формуле всемирного тяготения приводит к точному результату? Взаимодействующие тела должны находиться на таком расстоянии, чтобы их собственные размеры были малы в сравнении с расстоянием между телами. Тогда взаимодействующие тела массой m_1 и m_2 считают материальными точками. В этом случае расстояние r – это расстояние между точками (телами). Подобным же образом проводят расчёт и при взаимодействии двух тел шарообразной формы либо при взаимодействии «шар – материальная точка». Все указанные случаи схематически изображены в таблице на странице 62.

Какие тела взаимодействуют	Как определяется расстояние r	Поясняющий рисунок
Две материальные точки	r – расстояние между телами – материальными точками	
Два тела шарообразной формы	r – расстояние между центрами шаров	
Тело шарообразной формы и материальная точка	r – расстояние между центром шара и материальной точкой	

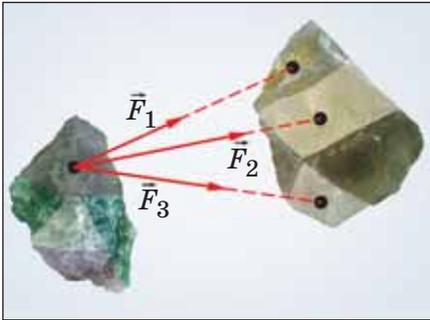


Рис. 65

Вычислим, чему будет равна, к примеру, сила всемирного тяготения между двумя шарами массой по 10 кг, находящимися на расстоянии 1 м друг от друга.

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

$$F = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2} \frac{10 \text{ кг} \cdot 10 \text{ кг}}{(1 \text{ м})^2} = 6,67 \cdot 10^{-9} \text{ Н}.$$

Как видно из этого примера, сила всемирного тяготения составляет *миллиардную часть* ньютона, то есть сила крайне мала. По этой причине мы в повседневной жизни не обнаруживаем сил тяготения между телами, имеющими незначительные массы. Но если хотя бы одно из тел имеет значительную массу (планеты, звёзды), то тогда ситуация иная. Например, сила тяготения Луны к Земле так велика, что этой силы хватило бы для разрыва стального троса диаметром в 700 км!

Как производят вычисление гравитационных сил в случае если тела имеют не шарообразную форму? При расчётах тела мысленно делят на отдельные элементы малых размеров. Вычисляют силы гравитационного взаимодействия между отдельными «элементарными» массами (рис. 65). Затем, сложив (векторно!) эти «элементарные» силы, определяют силу всемирного тяготения между телами. При столь сложных расчётах не обойтись без компьютера.

Сила тяжести. Ускорение свободного падения. Сила тяжести – сила, действующая на тело со стороны Земли (или других планет). Направлена сила тяжести вертикально вниз. Если тело может рассматриваться как материальная точка, то сила тяжести приложена к материальной точке. Если необходимо учитывать размеры тела, то силу тяжести считают приложенной к определённой точке – к *центру тяжести* тела. Центр тяжести – это точка, через которую проходит равнодействующая сила всех сил тяжести, действующих на частицы тела. Например, центр тяжести шара находится в центре шара, центр тяжести кубика – в точке пересечения его диагоналей, а центр тяжести кольца – в центре кольца (вне тела).

Из курса физики 7 класса вам известна формула для расчёта силы тяжести:

$$F_{\text{тяж}} = mg, \quad (8.2)$$

где коэффициент g равен $9,8$ Н/кг. Эта формула была установлена нами как обобщение опыта, теперь же мы выведем формулу для расчёта силы тяжести теоретически.

Пусть тело массой m находится на расстоянии h от поверхности Земли (рис. 66). Тогда сила тяжести $F_{\text{тяж}}$ равна

$$F_{\text{тяж}} = G \frac{M_3 m}{(R + h)^2}, \quad (8.3)$$

где M_3 – масса Земли;

R_3 – радиус Земли.

Средний радиус Земли составляет около 6400 км. Поэтому при подъёме тела на несколько десятков, сотен и даже тысяч метров сила тяжести неизменна. Только при значительной высоте подъёма сила тяжести уменьшается (рис. 67).

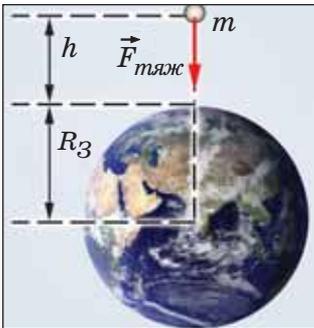


Рис. 66

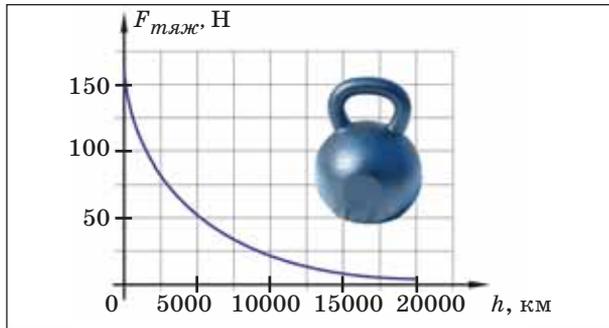


Рис. 67. Зависимость силы тяжести, действующей на гирию массой 16 кг, от высоты подъёма гири над поверхностью Земли



8.1. Как формулируется II закон Ньютона?

В соответствии со II законом Ньютона под действием силы тяжести тело будет двигаться с ускорением.

Ускорение, сообщаемое телу силой тяжести, называют ускорением свободного падения.

Обозначают ускорение свободного падения буквой g (читается: же).



8.2. Какова единица измерения ускорения свободного падения?

Рассчитаем ускорение свободного падения у поверхности Земли.

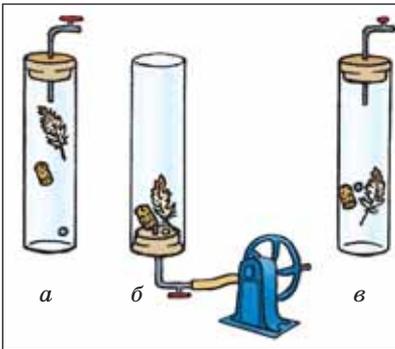


Рис. 68

$$g = \frac{F_{\text{тяж}}}{m}.$$

(Теперь стал ясен физический смысл коэффициента g в формуле (8.2) – это ускорение свободного падения!) Сила тяжести вблизи поверхности Земли равна

$$F_{\text{тяж}} = \frac{GM_3 m}{R_3^2}. \quad (8.4)$$

Следовательно,

$$g = \frac{GM_3}{R_3^2}. \quad (8.5)$$

Среднее значение ускорения свободного падения вблизи поверхности Земли равно

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2.$$

Из формулы (8.5) следует, что ускорение свободного падения тела не зависит от массы тела! Все тела падают на Землю с одним и тем же ускорением. На первый взгляд это противоречит жизненному опыту. Мы знаем, что если одновременно отпустить с одной и той же высоты лёгкий кусочек ваты и тяжёлую монету, то монета быстрее достигнет поверхности Земли. Но оказывается, различие обусловлено силой сопротивления, действующей на тела со стороны воздуха.

Убедимся в этом на опыте. В толстостенную стеклянную трубку длиной около метра поместим на дно свинцовую дробинку, кусок пробки и птичье перо. Перевернём трубку. Все тела упадут за разное время (рис. 68, *а*). Откачаем из трубки воздух (рис. 68, *б*). Повторим опыт. Мы наблюдаем, что в отсутствие воздуха тела действительно движутся с одинаковыми ускорениями и практически одновременно достигают дна трубки (рис. 68, *в*).

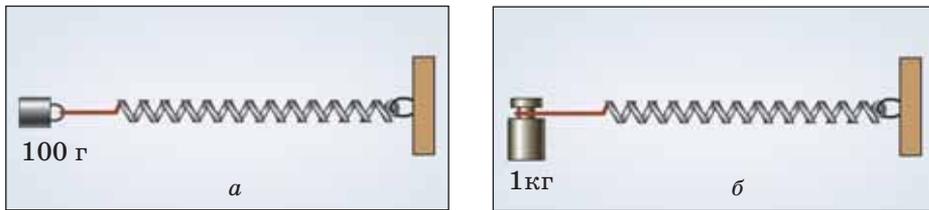


Рис. 69

То, что сила тяжести сообщает одинаковое ускорение телам различной массы, является удивительным фактом. Действительно, представим, например, растянутую пружину, к которой поочерёдно прикрепляют грузы разной массы (рис. 69, а, б). Ясно, что стограммовому грузу и килограммовой гире пружина сообщит различные ускорения.

Дело в том, что на разные по массе грузы будет действовать одинаковая сила упругости. Сила тяжести, в отличие от силы упругости, будет различной. Сила тяжести тем больше, чем больше масса тела. Поэтому ускорение свободного падения одинаково для всех тел.

Ускорение свободного падения можно определить на опыте. Пусть тело без начальной скорости падает с некоторой высоты.



8.3. Как рассчитывается перемещение тела при его равноускоренном движении?

Измерим время падения и перемещение тела (рис. 70). Пусть за время t тело переместилось вниз на расстояние h .

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

$$\text{Но } S = h, v_0 = 0, a = g.$$

$$\text{Тогда } h = \frac{gt^2}{2}.$$

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

$$gt^2 = 2h,$$

$$g = \frac{2h}{t^2}.$$

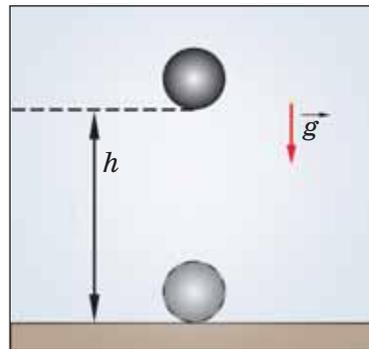


Рис. 70



8.4. Как влияют крупные рудные месторождения на значение ускорения свободного падения в местах их залегания?

Измерив опытным путём ускорение свободного падения и используя закон всемирного тяготения, можно «взвесить» Землю. Действительно, в соответствии с формулой (8.5)

$$g = \frac{GM_3}{R_3^2}.$$

Тогда

$$\frac{GM_3}{R_3^2} = g,$$

$$GM_3 = gR_3^2,$$

$$M_3 = \frac{gR_3^2}{G}.$$

Проведём расчёт:

$$M_3 = \frac{9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot (6400 \cdot 10^3 \text{ м})^2}{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}} = 6,0 \cdot 10^{24} (\text{кг}).$$

Действия с единицами измерений:

$$\frac{\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м}^2}{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}} = \frac{\text{м} \cdot \text{кг}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{Н}} = \frac{\text{м} \cdot \text{кг}^2}{\text{с}^2 \cdot \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}} = \text{кг}.$$

Искусственные спутники Земли. Если бросить камень горизонтально, то, пролетев некоторое расстояние, он упадёт на землю. В полёте на камень действует сила сопротивления воздуха и, конечно же, сила тяжести. Именно благодаря силе тяжести камень «приземляется» через некоторое время. Время падения камня (время его полёта) несложно вычислить, если считать, что камень движется вниз с ускорением свободного падения.



Рис. 71

От чего зависит дальность полёта камня при горизонтальном броске с одной и той же высоты? Ясно, что камень улетит тем дальше, чем больше скорость, сообщённая ему при броске.

Вообразите, что на Земле имеется очень высокая гора и на вершине этой горы за пределами атмосферы установлено орудие (рис. 71). При выстреле из такого «внеатмосферного» орудия на снаряд в полёте будет действовать только сила тяжести. Как и брошенный камень, снаряд будет улетать тем дальше, чем больше скорость, сообщённая ему при выстреле. Летящий снаряд, падая, приближается к поверхности Земли. Но одновременно он и удаляется от земной поверхности, «пролетая мимо», ведь поверхность Земли не плоская, а шарообразная (рис. 71).



8.5. Можно ли снаряду сообщить такую скорость, что он вообще не достигнет земной поверхности, не упадёт на Землю?

Придадим снаряду такую скорость, чтобы насколько он удалялся от «закруглённой» поверхности Земли, настолько же и приближался бы к Земле под действием силы тяжести. Тогда снаряд совершит виток вокруг Земли и станет её *искусственным спутником*.

Скорость, которой должно обладать тело, чтобы стать искусственным спутником Земли (ИСЗ), называют *первой космической скоростью*. Для искусственного спутника, движущегося у самой поверхности Земли, она равна 7,9 км/с.

Только в середине двадцатого века в ракетостроении была достигнута первая космическая скорость. 4 октября 1957 года в Советском Союзе ракетой-носителем был выведен на околоземную орбиту первый искусственный спутник. С этого момента ведёт свой отсчёт космическая эра человечества.



Расчёт первой космической скорости. Пренебрежём силой сопротивления воздуха и будем считать, что на спутник действует только сила тяжести (рис. 72):

$$\vec{F}_{тяж} = m\vec{g}.$$

Запишем II закон Ньютона:

$$m\vec{a} = \vec{F}_{тяж}.$$

Выберем ось координат X , направив её к центру Земли. Тогда проекция силы тяжести положительна:

$$(F_{тяж})_x = mg$$

и

$$ma_x = (F_{тяж})_x,$$

$$a_x = g. \quad (8.6)$$

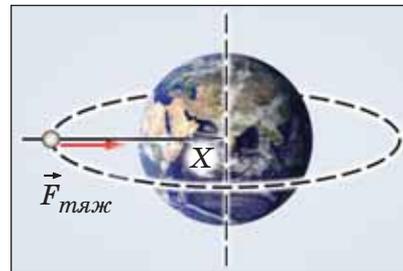


Рис. 72

Если тело движется по окружности с постоянной по величине скоростью, то, как вы знаете, оно движется с центростремительным ускорением a_u .

Следовательно,

$$a_x = a_u.$$

С учётом (8.6) имеем

$$a_u = g. \quad (8.7)$$

Как вычислить центростремительное ускорение a_u спутника, движущегося со скоростью v по окружности, радиус которой практически равен радиусу Земли R_3 ?

$$a_u = \frac{v^2}{R_3}.$$

Тогда соотношение (8.7) примет вид

$$\frac{v^2}{R_3} = g.$$

Отсюда

$$v^2 = gR_3$$

и

$$v = \sqrt{gR_3}.$$

Вычислим значение этой скорости:

$$v = \sqrt{9,8 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 6400 \cdot 10^3 \text{М}} \approx 7900 \frac{\text{М}}{\text{с}}.$$

$$v = 7,9 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$



8.6. Переведите значение первой космической скорости 7,9 км/с из км/с в км/ч.

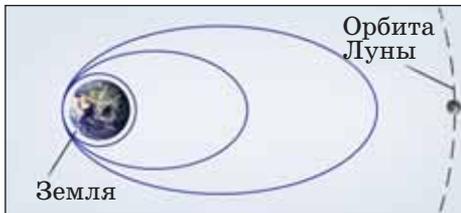


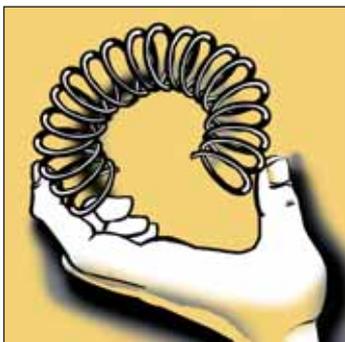
Рис. 73

Итак, если сообщить телу скорость в горизонтальном направлении около 8 км/с, то оно станет искусственным спутником Земли. При такой скорости спутник будет двигаться на небольшой (в сравнении с радиусом планеты) высоте по круговой орбите. Формы орбит при других значениях скорости изображены на рисунке 73.

Закон всемирного тяготения. $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$, постоянная всемирного тяготения (гравитационная постоянная), **сила тяжести**, центр тяжести, $F_{тяж} = G \frac{M_3 m}{(R_3 + h)^2}$, **ускорение свободного падения**, **искусственный спутник Земли**, первая космическая скорость.

- 8.1** ● Подготовьте ответ о законе всемирного тяготения по плану ответа о физическом законе.
- 8.2** ● Во сколько раз сила тяготения Земли к Солнцу больше силы тяготения Марса к Солнцу? Масса Марса составляет 0,11 от массы Земли. Расстояние от Марса до Солнца в 1,52 больше расстояния от Земли до Солнца.
- 8.3** ● Определите массу Солнца. При решении задачи можно принять, что Земля движется вокруг Солнца по круговой орбите радиусом 150 млн км. Скорость обращения Земли вокруг Солнца составляет 30 км/с. Во сколько раз масса Солнца больше массы Земли?
(Подсказка. Рассмотрите движение Земли вокруг Солнца; запишите для данного движения II закон Ньютона. Учтите, если считать, что Земля вращается вокруг Солнца по круговой орбите, то движение Земли происходит с центростремительным ускорением.)
- 8.4** ● Подготовьте ответ об ускорении свободного падения по плану ответа о физической величине.
- 8.5** ● Земля по форме в точности не является шаром; она сплюснута у полюсов, и её экваториальный радиус больше полярного. Где ускорение свободного падения больше – на экваторе или полюсе? Ответ обосновать.
- 8.6** ● Чему равен период вращения искусственного спутника Земли, движущегося по круговой орбите на высоте, которая во много раз меньше радиуса Земли? При расчётах считать Землю шаром радиусом 6400 км.
- 8.7** ● На гирию, находящуюся на поверхности Земли, действует сила тяжести 160 Н. Какая сила тяжести будет действовать на эту же гирию при её подъёме на высоту h , равную трём радиусам Земли?
- 8.8** ● Какова дальность полёта пули при выстреле из автомата в горизонтальном направлении с высоты 0,8 м? При расчёте принять скорость вылета пули равной 900 м/с, ускорение свободного падения 10 м/с². Силу сопротивления воздуха не учитывать.
- 8.9** ● Вычислите первую космическую скорость для искусственного спутника Марса, движущегося на малой высоте над поверхностью планеты по круговой орбите. Радиус Марса 3400 км. Масса Марса $6,6 \cdot 10^{23}$ кг.
- 8.10** ● Чему равно ускорение свободного падения на Луне, если радиус Луны составляет 27 % от радиуса Земли, а масса – 1,2 % от массы Земли? Почему американские астронавты, находясь на Луне, передвигались по её поверхности «стилем кенгуру»?

§ 9. СИЛА УПРУГОСТИ



Сила любой пружины находится в одинаковом отношении с напряжением. Иными словами, если одна сила растягивает или сгибает её на одну длину, две согнут на две длины... и так далее.

Р. Гук (1635–1703), известный английский естествоиспытатель, учёный-энциклопедист

Вам уже известно, что сила упругости возникает при деформации тела.

Основные сведения о силе упругости.

При деформации тела – сжатии, растяжении, изгибе, сдвиге, кручении – изменяется расстояние между частицами тела (рис. 74). Это приводит к изменению сил электрического взаимодействия между частицами тела. Так, при сближении одноименно заряженных частиц возрастают силы электрического отталкивания. При сближении разноименно заряженных частиц увеличиваются силы притяжения между ними. В итоге возникает *сила упругости*.

Сила упругости тем больше, чем больше величина деформации. Пусть, к примеру, пружину растянули так, что её длина увеличилась на x (рис. 75). Обозначим возникшую при этом силу упругости как $F_{упр}$.

Тогда

$$F_{упр} \sim x. \quad (9.1)$$

Эта зависимость получила в физике название закона Гука.

Сила упругости, возникающая при деформации тела, прямо пропорциональна величине деформации.



Рис. 74

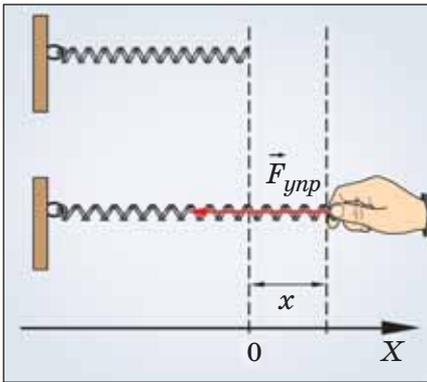


Рис. 75

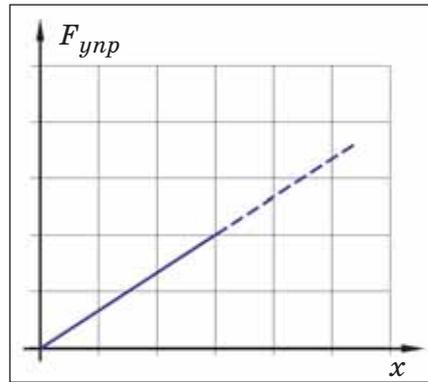


Рис. 76

График зависимости силы упругости $F_{упр}$ от величины деформации x изображён на рисунке 76.

При каких условиях выполняется закон Гука?

Во-первых, деформации должны быть *упругими*. То есть при упругой деформации тело возвращается к прежней форме после того, как прекращают сжимать или растягивать тело. Сжатие пружины, растяжение струны, изгиб линейки – это примеры упругих деформаций. «Безвозвратное» изменение формы куска пластилина или железной скрепки – примеры неупругих деформаций.

Во-вторых, деформации должны быть *малыми*. Например, если прочную стальную проволоку длиной 1 м растянуть более чем на 3 мм, то деформация перестанет быть упругой, и закон Гука уже не будет выполняться.

При дальнейшем же удлинении проволоки произойдёт разрыв – разрушение деформируемого тела.

Запишем соотношение (9.1) в виде равенства. Для этого введём коэффициент пропорциональности между силой упругости $F_{упр}$ и величиной деформации x . Обозначим коэффициент пропорциональности буквой k и назовём его **жёсткостью тела (пружины)**. Тогда формула закона Гука запишется в виде

$$F_{упр} = - kx . \quad (9.2)$$

Жёсткость тела (пружины) измеряется в Н/м (почему?).

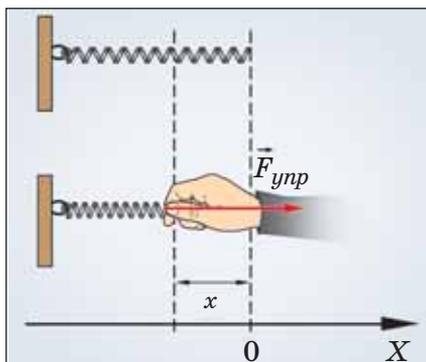


Рис. 77



У разных тел жёсткость различна. От чего зависит жёсткость? Во-первых, жёсткость зависит от рода вещества деформируемого тела. Ясно, что жёсткость стальной проволоки больше, чем жёсткость такой же по размерам и толщине рыболовной лески. Во-вторых, жёсткость зависит от площади поперечного сечения и длины деформируемого тела. На рис. 78 и 79 изображены опыты, подтверждающие, что чем толще и короче полоска резины, тем меньше она деформируется под действием одной и той же силы. Следовательно, *чем больше площадь поперечного сечения тела и чем меньше его длина, тем больше жёсткость тела.*

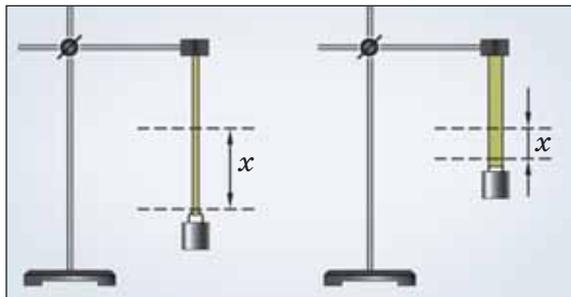


Рис. 78. Чем больше площадь поперечного сечения плоской резины, тем больше её жёсткость

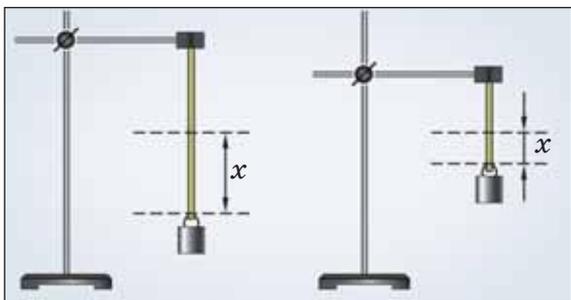


Рис. 79. Чем короче полоска резины, тем больше её жёсткость

В формуле закона Гука поставлен знак «минус». Почему? Это легко понять. Обратимся к рисунку 75. Пружина растянута вдоль оси X в *положительном* направлении. В этом случае сила упругости $F_{упр}$ направлена влево, проекция силы упругости на ось X *отрицательна*.



9.1. Пусть пружина сжата (рис. 77). Как при этом будет направлена сила упругости, каков будет знак её проекции на ось X ?

Лабораторная работа «Изучение силы упругости»

Оборудование: полоска плоской резины шириной 5–6 мм и длиной 20–25 см, лабораторный динамометр, деревянный брусок, измерительная линейка.

Указания к работе

Один конец полоски резины прижмите деревянным бруском, а к другому концу полоски прикрепите динамометр (рис. 80). Если сместить динамометр, то полоска резины растянется и при её деформации возникнет сила упругости. Величину деформации, то есть удлинение полоски резины x , легко определить:

$$x = l - l_0,$$

где l_0 и l – соответственно начальная и последующая длина полоски резины.

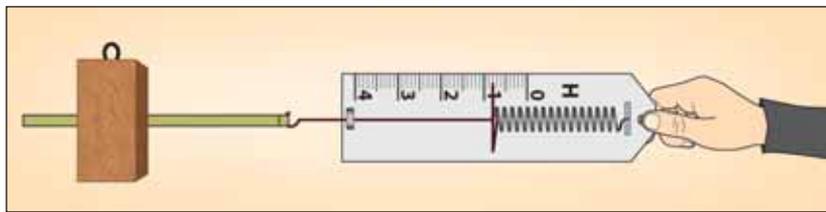


Рис. 80

Величину силы упругости $F_{упр}$, возникшую при деформации, также нетрудно определить – она равна показанию динамометра.



Задание 1. Изучите зависимость силы упругости от величины деформации.

1. Измерьте значение силы упругости $F_{упр}$ при различных удлинениях x полоски резины. Данные занесите в таблицу.

Величина деформации x , мм							
Сила упругости $F_{упр}$, Н							

2. По результатам проведённых измерений постройте график зависимости силы $F_{упр}$ от величины деформации x .



9.2. Значения какой из величин – x или $F_{упр}$ – следует отложить на горизонтальной оси графика?

3. Сделайте вывод, выполняется ли при деформации полоски резины закон Гука.



Задание 2. Определите жёсткость полоски резины.

Если закон Гука выполняется, то можно вычислить жёсткость полоски резины k . В соответствии с законом Гука

$$|F_{упр}| = kx.$$

Отсюда

$$kx = |F_{упр}|,$$

$$k = \frac{|F_{упр}|}{x}. \quad (9.3)$$

На графике выберите значения силы упругости $F_{упр}$ и величины деформации x . По формуле (9.3) вычислите жёсткость k полоски резины.

Для оценки точности полученного результата определите относительную погрешность ε_k измерения жёсткости.

$$\varepsilon_k = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta F_{упр}}{F_{упр}}.$$

Примите абсолютные погрешности равными

$$\Delta x = 1 \text{ мм}, \Delta F_{упр} = 0,1 \text{ Н}.$$

Вычислите абсолютную погрешность Δk измерения жёсткости. Согласно определению, относительная погрешность ε_k измерения жёсткости равна

$$\varepsilon_k = \frac{\Delta k}{k}.$$

Тогда

$$\Delta k = \varepsilon_k k.$$

Запишите результат измерения в виде

$$k_{измер} = k \pm \Delta k.$$

Сделайте вывод¹.

Задание 3. Определите жёсткость полоски резины при другой длине полоски. Сделайте вывод, зависит ли жёсткость полоски от её длины.

¹ Допустим, вами получен результат $k_{измер} = (95 \pm 7) \text{ Н/м}$.

Что означает такая форма записи результата? Так как любое измерение производится с некоторой погрешностью, то точное значение измеренной величины $k_{измер}$ не может быть установлено. Однако определено, что значение данной величины находится в интервале от 88 до 102 Н/м.

Вес тела. Невесомость. Прикрепим груз к пружине динамометра (рис. 81). Груз действует на пружину с некоторой силой, и пружина деформируется – растягивается. Между двумя стопками тетрадей положим линейку, а на неё – книгу (рис. 82). Книга будет действовать на линейку с некоторой силой, и линейка деформируется – изогнётся.

Силу, с которой тело растягивает нить подвеса или деформирует опору, называют весом тела.

Вес тела обозначают буквой \vec{P} (читается: пэ).

Сила тяжести и вес тела – различные силы. Во-первых, различна природа сил. Сила тяжести – это сила всемирного тяготения между телом и Землёй. Сила «вес тела» – это сила упругости, возникающая при деформации тела, взаимодействующего с опорой. Во-вторых, эти силы приложены к разным телам. Сила тяжести действует на тело, а сила «вес тела» – на опору. Обратите внимание, что подобное наименование физической величины не является удачным! Сила «вес тела» приложена не к телу, а к опоре (или нити подвеса).



Рис. 81



Рис. 82



На рисунке 83 изображён груз, находящийся на опоре. Какие силы приложены к грузу? На груз действуют две силы – сила тяжести $\vec{F}_{тяж}$ со стороны Земли и сила реакции \vec{N} со стороны опоры. На опору действует сила – вес тела \vec{P} .

Рассчитаем значение веса тела. С этой целью запишем формулу II закона Ньютона применительно к телу, находящемуся на опоре (рис. 83).

$$m \vec{a} = \vec{F}_{тяж} + \vec{N}.$$

$$\vec{F}_{тяж} = m \vec{g}.$$

Тогда

$$m \vec{a} = m \vec{g} + \vec{N}. \quad (9.4)$$

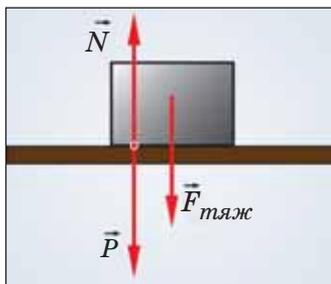


Рис. 83

Согласно III закону Ньютона, тело и опора взаимодействуют силами, равными по величине и противоположными по направлению.

Следовательно,

$$\vec{N} = -\vec{P}. \quad (9.5)$$

Подставим соотношение (9.5) в выражение (9.4):

$$m \vec{a} = m \vec{g} - \vec{P}.$$

$$\vec{P} = m \vec{g} - m \vec{a},$$

$$\vec{P} = m (\vec{g} - \vec{a}). \quad (9.6)$$

Если тело покоится или движется с постоянной скоростью ($\vec{a} = 0$), то вес равен силе тяжести, действующей на тело.

$$\vec{P} = m \vec{g} \text{ при } \vec{a} = 0.$$

Если тело движется ускоренно ($\vec{a} \neq 0$), то вес тела может быть как больше, так и меньше силы тяжести. Это легко проверить, используя динамометр и груз (рис. 84, а-в).

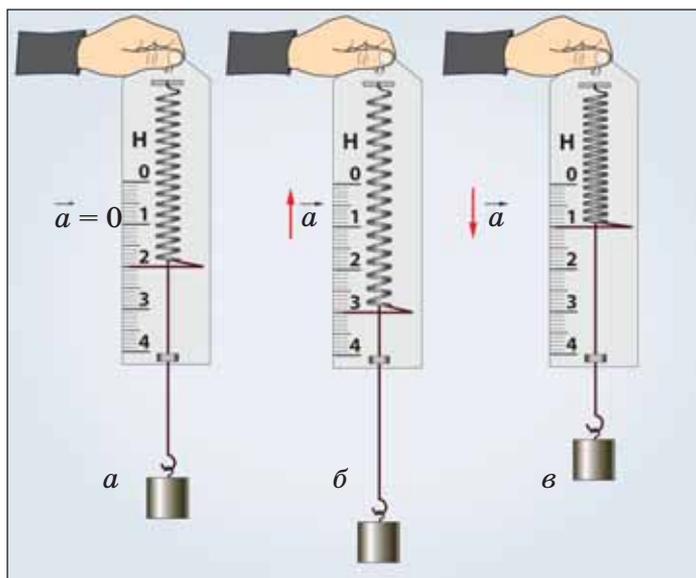


Рис. 84. Изменение веса тела:

а – ускорение тела равно нулю. Вес тела равен силе тяжести ($P = mg$);

б – ускорение тела направлено вверх. Вес тела больше силы тяжести ($P > mg$);

в – ускорение тела направлено вниз. Вес тела меньше силы тяжести ($P < mg$)

Наиболее интересным случаем является случай движения тела с ускорением, равным ускорению свободного падения ($\vec{a} = \vec{g}$).

В этом случае вес тела равен нулю.

$$\vec{P} = 0 \text{ при } \vec{a} = \vec{g}.$$

Состояние тела, при котором его вес равен нулю, называют *невесомостью*. В состоянии невесомости тело не давит на опору и не растягивает нить подвеса.



Рис. 85. Состояние невесомости в космическом корабле



9.3. Какая сила сообщает телу ускорение свободного падения?

Если на тело действует единственная сила – сила тяжести, то ускорение тела будет равно ускорению свободного падения. Поэтому тела, движущиеся только под действием силы тяжести, находятся в состоянии невесомости. Пусть, например, космический корабль выведен на орбиту искусственного спутника Земли. Тогда космический корабль, космонавт и предметы в корабле будут находиться в состоянии невесомости (рис. 85).

Сила упругости, закон Гука, $F_{упр} = -kx$, жёсткость тела (пружины), зависимость жёсткости тела от его геометрических размеров, **вес тела**, изменение веса тела при его ускоренном движении, $\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a})$, **невесомость.**

9.1 ● На рисунке 86 изображены графики зависимости силы упругости $F_{упр}$ от величины сжатия x для двух пружин. Какая из пружин имеет большую жёсткость? во сколько раз? Ответ обосновать.

9.2 ● Жёсткость пружины лабораторного динамометра составляет 40 Н/м. Какое значение силы покажет прибор при удлинении пружины динамометра на 2,5 см?

9.3 ● Человек массой 60 кг становится на платформу напольных весов. На сколько сместится вниз платформа весов, если жёсткость упругой системы прибора составляет 120 кН/м?

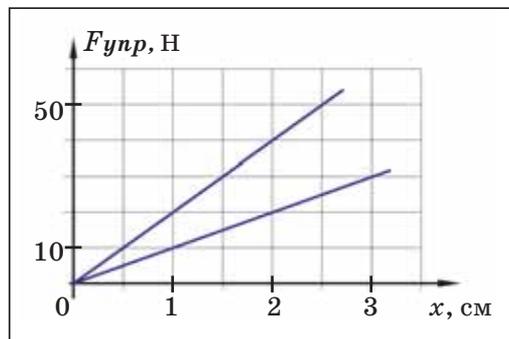


Рис. 86

9.4 ● Груз массой 100 г прикрепили к пружине жёсткостью 25 Н/м (рис. 69, а). Сместив груз, пружину растянули на 2,0 см. С каким ускорением будет двигаться груз в начальный момент (после того, как его отпустят)? Трение не учитывать. Будет ли движение груза равноускоренным? Ответ обосновать.

9.5 ● Полоска резины имеет жёсткость k . Чему станет равна жёсткость, если полоску сложить вдвое? Ответ обосновать.

§ 10. СИЛА ТРЕНИЯ



Очень слабые межмолекулярные силы являются причиной того, что тефлон имеет самый низкий коэффициент трения среди твёрдых материалов... Из-за низкого трения и несмачиваемости насекомые не способны ползти по тефлоновой стенке.

Материал из Википедии – свободной энциклопедии

Вы уже знаете, что одной из механических сил является сила трения.

Основные сведения о силе трения. Сила трения сопутствует большинству механических движений. Напомним основные сведения о силе трения, известные вам из курса физики 7 класса.

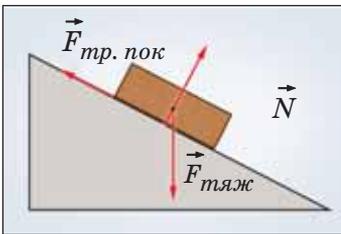


Рис. 87. Неподвижное тело на наклонной плоскости:

$\vec{F}_{тяж}$ – сила тяжести;

\vec{N} – сила реакции опоры;

$\vec{F}_{тр. пок}$ – сила трения покоя

Во-первых, существует *сила трения покоя*. Сила трения покоя – это сила, возникающая при попытке привести в движение покоящееся тело. Это именно та сила, что удерживает от скольжения, например, книгу при небольшом наклоне крышки стола (рис. 87).

Произнося слова «сила трения», мы сразу же представляем силу, «мешающую» движению. Но к силе трения покоя это не относится. Только благодаря силе трения покоя возможно движение тел – людей, автомобилей (рис. 88, а, б).

Во-вторых, при скольжении одного тела по поверхности другого возникает сила трения скольжения. Направление силы трения скольжения противоположно направлению движения тела (рис. 89). Трение – сложный физический процесс, в котором имеет место одновременно и деформация – изменение поверхностного слоя скользящего тела, и возникновение сил молекулярного взаимодействия между отдельными частицами соприкасающихся тел. Величина силы трения скольжения зависит от качества обработки соприкасающихся поверхностей, а также от того, какие вещества контактируют при скольжении.

Сила трения скольжения зависит ещё и от того, с какой силой движущееся тело давит на опору (от веса тела).

Чем больше вес тела, тем больше сила трения скольжения, действующая на тело.

Опыт свидетельствует, что во сколько раз увеличивается вес тела, во столько же раз увеличивается и сила трения скольжения.

Если тело действует на опору силой «вес тела», то деформированная опора, в свою очередь, действует на тело силой реакции \vec{N} (рис. 91).

Согласно III закону Ньютона,

$$\vec{P} = -\vec{N}.$$

Таким образом, можно сделать вывод, что величина силы трения скольжения $F_{тр.скол}$ зависит от величины силы реакции N . Математически данную зависимость можно выразить следующим образом:

$$F_{тр.скол} \sim N. \quad (10.1)$$

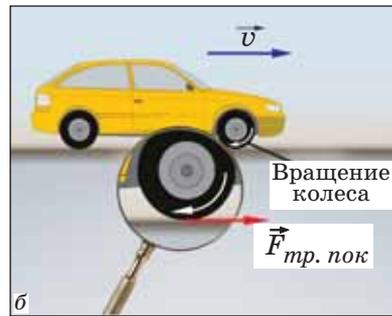
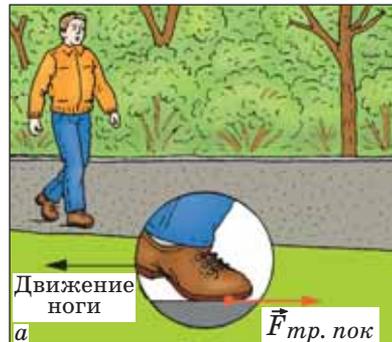


Рис. 88. Сила трения покоя как причина движения:

a – при действии подошвы обуви человека на поверхность земли; *б* – при вращении колеса автомобиля



Рис. 89



Рис. 90

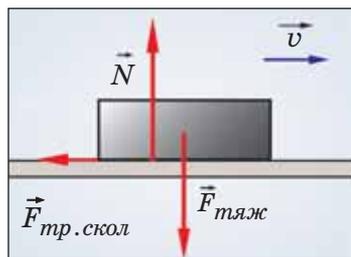


Рис. 91



10.1. В каком случае необходимо прикладывать бóльшую силу при равномерном движении санок (рис. 90, а, б)?

Запишем соотношение (10.1) в виде равенства. Для этого введём коэффициент пропорциональности между силой трения скольжения и силой реакции. Обозначим коэффициент пропорциональности буквой μ (читается: мю) и назовём его **коэффициентом трения скольжения**.

Тогда соотношение (10.1) примет вид

$$F_{\text{тр.скол}} = \mu N. \quad (10.2)$$



10.2. В каких единицах измеряется коэффициент трения скольжения?

Ниже в таблице приведены ориентировочные значения коэффициента трения скольжения для некоторых пар материалов.

Материалы (при сухих поверхностях)	Коэффициент трения скольжения
Дерево по дереву (в среднем)	0,15 – 0,20
Лёд по льду	0,028
Сталь по стали	0,03–0,09
Сталь по льду (коньки)	0,015
Резина (шина) по асфальту	0,50 – 0,70

Лабораторная работа «Изучение силы трения скольжения»

Оборудование: динамометр лабораторный, набор грузов, деревянный брусок, деревянная линейка, полоска линолеума.

Указания к работе

При выполнении работы необходимо проверить зависимость силы трения скольжения от силы реакции и определить коэффициент трения скольжения дерева по дереву, дерева по линолеуму.

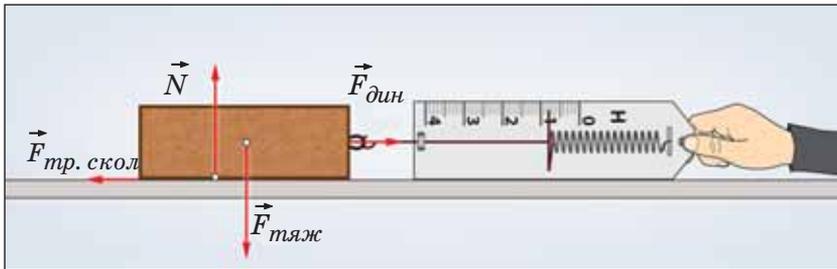


Рис. 92



Задание 1. Изучите зависимость силы трения скольжения от силы реакции.

1. Измерьте силу трения при скольжении деревянного бруска по поверхности горизонтально расположенной деревянной линейки. Для измерения силы трения скольжения прикрепите к бруску динамометр и добейтесь *равномерного* движения бруска по линейке (рис. 92). В этом случае показание динамометра будет равно величине силы трения скольжения (почему?).

Примечание. При измерении силы трения скольжения сложно добиться строго равномерного движения бруска; указатель динамометра, как правило, «дёргается», колеблется. Поэтому каждое измерение силы трения скольжения следует проводить три-четыре раза и заносить в таблицу среднее значение силы трения.

2. Измерьте силу реакции (как это сделать?).

3. Повторите измерения, поочерёдно утяжеляя брусок одним, двумя, тремя грузами. Данные занесите в таблицу.

Сила реакции N , Н				
Сила трения скольжения $F_{тр.скол}$, Н				

4. По результатам проведённых измерений постройте график зависимости силы трения скольжения $F_{тр.скол}$ от силы реакции N .



10.3. Значение какой из величин – N или $F_{тр.скол}$ – следует отложить на горизонтальной оси графика?

Сделайте вывод, действительно ли сила трения скольжения прямо пропорциональна силе реакции.



Задание 2. Определите коэффициент трения скольжения дерева по дереву. В соответствии с соотношением (10.2) сила трения скольжения равна

$$F_{тр. скол} = \mu N.$$

Если это предположение получило подтверждение на опыте, то можно вычислить коэффициент трения скольжения.

$$\mu N = F_{тр. скол}.$$

Отсюда

$$\mu = \frac{F_{тр. скол}}{N}. \quad (10.3)$$

На графике выберите значения силы трения скольжения $F_{тр. скол}$ и силы реакции N . По формуле (10.3) вычислите коэффициент трения скольжения μ .

Для оценки точности полученного результата определите относительную погрешность ε_μ измерения коэффициента трения скольжения.

$$\varepsilon_\mu = \frac{\Delta F_{тр. скол}}{F_{тр. скол}} + \frac{\Delta N}{N}.$$

Примите абсолютные погрешности измерения равными

$$\Delta F_{тр. скол} = 0,1 \text{ Н}, \Delta N = 0,1 \text{ Н}.$$

Вычислите абсолютную погрешность $\Delta\mu$ измерения коэффициента трения скольжения. Согласно определению, относительная погрешность измерения ε_μ коэффициента трения скольжения равна

$$\varepsilon_\mu = \frac{\Delta\mu}{\mu}.$$

Тогда

$$\Delta\mu = \varepsilon_\mu \cdot \mu.$$

Запишите результат измерения в виде

$$\mu_{измер} = \mu \pm \Delta\mu.$$



10.4. Что означает такая форма записи результата?

Задание 3. Определите коэффициент трения скольжения дерева по линолеуму.

Сделайте вывод, одинаково ли значение коэффициента трения скольжения для разных пар материалов.

Сила трения покоя, сила трения скольжения, коэффициент трения скольжения, $F_{тр. скол} = \mu N$.

10.1 ● При движении бруска по наклонной плоскости на брусок действуют сила тяжести, сила реакции и сила трения скольжения (рис. 93). Определите коэффициент трения скольжения бруска по наклонной плоскости, если сила трения скольжения 0,75 Н, сила реакции 2,5 Н. В каком направлении – вверх или вниз по наклонной плоскости – движется брусок? Ответ обосновать.

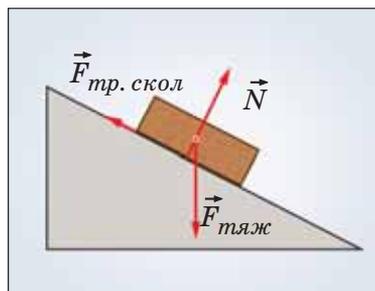


Рис. 93

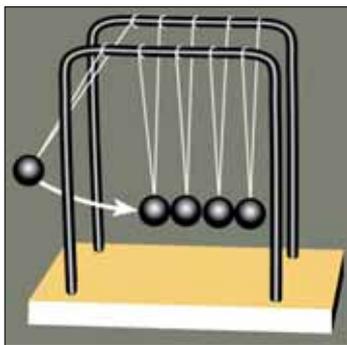
10.2 ● Санки, соскользнув со склона горки, движутся далее по горизонтальной дорожке. Чему равна при этом сила трения, действующая на санки? Коэффициент трения скольжения полозьев санок по дорожке 0,20. Масса санок вместе с пассажиром 45 кг.

10.3 ● Магнит притягивается к горизонтально расположенной стальной плите с силой 8 Н. Какую силу необходимо приложить в горизонтальном направлении, чтобы магнит мог равномерно двигаться по поверхности плиты? Коэффициент трения скольжения магнита по поверхности плиты 0,25. Считать, что сила, с которой магнит притягивается к плите, во много раз больше силы тяжести магнита.

10.4 ● Фигурист, разогнавшись, скользит по льду катка. С каким ускорением он движется?

10.5 ● Как следует изменить скорость, с которой автомобиль проходит поворот, если после дождя коэффициент трения скольжения шин по асфальту уменьшился в 2 раза?

§ 11. ИМПУЛЬС. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА



Во Вселенной, во всей созданной материи есть известное количество движения, которое никогда не увеличивается, не уменьшается, и, таким образом, если одно тело приводит в движение другое, то теряет столько своего движения, сколько его сообщает.

Р. Декарт (1596–1650), французский философ, математик, физик

Вам уже известно, что для некоторых физических величин выполняются законы сохранения.

Что такое законы сохранения. Среди множества физических величин есть особые величины, значения которых при определённых условиях являются неизменными, сохраняющимися. Для таких величин установлены **законы сохранения**.

Например, в курсе физики 7 класса вы изучали закон сохранения механической энергии. В курсе физики 8 класса рассматривался I закон термодинамики – закон сохранения энергии применительно к тепловым явлениям. Вам также известен закон сохранения электрического заряда.

При изучении механики мы продолжим изучение законов сохранения. *Во-первых*, вы познакомитесь с физической величиной «импульс» и будет сформулирован закон сохранения импульса. *Во-вторых*, более подробно будет рассмотрен закон сохранения механической энергии.

Импульс¹. Закон сохранения импульса. Импульс – это физическая величина, являющаяся мерой механического движения². Всякое движущееся тело обладает импульсом, и чем больше масса тела и его скорость, тем импульс больше.

Импульс тела – это физическая величина, равная произведению массы тела на его скорость.

Импульс принято обозначать буквой \vec{p} (читается: пэ).

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (11.1)$$

Единица измерения импульса – кг·м/с.



11.1. Какой величиной – векторной или скалярной – является импульс?

11.2. В каком случае импульс тела равен нулю?

Одним из важнейших законов механики является закон сохранения импульса. Этот закон формулируют применительно к замкнутой системе тел. Что такое «система тел» и, в частности, что такое «замкнутая система тел»? Любую группу взаимодействующих тел в физике называют системой тел. Если же тела системы взаимодействуют только между собой и никакие внешние тела на них не действуют, то такую систему называют замкнутой.

Для замкнутой системы тел выполняется закон сохранения импульса.

Векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, есть величина неизменная при любых взаимодействиях тел этой системы между собой.

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + \vec{p}_4 + \dots = \vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} + \vec{p}_{03} + \vec{p}_{04} + \dots \quad (11.2)$$

¹ От латинского *impulsus* – удар, толчок.

² Поэтому импульс называют также количеством движения.

Что означает равенство (11.2)?

\vec{p}_1 , \vec{p}_2 и так далее – импульсы тел, составляющих замкнутую систему после взаимодействия.

\vec{p}_{01} , \vec{p}_{02} и так далее – импульсы тел, составляющих замкнутую систему до взаимодействия.

При взаимодействии импульс любого тела, входящего в систему, может измениться, но векторная сумма импульсов всех тел системы не меняется.

Подтвердим закон сохранения импульса опытами. Две тележки одинаковой массы m расположим на гладком горизонтальном столе. К торцу одной из тележек прикрепим пластилиновый шарик и сообщим тележке некоторую скорость \vec{v} (рис. 94, а). Движущаяся тележка сталкивается с неподвижной, и обе тележки далее движутся со скоростью, которая в два раза меньше начальной скорости одной тележки (рис. 94, б).

Проанализируем результаты опыта. До столкновения импульс одной тележки равен $m\vec{v}$, а импульс другой тележки – нулю (она была неподвижна). Значит, до взаимодействия импульс системы тел составлял $m\vec{v}$. После взаимодействия импульс системы тел равен

$$2m \cdot \frac{1}{2} \vec{v} = m\vec{v}.$$

Таким образом, импульс системы тел при их взаимодействии не изменился.

Прделаем другой опыт. Направим тележки с одинаковыми по величине скоростями навстречу друг другу (рис. 94, в). Столкнувшись, тележки останавливаются (рис. 94, г). Почему? До взаимодействия импульсы тележек равны по величине, но противоположны по направлению. Значит, импульс системы тел был равен

$$m\vec{v} - m\vec{v} = 0.$$

После взаимодействия импульс системы тел по-прежнему равен нулю (тележки неподвижны). Этот опыт также подтвердил закон сохранения импульса.

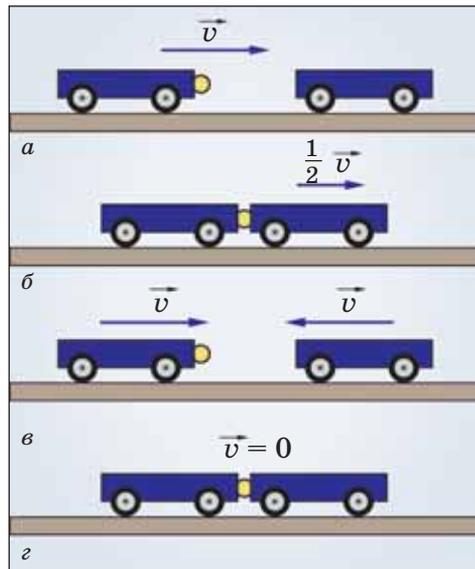


Рис. 94



Приведём теоретический вывод закона сохранения импульса для случая системы, состоящей из двух тел (рис. 95). Пусть тела взаимодействуют только между собой и никакие другие тела на них не действуют (*замкнутая система тел*). По III закону Ньютона, тела взаимодействуют с силами, равными по величине и противоположными по направлению:

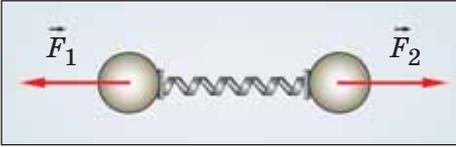


Рис. 95

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2. \quad (11.3)$$

По II закону Ньютона,

$$\vec{F}_1 = m_1 \vec{a}_1,$$

$$\vec{F}_2 = m_2 \vec{a}_2.$$



11.3. Что характеризует физическая величина «ускорение»?

Если за некоторое время t скорость первого тела изменилась от начальной скорости \vec{v}_{01} до скорости \vec{v}_1 , то ускорение \vec{a}_1 первого тела равно

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{v}_1 - \vec{v}_{01}}{t}.$$

Как рассчитать ускорение \vec{a}_2 второго тела, если за время t его скорость изменилась от начальной скорости \vec{v}_{02} до скорости \vec{v}_2 ?

$$\vec{a}_2 = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_{02}}{t}.$$

Тогда

$$\vec{F}_1 = \frac{m_1(\vec{v}_1 - \vec{v}_{01})}{t},$$

$$\vec{F}_2 = \frac{m_2(\vec{v}_2 - \vec{v}_{02})}{t}.$$

Подставим полученные соотношения в формулу III закона Ньютона (11.3):

$$\frac{m_1(\vec{v}_1 - \vec{v}_{01})}{t} = -\frac{m_2(\vec{v}_2 - \vec{v}_{02})}{t}.$$

Отсюда

$$m_1 \vec{v}_1 - m_1 \vec{v}_{01} = -m_2 \vec{v}_2 - m_2 \vec{v}_{02}.$$

Или

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = -m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02}.$$

С учётом определения импульса имеем

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_{01} + \vec{p}_{02}. \quad (11.4)$$

Таким образом, закон сохранения импульса для случая замкнутой системы тел теоретически обоснован.

Значение закона сохранения импульса. Можно ли определить скорости тел, которые они имеют после взаимодействия, не прибегая к закону сохранения импульса? Конечно же, да. Необходимо установить, какие силы действуют на тело, и определить равнодействующую силу. Далее, применив II закон Ньютона, следует вычислить ускорение тела. Если же известно ускорение тела, то есть известно, как быстро изменяется скорость, то можно определить и саму скорость тела.

При таком подходе к решению задачи необходимо знать силы, которыми тела взаимодействуют, знать, как эти силы меняются в процессе взаимодействия тел. Однако величина сил взаимодействия известна не всегда, может быть неизвестен или крайне сложен математически закон изменения сил при взаимодействии. В этом случае намного проще поставленная задача расчёта скорости движения взаимодействующих тел решается благодаря закону сохранения импульса. Ведь для того, чтобы применить закон сохранения импульса, не нужно анализировать сам процесс взаимодействия. Достаточно лишь знать, каковы импульсы тел «до» и «после» их взаимодействия.

Реактивное движение. Рассмотрим следующий опыт. Пусть пробирка, частично заполненная водой, закрыта пробкой и подвешена на нити. Нагреем пробирку. Образовавшийся водяной пар выталкивает пробку. Пробка летит в одном направлении, а пробирка отклоняется в противоположном направлении (рис. 96).



Рис. 96



11.4. Почему и пробирка, и пробка приходят в движение, разлетаясь в противоположные стороны? Одинакова ли величина скорости пробирки и пробки?

Движение пробирки является примером реактивного движения, возникновение которого объясняется законом сохранения импульса. Действительно, начальный импульс системы «пробирка – вода – пробка» был равен нулю. После того как пробка вылетела из пробирки, она обладает некоторым импульсом. Следовательно, пробирка, толкаемая водяным паром, приобретает точно такой же по величине импульс, но направленный противоположно импульсу пробки.

Реактивное движение – это движение тела, возникающее при отделении от тела части его массы с некоторой скоростью.



Рис. 97

Именно благодаря реактивному движению возможен запуск искусственных спутников Земли, космических кораблей, межпланетных станций на требуемую орбиту. Допустим, стартует ракета, имеющая массу корпуса m_P и наполненная топливом массой m_T (рис. 97). Для простоты расчёта предположим, что всё топливо сгорает очень быстро и образовавшиеся раскаленные газы вылетают из ракеты со скоростью v_T . При этом ракета приобретает скорость v_P .

В соответствии с законом сохранения импульса

$$m_P \vec{v}_P + m_T \vec{v}_T = 0. \quad (11.5)$$

Направим ось координат Y вертикально вверх и запишем соотношение (11.5) в проекции на выбранную ось.

$$m_P v_P - m_T v_T = 0.$$

$$m_P v_P = m_T v_T,$$

$$v_P = \frac{m_T v_T}{m_P}. \quad (11.6)$$

Как видно из формулы (11.6), скорость ракеты будет тем больше, чем больше скорость вылета сгоревшего топлива и его масса.

Одним из основоположников космонавтики является русский учёный и изобретатель К.Э. Циолковский. Им была обоснована возможность использования ракет для космических полётов, высказан ряд важных идей в области ракетостроения.



Константин Эдуардович Циолковский (1857–1935). Учёный и изобретатель в области аэро- и ракетодинамики, теории самолёта и дирижабля, основоположник современной космонавтики. Впервые обосновал возможность использования ракет для космических полётов.

Пример решения задачи.

Железнодорожная платформа массой 27 т, двигающаяся со скоростью 2,0 м/с по горизонтальному пути, сталкивается с платформой массой 23 т, двигающейся со скоростью 1,0 м/с навстречу первой платформе. При столкновении срабатывает автосцепка, и далее платформы движутся вместе. Определите скорость платформ после столкновения.

<i>Дано:</i>	<i>СИ:</i>
$m_1 = 27 \text{ т}$	27 000 кг
$v_1 = 2,0 \text{ м/с}$	
$m_2 = 23 \text{ т}$	23 000 кг
$v_2 = 1,0 \text{ м/с}$	
$v - ?$	

Решение:

Рассмотрим, какие силы действуют на каждую из платформ до столкновения (рис. 98). Платформа взаимодействует с Землёй и железнодорожными рельсами.

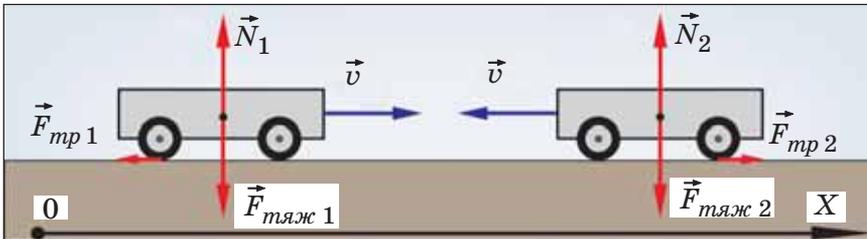


Рис. 98

Так как платформа движется по горизонтальному пути, то сила тяжести $\vec{F}_{тяж}$ и сила реакции \vec{N} , очевидно, компенсируют друг друга. Сила трения качения, действующая на платформу, мала, и ею можно пренебречь. Следовательно, сталкивающиеся платформы можно считать *замкнутой системой* и применить к рассмотрению их движения закон сохранения импульса.

$$m_1 \vec{v} + m_2 \vec{v} = -m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02}.$$

(В данной записи закона сохранения импульса учтено, что после столкновения платформы движутся совместно и их скорости одинаковы. $\vec{v}_1 = \vec{v}_2 = \vec{v}$.)

$$(m_1 + m_2) \vec{v} = m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02}. \quad (11.7)$$

Направим ось координат X горизонтально вдоль направления скорости \vec{v}_{01} первой платформы.



11.5. Как определяют проекции вектора? В каком случае проекция вектора положительна? отрицательна?

Определим проекции векторов \vec{v}_{01} и \vec{v}_{02} на ось X .

$$v_{01x} = +v_{01}. \quad (11.8)$$

$$v_{02x} = -v_{02}. \quad (11.9)$$

Что касается знака проекции вектора \vec{v} , то знак проекции неизвестен – не определено, в каком направлении будут двигаться платформы после столкновения. Предположим, что после столкновения платформы движутся вдоль оси X . Тогда

$$v_x = +v. \quad (11.10)$$

Запишем формулу закона сохранения импульса (11.7) в проекции на ось X и учтём при этом соотношения (11.8) – (11.10).

$$(m_1 + m_2)v = m_1v_{01} - m_2v_{02}.$$

Отсюда
$$v = \frac{m_1 v_{01} - m_2 v_{02}}{m_1 + m_2}.$$

Проведём вычисление:

$$v = \frac{27\,000 \text{ кг} \cdot 2,0 \frac{\text{м}}{\text{с}} - 23\,000 \text{ кг} \cdot 1,0 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{27\,000 \text{ кг} + 23\,000 \text{ кг}}.$$

$$v = 0,62 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Действия с единицами измерений:

$$\frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} - \text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}{(\text{кг} + \text{кг})} = \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\text{кг}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ: $v = 0,62 \text{ м/с}$.

Обратите внимание: в результате вычислений получено положительное значение проекции скорости v . Это свидетельствует о том, что наше предположение о направлении движения платформ после столкновения оказалось верным. А если в результате вычислений нами было бы получено отрицательное значение проекции скорости? Означало ли это, что задача нами решена неверно? Нет, это свидетельствовало бы только о том, что мы не угадали, каково направление скорости \vec{v} .

Законы сохранения, **импульс**, $\vec{p} = m\vec{v}$, **замкнутая система тел**, **закон сохранения импульса**, $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + \vec{p}_4 + \dots = \vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} + \vec{p}_{03} + \vec{p}_{04} + \dots$, **реактивное движение**.

11.1 ● Вычислите импульс, которым обладает спортсмен массой 60 кг, движущийся со скоростью 7 м/с.

С какой скоростью вылетает пуля из автомата Калашникова, если её импульс составляет 3,64 кг·м/с? Масса пули 4 г.

11.2 ● Пробка массой 3,5 г вылетает из пробирки со скоростью 9,0 м/с (рис. 96). Чему равен импульс пробирки? Какова масса пробирки, если она после вылета пробки приходит в движение со скоростью 1,0 м/с?

11.3 ● Человек, разбежавшись, запрыгивает в лодку, находящуюся у причала. С какой скоростью лодка придёт в движение? Масса лодки 120 кг, масса человека 80 кг. Горизонтальная скорость человека в момент прыжка составляет 4 м/с.

11.4 ● Прodelайте опыт. На гладкую горизонтальную поверхность стола положите две одинаковые монеты. Щелчком приведите одну из монет в движение по поверхности стола так, чтобы она столкнулась с другой, неподвижной монетой. Удар должен быть прямым, вектор скорости движущегося тела должен проходить через центр первоначально покоящегося тела (рис. 99, а).

Проверьте на опыте, что после прямого удара первая монета останавливается, а вторая приходит в движение (рис. 99, б). Как объяснить наблюдаемое движение? Одинаковы ли скорости движения монет?

11.5 ● На тележку в течение 3 с в горизонтальном направлении действует сила 4 Н. Чему станет равен импульс тележки? Первоначально тележка покоилась.



Рис. 99

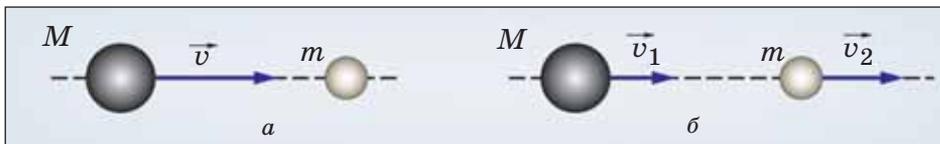


Рис. 100

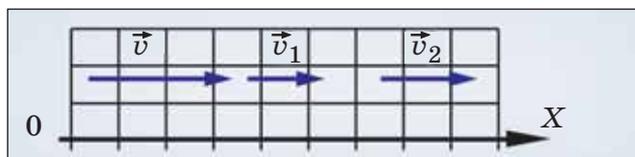
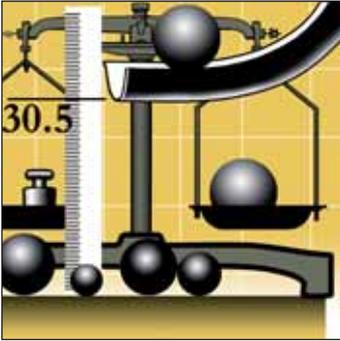


Рис. 101

§ 12. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА
«ОПЫТНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА»



Опыт берёт большую плату за учение, но учит он лучше всех учителей.

*Т. Карлейл (1795–1881),
английский историк, философ*

Вам уже известен закон сохранения импульса.



Оборудование: два стальных шарика разной массы, весы с разновесами, штатив, измерительная лента, отвес, листы белой и копировальной бумаги, наклонный жёлоб.

Указания к работе

Пусть шар массой M движется со скоростью \vec{v} (рис. 100, а). Тогда он обладает импульсом \vec{p} :

$$\vec{p} = M\vec{v}.$$

После столкновения этого шара с покоящимся шаром меньшей массы m двигаться будут оба шара (рис. 100, б). Если скорости шаров \vec{v}_1 и \vec{v}_2 , то импульсы шаров равны соответственно

$$\vec{p}_1 = M\vec{v}_1,$$

$$\vec{p}_2 = M\vec{v}_2.$$

В соответствии с законом сохранения импульса

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2,$$

или

$$M\vec{v} = M\vec{v}_1 + M\vec{v}_2. \quad (12.1)$$

Если происходит прямой удар и скорости \vec{v}_1 , \vec{v}_2 направлены так же, как и скорость \vec{v} , то соотношение (12.1) упростится. В этом случае выберем координатную ось X так, чтобы её направление совпадало с направлением скоростей \vec{v} , \vec{v}_1 , \vec{v}_2 (рис. 101).

Проекции скоростей на ось X положительны:

$$v_x = v, \quad v_{1x} = v_1, \quad v_{2x} = v_2.$$

Соотношение (12.1) запишется в виде

$$Mv = Mv_1 + mv_2. \quad (12.2)$$

При выполнении лабораторной работы необходимо проверить справедливость равенства (12.2) и тем самым подтвердить закон сохранения импульса.



Задание 1.

1. Определите массу шариков M и m взвешиванием. Эти и последующие данные занесите в таблицу:

M , кг	m , кг	S , м	v , м/с	p , кг·м/с	S_1 , м	v_1 , м/с	p_1 , кг·м/с	S_2 , м	v_2 , м/с	p_2 , кг·м/с

2. Закрепите жёлоб в штативе так, чтобы его нижний прямолинейный участок располагался горизонтально и находился на высоте $h = 30,5$ см от поверхности стола (рис.102). Используя отвес, определите проекцию края жёлоба, отметьте её (точка A на рисунке 102). На стол положите лист белой бумаги, а сверху лист копировальной бумаги и прикрепите их к поверхности стола. Шар большей массы прижимают к упору в верхней части жёлоба и затем отпускают. Шар, скатываясь с жёлоба, приобретает скорость \vec{v} и далее движется с этой горизонтальной скоростью до точки падения (точка B на рисунке 102). В точке падения шарик оставляет отметку на бумаге.

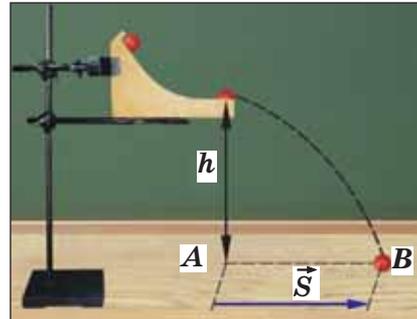


Рис. 102



12.1. Почему при движении шарика его горизонтальная скорость не изменяется?

3. Запуск шарика произведите три-четыре раза. По отметкам на бумаге определите среднее положение точки падения шарика и измерьте его горизонтальное перемещение S .

4. При выбранной высоте закрепления жёлоба $h = 30,5$ см время падения шарика составляет $0,25$ с.



12.2. Как подтвердить расчётом, что время падения шарика действительно равно $0,25$ с? (Подсказка. Шарик свободно падает с высоты $h = 30,5$ см.)

12.3. Как определить скорость движения шарика в горизонтальном направлении?

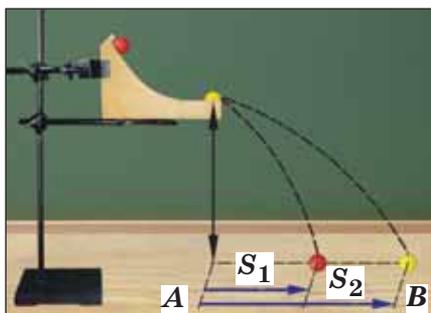


Рис. 103

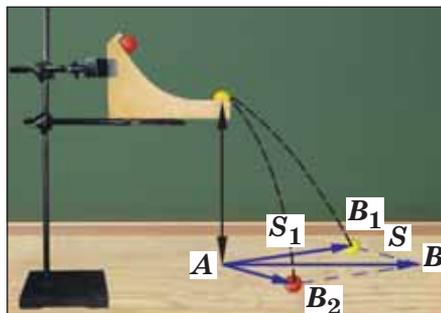


Рис. 104

Вычислите скорость движения v и импульс p шарика массой M .

$$v = \frac{S}{t}.$$

$$p = Mv.$$

5. Для определения импульсов шаров p_1 и p_2 продолжите опыт. На краю жёлоба установите шар меньшей массы, а шар большей массы вновь запустите с высшей точки жёлоба (рис. 103).

Измерьте средние горизонтальные перемещения шаров S_1 и S_2 при их свободном падении после соударения.

По полученным данным вычислите скорости v_1 и v_2 и импульсы шаров p_1 и p_2 .

6. Сравните первоначальный импульс p с суммой импульсов p_1 и p_2 обоих шаров после их взаимодействия (соударения). Сделайте вывод, справедливо ли равенство (12.2), выполняется ли закон сохранения импульса.

Задание 2. Как вы знаете, измерение любой физической величины всегда производится с некоторой погрешностью. Во-первых, допускаются погрешности измерения самим экспериментатором, производящим измерения. Во-вторых, на результат измерения влияют погрешности приборов, используемых при проведении измерения.

Следовательно, опытная проверка равенства (12.2) также может быть проведена только с некоторой точностью. В проделанных опытах (задание 1) основные погрешности допускались при измерениях перемещений S , S_1 и S_2 , что и приводит к погрешности в определении импульсов p , p_1 и p_2 .

Относительная погрешность измерения всех перемещений (в процентах) определяется относительной погрешностью измерений каждого из перемещений и может быть вычислена по формуле

$$\varepsilon_S = \left(\frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta S_1}{S_1} + \frac{\Delta S_2}{S_2} \right) \cdot 100\%.$$

В формуле ΔS – это абсолютная погрешность измерения перемещения, её можно принять равной 0,5 см.

$$\Delta S \approx 0,5 \text{ см.}$$

Если равенство (12.2) справедливо, то в опыте «расхождение» (в процентах) значений левой и правой частей равенства (12.2) не должно превышать относительной погрешности ε_S измерения перемещений.

«Расхождение» (в процентах) левой и правой частей равенства (12.2) вычисляется по формуле

$$\varepsilon_p = \left| \frac{p - (p_1 + p_2)}{p} \right| \cdot 100\%.$$

Вычислите значения ε_S и ε_p , сравните их и сделайте вывод, подтверждается ли в опыте справедливость равенства (12.2).

Задание 3. Проверьте выполнение закона сохранения импульса при косом ударе (рис. 104). При таком ударе векторы импульсов шаров \vec{p}_1 и \vec{p}_2 после столкновения имеют различные направления.

Если использовать шары одинаковой массы ($M = m$), то соотношение (12.1) примет вид

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2.$$

Так как

$$v = \frac{S}{t}, \quad v_1 = \frac{S_1}{t}, \quad v_2 = \frac{S_2}{t},$$

то

$$\vec{S} = \vec{S}_1 + \vec{S}_2. \quad (12.3)$$

Таким образом, для опытной проверки выполнения закона сохранения импульса при косом ударе (в случае столкновения шаров одинаковой массы) следует проверить справедливость равенства (12.3).

12.1 ● Представьте, что космонавт находится в открытом космосе рядом с космической станцией и проводит ремонтные работы. В какой-то момент времени трос (страховочный фал), соединяющий его с космической станцией, отстегнулся, и космонавт оказался на некотором удалении от станции. Каким образом космонавт может вернуться на станцию? (Подсказка. У космонавта есть сумка с инструментами.)

12.2 ● Пуля массой 4 г, летящая горизонтально со скоростью 800 м/с, пробивает пенопластовый кубик, стоящий на гладком горизонтальном столе. После этого пуля продолжает двигаться со скоростью 795 м/с. Какой импульс приобретёт кубик при взаимодействии с пулей? Чему равна скорость кубика? Масса кубика 20 г.

12.3 ● Координата x прямолинейно движущегося тела массой 0,5 кг изменяется с течением времени t по закону $x = 8 + 3t + 5t^2$. Чему равен начальный импульс тела? Чему равен импульс тела в момент времени $t = 4$ с?

12.4 ● Бильярдный шар, двигавшийся с некоторой скоростью, ударяет о неподвижный шар. После косого удара шары разлетаются под прямым углом друг к другу (рис. 105). Импульсы шаров после взаимодействия составляют соответственно 0,4 и 0,3 кг · м/с. Чему был равен импульс налетающего бильярдного шара?

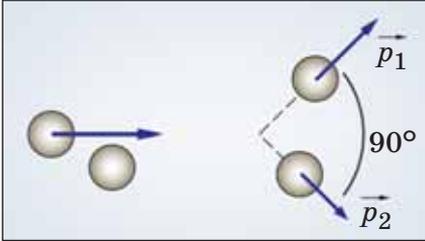


Рис. 105

$$\vec{F} = \frac{m(\vec{v} - \vec{v}_0)}{t}, \quad \vec{F} = \frac{m\vec{v} - m\vec{v}_0}{t} \quad \text{или} \quad \vec{F} = \frac{\vec{p} - \vec{p}_0}{t}.$$

Иными словами, **сила, действующая на тело, определяет быстроту изменения импульса тела.**

При реактивном движении импульс тела изменяется, следовательно, на тело действует сила. Эту силу называют **реактивной силой**. Вычислите реактивную силу (силу тяги), возникающую при работе двигателя модели ракеты, если ежесекундно от ракеты отделяются горячие газы массой 10 г со скоростью 240 м/с.

12.5 ● По II закону Ньютона, сила \vec{F} , действующая на тело массой m , равна

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

где ускорение \vec{a} определяется соотношением

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}.$$

Таким образом,

§ 13. МЕХАНИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ. РАБОТА. МОЩНОСТЬ



Высказанный закон не противоречит ни одному из известных в естествознании фактов и поразительным образом подтверждается большим числом их.

Из работы выдающегося немецкого учёного Г. Гельмгольца (1821–1894) «О сохранении силы»¹

Вам уже знакомо понятие «энергия».

Механическая энергия. При описании самых разных явлений природы используется такая физическая величина, как «энергия». **Энергия – общая количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи.**

¹ Под «сохранением силы» Г. Гельмгольцем подразумевается сохранение энергии.

В физике рассматривают различные виды энергии – *механическую энергию, тепловую энергию, энергию электромагнитного взаимодействия, ядерную энергию* и так далее. Учёными установлен один из фундаментальных законов природы – **закон сохранения энергии**:

В изолированной системе энергия может переходить из одной формы в другую, но общее количество энергии остается постоянным.



13.1. В каких единицах измеряют энергию?

Одним из известных вам видов энергии является *механическая энергия*. Как вы знаете из курса физики 7 класса, механическую энергию движущегося тела называют *кинетической энергией*. Механическую энергию тел, взаимодействующих силами тяготения или упругости, называют *потенциальной энергией*.

«Зарядим» пружинный пистолет металлическим шариком (рис. 106, *а*). Деформированные (сжатые витки) пружины обладают потенциальной энергией. Величина потенциальной энергии пружины определяется её жёсткостью и тем, насколько пружина деформирована. Произведём «выстрел» вертикально вверх. Пружина распрямится, её потенциальная энергия станет равной нулю; одновременно шарик приобретёт кинетическую энергию и вылетит из пистолета (рис. 106, *б*). Величина кинетической энергии шарика определяется его массой и скоростью движения. При полёте шарика его скорость, а значит, и кинетическая энергия уменьшаются, но потенциальная энергия взаимодействия «шарик – Земля» увеличивается (рис. 106, *в*). Величина потенциальной энергии шарика зависит от его массы и высоты подъёма над поверхностью земли.

Все упомянутые выше превращения механической энергии, конечно же, происходят в соответствии с законом сохранения энергии.

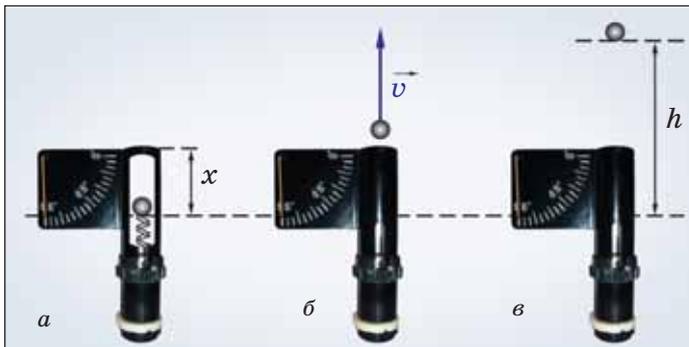


Рис. 106

Как рассчитывается механическая энергия?

Кинетическая энергия E_k

Кинетическая энергия движущегося тела вычисляется по формуле

$$E_k = \frac{mv^2}{2} . \quad (13.1)$$

Чем больше масса m и скорость v движения тела, тем больше его кинетическая энергия.



13.2. Что обладает большей кинетической энергией – грузовая машина или легковой автомобиль, если скорости их движения одинаковы?

13.3. Во сколько раз изменяется кинетическая энергия футбольного мяча при увеличении его скорости в два раза?

Потенциальная энергия E_n

Потенциальная энергия некоторого тела и Земли, *взаимодействующих силой тяготения*, вычисляется по формуле

$$E_n = mgh , \quad (13.2)$$

где g – ускорение свободного падения;

m – масса тела, поднятого над поверхностью земли на высоту h .



13.4. Как меняется ускорение свободного падения с ростом высоты h ?

Формула (13.2) применима только в том случае, когда высота подъёма тела h во много раз меньше радиуса Земли R_3 (почему?).

Потенциальная энергия E_n , которой обладают витки деформированной пружины, *взаимодействующие силой упругости*, вычисляется по формуле

$$E_n = \frac{kx^2}{2} , \quad (13.3)$$

где k – жёсткость пружины;

x – величина деформации (сжатия или растяжения) пружины.

Формула (13.3) применима только в том случае, когда сила упругости, возникающая при деформации тела, подчиняется закону Гука.



13.5. Как в соответствии с законом Гука вычисляют силу упругости?

Механическая работа. Если на тело действует сила, то скорость тела изменяется. Следовательно, изменяется и кинетическая энергия тела. Для количественной характеристики действия, производимого силой, введена скалярная физическая величина *механическая работа*.

Механическая работа силы, действующей на тело, – это физическая величина, численно равная изменению кинетической энергии тела, произошедшему под действием этой силы.

Обозначим механическую работу, совершённую силой, действующей на тело, буквой A , начальную кинетическую энергию тела $E_{к0}$, а конечную кинетическую энергию $E_{к}$.

Тогда

$$A = E_{к} - E_{к0}.$$

Если на тело действует *постоянная сила* \vec{F} и *направление силы совпадает с направлением перемещения* \vec{S} тела, то механическую работу легко рассчитать иным образом. Как вам известно из курса физики 7 класса, механическая работа в этом случае вычисляется по формуле

$$A = |\vec{F}| \cdot |\vec{S}|. \quad (13.4)$$



13.6. Какова единица измерения механической работы?

13.7. Как доказать, что $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н}\cdot\text{м}$?

Механическая работа совершается только в том случае, если под действием силы тело совершает перемещение ($|\vec{S}| \neq 0$).

Как вычислить механическую работу в случае, если вектор силы \vec{F} и вектор перемещения тела \vec{S} не совпадают по направлению (рис. 107, а)? Заменяем силу \vec{F} двумя силами \vec{F}_1 и \vec{F}_2 (рис. 107, б).

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

Пусть направление силы \vec{F}_1 перпендикулярно перемещению \vec{S} , а направление силы \vec{F}_2 параллельно перемещению \vec{S} . Так как вдоль направления силы \vec{F}_1 тело не перемещается, то работа этой силы равна нулю. Следовательно, работа силы \vec{F} будет равна только работе силы \vec{F}_2 :

$$A = |\vec{F}_2| \cdot |\vec{S}|. \quad (13.5)$$

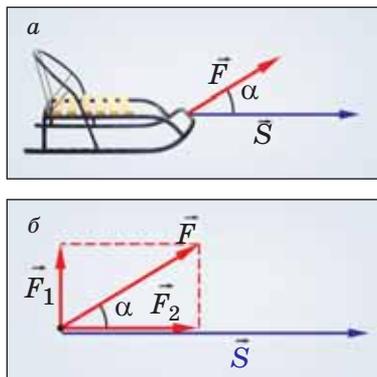


Рис. 107

Обозначим угол между вектором силы \vec{F} и вектором перемещения \vec{S} буквой α (читается: альфа). Из рисунка 107, б видно, что угол α – это угол прямоугольного треугольника. Гипотенуза треугольника равна $|\vec{F}|$, а катет треугольника, прилежащий к углу α , равен $|\vec{F}_2|$.

Тогда

$$\cos \alpha = \frac{|\vec{F}_2|}{|\vec{F}|}, \quad \frac{|\vec{F}_2|}{|\vec{F}|} = \cos \alpha, \quad |\vec{F}_2| = |\vec{F}| \cos \alpha.$$

Подставив полученное выражение в соотношение (13.5), имеем

$$A = |\vec{F}| \cdot |\vec{S}| \cos \alpha. \quad (13.6)$$

Механическая работа, совершённая постоянной силой при перемещении тела, равна произведению модуля силы на модуль перемещения, умноженному на косинус угла между вектором силы и вектором перемещения.

Мощность. Напомним ещё об одной физической величине – мощности.

Мощность – величина, характеризующая быстроту совершения работы.

Если за время t силой совершена работа A , то мощность N будет равна

$$N = \frac{A}{t}. \quad (13.7)$$

Единица измерения мощности – ватт.

$$1 \text{ Вт} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ с}}.$$

Энергия, закон сохранения энергии, кинетическая энергия, $E_k = \frac{mv^2}{2}$, потенциальная энергия, $E_n = \frac{kx^2}{2}$, $E_n = mgh$, механическая работа, $A = E_k - E_{k0}$, $A = |\vec{F}| \cdot |\vec{S}| \cos \alpha$, **мощность, $N = \frac{A}{t}$, $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $1 \text{ Вт} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ с}}$.**

13.1 ● Заполните таблицу:

Физическая величина	Обозначение величины	Единицы измерения величины	Формула, связывающая данную величину с другими	Пояснения
Механическая работа постоянной силы				
Мощность				
Кинетическая энергия				
Потенциальная энергия при взаимодействии силой тяготения				
Потенциальная энергия при упругой деформации				

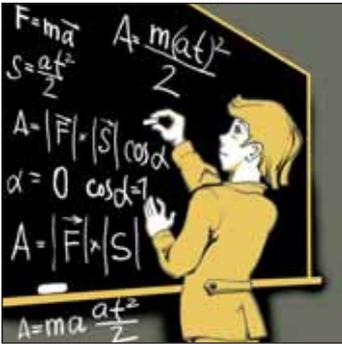
В столбце «Пояснения» укажите, какие физические величины входят в формулу, каковы их единицы измерения, при каких условиях применима формула.

13.2 ● Какой кинетической энергией обладал первый искусственный спутник Земли, запущенный 4 октября 1957 года, если его скорость при выходе на орбиту составляла $7,8 \text{ км/с}$, а масса $83,6 \text{ кг}$?

13.3 ● Человек, идущий по берегу реки, тянет против течения на верёвке лодку, прикладывая силу 250 Н . Угол между верёвкой и берегом 30° . Какую работу совершит человек при перемещении лодки на 10 м ?

13.4 ● Какую кинетическую энергию приобретает шарик при выстреле из пружинного пистолета, если жёсткость пружины $1,2 \text{ кН/м}$? Перед выстрелом пружина сжата на $2,5 \text{ см}$. Выстрел производят в горизонтальном направлении.

13.5 ● Начальная скорость стрелы при выстреле из лука 20 м/с . На какой высоте будет находиться стрела в тот момент, когда её скорость станет равной 5 м/с ? Сопротивление воздуха не учитывать.



§ 14. ВЫВОД ФОРМУЛ ДЛЯ РАСЧЁТА МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Не мыслям надо учить, а мыслить.

И. Кант (1724–1804), немецкий философ

Вам уже известны формулы для расчёта кинетической и потенциальной энергии.

Механическая работа и энергия. Если на тело действует сила и тело перемещается, то при этом, как вы знаете, силой совершается механическая работа.

С другой стороны, действие силы приводит к изменению движения тела и его взаимодействия с другими телами. Следовательно, изменяется кинетическая и потенциальная энергия тела. Например, действие силы трения приводит к уменьшению скорости, а значит, и кинетической энергии тела. Если поднять тело на некоторую высоту и отпустить, то под действием силы тяжести тело будет свободно падать. При этом его кинетическая энергия будет увеличиваться, а потенциальная энергия взаимодействия с Землёй – уменьшаться. При смещении витков пружины под действием силы упругости меняется деформация пружины, а значит, и её потенциальная энергия. Таким образом, вычислив механическую работу, можно определить энергию тела и установить, от каких физических величин она зависит.

Кинетическая энергия. Пусть на первоначально покоящееся тело массой m в течение времени t действует постоянная сила \vec{F} (рис. 108). Под действием силы тело будет двигаться равноускоренно с ускорением \vec{a} . В соответствии со вторым законом Ньютона

$$\vec{F} = m\vec{a}. \quad (14.1)$$

Величина перемещения S будет равна

$$S = \frac{at^2}{2}. \quad (14.2)$$

В формуле (14.2) учтено, что начальная скорость тела v_0 равна нулю: $v_0 = 0$.

Какая механическая работа A при этом была совершена силой \vec{F} ?

$$A = |\vec{F}| \cdot |\vec{S}| \cos \alpha.$$

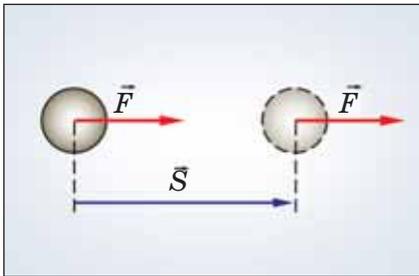


Рис. 108

Так как вектор силы \vec{F} и вектор перемещения \vec{S} сонаправлены, то угол между этими векторами равен нулю:

$$\alpha = 0 \text{ и } \cos \alpha = 1.$$

Тогда

$$A = |\vec{F}| \cdot |\vec{S}|.$$

С учётом соотношений (14.1) и (14.2) имеем

$$\begin{aligned} A &= ma \frac{at^2}{2}, \\ A &= \frac{ma^2 t^2}{2}, \\ A &= \frac{m(at)^2}{2}. \end{aligned} \tag{14.3}$$

Какую скорость \vec{v} будет иметь тело в момент времени t ? По определению, ускорение равноускоренного движения

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}.$$

Но в рассматриваемом случае $v_0 = 0$, тогда

$$\begin{aligned} \vec{a} &= \frac{\vec{v}}{t}, \\ \frac{\vec{v}}{t} &= \vec{a}, \\ \vec{v} &= \vec{a} t. \end{aligned}$$

Следовательно, формула (14.3) примет вид

$$A = \frac{mv^2}{2}. \tag{14.4}$$

Проанализируем полученный результат. Первоначально тело покоилось, следовательно, его кинетическая энергия (энергия движения) была равна нулю. При совершении силой механической работы тело пришло в движение, приобрело кинетическую энергию. Таким образом, кинетическая энергия, приобретённая телом, равна работе, совершённой силой:

$$E_{\kappa} = A.$$

Величина работы известна – она определяется по формуле (14.4). Следовательно, известна и кинетическая энергия тела:

$$E_{\kappa} = \frac{mv^2}{2}. \tag{14.5}$$

Потенциальная энергия при взаимодействии силой тяготения. Пусть тело массой m поднято на некоторую высоту h ¹ (рис. 109). Как определить потенциальную энергию тела, взаимодействующего с Землёй силой тяготения?

Вновь рассчитаем, какую работу совершит сила (в этом случае сила тяжести) при перемещении тела.

Очевидно, что

$$|\vec{F}_{тяж}| = mg, \quad |\vec{S}| = h, \quad \alpha = 0^\circ.$$

Тогда работа силы тяжести равна

$$A = mgh. \quad (14.6)$$

Таким образом, потенциальная энергия E_n в случае взаимодействия силой тяготения равна

$$E_n = mgh. \quad (14.7)$$

Потенциальная энергия при упругой деформации. Горизонтально расположенную пружину деформируем, удлинив её (рис. 110). При этом пружина обладает потенциальной энергией. Как определить эту энергию?

Не будем удерживать пружину и предоставим ей возможность под действием силы упругости принять прежнюю форму. При этом сила упругости совершит работу, переместит витки пружины, а потенциальная энергия пружины станет равна нулю. Следовательно, для определения потенциальной энергии деформированной пружины необходимо вычислить работу, совершаемую силой упругости при возврате пружины в недеформированное состояние.

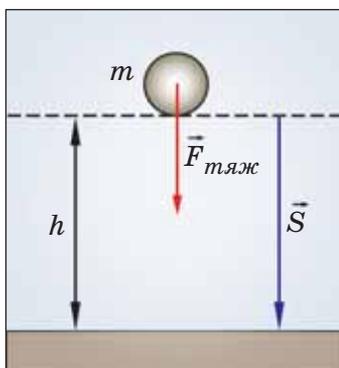


Рис. 109

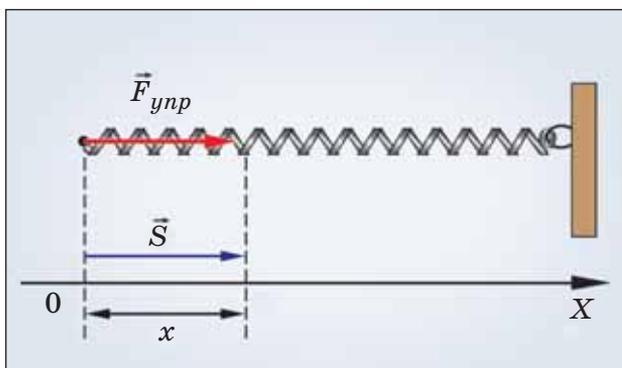


Рис. 110

¹ Высота подъёма должна быть мала в сравнении с размером Земли: $h < R_3$.

Как видно из рисунка 110, вектор силы упругости $\vec{F}_{упр}$ и вектор перемещения \vec{S} сонаправлены.

$$\alpha = 0^\circ$$

и

$$\cos \alpha = 1.$$

В соответствии с законом Гука

$$|\vec{F}_{упр}| = kx,$$

где x – величина деформации пружины.

Модуль перемещения S также легко определить:

$$|S| = x.$$

Однако воспользоваться для расчёта работы силы упругости формулой (13.4)

$$A = |\vec{F}| \cdot |\vec{S}|$$

не удастся! Почему? Эта формула применима только в случае вычисления работы *постоянной* силы. Сила же упругости переменна – она зависит от величины деформации.

На рисунке 111 показан график зависимости модуля силы упругости $|\vec{F}_{упр}|$ от величины деформации x . Пусть витки пружины совершают *малое* перемещение Δx_1 под действием силы упругости F_1 , действующей в этот момент в пружине. Так как перемещение Δx_1 мало, то сила упругости F_1 практически постоянна. Тогда работа A_1 постоянной силы F_1 при малом перемещении Δx_1 равна

$$A_1 = F_1 \Delta x_1.$$

Точно так же работа A_2 при малом перемещении Δx_2 под действием силы F_2 равна

$$A_2 = F_2 \Delta x_2.$$

Из рисунка 111 видно, что работа A_1 численно равна площади малого прямоугольника под графиком зависимости модуля силы упругости от величины деформации. Работа A_2 также равна площади соответствующего малого прямоугольника.

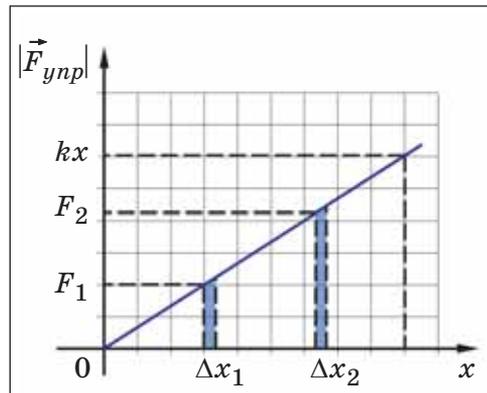


Рис. 111

Таким образом, становится понятно, как вычислить работу переменной силы упругости. Необходимо определить площадь под графиком зависимости модуля силы упругости от величины деформации. Эта площадь, как видно из рисунка 111, есть площадь прямоугольного треугольника. Один из катетов треугольника – модуль силы упругости $F_{упр} = kx$; второй катет – отрезок, равный величине деформации x .

Тогда

$$A_{упр} = \frac{kx \cdot x}{2}.$$

$$A_{упр} = \frac{kx^2}{2}.$$

Значит, потенциальная энергия E_n при упругой деформации равна:

$$E_n = \frac{kx^2}{2}. \quad (14.8)$$

Обоснование закона сохранения механической энергии. Рассмотрим систему тел, которые взаимодействуют между собой только силами тяготения и упругости (сила трения отсутствует). Например, прикрепим к вертикально расположенной пружине груз и предоставим возможность грузу совершать движение под действием силы упругости и силы тяжести (рис. 112).

Если не учитывать влияние воздуха на движение груза и витков пружины, то Земля, пружина и груз образуют замкнутую систему тел, взаимодействующих силами тяготения и упругости.

Пусть силами тяготения и упругости совершена положительная работа A . Это приведёт к *увеличению кинетической энергии* системы. Если $E_{к0}$ – начальная кинетическая энергия, а E_k – конечная кинетическая энергия системы, то $E_k > E_{к0}$ и

$$A = E_k - E_{к0}. \quad (14.9)$$

Совершение положительной механической работы силами тяготения и упругости приводит к *уменьшению потенциальной энергии* взаимодействующих тел. Если E_{n0} – начальная потенциальная энергия, а E_n – конечная потенциальная энергия системы, то $E_n < E_{n0}$

и

$$A = E_{n0} - E_n. \quad (14.10)$$

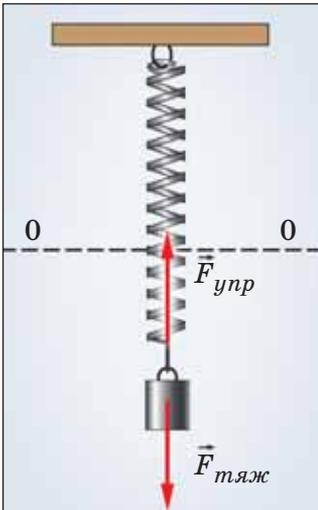


Рис. 112

Из соотношений (14.9) и (14.10) следует, что

$$E_k - E_{k0} = E_{n0} - E_n$$

или

$$E_k + E_n = E_{k0} + E_{n0}. \quad (14.11)$$

Последнее соотношение (14.11) и является математическим выражением закона сохранения механической энергии:

Механическая энергия замкнутой системы тел, взаимодействующих силами тяготения и упругости, есть величина неизменная.

Примеры решения задач

Задача 1. Закрепим два кольцообразных магнита на линейке, расположенной горизонтально. Подведём к ним плотную третий магнит (меньшего размера) и отпустим его (рис. 113). Магнит вылетит из магнитной «пушки» с некоторой скоростью. Определите скорость вылета магнита-«снаряда», если его тормозной путь составит 26 см. Коэффициент трения магнита по линейке равен 0,30.

Дано:
 $S = 26 \text{ см}$
 $\mu = 0,30$

СИ:
 $0,26 \text{ м}$

Решение:

Рассмотрим силы, действующие на магнит-«снаряд» после его вылета из магнитной «пушки» при движении по линейке.

$v_0 - ?$

На магнит-«снаряд» действуют сила тяжести $\vec{F}_{тяж}$, сила реакции \vec{N} и сила трения скольжения $\vec{F}_{тр.скол}$. Сила тяжести $\vec{F}_{тяж}$ и сила реакции \vec{N} , очевидно, компенсируют друг друга. (Почему?) Силой трения скольжения $\vec{F}_{тр.скол}$ совершается механическая работа A , что приводит к изменению кинетической энергии магнита-«снаряда»:

$$A = E_k - E_{k0}, \quad (14.12)$$

где E_k – конечная кинетическая энергия магнита-«снаряда», она равна нулю;

E_{k0} – начальная кинетическая энергия.

$$E_k = 0, \quad E_{k0} = \frac{mv_0^2}{2}, \quad (14.13)$$

где m – масса магнита-«снаряда».

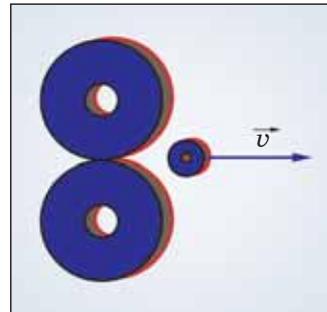


Рис. 113



14.1. Как рассчитывается сила трения скольжения?

14.2. Чему равен угол между направлением перемещения \vec{S} магнита-«снаряда» и направлением силы трения скольжения $\vec{F}_{тр.скол}$?

$$F_{тр.скол} = \mu N,$$

$$N = mg,$$

$$F_{тр.скол} = \mu mg.$$

$$A = - F_{тр.скол} S.$$

Следовательно,

$$A = - \mu mgS. \quad (14.14)$$

С учетом соотношений (14.2) – (14.4) имеем

$$\frac{mv^2}{2} = \mu mgS,$$

$$v_0 = \sqrt{2\mu gS},$$

$$v_0 = \sqrt{2 \cdot 0,30 \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 0,26 \text{ м}} = 1,2 \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

$$v_0 = 1,2 \text{ м/с.}$$

Ответ: $v_0 = 1,2 \text{ м/с.}$

Задача 2. Осуществляя выстрел из пружинного пистолета, пружину сжимают на 2,5 см (рис. 106). При выстреле шарик массой 12 г подлетает вертикально вверх на высоту 3,2 м. Чему равна жёсткость пружины пистолета?

Дано:

$$x = 2,5 \text{ см}$$

$$m = 12 \text{ г}$$

$$h = 3,2 \text{ м}$$

$$k - ?$$

СИ

$$0,025 \text{ м}$$

$$0,012 \text{ кг}$$

Решение:

Систему тел «пружина – шарик – Земля», взаимодействующих силами упругости и тяготения, можно рассматривать как замкнутую систему. Какие превращения энергии происходят в системе?

Первоначально деформированная пружина обладает потенциальной энергией (рис. 106, а).



14.3. Как рассчитывается потенциальная энергия при упругой деформации?

При выпрямлении пружины шарик приобретает кинетическую энергию (рис. 106, б).



14.4. Как рассчитывается кинетическая энергия тела?

При вертикальном полёте шарика в верхней точке траектории, на высоте h , шарик будет обладать только потенциальной энергией (рис. 106, в).



14.5. Как рассчитывается потенциальная энергия при взаимодействии тел силой тяготения?

Применим к рассматриваемой системе тел закон сохранения механической энергии. В начальном состоянии система обладала потенциальной энергией E_{n0} , равной

$$E_{n0} = \frac{kx^2}{2}.$$

В конечном состоянии (когда шарик находится в верхней точке траектории) потенциальная энергия E_n равна

$$E_n = mgh, \quad E_{n0} = E_n.$$

$$\frac{kx^2}{2} = mgh.$$

Отсюда
$$k = \frac{2mgh}{x^2}.$$

$$k = \frac{2 \cdot 0,012 \text{ кг} \cdot \frac{9,8 \text{ м}}{\text{с}^2} \cdot 3,2 \text{ м}}{(0,025 \text{ м})^2} = 1200 \left(\frac{\text{Н}}{\text{м}} \right).$$

$$k = 1,2 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Ответ: $k = 1,2 \text{ кН/м}$.

14.1 ● Средняя кинетическая энергия теплового движения молекулы кислорода при комнатной температуре составляет $6,2 \cdot 10^{-21}$ Дж. При какой скорости молекула обладает такой кинетической энергией? Масса молекулы кислорода равна $5,3 \cdot 10^{-26}$ кг.

14.2 ● После удара футболиста по мячу импульс мяча $8 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. Чему равна кинетическая энергия мяча? Масса мяча $0,4 \text{ кг}$.

14.3 ● Лыжник массой 80 кг съехал со склона горы длиной 120 м . Сила трения, действующая на лыжника при его движении по склону, равна 77 Н .

Определите работу силы тяжести, работу силы трения и работу силы реакции, совершённую при спуске лыжника со склона. Склон горы составляет с горизонтом угол 7° .

14.4 ● С какой скоростью шарик вылетает из пружинного пистолета при горизонтальном выстреле, если жёсткость пружины $1,2 \text{ кН/м}$ и она первоначально сжата на $2,5 \text{ см}$? Какова дальность полёта шарика, если пистолет закреплён в штативе на высоте 45 см от поверхности стола? Масса шарика 12 г .

14.5 ● Маятник представляет собой стограммовый груз, закреплённый на нити длиной 80 см . Нить отводят на угол 90° от вертикали и отпускают. Чему равна скорость груза в нижней точке траектории? Каково ускорение груза в нижней точке траектории? Чему равна в этот момент сила натяжения нити?

Самое важное в разделе «Основы механики»

1. Существуют различные виды механического движения:



2. Основу механики составляют законы Ньютона:

I закон: рассматривается движение свободного тела.

II закон: $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$.

III закон: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$.

3. В механике изучается несколько видов сил:

- сила *всемирного тяготения*,
- сила *упругости*,
- сила *трения*.

4. Движущееся тело характеризуется *импульсом* и *кинетической энергией*.

5. Группа тел (система тел), взаимодействующих силами тяготения и (или) упругости, обладает потенциальной энергией.

6. Для замкнутой системы тел справедлив закон сохранения импульса.

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

7. Для замкнутой системы тел, взаимодействующих силами тяготения и упругости, справедлив закон сохранения механической энергии.

$$E_k + E_n = \text{const} .$$

I.1 ● С какой скоростью автомобиль должен проходить поворот дороги радиусом 20 м, чтобы центростремительное ускорение автомобиля не превышало 4 м/с^2 ?

I.2 ● На рисунке 114 изображён график зависимости импульса тела p от времени t . Чему равна скорость тела в начальный момент времени, если масса тела 200 г? Чему равна сила, действующая на тело? (Направление силы совпадает с направлением начальной скорости тела.)

I.3 ● Докажите, что $1 \text{ Вт} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$.



I.4. Положите на край стола небольшой лёгкий предмет (ластик, коробочку из-под скрепок) и щёлкните по нему пальцем так, чтобы он упал со стола.

Измерив дальность полёта L и высоту стола h , определите скорость пальца при ударе о предмет (рис. 115).

I.5 ● Башенный кран поднимает бетонную плиту массой 1,2 т на высоту 45 м за 1,5 мин. Определите КПД крана, если сила тока в обмотке электромотора крана 30 А и электрическое напряжение, подаваемое на мотор, составляет 380 В.

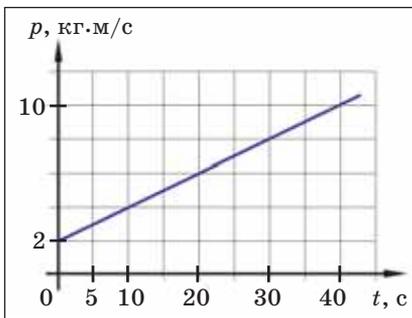


Рис. 114

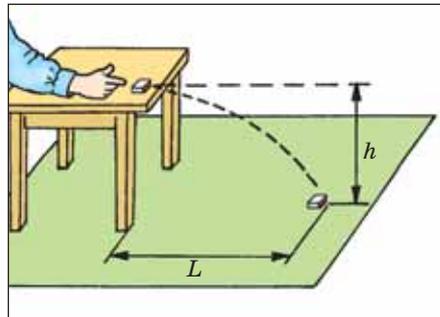


Рис. 115

P. S.



За столь малое время, что мы потратили на изучение механического движения, конечно же, нельзя в полной мере изучить все основные законы механики и научиться применять их на практике.

Вот только некоторые из вопросов, которые нами не рассматривались.

– Вам известно, в чём заключается явление механического движения. Но каковы свойства пространства – времени?

– Вы знаете, как рассчитать координату и скорость тела при его равноускоренном движении. Но как рассчитать координату и скорость тела, если оно движется с переменным ускорением?

– Не обсуждался вопрос о том, существует ли максимально возможная скорость движения. Оказывается, да! Максимальная возможная скорость – скорость света (300 000 км/с). Этот факт был установлен в начале двадцатого века великим физиком А. Эйнштейном. Им была разработана теория относительности, которая позволяет рассчитать движение тел при скоростях, близких к скорости света. Именно в соответствии с формулами теории относительности Эйнштейна (а не по формулам механики Ньютона) рассчитывают скорости и энергии частиц в современных ускорителях заряженных частиц.

– Вы знаете, что расчёт движения тел производится на основе законов Ньютона. Но применимы ли законы Ньютона в микромире (мире малых частиц)? В двадцатом веке учёные-физики установили, что расчёт движения микрочастиц, например электронов в атоме, требует применения законов движения, отличных от законов Ньютона.

– Вам известна формула для расчёта кинетической энергии тела, движущегося поступательно. Но как рассчитать энергию вращательного движения (например, Земли, вращающейся вокруг своей оси)?

– Вам известны законы сохранения импульса и механической энергии. Но каковы причины того, что эти законы выполняются? Почему физические явления происходят в соответствии с законами сохранения импульса и энергии?

Раздел 2. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

В этом разделе учебника рассматриваются колебательные и волновые процессы, с которыми мы встречаемся в природе и технике на каждом шагу. Биение человеческого сердца, морские волны, звуки, переменный ток и радиоволны – примеры таких процессов.

Обратите внимание, что в учебнике и механические, и электромагнитные колебания и волны рассматриваются совместно. Что же объединяет столь разные по своей физической природе процессы? Оказывается, все колебательные и волновые явления подчиняются одинаковым математическим закономерностям, которые изучаются в специальном разделе физики «Колебания и волны».



Вспомните то, что вы изучали ранее, и ответьте на вопросы:

- С каким – постоянным или переменным – ускорением будет двигаться тело под действием переменной силы?
- Какие действия необходимо предпринять, чтобы раскачать качели (предложите не менее двух способов)?
- Чем, по вашему мнению, различаются звуки, издаваемые различными музыкальными инструментами?
- Что такое электрические и магнитные поля? Каковы их основные свойства?
- Что такое электрический ток? Перечислите известные вам признаки данного явления.
- Как формулируется закон Ома для участка электрической цепи?
- В чём заключается явление электромагнитной индукции?

§ 15. Свободные механические колебания

Свободные колебания и условия их возникновения

Характеристики колебаний

Гармонические колебания

Как вычисляется период колебаний

§ 16. Решение задач по теме «Свободные механические колебания»

Классификация задач

Примеры решения

§ 17. Лабораторная работа «Изучение колебаний маятника»

§ 18. Вынужденные колебания. Резонанс

Вынужденные колебания

Резонанс

Автоколебания

§ 19. Механические волны

Механические волны. Типы волн

Длина волны

Основные свойства волн

§ 20. Звук

Что такое звук

Звук в различных средах

Пример решения задачи

Характеристики звука

§ 21. Волновые явления

Отражение волн

Ультразвук в технике и природе

Явление интерференции волн

Явление дифракции волн

§ 22. Повторение темы «Электрические и магнитные явления»

Электрическое взаимодействие

Электрический ток

Магнитное поле. Явление электромагнитной индукции

§ 23. Явление самоиндукции

Правило Ленца

Явление самоиндукции

§ 24. Свободные электромагнитные колебания

Колебательный контур

Пример решения задачи

§ 25. Переменный ток

Генератор переменного тока

Переменный ток

Конденсатор и катушка в цепи переменного тока

§ 26. Преобразование и передача электроэнергии

Трансформатор

Передача электроэнергии

§ 27. Электромагнитные волны. Свойства электромагнитных волн

Вспомним известное

Свойства электромагнитных волн

§ 28. Практическое применение радиоволн

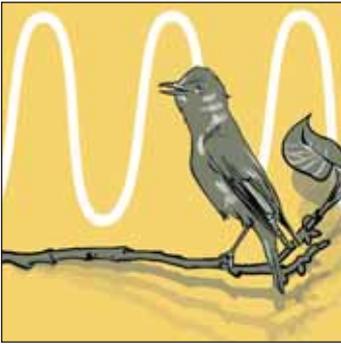
Принципы радиосвязи

Распространение радиоволн

Радиолокация

Самое важное в разделе «Колебания и волны»**P. S.**

§ 15. СВОБОДНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ



Каждый добавляет понемногу к нашему познанию природы.

Аристотель (384–322 до нашей эры), выдающийся философ древности

Вы уже знаете, что если на тело действует сила, то тело движется ускоренно.

Свободные колебания и условия их возникновения. Пронаблюдаем движение различных тел (рис. 116): груза, прикрепленного к пружине, вешалки для одежды, шарика на нити (маятника), упругой металлической линейки, горизонтально расположенного диска, подвешенного на нитях. Каждое из этих тел, будучи выведено из положения равновесия, совершает повторяющееся движение. Такое движение называют свободными колебаниями.

Если отпустить шарик с вершины наклонной плоскости, то шарик скатится вниз и колебания происходить не будут. Если же предоставить шарик возможность двигаться по внутренней поверхности чаши, то он совершает колебания. Налейте в чашу немного воды или насыпьте на дно чаши песок. Теперь шарик не повторит свое движение по поверхности чаши, колебания происходить не будут.

Свободные колебания – это движение, повторяющееся точно (или почти точно) через определённые промежутки времени после отклонения тела от положения равновесия.



15.1. При каких условиях тело может совершать свободные колебания?

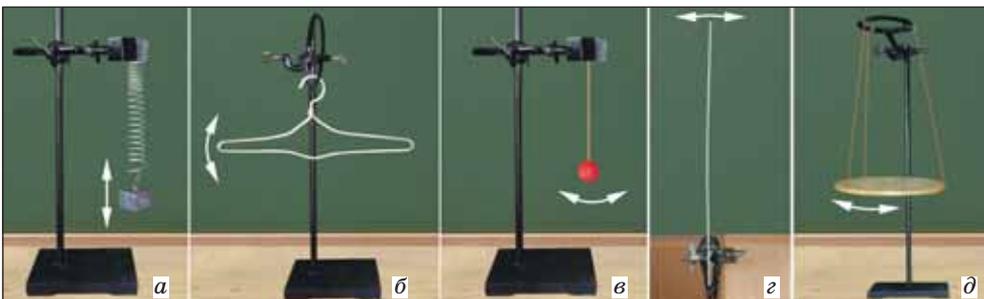


Рис. 116

Проанализируем, например, как движется груз, прикрепленный к пружине. Сжав пружину, отклоним груз влево от положения равновесия (рис. 117, а).

Отпустим груз. Под действием деформированной пружины тело придёт в движение. При этом на него действует сила упругости

$$F_{упр} = -kx$$

(k – жёсткость пружины; x – величина деформации пружины). В этот момент сила упругости направлена *вправо*, к положению равновесия (рис. 117, б). Под действием силы упругости груз движется с переменным ускорением (вспомните второй закон Ньютона).

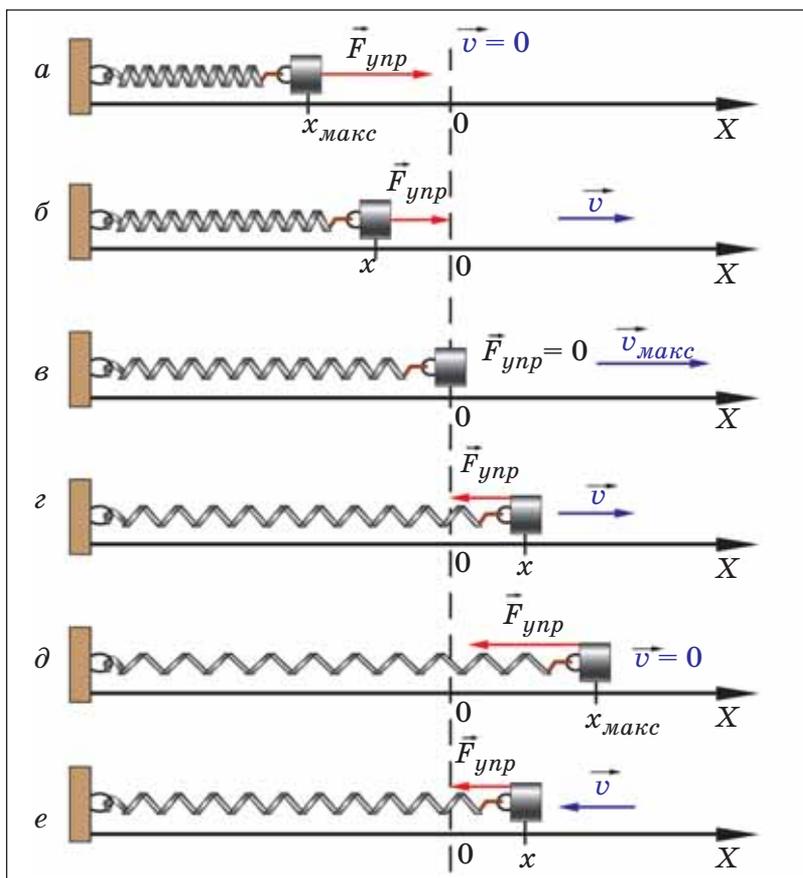


Рис. 117

При прохождении положения равновесия (точка 0 на рисунке 117) сила упругости, действующая на груз, равна нулю. Остановится ли груз? Нет, тело по инерции продолжит движение (рис. 117, в).

При смещении груза вправо от положения равновесия происходит растяжение пружины, и вновь на тело действует сила упругости. Как при этом направлена сила? Сила упругости направлена *влево, к положению равновесия* (рис. 117, г).

Под действием этой силы груз уменьшит свою скорость до нуля (рис. 117, д). В этот момент пружина вновь максимально деформирована – растянута.

Каково будет дальнейшее движение груза? Ясно, что тело продолжит движение с переменным ускорением, смещаясь к положению равновесия (рис. 117, е).

При колебаниях непрерывно изменяются растяжение пружины и скорость колеблющегося груза. Следовательно, изменяются потенциальная энергия упруго деформированной пружины и кинетическая энергия тела. Полная же механическая энергия колебательной системы в соответствии с законом сохранения энергии есть величина неизменная.

Анализируя колебания груза, мы не принимали во внимание силу трения; считали, что она мала. Что произойдёт, если на тело будет действовать значительная сила трения? В этом случае энергия движущегося тела расходуется на совершение работы по преодолению трения, и движение быстро прекращается.

Поместим груз, прикреплённый к пружине, в стакан с вязкой жидкостью (рис. 118) или снабдим маятник «парусом» – листом бумаги (рис. 119). В этом случае из-за сил сопротивления колебания либо не происходят вовсе, либо размах колебаний быстро уменьшается. (Как говорят, колебания затухают.)



Рис. 118



Рис. 119

Итак, выяснены два условия, которые должны выполняться, чтобы тело могло совершать свободные колебания. *Во-первых*, при отклонении от положения равновесия должна возникать переменная сила, направленная к положению равновесия. *Во-вторых*, на тело должна действовать малая сила трения.



15.2. Какие величины характеризуют механическое движение?

Характеристики колебаний. Механические колебания – один из видов механического движения. Как и любое механическое движение, колебания могут быть охарактеризованы такими физическими величинами, как траектория, скорость, ускорение, импульс, механическая энергия. Помимо этих величин важными характеристиками колебаний являются *амплитуда*, *период* и *частота колебаний*.

Амплитудой некоторой величины называют её максимальное (по модулю) значение при колебании.

Так, на рисунках 117, *а* и *д* указана амплитуда смещения колеблющегося тела $x_{\text{макс}}$. Скорость колеблющегося тела имеет амплитудное значение $v_{\text{макс}}$ в тот момент, когда пружина не деформирована (потенциальная энергия пружины равна нулю). Этот момент изображён на рисунке 117, *в*.



15.3. На каких из рисунков 117, *а–е* изображены те моменты, когда ускорение колеблющегося тела имеет амплитудное значение?

При колебаниях движение тела повторяется через определённый промежуток времени.

Наименьший промежуток времени, через который движение колеблющегося тела полностью повторяется, называют **периодом колебаний**.

Период обозначают буквой T .

Рассмотрим пример. Пусть период колебаний $T = 0,05$ с. Сколько колебаний происходит при этом за 1 с?

Ответ очевиден:

$$\frac{1 \text{ с}}{0,05 \text{ с}} = 20.$$

Число колебаний за единицу времени называют **частотой колебаний**.

Частоту обозначают буквой ν .



15.4. Как определить частоту колебаний ν , если известен период колебания T ?

$$v = \frac{1}{T} . \quad (15.1)$$

Единица измерения частоты называется герц (сокращённо обозначается Гц). Так единица частоты названа в честь немецкого учёного Г. Герца (1859–1894), экспериментально обнаружившего электромагнитные волны.

$$\text{Гц} = \frac{1}{\text{с}} .$$

Гармонические колебания. Выясним, как изменяется координата тела от времени при свободных колебаниях. К грузу на пружине прикрепим кисточку, смоченную в краске. Расположим лист плотной бумаги так, чтобы кисточка касалась листа. Толкнув груз вверх, предоставим ему возможность совершать свободные колебания (рис. 120). Кисточка оставит на бумаге вертикальный след, длина которого равна удвоенной амплитуде смещения (почему?). Продолжим опыт, и в то время, когда груз совершает колебания, будем перемещать лист бумаги равномерно в горизонтальном направлении. На бумаге останется след кисточки, отражающий движение груза в различные моменты времени. Этот след не что иное, как *график зависимости колеблющегося тела от времени* (рис. 121).

Из графика видно, что отрезки AB и $A'B'$ равны амплитуде смещения $x_{\text{макс}}$ (почему?). Движение колеблющегося тела повторяется через время, равное периоду. Следовательно, промежутки времени t_1t_2 , $t'_1t'_2$ (рис. 121) равны периоду колебаний T (почему?).

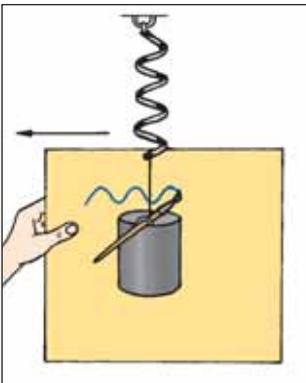


Рис. 120

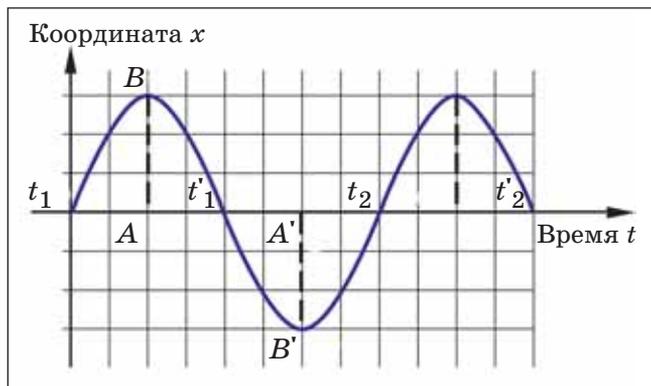


Рис. 121

Как вам известно из курса алгебры, если каждому значению независимой переменной (например, времени t) соответствует единственное значение зависимой переменной (например, координаты x), то такую зависимость называют *функцией*. Какой же математической функции соответствует график зависимости координаты колеблющегося тела x от времени t , полученный нами при проведении опыта? Эта функция называется *синусом* (обозначается \sin). В математике определено, что функция синус принимает значения от -1 до $+1$. Также полезно запомнить значение функции синус при некоторых значениях аргумента:

$$\sin 0 = 0, \quad \sin \frac{\pi}{2} = 1, \quad \sin \pi = 0, \quad \sin \frac{3}{2} \pi = -1, \quad \sin 2\pi = 0.$$

С использованием функции синус зависимость координаты колеблющегося тела x от времени t записывается в виде

$$x = x_{\text{макс}} \sin \omega t. \quad (15.2)$$

Укажем, каков физический смысл величин $x_{\text{макс}}$ и ω (читается: омега), использованных в записи зависимости координаты от времени:

– величина $x_{\text{макс}}$ – это *амплитуда колебаний* (то есть модуль наибольшего значения координаты колеблющегося тела¹);

– величина ω называется *круговой (или циклической) частотой*. Она равна

$$\omega = 2\pi\nu. \quad (15.3)$$



15.5. Как определяется частота ν ?

Число колебаний за 2π секунд называют **круговой (или циклической) частотой**.

Единицей измерения круговой частоты ω , как и частоты ν , является герц.



15.6. Как связаны частота колебаний и период колебаний T ?

Так как

$$\nu = \frac{1}{T},$$

то круговая частота может быть рассчитана и по следующей формуле:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (15.4)$$

¹ Попробуйте обосновать это утверждение самостоятельно.

Подведём итог. При свободных механических колебаниях координата колеблющегося тела изменяется с течением времени по закону синуса¹. Это утверждение может быть доказано математически строго и подтверждено экспериментально².

Колебания, при которых координата тела изменяется с течением времени по закону синуса (или косинуса), называют **гармоническими**.

Как вычисляется период колебаний. Строгий вывод формул для расчёта периода колебаний груза, прикрепленного к пружине, и маятника (шарика на нити) достаточно сложен. Вывод требует большего объёма математических знаний, чем вы имеете. Приведем эти формулы без вывода.

1. Период колебаний T груза, прикрепленного к пружине, вычисляется по формуле

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (15.5)$$

где m – масса груза;

k – жёсткость пружины.

Как следует из формулы (15.5), период колебаний груза, прикрепленного к пружине, зависит от массы груза и жёсткости пружины.



15.7. Как изменится частота колебаний груза, прикрепленного к пружине, при уменьшении жёсткости пружины в 4 раза?

2. Период колебаний T маятника вычисляется по формуле:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (15.6)$$

где l – длина нити маятника;

g – ускорение свободного падения.

Как следует из формулы (15.6), период маятника зависит от длины нити маятника и ускорения свободного падения.



15.8. Как изменится частота колебаний маятника, если его перенести с Земли на Луну? (Ускорение свободного падения на Луне в шесть раз меньше, чем на Земле.)

¹ В случае малого отклонения от положения равновесия и отсутствия затухания колебаний.

² Для математической записи зависимости координаты колеблющегося тела x от времени t может быть также использована функция косинус (обозначается: \cos):

$$x = x_{\max} \cos \omega t.$$

Функция косинус так же, как и функция синус, принимает значения от -1 до $+1$:

$$\cos 0 = 1, \quad \cos \frac{\pi}{2} = 0, \quad \cos \pi = -1, \quad \cos \frac{3}{2} \pi = 0, \quad \cos 2\pi = 1.$$



Для обоснования формул (15.5) и (15.6) применим приём, использованный нами при выводе формулы центростремительного ускорения (смотрите § 4 учебника).

Колебания груза, прикреплённого к пружине.

Период и частота колебаний груза, прикреплённого к пружине, зависят от жёсткости пружины и массы груза. Чем больше жёсткость пружины, тем большее ускорение она сообщает грузу и тем быстрее груз движется, совершает больше колебаний за единицу времени. Чем груз массивнее, тем медленнее он изменяет скорость под действием силы упругости, тем меньше частота колебания.

Выпишем единицы измерения круговой частоты ω , жёсткости пружины k и массы груза m :

Круговая частота ω	Жёсткость пружины k	Масса груза m
$\Gamma_{\text{ц}} = \frac{1}{\text{с}}$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{м}} = \frac{\text{кг}}{\text{с}^2}$	кг

Единица измерения круговой частоты $\frac{1}{\text{с}}$ получается, если единицу измерения жёсткости $\frac{\text{кг}}{\text{с}^2}$ разделить на единицу массы кг и извлечь квадратный корень из данного отношения.

Следовательно, можно записать

$$\omega \sim \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Строгий математический расчёт позволяет определить коэффициент пропорциональности между левой и правой частями данного выражения. В данном случае он равен 1.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (15.7)$$

Из соотношений (15.3) и (15.7) имеем

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (15.8)$$

Располагая набором грузов различной массы и пружинами различной жёсткости, можно убедиться на опыте в справедливости данной формулы. Так, например, при увеличении массы груза в 4 раза период колебаний возрастёт в 2 раза.

Колебания маятника.

Естественно предположить, что период и частота колебаний маятника зависят от длины нити, его массы и силы тяжести, действующей на маятник.

Выпишем единицы измерения этих физических величин:

Круговая частота ω	Длина нити маятника l	Масса маятника m	Сила тяжести, действующая на маятник, $F_{тяж}$
$\Gamma\text{ц} = \frac{1}{\text{с}}$	м	кг	$\text{H} = \frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}^2}$

Единица измерения круговой частоты $\frac{1}{\text{с}}$ получается, если единицу измерения силы тяжести $\frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}^2}$ разделить на единицу массы кг, на единицу длины нити м и извлечь квадратный корень из данного отношения.

То есть

$$\omega \sim \sqrt{\frac{F_{тяж}}{m \cdot l}}.$$

Вспомним, как рассчитывается сила тяжести:

$$F_{тяж} = mg$$

(g – ускорение свободного падения).

Тогда
$$\omega = \sqrt{\frac{mg}{m \cdot l}}.$$

Коэффициент пропорциональности в этом выражении также равен 1.

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (15.9)$$

Из соотношений (15.3) и (15.9) имеем

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (15.10)$$

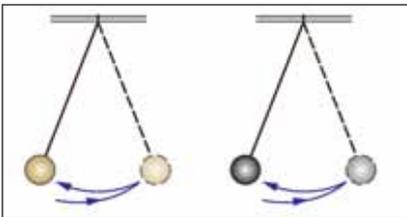


Рис. 122

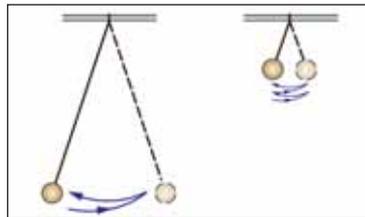


Рис. 123

Как следует из формулы, период колебаний маятника зависит от его длины и ускорения свободного падения, но не зависит от массы маятника. Используя маятники равной длины, но разные по массе, легко убедиться, что периоды колебаний действительно одинаковы (рис. 122).

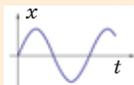
Для проверки зависимости периода колебаний от длины маятника удобно использовать маятники, отличающиеся по длине в 4 раза (рис. 123). В этом случае видно, что за время одного колебания «длинного» маятника совершается два колебания «короткого» маятника. Период колебаний «длинного» маятника в два раза больше периода колебаний «короткого» маятника.



15.9. Как изменяется сила тяжести по мере удаления от поверхности Земли?

Для того чтобы подтвердить зависимость периода маятника от величины ускорения свободного падения, следует провести измерения периода колебаний в двух случаях – на уровне моря и высоко в горах. На опыте подтверждается, что во втором случае маятник совершает более медленные колебания, с большим периодом (почему?).

Свободные колебания, условия возникновения свободных колебаний, амплитуда, период, частота, круговая частота, гармонические колебания, $x = x_{\max} \sin \omega t$, $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$, $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$.



15.1 ● На рисунке 124 изображены графики гармонических колебаний. Сравните амплитуду, период и частоту этих колебаний.

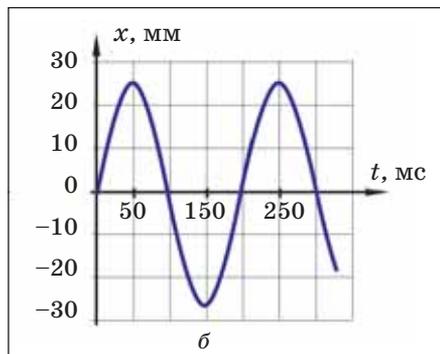
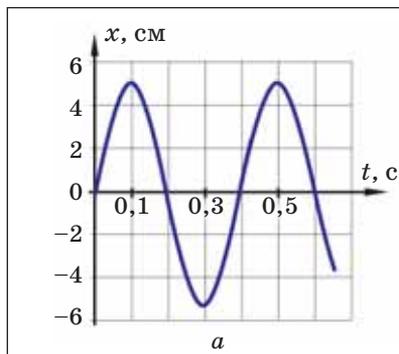


Рис. 124

15.2 ● Проведя эксперимент, ученик обнаружил, что за 3 мин маятником было совершено 120 колебаний. Определите период, частоту, круговую частоту колебаний.

15.3 ● Вычислите период, частоту, круговую частоту колебаний маятника длиной 1 м.

15.4 ● Сколько колебаний совершит груз массой 200 г, прикрепленный к пружине жёсткостью 20 Н/м, за 30 с?

15.5 ● Для измерения массы космонавта на орбитальной станции используется подвижное кресло известной массы, закреплённое на пружине. Как с помощью такого кресла производят измерение массы космонавта?

§ 16. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «СВОБОДНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ»



Ясный разум даёт душе то, что здоровье – телу.

*Франсуа де Ларошфуко (1613–1680),
французский писатель*

Вам уже известны величины, характеризующие колебания.



Классификация задач. Задачи по теме «Механические колебания» можно разделить на следующие виды:

1. *Задачи на расчёт периода и частоты колебаний.*

При решении этих задач используются формулы:

– период колебаний маятника $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$;

– период колебаний груза, прикрепленного к пружине, $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$;

– связь частоты и периода колебаний $\nu = \frac{1}{T}$;

– связь частоты и круговой частоты колебаний $\omega = 2\pi\nu$.

2. *Определение характеристик колебаний по графику.*

По графику гармонических колебаний можно определить амплитуду и период колебаний.

3. *Определение характеристик колебаний из уравнения зависимости координаты гармонически колеблющегося тела от времени.*

Непосредственно из данного уравнения не составляет труда определить амплитуду и круговую частоту колебаний.

4. *Комбинированные задачи.*

Комбинированные задачи, как вы знаете, содержат в себе несколько простых задач. При решении комбинированной задачи необходимо вначале решить отдельные простые задачи, а затем полученные результаты объединить в итоговом решении.

Примеры решения задач.

Задача 1. В 1851 году французский физик Фуко для наглядной демонстрации доказательства вращения Земли вокруг своей оси соорудил маятник с большой длиной нити подвеса.

Какова была длина нити подвеса маятника Фуко, если за 5 мин 28 с маятник совершал 20 колебаний? Ускорение свободного падения в Париже составляет $9,81 \text{ м/с}^2$.

Дано:

Маятник
 $t = 5 \text{ мин } 28 \text{ с}$
 $N = 20$
 $g = 9,81 \text{ м/с}^2$

$l - ?$

СИ:

328 с

Решение:

Зная общее время t нескольких колебаний N , можно определить период маятника T :

$$T = \frac{t}{N}. \quad (16.1)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (16.2)$$

С другой стороны,

Сравнивая соотношения (16.1) и (16.2), имеем

$$2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} = \frac{t}{N}.$$

Отсюда

$$\frac{4\pi^2 l}{g} = \frac{t^2}{N^2},$$

$$4\pi^2 l = \frac{t^2 g}{N^2},$$

$$l = \frac{t^2 g}{4\pi^2 N^2}.$$

(Дальнейшие действия по решению задачи выполните самостоятельно.)

Ответ: $l = 67 \text{ м}$.

Задача 2. На рисунке 125 изображён график колебаний поплавок на поверхности воды. (S – смещение поплавок от положения равновесия, t – время.) Пренебрегая затуханием колебаний за небольшой промежуток времени, запишите уравнение зависимости смещения от времени.

Дано:

График колебаний

$$S = f(t) - ?$$

Решение:

На поплавок, частично погружённый в воду, действуют сила тяжести и выталкивающая сила. Выталкивающая сила, как вам известно, зависит от плотности жидкости и объёма погружённой в жидкость части тела.

Если вывести поплавок из положения равновесия, то при его движении будет изменяться глубина погружения поплавок, а значит, и выталкивающая сила. В те моменты времени, когда поплавок ниже положения равновесия, выталкивающая сила больше силы тяжести и равнодействующая сила направлена к положению равновесия. В те моменты времени, когда поплавок выше положения равновесия, выталкивающая сила меньше силы тяжести и равнодействующая сила направлена к положению равновесия. Таким образом, под действием выталкивающей силы и силы тяжести поплавок совершает свободные колебания. Так как затуханием колебаний по условию задачи можно пренебречь, то колебания являются гармоническими.

При гармонических колебаниях поплавок его смещение S изменяется с течением времени по закону синуса.

По аналогии с соотношением (15.2) запишем

$$S = S_{\text{макс}} \sin \omega t.$$

Амплитуду смещения $S_{\text{макс}}$ определим непосредственно из графика (рис. 125):

$$S_{\text{макс}} = 3 \text{ мм.}$$

$$S_{\text{макс}} = 0,003 \text{ м.}$$

Круговая частота ω может быть выражена через период колебания T :

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

Из графика (рис. 125) определим период T :

$$T = 0,4 \text{ с.}$$

(Дальнейшие действия по решению задачи выполните самостоятельно.)

$$\text{Ответ: } S = 0,003 \sin 5\pi t.$$

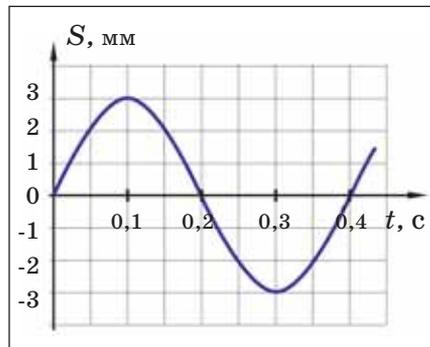


Рис. 125

Задача 3. Груз массой 200 г совершает гармонические колебания, при которых скорость тела v изменяется с течением времени t по закону

$$v = 0,4 \sin(10\pi t) \text{ м/с.}$$

Определите амплитуду скорости, период и частоту колебаний. Чему равен импульс тела и его кинетическая энергия в момент времени $t = 0,05$ с?

Дано:
 Груз колеблется гармонически
 $m = 200$ г
 $v = 0,4 \sin(10\pi t)$ м/с
 $t = 0,1$ с

 $v_{\text{макс}} - ?$ $T - ?$
 $v - ?$ $p - ?$ $E_k - ?$

СИ:

 $0,2$ кг

Решение:
 При гармоническом колебании координата, скорость, ускорение колеблющегося тела изменяются с течением времени по закону синуса (или косинуса).

Например,

$$v = v_{\text{макс}} \sin \omega t.$$

Сравнивая эту зависимость с зависимостью, указанной в условии задачи,

$$v = 0,4 \sin(10\pi t) \text{ м/с,}$$

легко определить амплитуду скорости и круговую частоту колебаний.

$$v_{\text{макс}} = 0,4 \text{ м/с,}$$

$$\omega = 10\pi \text{ Гц.}$$

Соотношения (15.3) и (15.4) позволяют рассчитать период и частоту колебаний:

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi}, \quad \nu = 5 \text{ Гц;}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad T = 0,2 \text{ с.}$$



16.1. Как рассчитываются импульс и кинетическая энергия движущегося тела?

Для расчёта импульса p и кинетической энергии груза E_k в некоторый момент времени необходимо знать его скорость.

$$v = 0,4 \sin(10\pi t) \text{ м/с, } t = 0,05 \text{ с.}$$

Тогда

$$v = 0,4 \sin(10\pi \cdot 0,05) \text{ м/с,}$$

$$v = 0,4 \text{ м/с.}$$

(Дальнейшие действия по решению задачи выполните самостоятельно.)

Ответ: $v_{\text{макс}} = 0,4$ м/с, $\nu = 5$ Гц, $T = 0,2$ с, $p = 0,08$ кг·м/с, $E_k = 16$ мДж.



Задача 4. На гладком горизонтальном столе находится тележка массой 400 г, прикреплённая к пружине жёсткостью 10 Н/м (рис. 126). Определите максимальное ускорение тележки и её максимальную скорость, если она совершает колебания с амплитудой 5,0 см.

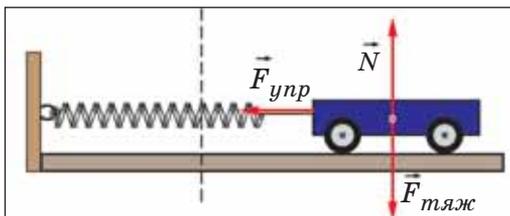


Рис. 126

Дано:

$$m = 400 \text{ г}$$

$$k = 10 \text{ Н/м}$$

$$x_{\text{макс}} = 5,0 \text{ см}$$

$$a_{\text{макс}} - ?$$

$$v_{\text{макс}} - ?$$

СИ:

$$0,4 \text{ кг}$$

$$0,050 \text{ м}$$

Решение:

На тележку действуют сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$, сила тяжести $\vec{F}_{\text{тяж}}$ и сила реакции \vec{N} (силу трения считаем малой). В соответствии со вторым законом Ньютона ускорение тележки равно

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

где

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{упр}} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тяж}}.$$

Так как сила реакции \vec{N} и сила тяжести $\vec{F}_{\text{тяж}}$ уравновешивают друг друга, то

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{упр}}.$$

В соответствии с законом Гука $|\vec{F}_{\text{упр}}| = kx$.

Тогда

$$|\vec{a}| = \frac{kx}{m}.$$

Ускорение, с которым движется тележка, максимально при наибольшей деформации пружины:

$$a_{\text{макс}} = \frac{k}{m} x_{\text{макс}}.$$



16.2. Какие превращения энергии происходят при колебаниях тележки, прикреплённой к пружине?

16.3. Как рассчитывается потенциальная энергия упруго деформированной пружины?

16.4. В какие моменты времени, при каких положениях колеблющейся тележки потенциальная энергия упруго деформированной пружины максимальна?

16.5. Как рассчитывается кинетическая энергия движущегося тела?

Для определения максимальной скорости тележки воспользуемся законом сохранения энергии:

$$\frac{mv_{\text{макс}}^2}{2} = \frac{kx_{\text{макс}}^2}{2}.$$

(Обоснуйте данное выражение.)

$$v_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot x_{\text{макс}}.$$

(Дальнейшие действия по решению задачи выполните самостоятельно.)

Ответ: $a_{\text{макс}} = 1,3 \text{ м/с}^2$, $v_{\text{макс}} = 0,25 \text{ м/с}$.

16.1 По маятнику, находящемуся в покое, нанесли резкий удар. После удара маятник начинает двигаться со скоростью $0,13 \text{ м/с}$ и совершает колебания в вертикальной плоскости. Напишите уравнение зависимости скорости маятника v от времени движения t . Длина нити маятника 61 см .

16.2 Экспериментатором изучалась зависимость периода колебаний маятника от длины его нити. По результатам эксперимента был построен соответствующий график (рис. 127). Однако по оплошности экспериментатора не был указан масштаб по оси T . Восстановите масштаб. Ускорение свободного падения равно $9,8 \text{ м/с}^2$.

16.3 Предложите способ определения объёма комнаты, располагая следующим оборудованием: секундомер, двадцатиграммовый груз (или шарик), нить неизвестной длины. По возможности проверьте предлагаемый вами способ на опыте.

16.4 Внимательный зритель – знаток физики – смотрит фильм о высадке астронавтов на Луну. В фильме показан космический модуль, совершивший «прилунение». Из открытого люка модуля свисает легкая веревочная лестница длиной 1 м с тяжелой ступенькой-платформой на конце лестницы. Лестница за 10 с совершает 5 колебаний. Зритель смог определить, действительно ли съёмки этого эпизода фильма происходили на Луне. Сделайте вывод, игровым или документальным является данный эпизод фильма.

16.5 Неподвижный груз, подвешенный на пружине, находясь в положении равновесия, растягивает её на 10 см . Чему будет равен период вертикальных колебаний груза? Массу пружины не учитывать.

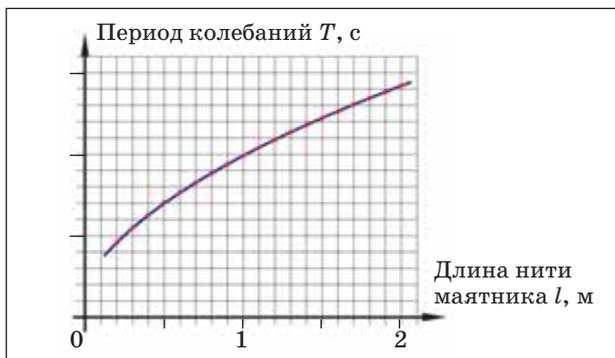


Рис. 127

§ 17. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА
«ИЗУЧЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ МАЯТНИКА»



Чтобы что-нибудь узнать, нужно уже что-то знать.

*Станислав Лем (1921–2006),
польский писатель-фантаст*

Вы уже знаете, как рассчитывается период колебаний маятника.

Оборудование: секундомер, измерительная лента, шарик с отверстием, штатив с муфтой и кольцом.

Указания по выполнению работы



Задание 1. Установите на краю стола штатив. У его верхнего конца с помощью муфты укрепите кольцо. Подвесьте к кольцу шарик на нити. Измерьте длину маятника.

Отклоните маятник от положения равновесия на малый угол¹ и отпустите его. Измерьте время 40–50 колебаний маятника. Повторите опыт несколько раз и вычислите среднее время t полных N колебаний маятника².

Вычислите период колебаний маятника T :

$$T = \frac{t}{N}.$$

Задание 2. Используя данные, полученные другими учениками, заполните следующую таблицу:

Длина маятника l , м						
Период колебаний T , с						
Квадрат периода колебаний T^2 , с ²						

¹ Достаточно отклонить маятник на 2–4 см от положения равновесия.

² При повторных экспериментах, естественно, число полных колебаний маятника N должно быть одно и то же.

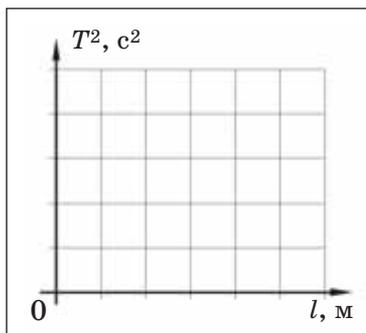


Рис. 128

Постройте график зависимости квадрата периода колебаний T^2 от длины маятника l (рис. 128).

Примечание. Период колебаний маятника рассчитывается по формуле

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (17.1)$$

Возведя левую и правую части данного выражения в квадрат, получим

$$T^2 = \frac{4\pi^2 l}{g}. \quad (17.2)$$



17.1. Как будет выглядеть график зависимости квадрата периода колебаний T^2 от длины маятника l , если соотношение (17.1) справедливо?

Сделайте вывод, подтверждается ли теоретическая зависимость периода колебаний маятника от его длины характером графика.

17.2. Почему для экспериментального обоснования теоретической зависимости периода колебаний маятника от его длины недостаточно построения графика зависимости периода колебаний T от длины маятника l ?



Задание 3. Выведите формулу для расчёта ускорения свободного падения g [воспользуйтесь выражением (17.2)]. Вычислите ускорение свободного падения.

Задание 4. Вычислите относительную погрешность измерения ускорения свободного падения ε_g по формуле

$$\varepsilon_g = \frac{\Delta l}{l} + 2 \frac{\Delta t}{t}.$$

Примите $\Delta l = 1$ см, $\Delta t = 0,5$ с. (Абсолютная погрешность измерения длины Δl принята равной цене деления измерительной ленты. Абсолютная погрешность измерения времени Δt принята равной времени реакции, необходимому для включения и выключения секундомера.)

Вычислите абсолютную погрешность измерения ускорения свободного падения Δg .

Так как

$$\varepsilon_g = \frac{\Delta g}{g},$$

то

$$\Delta g = \varepsilon_g \cdot g.$$

Сделайте вывод, принадлежит ли табличное значение ускорения свободного падения $g_{\text{табл}}$ интервалу $(g - \Delta g, g + \Delta g)$.

§ 18. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. РЕЗОНАНС



Без ветра камыш не качается.

Русская пословица

Вам уже известно, что свободные колебания являются затухающими.

Вынужденные колебания.



18.1. Какая – положительная или отрицательная – работа совершается силами трения (силами сопротивления) при колебаниях?

В процессе свободных колебаний из-за сил трения (сил сопротивления) происходит постепенное превращение механической энергии в тепловую энергию. Это приводит к уменьшению амплитуды колебаний. Для того чтобы амплитуда была неизменной, нужно «подпитывать» колебательную систему энергией. Как это можно сделать?

Прикрепим к прочной горизонтальной нити несколько маятников (рис. 129). Маятник 1 выведем из положения равновесия – он будет совершать колебания. Постепенно маятники 2, 3 и 4 также придут в движение. Почему? Со стороны маятника 1 на горизонтальную нить действует переменная сила. Под действием этой внешней силы (часто её называют *вынуждающей силой*) маятники 2, 3 и 4 совершают колебания. Такие колебания называют *вынужденными*.

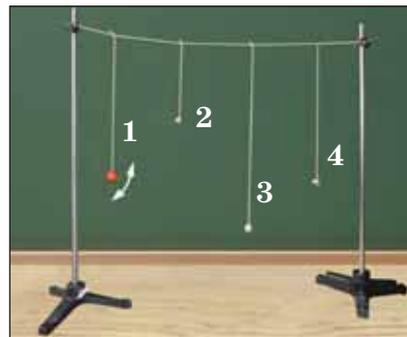


Рис. 129

Вынужденные колебания – это колебания, совершаемые телом под действием внешней переменной силы.

Частота вынужденных колебаний равна частоте изменения внешней (вынуждающей) силы, а амплитуда колебаний определяется амплитудой вынуждающей силы.

Вот ещё один пример вынужденных колебаний. В муфте штати-

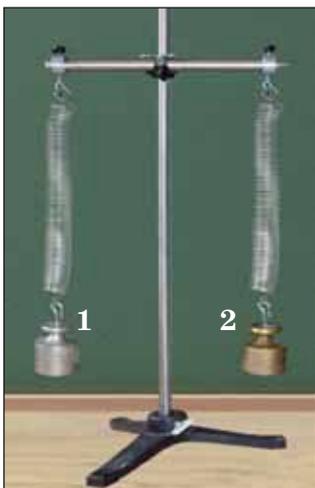


Рис. 130

ва закрепим короткий металлический стержень; к обоим концам стержня прикрепим грузы на пружинах (рис. 130). Если винт муфты затянут крепко, то при колебаниях груза 1 другой груз – груз 2 – будет неподвижен. Но стоит только ослабить винт, как груз 2 начнёт совершать вынужденные колебания.



18.2. Как объяснить возникновение вынужденных колебаний в системе, изображённой на рисунке 130?

Проведём сравнение свободных и вынужденных колебаний. Используя установки, изображённые на рисунках 129 и 130, легко выявить различия между этими двумя видами колебаний:

Сравнение свободных и вынужденных колебаний

Величина, характеризующая колебания	Свободные колебания	Вынужденные колебания
Частота колебаний	Определяется свойствами самой колебательной системы (например, длиной нити маятника и ускорением свободного падения). Частоту свободных колебаний называют собственной частотой колебательной системы	Равняется частоте вынуждающей силы
Амплитуда колебаний	Определяется первоначальным отклонением тела от положения равновесия, с течением времени уменьшается	Зависит от амплитуды внешней вынуждающей силы, с течением времени не изменяется

Резонанс. Амплитуда вынужденных колебаний зависит от амплитуды вынуждающей силы. Но, оказывается, *амплитуда вынужденных колебаний зависит и от частоты вынуждающей силы.*



18.3. Какими физическими величинами определяется частота свободных колебаний груза на пружине?

Если менять жёсткость пружины и массу груза *1* (рис. 130), то будет изменяться частота вынуждающей силы. Выясним, влияет ли это изменение частоты на амплитуду вынужденных колебаний груза *2*. Наблюдение показывает, что амплитуда вынужденных колебаний становится максимальной тогда, когда частота вынуждающей силы равна частоте свободных колебаний груза *2* (собственной частоте колебаний). Такое явление получило в физике название *резонанса*¹.

Резонанс – это явление значительного увеличения амплитуды вынужденных колебаний при условии совпадения частоты вынуждающей силы с собственной частотой колебательной системы.



18.4. Какими физическими величинами определяется собственная частота колебаний маятника?

Явлением резонанса объясняется то, что из трёх маятников (маятники *2*, *3* и *4* на рисунке 129) именно маятник *4* совершает вынужденные колебания с наибольшей амплитудой. Действительно, нити маятника *1* («источник» вынуждающей силы) и маятника *4* (колебательная система, совершающая вынужденные колебания) имеют одинаковые длины. Значит, частота вынуждающей силы совпадает с собственной частотой колебательной системы. Условие резонанса выполняется, в результате у маятника *4* амплитуда вынужденных колебаний самая большая.

Явление резонанса необходимо учитывать на практике. Иногда это явление может быть полезно, как, например, при раскачивании качелей. Иногда может приводить к нежелательным последствиям. Например, фундаменты, на которые крепятся станки, при работе двигателей станков испытывают периодические толчки. Поэтому необходимо предусмотреть, чтобы собственная частота колебаний сооружения не совпала с частотой внешнего воздействия. Морские корабли, попав в шторм, так выбирают свой курс, чтобы частота ударов волн случайно не совпала с собственной частотой колебаний корабля.

¹ От латинского *resonans* – дающий отзвук.



Рис. 131

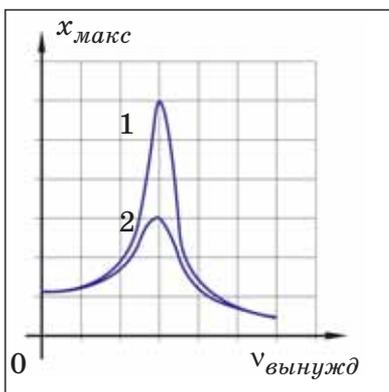


Рис. 132

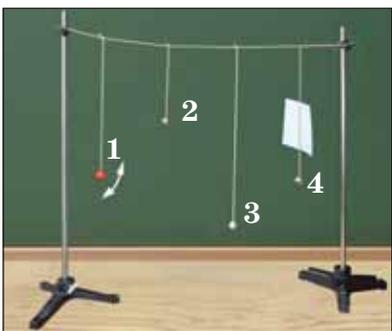


Рис. 133

Во избежание возможного резонанса воинским подразделениям при прохождении мостов отдаётся команда «Идти не в ногу». Порой недостаточный учёт законов и особенностей колебательного движения приводит к самым серьёзным последствиям. Так, в 1940 году в США рухнул висячий мост Такома-Нэрроуз (рис. 131). Через четыре месяца после открытия под действием порывов ветра основной пролёт моста длиной 853 м постепенно раскачался до такой значительной амплитуды, что произошло его разрушение.



Почему же именно условие равенства частот является условием резонансного увеличения амплитуды? Оказывается, в этом случае в течение всего периода колебаний направление вынуждающей силы совпадает с направлением перемещения колеблющегося тела. Это означает, что в течение всего периода колебаний вынуждающая сила совершает *только положительную работу*. В итоге увеличивается механическая энергия колеблющегося тела, а значит, и амплитуда колебаний.

На рисунке 132 изображены графики зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы (резонансные кривые).

Кривая 1 соответствует явлению резонанса в колебательной системе с малой силой сопротивления.

Кривая 2 (когда резонанс менее заметен) соответствует системе с большей силой сопротивления. В этом случае положительная работа вынуждающей силы не приводит к увеличению энергии системы и значительному росту амплитуды вынужденных колебаний. Почему?

Весь «прирост» энергии за период колебания идёт на восполнение «убыли» энергии, происходящей за счёт отрицательной работы силы сопротивления.



18.5. Как рассчитывается механическая работа?

Механическая работа, как известно, зависит от модуля силы, модуля перемещения и угла между ними¹. Допустим, сила сопротивления велика. Тогда уже за небольшое перемещение колеблющегося тела силой сопротивления будет совершена отрицательная работа, численно равная «приросту» энергии. В итоге амплитуда резонансных колебаний будет невелика. Это можно проверить. Используем установку, изображённую на рисунке 129. Снабдим «резонирующий» маятник 4 «парусом» – листком бумаги (рис. 133). В этом случае сила сопротивления, действующая на движущийся маятник со стороны воздуха, существенно больше, и значительного резонансного увеличения амплитуды колебаний не происходит.

Автоколебания. Существует способ получения незатухающих колебаний без использования внешней вынуждающей силы. Такие незатухающие самоподдерживающиеся колебания называют *автоколебаниями*.

Одна из автоколебательных систем изображена на рисунке 134. Как происходят колебания в такой системе? Груз 1 совершает колебания на пружине 2. При движении груз касается металлической упругой линейки – контакта 3. При этом замыкается электрическая цепь, содержащая источник постоянного тока 4, электромагнит 5 и лампу 6. При прохождении тока электромагнит притягивает груз. На груз действует дополнительно магнитная сила; этой силой при смещении груза вниз совершается положительная работа, и кинетическая энергия груза увеличивается.

При дальнейшем движении груза цепь автоматически размыкается, и груз будет совершать свободные колебания. Затем груз вновь коснётся контакта, замкнёт цепь, вновь получит дополнительную «порцию» энергии. Периодическая «подпитка» колебательной системы компенсирует уменьшение механической энергии системы за счёт трения. В итоге устанавливаются незатухающие *автоколебания*.

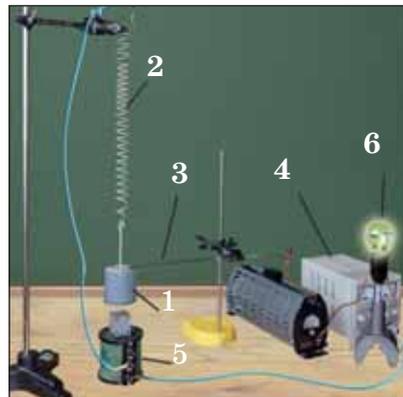


Рис. 134

¹ Угол между силой сопротивления и перемещением тела, очевидно, составляет 180° .

Автоколебания отличаются и от свободных, и от вынужденных колебаний. В отличие от свободных колебаний автоколебания являются незатухающими. В отличие от вынужденных колебаний автоколебания происходят с собственной частотой, которая определяется свойствами самой автоколебательной системы, а не частотой вынуждающей силы.

Автоколебания широко распространены в природе и технике. Свисток, духовые музыкальные инструменты (труба, флейта), электрический звонок, часы – примеры автоколебательных систем. Сердце и лёгкие человека – также автоколебательные системы. Гудение горячего воздуха в дымоходе печи, звуки, издаваемые животными, человеческая речь – примеры автоколебаний.

Несмотря на такое многообразие, в устройстве автоколебательных систем можно выделить четыре основных элемента (рис. 135). Перечислим их:

1. *Колебательная система.* Колебательная система может совершать свободные колебания с определённой собственной частотой.

2. *Источник энергии.* Источник энергии поддерживает неизменным энергетический «баланс» колебательной системы, компенсирует уменьшение механической энергии системы ввиду отрицательной работы сил трения.

3. *Клапан.* Клапан передаёт порции энергии от источника в колебательную систему.

4. *Обратная связь.* Благодаря этому элементу сама колебательная система в определённые моменты времени открывает клапан и получает порцию энергии. Если отсутствует элемент обратной связи и клапан открыт всегда или открывается в произвольные моменты времени, то установление автоколебаний невозможно.



18.6. Выделите четыре основных элемента автоколебательной системы в установке, изображённой на рисунке 134.

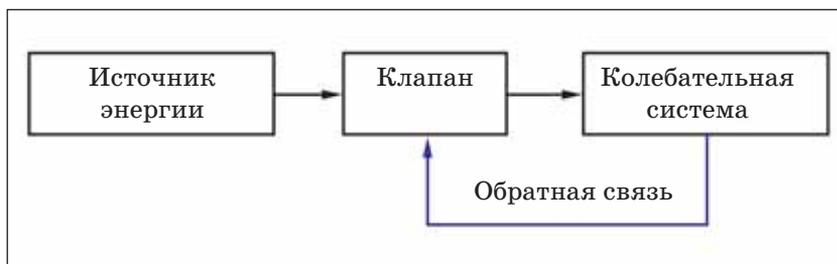


Рис. 135

Вынужденные колебания, частота и амплитуда вынужденных колебаний, резонанс, резонансные кривые, автоколебания, блок-схема автоколебательной системы.

18.1 ● Подготовьте ответ о вынужденных колебаниях и резонансе по плану ответа о физическом явлении.

18.2 ● Катер, плывущий по морю, начинает сильно раскачиваться, хотя волны сравнительно невысокие. Капитан изменяет курс катера и его скорость. Удары волн о катер становятся при этом в два раза чаще, но, тем не менее, размах колебаний катера значительно уменьшается. Объясните это.

18.3 ● На рисунке 136 изображён график зависимости внешней вынуждающей силы, действующей на маятник, от времени. Определите период и частоту вынужденных колебаний маятника. При какой длине маятника амплитуда его колебаний будет наибольшей?

18.4 ● Грузовики въезжают по грунтовой дороге на зерновой склад, разгружаются и выезжают со склада с той же скоростью, но с другой стороны склада. С одной стороны склада выбоины на дороге идут чаще, чем с другой (рис. 137). Как по состоянию дороги определить, с какой стороны склада въезд, а с какой стороны выезд?

18.5 ● На рисунке 132 показаны две резонансные кривые для одной и той же колебательной системы в случаях, когда трение в системе различно. Во сколько раз отличаются энергии колебаний при резонансе? (Подсказка. При колебаниях происходят периодические превращения механической энергии: потенциальной энергии в кинетическую энергию и обратно. Вспомните, от чего зависит потенциальная энергия, например, в случае упругой деформации.)

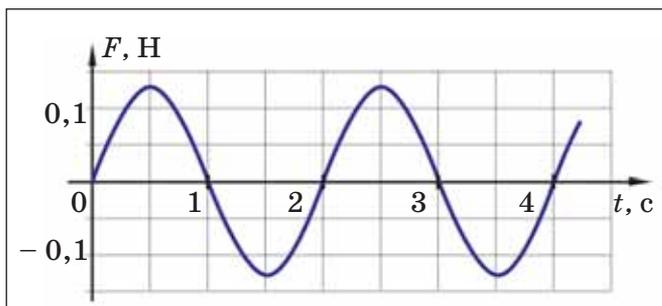


Рис. 136

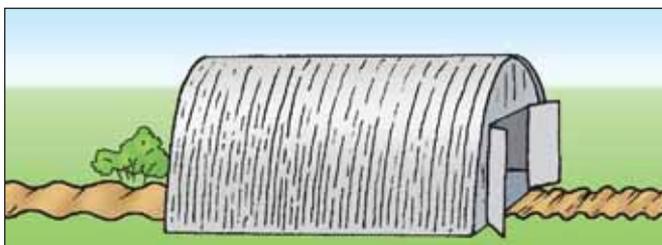


Рис. 137

§ 19. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ



Бросая в воду камешки, смотри на круги, ими образуемые; иначе такое бросание будет пустою забавою.

Козьма Прутков (коллективный псевдоним писателей А. Толстого и братьев Жемчужниковых, выступавших под этим именем с баснями, афоризмами с 1850 по 1860)

Вами уже изучен такой вид механического движения, как колебание.

Механические волны. Типы волн. В предыдущих параграфах мы изучали колебания, происходящие в отдельных колебательных системах – маятнике, грузе на пружине. Но чаще всего встречаются случаи, когда происходят колебания тел (частиц), взаимодействующих с другими телами (частицами).



19.1. Что происходит при взаимодействии колеблющихся тел с другими телами?

В таких случаях одна из колеблющихся частиц приводит в движение другую частицу, та – следующую, таким образом происходит *распространение колебаний*.

Рассмотрим такое явление более подробно. Проведем опыт, похожий на тот, что мы проводили, изучая вынужденные колебания (рис. 129). Однако в этот раз наблюдаем колебания одинаковых по длине маятников, связанных тонким резиновым шнуром (рис. 138).

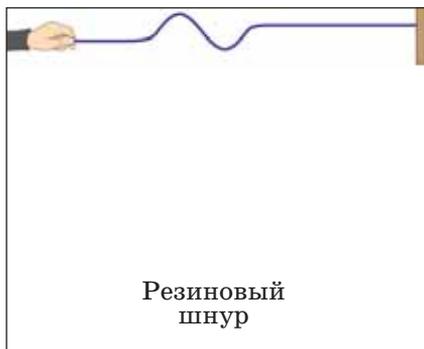


Рис. 138

Отклоним маятник 1 от положения равновесия в плоскости, перпендикулярной горизонтальному стержню, и отпустим. Маятник 1 будет совершать колебания.

Благодаря периодическому растяжению резинового шнура через некоторое время начнёт совершать колебания маятник 2, затем маятник 3 и так далее. Таким образом, мы наблюдаем передачу, распространение колебаний от одного маятника к другому благодаря упругой связи между ними.

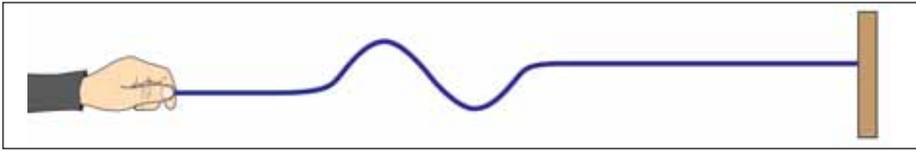


Рис. 139

Распространение колебаний можно наблюдать и в длинном резиновом шнуре или трубке (рис. 139). Шнур необходимо слегка растянуть и боковым ударом руки привести часть шнура в колебательное движение.

Колебания, распространяющиеся в упругой среде, называют **механической волной**.

Как объяснить возникновение механических волн, распространение колебаний? Причиной распространения колебаний являются силы взаимодействия между частицами среды. Вследствие инертности частиц они вовлекаются в волновое движение постепенно, поэтому волна распространяется в упругой среде не мгновенно, а с некоторой скоростью.

В резиновом шнуре (рис. 139) колебания его отдельных частей происходят в вертикальном направлении, при этом возникают *деформации сдвига* (рис. 140). Возникают силы упругости, вовлекающие в волновое движение последующие части резинового шнура. В результате волна распространяется в горизонтальном направлении (рис. 141).

Волна, в которой направление распространения волны перпендикулярно направлению колебаний частиц среды, называется **поперечной волной**.

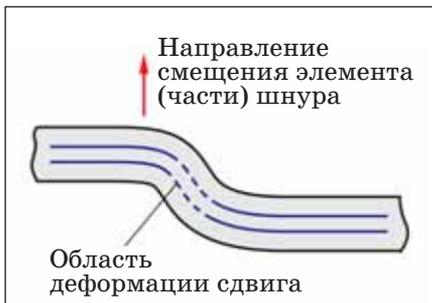


Рис. 140

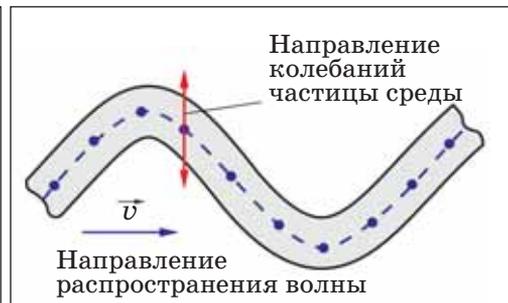


Рис. 141

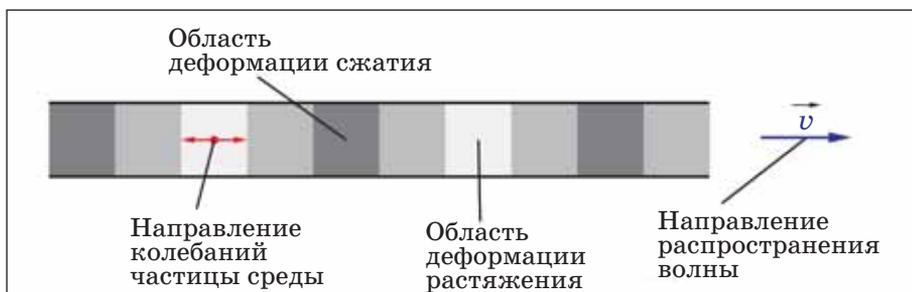


Рис. 142

Поперечные волны могут возникать только в *твёрдых телах*¹. Почему? Дело в том, что только в твёрдых телах при деформации сдвига возникают силы упругости, приводящие к распространению колебаний. При сдвиге же слоев газа или жидкости сил упругости не возникает. Однако это не означает, что в газах и жидкостях механические волны распространяться не могут. Вспомните, как «упруго» ведёт себя воздух под поршнем насоса, как передаётся давление в жидкостях. *В газах, жидкостях и твёрдых телах за счёт упругой деформации сжатия возникают продольные волны* (рис. 142).

Волна, в которой направление распространения волны совпадает с направлением колебаний частиц среды, называется **продольной волной**.

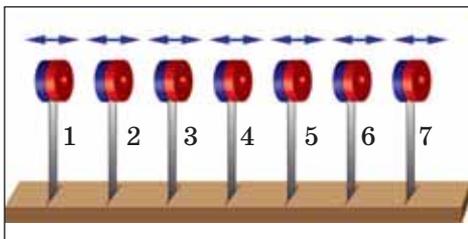


Рис. 143

Наглядно распространение продольных волн можно пронаблюдать на модели из кольцевых магнитов, закреплённых на упругих пластинах (рис. 143). В этой модели кольцевые магниты изображают (моделируют) частицы среды. Силы, возникающие при изгибе упругих пластин, и магнитные силы, действующие между магнитами, моделируют силы межмолекулярного взаимодействия частиц газов, жидкостей или твёрдых тел.

Возбудим колебания крайней пары магнитов 1. Через некоторое время приходят в колебания магниты 2, затем 3 и так далее – возникает продольная волна.

¹ Поперечные волны возникают также на поверхности жидкости. Они формируются благодаря действию силы тяжести и так называемой силы поверхностного натяжения жидкости.

Длина волны. Наряду с частотой колебаний длина волны является одной из основных величин, характеризующих волновой процесс.

Расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний, называется длиной волны.

Длина волны обозначается буквой λ (читается: лямбда). Для поперечной волны длина волны – это расстояние между её ближайшими гребнями или ближайшими впадинами (рис. 144). Для продольной волны длина волны – это расстояние между её ближайшими сжатиями или разрежениями (рис. 145).

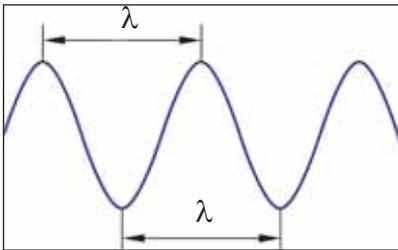


Рис. 144

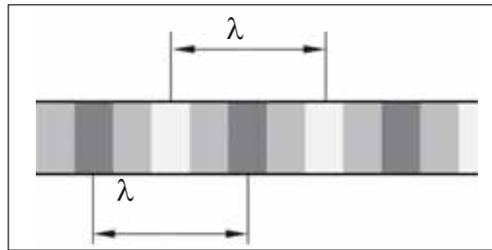


Рис. 145



19.2. Как рассчитывается путь, пройденный телом при равномерном движении?

Обозначим скорость распространения волны буквой v . Тогда из определения длины волны следует, что

$$\lambda = vT, \quad (19.1)$$

где T – период колебаний.

Длина волны тем больше, чем больше скорость волны и чем больше период колебаний.

Из формулы связи частоты колебаний ν с периодом колебаний T

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

легко определить период колебаний:

$$T = \frac{1}{\nu}.$$

Тогда формула (19.1) примет вид

$$\lambda = \frac{v}{\nu}. \quad (19.2)$$



Основные свойства волн. Волны и связанные с ними волновые явления очень широко распространены в природе и технике. Разнообразны и виды волн в земной коре, возникающие при взрывах и землетрясениях, волны на поверхности воды. Звуки, издаваемые, например, музыкальными инструментами и слышимые человеком, также являются волнами. Обладают ли столь разные волны какими-нибудь общими свойствами?

Во-первых, *волны распространяются не мгновенно*, а с некоторой скоростью. Значение скорости волны определяется свойствами среды и тем, какого типа волна – продольная или поперечная – движется в среде. Так, например, в земной коре на глубине 100 км скорость продольных волн составляет 8,2 км/с, а поперечных волн – 4,6 км/с.

Во-вторых, *волной осуществляется перенос энергии без переноса вещества*. Обратимся вновь к опыту, изображённому на рисунке 139. С помощью мела выделим небольшой участок (элемент) резинового шнура. Наблюдая за движением этого элемента, мы обнаружим, что он совершает колебания в вертикальной плоскости, но вместе с волной не перемещается.



Рис. 146

Бросим камешек в воду и пронаблюдаем за волнами на поверхности воды (рис. 146). Мы обнаружим, что по поверхности воды перемещаются гребни и впадины волны, но не сама вода. Особенно легко это будет заметить, если на поверхность воды поместить поплавоч. Как только до поплавка дойдет волна, он начнет совершать колебания в вертикальной плоскости, но не будут перемещаться вслед за волной.

Механические волны, поперечные волны, продольные волны, длина волны, $\lambda = vT$, $\lambda = \frac{v}{\nu}$, основные свойства волн.

19.1 ● Подготовьте ответ о механических волнах, ответ о длине волны, используя соответствующие планы ответа.

19.2 ● Механические волны, распространяющиеся в земной коре, называют сейсмическими. Волны могут быть как продольными (волны сжатия), так и поперечными (волны сдвига); скорость волн меняется с глубиной. Определите длину волны продольных сейсмических волн, распространяющихся на глубине 100 км со скоростью 8,2 км/с, если период их колебаний составляет 100 мс.

19.3 ● Знарок физики рыболов заметил, что поплавоч на воде за 10 с совершил 20 колебаний, а расстояние между соседними гребнями волн равно 0,4 м (рис. 146). Какое значение скорости волны было получено рыболовом?

19.4 Из соотношения (19.1) скорость распространения волны может быть определена по формуле $v = \lambda/T$. Можно ли на этом основании считать, что скорость волны в данной среде прямо пропорциональна длине волны и обратно пропорциональна периоду колебаний?

19.5 В драме А. С. Пушкина «Борис Годунов» имеются следующие строки:

«Послушай! Что за шум?
Народ завыл, там падают, что волны,
За рядом ряд... ещё... ещё... Ну, брат,
Дошло до нас; скорее! на колени!»

Какие особенности волнового движения подмечены поэтом в этих строках?

§ 20. ЗВУК

Если не бить в барабан, он не издаст звук.

Китайская поговорка



Вам уже известно, что продольные волны могут распространяться в твёрдых телах, жидкостях и газах.

Что такое звук. Одним из важнейших качеств человека, сформировавшихся в процессе развития его мышления, является *речь*. Речь – это и средство общения, и орудие мышления. Осуществление внешнего речевого общения возможно только благодаря звукам. Что же такое звук? Как возникают звуки?

Проведём опыт. Длинную стальную линейку зажем в тисках и, отклонив от вертикали, предоставим ей возможность совершать колебания (рис. 147). При движении линейка смещает окружающий её воздух, и в воздухе будут также распространяться колебания – возникнет волна.



20.1. Какие волны – поперечные или продольные – могут распространяться в воздухе?

Рис. 147

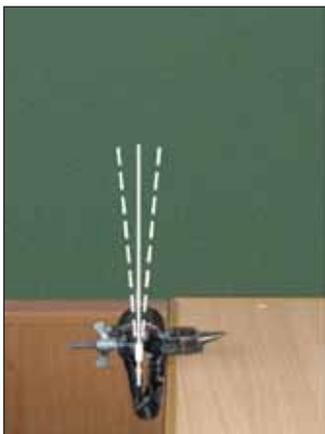


Рис. 148

Но эти колебания воздуха не воспринимаются нашим органом слуха.



20.2. Как изменится частота колебаний линейки, если, передвинув её в тисках, укоротить свободную верхнюю часть линейки (рис. 148)?

«Укоротим» линейку (рис.148). Колеблющаяся часть линейки будет иметь меньшую массу, будет менее инертной, следовательно, частота колебаний возрастет. Как только частота колебаний превысит 16 Гц, мы услышим звук.

Звук – колебания упругой среды частотой от 16 до 20 000 Гц в продольной механической волне.

Такие продольные механические волны получили название звуковых (или акустических) волн.

При изучении звуковых явлений в качестве источника звука часто применяют камертон (рис. 149). Он представляет собой изогнутый металлический стержень на ножке, с помощью которой прибор закрепляется на деревянном ящике. При ударе по камертону он колеблется и издает ясный чистый звук. То, что при звучании камертон колеблется, легко проверить при помощи маятника. Если поднести к камертону маятник, то шарик маятника будет отскакивать от камертона (рис. 150).



20.3. Изменится ли частота колебаний камертона, если ветви камертона утяжелить, например, прикрепив к ним кусочки пластилина?



20.4. Какие колебания называют гармоническими?

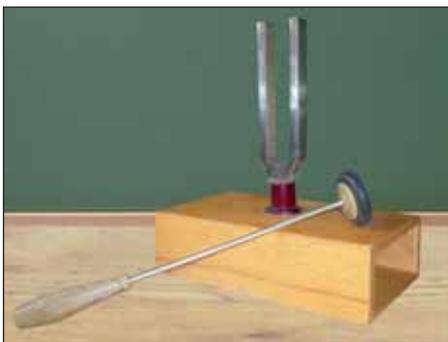


Рис. 149

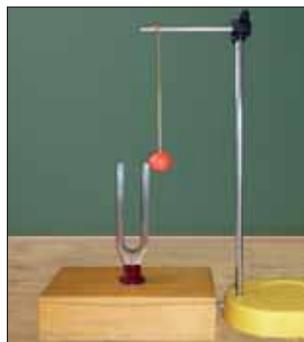


Рис. 150

К ветви камертона, имеющего частоту колебаний около 60 Гц, прикрепим металлическое остриё (рис. 151, а). Возбудим колебания камертона и быстро проведём остриём по поверхности закопчённой стеклянной пластинки (рис. 151, б). Мы обнаружим, что траектория острия представляет волнообразную линию – синусоиду. Это позволяет сделать вывод, что ветви камертона совершают гармонические колебания.

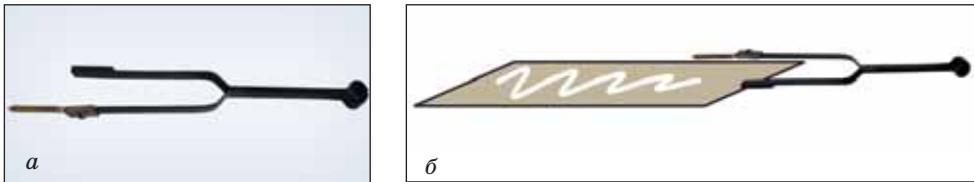


Рис. 151

Звук в различных средах. Звуковые волны распространяются не только в газе (воздухе), но и в жидкостях, и в твёрдых телах (рис. 152). То, что вода является проводником звуковых волн, известно вам и из жизненного опыта. Вспомните, что при купании, нырнув в воду с головой, вы продолжаете слышать звуки, распространяющиеся и в воздухе, и в воде. Слышат звуки и рыбы, причём по чувствительности к звукам частотой от 500 до 1000 Гц слух рыб не уступает слуху млекопитающих. Это учитывают опытные рыболовы, которые стараются не ударять снастью по воде или по корпусу лодки.

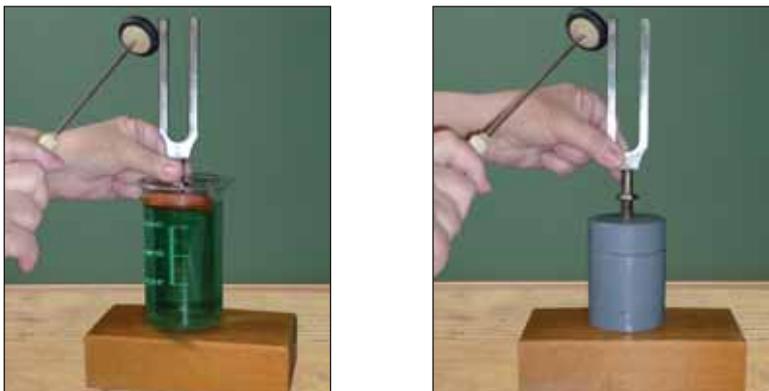


Рис. 152. Демонстрация звукопроводности воды и твёрдого тела. На крышку ящика ставят стакан с водой или металлический стержень. Если возбудить колебания камертона и прикоснуться ножкой звучащего камертона к поверхности воды или стержня, то звук заметно усилится

Хорошим проводником звука является и земля. Недаром в старинных сказаниях встречается описание того, как былинный богатырь мог узнать о приближении неприятельских войск, приложив ухо к земле.

Плохо проводят звук мягкие и пористые материалы. Такие материалы используют для *звукоизоляции* – защиты помещений от проникновения посторонних звуков.



Рис. 153

Не будут, очевидно, распространяться звуковые волны в пустоте (вакууме). Это подтверждает опыт с электрическим звонком, помещённым под колокол воздушного насоса (рис. 153). Пока под колоколом имеется воздух, звонок слышен отчётливо. При откачивании воздуха из-под колокола давление воздуха понижается, воздух становится всё более разреженным, и в итоге звук не слышен.

В различных средах звуковые волны распространяются с различными скоростями. Скорость звука в твёрдых телах составляет несколько километров в секунду, в жидкостях – около километра в секунду. Скорость звука в газах – сотни метров в секунду. При повышении температуры газа скорость звука повышается. Например, в воздухе при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ скорость звука равна $331,5\text{ м/с}$, при $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 337 м/с , при $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $348,9\text{ м/с}$.



20.5. Почему скорость звука в твёрдых телах, как правило, больше, чем в жидкостях, а в жидкостях больше, чем в газах? Почему скорость звука в газах увеличивается с ростом температуры?

Скорость звука в различных средах, м/с (при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Алюминий	6920	Железо	5850
Ацетон	1190	Кирпич	3600
Вода морская	1490	Медь	4700
Водород	1330	Мрамор	6100
Воздух	343	Парафин	1300
Гранит	3850	Стекло	5500
Дерево (ель)	5000	Ртуть	1450

Пример решения задачи.

Скорость звука в чугуне впервые была определена французским учёным Жаном Батистом Био следующим образом. У одного конца чугунной трубы ударяли в колокол; у другого конца экспериментатор слышал два звука: один, пришедший по чугуну, а спустя некоторое время – второй, пришедший по воздуху. Длина трубы была 930 м, промежуток времени между приходом звуков оказался равным 2,5 с. Определите по этим данным скорость звука в чугуне. Скорость звука в воздухе принять равной 340 м/с.



20.6. Какие физические величины необходимо знать, чтобы определить скорость равномерного движения? Какие физические величины уже известны по условию задачи?

20.7. Как определить время, затраченное звуковой волной на распространение по воздуху на расстояние, равное длине трубы?

Дано:

Звук в чугуне

$$S = 930 \text{ м}$$

$$\Delta t = 2,5 \text{ с}$$

$$v_{\text{вх}} = 340 \text{ м/с}$$

$$v_{\text{чуг}} = ?$$

Решение:

Скорость звука в чугуне равна

$$v_{\text{чуг}} = \frac{S}{t_{\text{чуг}}},$$

где $t_{\text{чуг}}$ – время, затраченное звуковой волной на распространение по чугунной трубе.

По условию задачи

$$t_{\text{чуг}} = t_{\text{вх}} - \Delta t,$$

где $t_{\text{вх}}$ – время, затраченное звуковой волной на распространение по воздуху на расстояние, равное длине трубы.

$$t_{\text{вх}} = \frac{S}{v_{\text{вх}}}.$$

Тогда

$$t_{\text{чуг}} = \frac{S}{v_{\text{вх}}} - \Delta t.$$

Таким образом,

$$v_{\text{чуг}} = \frac{S}{\frac{S}{v_{\text{вх}}} - \Delta t}.$$

(Дальнейшие действия по решению задачи выполните самостоятельно.)

Ответ: $v_{\text{чуг}} = 4,0 \text{ км/с}$.

Характеристики звука. Оценивая на слух воспринимаемые звуки, мы характеризуем высоту звука (низкий или высокий звук), тембр звука (его своеобразие) и громкость (тихий или громкий звук). Но все указанные характеристики зависят от личного восприятия человека, состояния его органа слуха. Как говорят, высота, тембр, громкость являются субъективными характеристиками звука. Объективными же физическими характеристиками звука являются частота и амплитуда колебаний.



20.8. Как взаимосвязаны объективные и субъективные характеристики звука?

Возбудим колебания двух камертонов, отличающихся размерами. Тогда легко обнаружить, что больший по размерам, «инертный» камертон издаёт более низкий музыкальный тон. А камертон меньших размеров издаёт более высокий музыкальный тон. Это свидетельствует о том, что *высота музыкального тона определяется частотой колебаний*. **Чем больше частота колебаний, тем выше звук.**

Это легко подтвердить и опытом, для которого потребуется ленточка метровой длины ёлочной мишуры – «дождя» – и кусок пластилина. Закрепим на конце ленточки груз – кусок пластилина – и раскрутим его в вертикальной плоскости. Чем с большей скоростью вращается груз, чем больше частота его вращения, тем выше звук. Вспомните, как меняется высота звука, возникающего при работе вентилятора или электрической дрели, при изменении частоты вращения лопастей вентилятора или сверла электродрели.



20.9. Кто чаще машет крыльями – комар или пчела?

Ударяя молоточком по камертону с разной силой, мы услышим звуки различной громкости. Но чем сильнее удар, тем больше амплитуда колебаний камертона. И, как следствие, больше амплитуда колебаний давления в звуковой волне, больше энергия колебаний. Следовательно, **чем больше амплитуда колебаний, тем больше энергия колебаний, тем звук громче.**

Но громкость звука и амплитуда колебаний не находятся в пропорциональной зависимости друг от друга. Восприятие и оценка громкости звука органом слуха человека зависят также от частоты колебаний. При равной амплитуде колебаний человек воспринимает как более громкие те звуки, частота которых составляет от 1 до 5 кГц. Особенности строения нашего органа слуха позволяют нам воспринимать как очень громкие, так и очень тихие звуки, вызывающие колебания барабанной перепонки с амплитудой, не превосходящей диаметра атома (!).

Такой сверхчувствительный и сложный орган слуха требует к себе бережного отношения – громкие звуки не безвредны для организма человека! Воздействие на человека громких звуков, шумов¹ приводит к снижению остроты слуха и развитию шумовой болезни (быстрая утомляемость, головные боли, повышенная нервная возбудимость).



В качестве объективной характеристики звука используется физическая величина – *интенсивность* звука. Интенсивность звука численно равна энергии, переносимой звуковой волной за единицу времени через единицу площади поверхности. Единица интенсивности звука – Вт/м².

Ещё одна характеристика звука – *уровень звукового давления*. Единица измерения уровня звукового давления – децибел (сокращённо обозначается дБ).

Интенсивность звука, звуковое давление и уровень звукового давления в различных случаях

Интенсивность звука, Вт/м ²	Звуковое давление, Па	Уровень звукового давления, дБ	Примерные условия, соответствующие данным таблицы
10 ⁻¹²	2 · 10 ⁻⁵	0	Порог слышимости
10 ⁻¹⁰	2 · 10 ⁻⁴	20	Шелест листьев в тихом саду. Разговор шёпотом
10 ⁻⁸	2 · 10 ⁻³	40	Разговор вполголоса. Негромкая музыка ²
10 ⁻⁶	2 · 10 ⁻²	60	Громкий разговор. Улица средней оживлённости
10 ⁻⁴	2 · 10 ⁻¹	80	Громкоговоритель при максимальной громкости
10 ⁻²	2	100	Звуки автомобильной сирены
10	20	120	Сильные раскаты грома
100	63	130	Болевые ощущения

Сравните энергию звука, возникающего при работе двигателя самолёта, с энергией звука, возникающего при шорохе листьев или разговоре шёпотом. Они отличаются в 10¹² (миллион миллионов) раз! Только восхищения достоин наш природный «прибор» – орган слуха, способный воспринимать звуковые волны, столь разительно отличающиеся по своей энергии.

¹ Шум – беспорядочные звуковые колебания со случайным изменением амплитуды и частоты.

² Согласно санитарным нормам, уровень допустимого шума не должен превосходить 40 дБ.

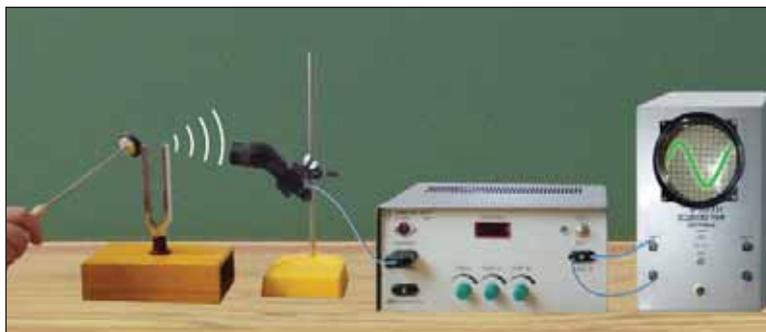


Рис. 154

Как вам известно, звуки – колебания давления воздуха – с помощью *микрофона* можно превратить в колебания электрического тока. Подключим микрофон к прибору – *осциллографу*. Микрофоном звуковые колебания будут преобразованы в электрический сигнал. Этот электрический сигнал повлияет на движение электронного луча в электронно-лучевой трубке осциллографа. И в итоге на экране осциллографа образуется *осциллограмма* – график звуковых колебаний.

Поднесём к микрофону звучащий камертон – на экране осциллографа появится график гармонического колебания – синусоида (рис. 154).

Если же к микрофону поднести какой-нибудь звучащий музыкальный инструмент, то на экране осциллографа возникает не синусоида, а более сложная кривая. Так, на рисунке 155, *а, б* показаны осциллограммы, возникающие при звучании флейты и трубы. Оказывается, эти сложные колебания являются суммой нескольких гармонических колебаний.

Главное колебание называют *основным тоном*, а дополнительные колебания называют обертонами. Амплитуды колебаний обертонов могут быть самыми разными, а вот частоты обертонов строго определены. Частота обертона обязательно в целое число раз (в 2, 3, 4, 5 и так далее) больше частоты основного тона.

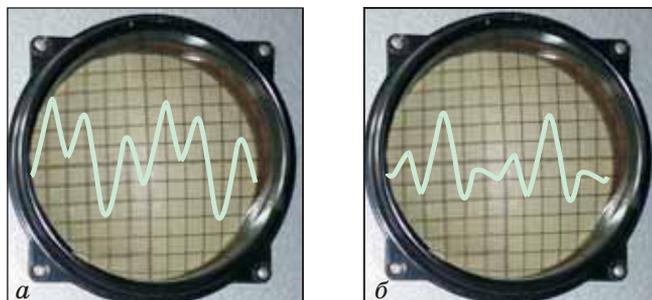


Рис. 155

Звуковые сигналы флейты и трубы могут иметь одинаковую частоту основного тона (например, 440 Гц). Но при этом набор обертонов флейты и трубы будет различен – по количеству обертонов, по амплитудам обертонов. Это и приводит к своеобразию музыкального звучания флейты и трубы.

Таким образом, **тембр звука определяется количеством и амплитудами обертонов, дополняющих основной тон звукового сигнала.** Именно отличия в тембре позволяют нам различать музыкальные инструменты и голоса людей.

Звук, акустические волны, высота звука, частота звука, громкость звука, интенсивность звука, уровень звукового давления, децибел, тембр звука.

20.1 ● Какова длина звуковой волны, создаваемой камертоном, настроенным на тон «ля» первой октавы (440 Гц)? Скорость звука в воздухе принять равной 340 м/с.

20.2 ● Во время грозы человек услышал гром через 8 с после вспышки молнии. Как далеко от него произошёл разряд?

20.3 ● Во сколько раз изменяется длина звуковой волны при её переходе из воздуха в воду?

20.4 ● В романе знаменитого французского писателя В. Гюго «Собор Парижской Богоматери» имеется эпизод, где описывается избрание толпой парижан главы шутов: «... из его разинутого рта вырывался вопль, который не был слышен не потому, что его заглушал общий шум, а потому, что он выходил за пределы, воспринимаемые человеческим слухом, как это бывает, по Соверу, при двенадцати тысячах, а по Био – при восьми тысячах колебаний в секунду». Прокомментируйте данное высказывание.

20.5 ● Из-под ноги альпиниста с отвесного склона ущелья срывается камень. Через сколько времени после этого альпинист услышит звук падения камня на дно ущелья? Глубина ущелья 80 м. Скорость звука принять равной 330 м/с.

§ 21. ВОЛНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ



Волна, набежав на волну, набирает силу.

Персидская пословица

Вам уже доводилось наблюдать различные волновые явления.

Отражение волн. При распространении волн происходят различные волновые явления. Одно из таких явлений – отражение волн. Например, легко наблюдать отражение волн, распространяющихся по поверхности воды.

Для этого потребуются кухонный противень и настольная лампа. Наполните противень водой и расположите настольную лампу так, чтобы поверхность воды была ярко освещена «скользящими» лучами света. Касаясь карандашом или линейкой поверхности воды, можно создать круговые или плоские волны и наблюдать их отражение от стенок сосуда (рис. 156, *а, б*). Для создания круговой волны необходимо ударять по поверхности воды кончиком карандаша; источником волн могут быть и капли жидкости из пипетки, падающие на поверхность воды с высоты 10–15 см (рис. 156, *а*). Для создания плоской волны необходимо ударять по поверхности воды боковой поверхностью линейки (156, *б*).

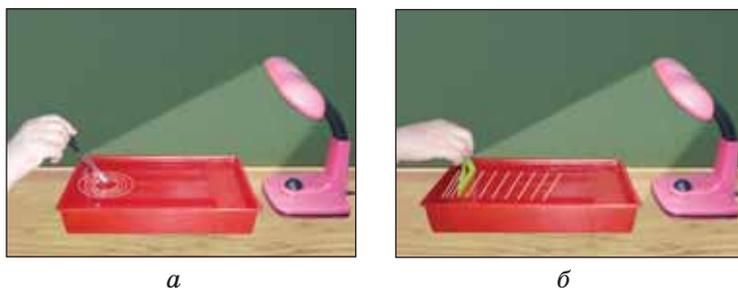


Рис. 156

Отражаются и звуковые волны. На дно высокой мензурки на слой поролона поместим головной телефон (наушник) мембраной вверх и подключим телефон к источнику переменного тока. При колебаниях мембраны возникает звук (рис. 157, *а*). Однако звук слышен в аудитории лишь тогда, когда над мензуркой расположат пластинку, от которой звук будет отражаться (рис. 157, *б*).

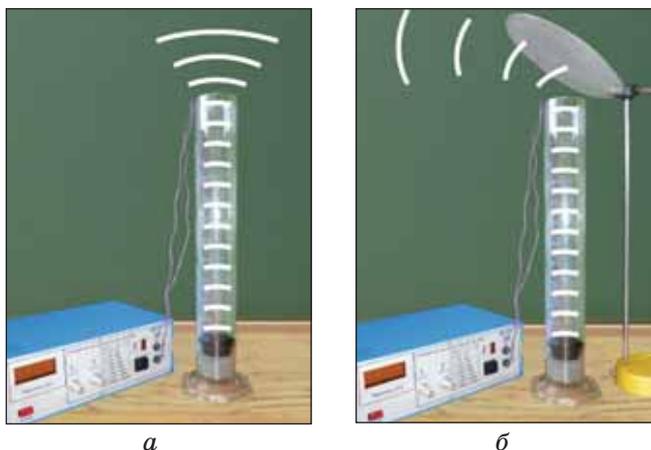


Рис. 157



21.1. Каковы отличительные признаки волнового движения?

Почему волны отражаются?

Это происходит потому, что волна, назовем её падающей (первичной) волной, достигая препятствия, возбуждает колебания частиц препятствия. Эти колеблющиеся частицы становятся источниками волн (рис. 158). Одна волна распространяется в той среде, что образует препятствие. Другая волна – это и есть отражённая волна – распространяется в ту среду, из которой «пришла» падающая волна.

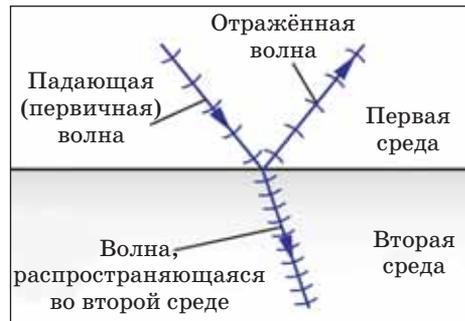


Рис. 158

Явление отражения звука использовано в рупоре – расширяющейся трубе круглого или прямоугольного сечения (рис. 159, а, б).

Если говорить в рупор, то звуковые волны отражаются от стенок рупора. В результате звуковая энергия не рассеивается во всех направлениях, а распространяется вдоль оси рупора, и звук слышен на большем расстоянии.

Всем хорошо известно такое явление, как эхо. Чтобы услышать эхо – отражённую звуковую волну, – необходимо препятствие больших размеров на расстоянии в десятки метров¹.

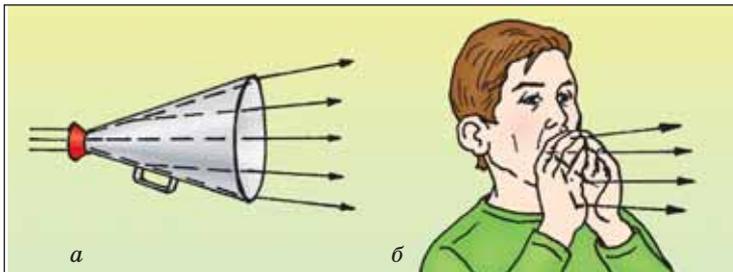


Рис. 159

а – отражение звуковых волн от стенок рупора;

б – простейший рупор – сложенные вместе ладони

¹ Если препятствие, от которого отражается звуковая волна, будет находиться близко, то отражённый звук не будет восприниматься отдельно от произнесённого звука.

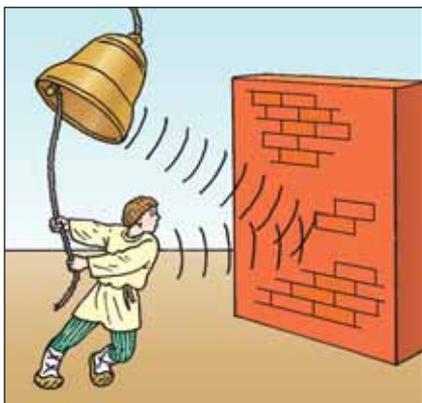


Рис. 160



Ультразвук в технике и природе. Подобный эхометод определения расстояний широко используется на практике, он получил название эхолокации. Например, эхолокация применяется для определения глубины моря. При этом используются не звуковые волны, слышимые человеком, а колебания более высокой частоты (более 20 000 Гц). Их называют ультразвуком.

Специальный излучатель ультразвука испускает короткие сигналы длительностью в тысячную долю секунды с частотой колебаний в сотни килогерц. Отражённый от дна моря ультразвуковой сигнал регистрируется приёмником ультразвука (рис. 161). Определяется время, за которое ультразвук достигает дна моря и возвращается обратно. На основании формулы (21.1) прибором автоматически производится расчёт глубины моря.

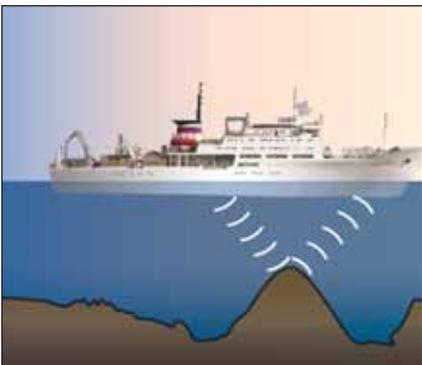


Рис. 161

Допустим, мы услышали эхо через время t после того, как был произведён звук (рис. 160). Как определить расстояние L , на котором находится препятствие, отразившее звуковую волну?

Пусть звук распространяется со скоростью v . Если расстояние $2L$ («туда» и «обратно») звуковая волна преодолела за время t , то

$$2L = vt.$$

Отсюда расстояние до препятствия равно

$$L = \frac{vt}{2}. \quad (21.1)$$

Если ультразвуком «просвечивать» металлические детали – рельсы, стальные трубы, корпуса химических цистерн, – то можно обнаружить скрытые внутри металла дефекты – трещины, пустоты. На исследуемую деталь направляют ультразвуковые сигналы и наблюдают, не возникает ли «эхо» – ультразвуковая волна, отразившаяся от дефекта. Если приёмник ультразвука регистрирует отражённый сигнал, то можно определить месторасположение дефекта, его размеры.

Вы, вероятно, слышали, что ультразвук используется и в медицине. Ультразвуковое исследование (УЗИ) – исследование состояния органов и тканей человека с помощью ультразвуковых волн. Различные органы и ткани имеют неодинаковую плотность, по этой причине происходит отражение ультразвуковых волн от границы тканей в организме человека. Специальный прибор регистрирует эти отражённые волны, а использование компьютерных программ позволяет получить изображение исследуемого органа на мониторе компьютера. Врач имеет возможность видеть объёмное изображение внутренних органов, обнаружить возможные изменения и отклонения от нормы в работе органа, наблюдать, при необходимости, движение крови по сосудам у пациента.

Отдельные живые существа способны издавать и улавливать ультразвук. Так, дельфины издают ультразвуковые колебания частотой до 170 кГц. Природный аппарат эхолокации дельфинов не уступает по точности и дальности действия приборам, разработанным человеком. Дельфины в состоянии обнаружить рыбу и даже различить породу рыбы на расстоянии до трёх километров.

Благодаря ультразвуку ориентируются летучие мыши. Они имеют очень плохое зрение, но, несмотря на это, способны обнаружить в темноте препятствие в виде проволоки диаметром 0,3 мм. При охоте на комаров летучая мышь обнаруживает их с расстояния в несколько метров, затрачивая на отлов каждого комара менее одной секунды.

Явление интерференции волн. Пусть на поверхности воды находится поплавок. Если по воде распространяется волна, то поплавок (как только его достигла волна) будет совершать вынужденные колебания с частотой, равной частоте колебаний источника волн. От чего зависит амплитуда колебаний поплавка? Ясно, что амплитуда колебаний поплавка равна амплитуде колебаний воды в той точке, где находится поплавок. Если создать колебания воды с большей амплитудой, то и амплитуда колебаний поплавка увеличится.

Теперь представим, что на поплавок воздействуют не одна волна, а две. Пусть, например, источник одной волны находится в точке O_1 , источник другой волны – в точке O_2 , поплавок – в точке A (рис. 162). Для простоты будем считать, что амплитуды колебаний, создаваемых источниками волн в точке A , одинаковы.



21. 2. Как будут происходить колебания поплавка, если на него одновременно воздействуют две волны?

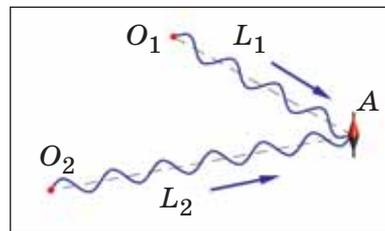


Рис. 162

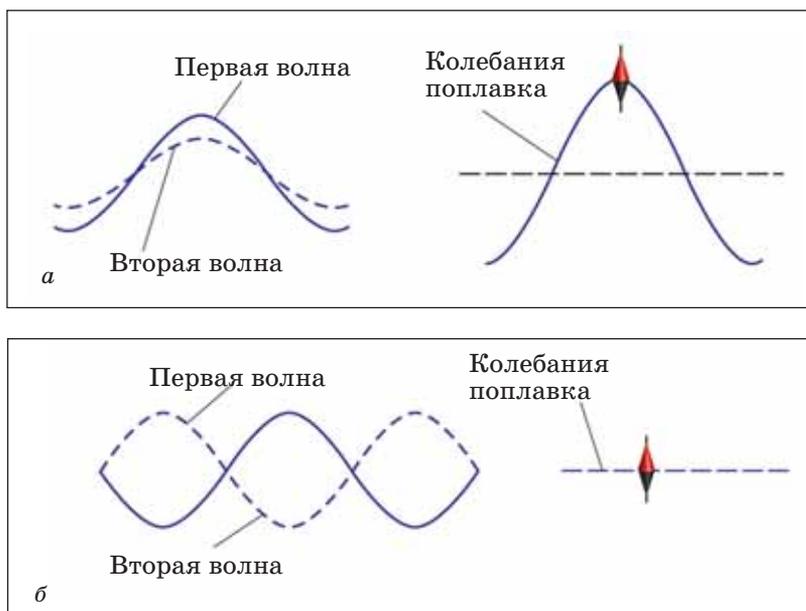


Рис. 163

Если в точку A одновременно приходят гребень одной волны и гребень другой волны, то тогда амплитуда суммарных колебаний поплавка удвоится (рис. 163, *а*).

Если в точку A одновременно приходят гребень одной и впадина другой волны, то амплитуда суммарных колебаний поплавка равна нулю (рис. 163, *б*).

Итак, каков же результат наложения волн? В каких-то точках пространства амплитуда суммарных колебаний удвоится (точки максимума). В каких-то точках колебания вообще не будут вообще (точки минимума). В каких-то точках не происходит ни полного «гашения», ни максимального «усиления» колебаний, и амплитуда суммарных колебаний будет больше нуля, но меньше удвоенного значения.

Рассмотренный опыт является примером явления интерференции¹ волн.

Наложение двух или нескольких волн, при котором в различных точках пространства наблюдается усиление или ослабление результирующих колебаний, называют явлением интерференции волн.

¹ От латинского *inter* – взаимно, между собой и *ferio* – ударяю, поражаю.

На рисунке 164 изображена схема опыта по наблюдению интерференции волн на поверхности воды. В ванну налита вода, на борту ванны закреплена упругая пластинка. К пластинке прикрепляют стержень с двумя шариками так, чтобы при колебаниях пластины они одновременно касались поверхности воды.



Рис. 164

Заставим пластинку совершать колебания. По поверхности воды будут распространяться две круговые волны. На любую из частиц на поверхности воды воздействуют и первая, и вторая волны, приводя поверхность воды в колебательное движение. Амплитуда результирующих колебаний частицы на поверхности воды зависит от того, как именно складываются колебания, вызываемые каждой из волн. Одновременный приход двух гребней волн приводит к удвоению амплитуды колебания. Приход гребня одной волны и впадины другой волны гасит результирующие колебания.

Для того чтобы возникло явление интерференции, источники волн должны совершать колебания с одинаковой частотой и эти колебания не должны прерываться. Волны от таких источников называют в физике *когерентными*¹.

В случае когерентных волн в любой точке пространства колебания, создаваемые каждой из волн, с течением времени не изменяются. Следовательно, не изменяется и амплитуда результирующего колебания. По этой причине *явление интерференции наблюдается только для когерентных волн.*



21.3. Какими – продольными или поперечными – являются волны на поверхности воды?

Опишем также опыт, который подтверждает, что интерферируют не только поперечные, но и продольные, например звуковые, волны. В качестве источников звуковых волн определённой частоты используем два наушника – головных телефона. В наушнике имеются катушки электромагнита и железная пластинка – мембрана. Если подключить наушник к источнику переменного тока, то мембрана под действием переменного магнитного поля будет совершать колебания и возникнет звук.

¹ При изучении курса физики в старших классах будет дано более строгое определение когерентности волн.

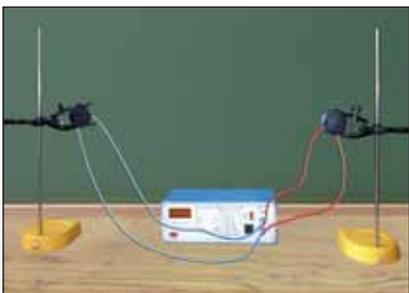


Рис. 165

Повёрнём оба наушника в сторону аудитории (рис. 165).

21.4. Являются ли когерентными звуковые волны, создаваемые наушниками (рис. 165)?

Предложим «слушателям» медленно наклоняться то вправо, то влево, закрыв одно ухо рукой. При своём движении они обнаружат зоны усиления и ослабления звука. Как объяснить результаты опыта? Как известно, громкость звука определяется амплитудой колебаний. Значит, при проведении опыта обнаруживается, что амплитуда результирующих колебаний в различных точках пространства неодинакова. В этом и заключается явление интерференции волн. Образно говоря, возможна ситуация, когда

$$\text{«звук»} + \text{«звук»} = \text{«звук» (максимум)},$$

и возможна ситуация, когда

$$\text{«звук»} + \text{«звук»} = \text{«тишина» (минимум)}.$$



Выясним, при каких условиях возникают максимумы и минимумы при интерференции. Обратимся к рисунку 162. Пусть расстояние от точки А до первого источника волн равно L_1 , а расстояние до второго источника волн — L_2 . Если расстояния равны, то, очевидно, результирующие колебания в точке А будут иметь удвоенную амплитуду — *интерференционный максимум*.

Какова будет амплитуда результирующих колебаний, если расстояние L_2 больше расстояния L_1 на длину волны λ ? Ясно, что в точке А вновь будут «встречаться» гребни двух волн и мы вновь имеем интерференционный максимум. Ситуация не изменится, если разность хода волн $L_2 - L_1$ будет равна 2, 3, 4 и так далее длинам волн. Таким образом, *в некоторой точке пространства наблюдается интерференционный максимум, если разность хода волн равна целому числу длин волн:*

$$L_2 - L_1 = 0 \cdot \lambda,$$

$$L_2 - L_1 = 1 \cdot \lambda,$$

$$L_2 - L_1 = 2 \cdot \lambda$$

и так далее.

Какова будет амплитуда результирующего колебания, если расстояние L_2 больше расстояния L_1 на половину длины волны λ ?

$$L_2 - L_1 = \lambda/2.$$

Теперь в точке А гребень одной волны будет «встречаться» со впадиной другой волны, и амплитуда результирующих колебаний будет равна нулю.

В этом случае образуется интерференционный минимум. Ситуация не изменится, если разность хода волн $L_2 - L_1$ будет равна 2, 3, 4 и так далее длинам волн плюс половина длины волны. Таким образом, в некоторой точке пространства наблюдается интерференционный минимум, если разность хода волн равна целому числу волн плюс половина длины волны:

$$\begin{aligned} L_2 - L_1 &= \lambda/2, \\ L_2 - L_1 &= 1 \cdot \lambda + \lambda/2, \\ L_2 - L_1 &= 2 \cdot \lambda + \lambda/2 \end{aligned}$$

и так далее.

Явление дифракции волн. Если на пути распространения волны имеется препятствие или волна проходит через отверстие, то волна огибает край препятствия (рис. 166). Это явление получило название дифракции¹.



Рис. 166

Дифракция – огибание волной препятствия.

Наиболее отчетливо дифракция наблюдается, если препятствие (отверстие) по своим размерам такое же или меньше, чем длина волны (рис. 167).



Рис. 167

¹ От латинского *diffractus* – разломанный, преломленный.

Явление дифракции наблюдается и для звуковых волн. Например, грибники, находясь в лесу на большом расстоянии, не видят друг друга за деревьями. Но они могут переговариваться, слышать друг друга. Почему? В этом случае при распространении звуковых волн также происходит явление дифракции.



К примеру, грибник кричит «ау». Когда издаётся звук «у», то частота звука составляет около 300 Гц. Определим длину волны такого звука.



21.5. Какова математическая связь между скоростью распространения волны, длиной волны и частотой колебаний?

Дано:

Звук в воздухе

$$v = 340 \text{ м/с}$$

$$\nu = 300 \text{ Гц}$$

λ – ?

Отсюда

Решение:

$$v = \lambda \nu.$$

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

$$\lambda = \frac{340 \text{ м/с}}{300 \text{ Гц}}.$$

$$\lambda = 1,1 \text{ м}.$$

Ответ: $\lambda = 1,1 \text{ м}$.

Как показывает проведённый расчёт, длина звуковой волны больше размера препятствия – диаметра дерева. По этой причине заметна дифракция звука в лесу, что и способствует общению грибников.



21.6. Если духовой оркестр заходит, удаляясь, за угол улицы, то через некоторое время слышны лишь звуки басовых труб. Почему при этом не слышны звуки флейт, кларнетов? Для справки: частота звучания басовых труб охватывает диапазон 100–200 Гц, флейта издает звуки частотой 260–2000 Гц, кларнет 250–600 Гц.

Помимо рассмотренных нами явлений отражения, интерференции, дифракции волн наблюдается также явление преломления волн. Например, на рисунке 158 показано, что при переходе волны из одной среды в другую она меняет направление своего распространения – преломляется. В следующем разделе учебника вы подробно ознакомитесь с явлением преломления световых волн. Существуют и другие волновые явления. Но важно то, что какова бы ни была природа волн, какого бы типа ни были волны, всегда для волн наблюдаются явления интерференции и дифракции. *Иными словами, явления интерференции и дифракции – «визитная карточка» любого волнового процесса.*

Отражение волн, рупор, эхо, ультразвук, явление интерференции волн, когерентные волны, условия максимума и минимума при интерференции, явление дифракции волн.

21.1 ● Какое значение глубины озера Байкал было получено при измерении эхолотом, если моменты излучения и приёма ультразвукового сигнала разделены промежутком времени $2,24$ с? Скорость звука в воде принять равной 1450 м/с.

21.2 ● В вашем распоряжении имеются два одинаковых камертона (рис. 168, а). Если один из камертонов развернуть в сторону аудитории и ударом молоточка возбудить колебание камертона, то будет слышен звук. После прикосновения руки к колеблющемуся камертону звук исчезнет (рис. 168, б).

Если же камертон развернуть в сторону другого камертона, вновь возбудить колебания, а затем прикоснуться рукой к колеблющемуся камертону, то звук по-прежнему будет слышен (рис. 168, в). Объясните явление.

21.3 ● Почему в пустой, например, приготовленной к ремонту, квартире звуки «раздаются» громче, чем в жилом помещении?

21.4 ● Два громкоговорителя являются источниками когерентных звуковых волн с длиной волны $0,7$ м. Приёмник звука расположен в точке А (рис. 169). Расстояния от приёмника звука до громкоговорителей равны соответственно $3,1$ и $2,4$ м. Каков результат интерференции звуковых волн в точке А (интерференционный минимум или максимум)? Ответ обосновать.

21.5 ● В § 21 описывается опыт по обнаружению интерференции звуковых волн (схема опыта изображена на рисунке 165). Оцените, какой частоты звук следует использовать для успешного обнаружения интерференции. Считать, что «слушатель» во время опыта может перемещать голову влево и вправо на 15 – 20 см.

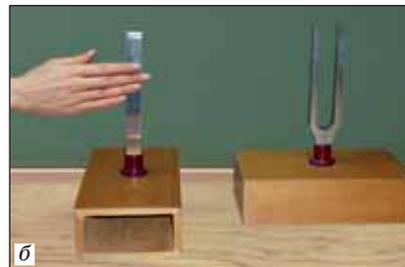
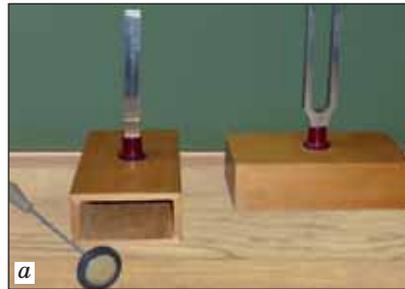


Рис. 168

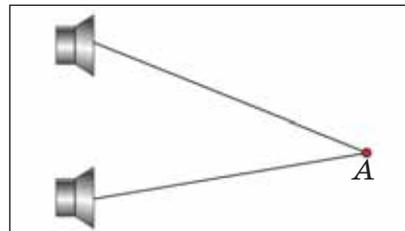
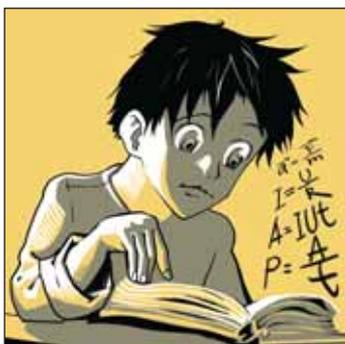


Рис. 169

§ 22. ПОВТОРЕНИЕ ТЕМЫ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ»



Повторение – мать учения.

Русская пословица

Вам уже известно, что в природе существуют электрически заряженные частицы и электромагнитное поле.

Электрическое взаимодействие. В природе существуют положительно и отрицательно заряженные частицы. На опыте установлено, что частицы одного знака, взаимодействуя, отталкиваются, а частицы разных знаков – притягиваются (рис. 170, а–в).

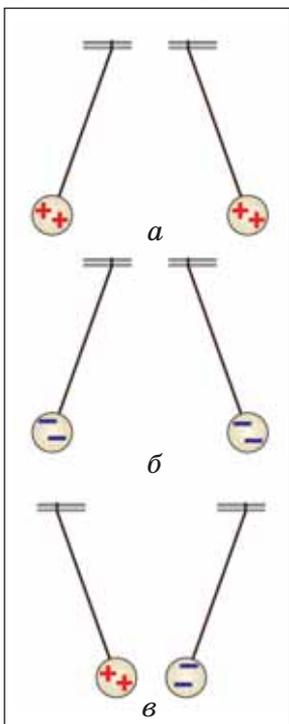


Рис. 170

По какой причине заряженные частицы, находясь на некотором расстоянии друг от друга, «узнают», что они «должны» притягиваться или отталкиваться? Почему существуют силы электрического взаимодействия? Ответы на эти вопросы также известны.

Вокруг заряженных частиц существует электрическое поле.

Электрическое поле, созданное первым зарядом (рис. 170), действует с некоторой силой на второй заряд. Электрическое поле, созданное вторым зарядом, действует на первый заряд.

Электрическое поле обладает энергией. «Накопителем» энергии электрического поля являются приборы – конденсаторы (рис. 171). Одну из пластин конденсатора заряжают положительно, другую – отрицательно (рис. 172). Так между пластинами конденсатора создаётся электрическое поле. При этом чем больше заряженных частиц находится на пластинках конденсатора, тем больше энергия электрического поля в конденсаторе.



Рис. 171

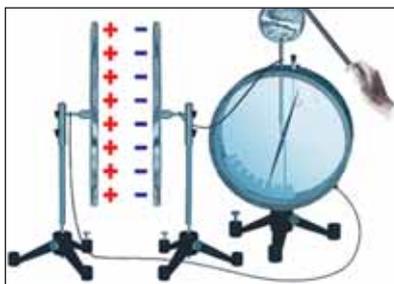


Рис. 172

«Накопительную способность» конденсатора характеризует физическая величина **электроёмкость**¹ (часто эту величину называют, сокращая слово, ёмкость). Чем больше электроёмкость, тем больший заряд накапливается на пластинах конденсатора при его зарядке от источника тока; следовательно, тем больше энергия электрического поля в конденсаторе. Это легко подтвердить следующими опытами. К конденсаторам, предварительно заряженным от источника тока, подключим неоновую лампу². Замкнём ключ, и лампа вспыхнет (рис. 173, а). Почему? При замыкании ключа электрическим полем совершается работа по перемещению заряженных частиц, возникает электрический ток – газовый разряд в лампе. Конденсатор разряжается – заряды «перетекают» по электрической цепи с одной пластины на другую. При этом происходит превращение энергии электрического поля в световую энергию. Увеличим ёмкость конденсаторов, вновь зарядим их от источника тока и повторим опыт (рис. 173, б). Теперь лампа вспыхнет ярче. Это свидетельствует о том, что *чем больше электроёмкость конденсатора, тем больший электрический заряд может быть накоплен на пластинах конденсатора, тем больше энергия электрического поля.*

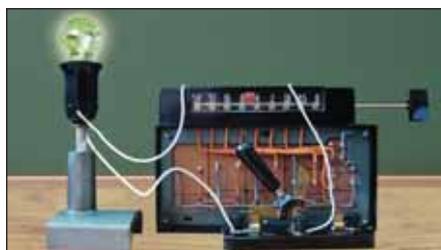
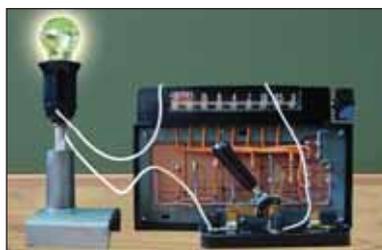


Рис. 173

а



б

¹ Определение электроёмкости, формулы, связывающие эту величину с другими, единицы измерения электроёмкости изучаются в старших классах средней школы.

² Неоновая лампа заполнена газом неоном при невысоком давлении. При подаче на лампу напряжения в ней возникает газовый разряд, и газ, заполняющий лампу, светится.

На заряженную частицу в электрическом поле действует сила. В соответствии со вторым законом Ньютона ускорение \vec{a} , с которым движется частица под действием силы \vec{F} , равно

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

где m – масса частицы.

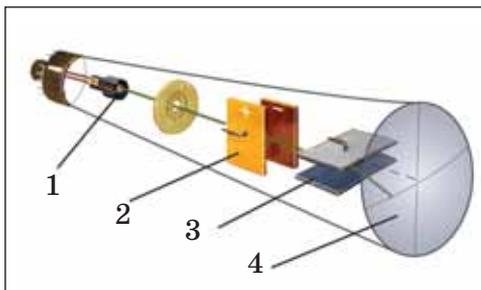


Рис. 174.

1 – электронная пушка (источник электронов); 2 – горизонтально отклоняющие пластины; 3 – вертикально отклоняющие пластины; 4 – экран трубки

Если частица движется с ускорением, это означает, что её скорость изменяется по величине или по направлению. Силовое действие электрического поля на заряженные частицы использовано в приборе *осциллографе* (рис. 174). Основной элемент осциллографа – *электронно-лучевая пушка*. В электронно-лучевой трубке движением летящих электронов – электронным лучом – можно управлять. Для этого служат пары пластин, расположенные горизонтально и вертикально. Подключая пластины к источнику тока,

создают электрическое поле между пластинами, подобно тому, как это происходит при зарядке конденсатора. Меняя напряжение между пластинами, меняют электрическое поле «конденсатора», а значит, и величину силы, действующей на движущиеся между пластинами электроны.

Электрический ток. Электрический ток, как вам известно, это направленное (упорядоченное) движение заряженных частиц. Электрический ток характеризует физическая величина **сила тока**. Чем больше сила тока, тем больший электрический заряд проходит ежесекундно через поперечное сечение проводника.



22.1. В каких единицах измеряют силу тока?

При перемещении зарядов по участку электрической цепи электрическое поле совершает работу. «Работоспособность» электрического поля на участке электрической цепи характеризуют физической величиной **напряжением**. Чем больше напряжение на участке цепи, тем большую работу совершает электрическое поле при перемещении единичного электрического заряда на этом участке.

 22.2. В каких единицах измеряют напряжение?

Зависимость силы тока в проводнике от приложенного к проводнику напряжения устанавливает **закон Ома для участка цепи**.

Сила тока в участке цепи прямо пропорциональна напряжению на концах этого участка.

Математическая формула закона Ома для участка цепи записывается следующим образом:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (22.1)$$

где I – сила тока в цепи;

U – напряжение на участке цепи;

R – сопротивление проводника (участка цепи).

Сопротивление проводника, как вы знаете, зависит от рода вещества (его удельного сопротивления), толщины проводника (площади поперечного сечения) и длины. Чем меньше площадь поперечного сечения проводника и чем длиннее проводник, тем больше его сопротивление.

 22.3. В каких единицах измеряют сопротивление?

При прохождении электрического тока по участку цепи электрическим полем совершается работа. Работа электрического поля (работа тока) тем больше, чем больше сила тока в участке цепи, чем больше напряжение на участке цепи и чем больше время прохождения тока. Работа тока A вычисляется по формуле

$$A = IUt. \quad (22.2)$$

 22.4. В каких единицах измеряют работу тока?

Если известна работа, совершённая током за некоторое время, то можно определить и мощность тока P .

 22.5. Что характеризует физическая величина мощность?

$$P = \frac{A}{t}$$

и

$$P = UI. \quad (22.3)$$

 22.6. В каких единицах измеряют мощность тока?

Магнитное поле. Явление электромагнитной индукции. Учёными установлено, что помимо электрического поля в природе существует магнитное поле.

Магнитное поле существует вокруг движущихся зарядов – электрического тока.

Магнитное поле действует только на движущиеся заряженные частицы, на электрический ток. Примерами практического применения подобного «силового действия» являются громкоговорители, электродвигатели, ускорители заряженных частиц и многие другие технические устройства.

Выдающимся английским физиком М. Фарадеем было открыто явление электромагнитной индукции.

Переменное магнитное поле порождает электрическое поле.

Если магнит приближать к катушке, подключённой к чувствительному электроизмерительному прибору гальванометру, то гальванометр покажет ток (рис. 175, а). Ток в катушке и гальванометре возникнет и при удалении магнита (рис. 175, б).

Какова причина возникновения тока в цепи «катушка – гальванометр»? Переменное магнитное поле порождает электрическое поле¹. Это *вихревое электрическое поле* и приводит в движение заряженные частицы (свободные электроны в металлическом проводнике). Так в замкнутой цепи возникает электрический ток.

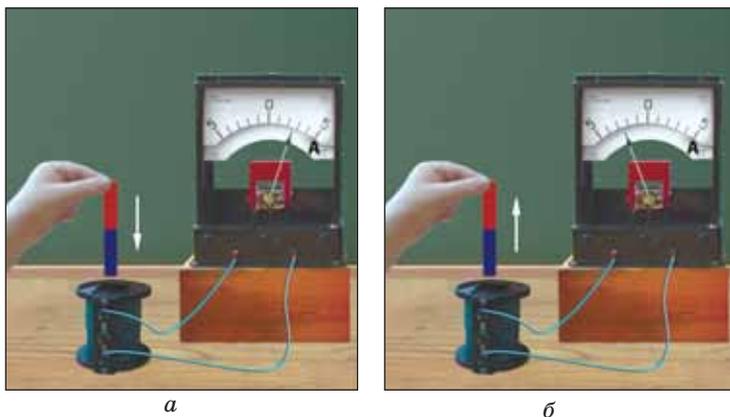


Рис. 175

¹ Необходимо различать электрическое поле, существующее вокруг электрически заряженных частиц, и электрическое поле, возникающее при изменении магнитного поля. Электрическое поле, порождаемое переменным магнитным полем, называют вихревым электрическим полем.

Магнитное поле обладает энергией. «Накопителями» энергии магнитного поля тока являются катушки с током. Энергия магнитного поля тем больше, чем больше сила тока в катушке. Помимо силы тока энергия магнитного поля зависит и от самой катушки – её размеров, формы, числа витков, наличия железного сердечника в катушке.

Магнитные свойства катушки характеризует физическая величина **индуктивность**¹. Чем больше индуктивность катушки, тем больше энергия магнитного поля тока в катушке. Продемонстрируем зависимость энергии магнитного поля от величины силы тока в катушке и индуктивности (магнитных свойств) катушки. К источнику тока подключим катушку и амперметр.

Параллельно катушке включим неоновую лампу (рис. 176, а). При размыкании цепи лампа на мгновение вспыхивает (рис. 176, б). Почему? Происходит превращение энергии магнитного поля тока, «накопленной» в катушке, в энергию вихревого электрического поля. Это вихревое электрическое поле приводит к газовому разряду в лампе.

Увеличим силу тока в катушке – яркость вспышки лампы возрастает. Увеличим индуктивность катушки. Это можно сделать, увеличив число витков катушки или введя в катушку железный сердечник. При этом яркость вспышки лампы также возрастает. Значит, действительно *энергия магнитного поля зависит от величины силы тока в катушке и индуктивности катушки.*

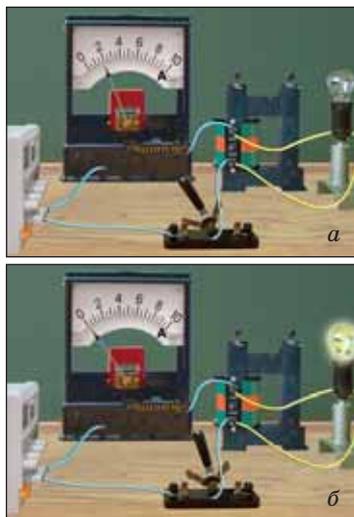


Рис. 176

Электрическое поле, конденсатор, электроёмкость, энергия электрического поля, электрический ток, сила тока, ампер (А), напряжение, вольт (В), сопротивление, ом (Ом), закон Ома, $I = \frac{U}{R}$, работа тока, джоуль (Дж), $A = IUt$, мощность, ватт (Вт), $P = UI$, магнитное поле, явление электромагнитной индукции, катушка с током, индуктивность, энергия магнитного поля.

¹ Определение индуктивности, формулы, связывающие эту величину с другими, единицы измерения индуктивности изучаются в старших классах средней школы.



Рис. 177

22.1 ● Первоначально находившийся в покое электрон, пройдя ускоряющее напряжение, приобрёл за 4 нс скорость 20 Мм/с (движение электрона считать равноускоренным). С каким ускорением двигался электрон? Какая сила действовала на электрон со стороны электрического поля? Какое расстояние было пройдено электроном? Какую работу совершило электрическое поле в процессе разгона электрона? Чему равна кинетическая энергия электрона? Масса электрона $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

22.2 ● Сопротивление обмотки демонстрационного амперметра 385 Ом. Чему равно напряжение на зажимах прибора при силе тока 200 мкА? Какая электрическая мощность при этом выделяется в приборе?

22.3 ● В каком из случаев (рис. 177) катушка обладает наибольшей индуктивностью? Ответ обосновать.

22.4 ● В электронно-лучевой трубке между пластинами плоского конденсатора движется поток электронов со скоростью 50 Мм/с. На пластины подано электрическое напряжение так, что созданное между пластинами электрическое поле действует на электрон с силой $2,3 \cdot 10^{-14}$ Н (рис. 178). На сколько сместится поток электронов в вертикальном направлении на выходе из конденсатора? Длина пластин конденсатора 4,0 см.

22.5 ● Электрон, имеющий кинетическую энергию $5,0 \cdot 10^{-18}$ Дж, влетает в магнитное поле так, что вектор его скорости перпендикулярен магнитным линиям поля (рис. 179). В магнитном поле электрон движется по круговой траектории радиусом 5,6 см. Определите силу, действующую на электрон со стороны магнитного поля.

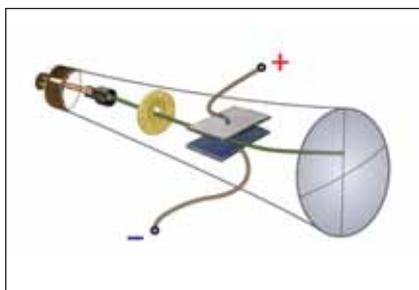


Рис. 178

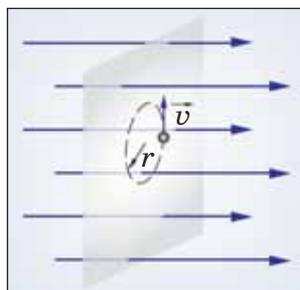
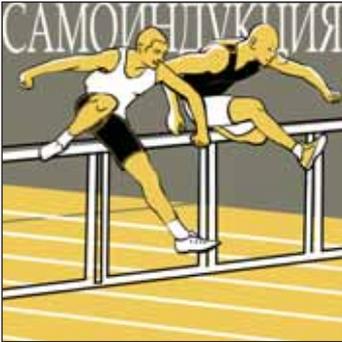


Рис. 179

§ 23. ЯВЛЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ



Всякая плодотворная идея кладёт начало удивительному извержению потока непредвиденных открытий.

Л. Бриллюэн (1889–1969), французский физик

Вы уже знаете, что переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.

Правило Ленца.



23.1. По каким признакам обнаруживают явление электромагнитной индукции?

Верным признаком, позволяющим обнаружить явление электромагнитной индукции, является возникновение тока в замкнутом проводнике, который пронизывает переменное магнитное поле. Но каково направление тока, возникающего благодаря явлению электромагнитной индукции? Ответ на этот вопрос найдём с помощью опыта. Рядом с катушкой электромагнита, включённой в электрическую цепь, подвесим на нити лёгкое алюминиевое кольцо (рис. 180, а).

Замкнём цепь (рис. 180, б). В момент замыкания цепи кольцо отклонится, оттолкнувшись от катушки. Почему? При замыкании цепи ток в катушке нарастает, а значит, увеличивается и магнитное поле катушки. В соответствии с явлением электромагнитной индукции переменное (нарастающее) магнитное поле порождает вихревое электрическое поле. Это электрическое поле создаёт ток в замкнутом проводящем кольце.



23.2. Каковы должны быть направления токов, чтобы проводники отталкивались?

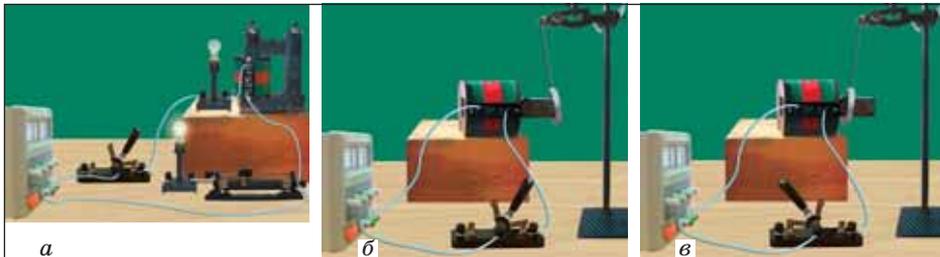


Рис. 180

Как вам известно, два проводника с током отталкиваются, если токи имеют противоположное направление. Следовательно, опыт показывает, что при замыкании цепи ток в кольце и ток в катушке направлены противоположно.



23.3. Как при замыкании цепи направлено магнитное поле тока в кольце по отношению к магнитному полю катушки? Увеличивается или уменьшается магнитное поле катушки при замыкании цепи?

При нарастании магнитного поля катушки ток, возникающий в кольце, имеет такое направление, что его магнитное поле противоположно нарастающему магнитному полю. Тем самым магнитное поле тока в кольце стремится уменьшить, скомпенсировать нарастание магнитного поля катушки. Как только при замыкании цепи ток в катушке становится постоянным, а магнитное поле, пронизывающее кольцо, неизменным, явление электромагнитной индукции не происходит. Ток в кольце прекращается.

Теперь выясним, как будет направлен ток в кольце, возникающий в случае уменьшения магнитного поля катушки. Для этого разомкнём цепь (рис. 180, в). В момент размыкания цепи кольцо вновь отклонится, но теперь оно притягивается к катушке.



23.4. Каковы должны быть направления токов, чтобы проводники притягивались?

Опыт показывает, что при размыкании цепи ток в кольце и ток в катушке направлены одинаково. Следовательно, при уменьшении магнитного поля катушки ток, возникающий в кольце, имеет такое направление, что его магнитное поле совпадает по направлению с убывающим магнитным полем. Тем самым магнитное поле тока в кольце стремится уменьшить, скомпенсировать убывание магнитного поля катушки.

Подобные опыты позволили российскому физiku Э. Х. Ленцу сформулировать общее правило, определяющее направление «индукционного» тока.

Ток, возникающий благодаря явлению электромагнитной индукции, всегда имеет такое направление, что стремится скомпенсировать причину, приводящую к его возникновению.

Почему явление электромагнитной индукции и вызываемый этим явлением ток «подчиняются» правилу Ленца? Оказывается, это обусловлено законом сохранения энергии. Действительно, при явлении электромагнитной индукции ток в замкнутом проводнике возникает, если проводник пронизывает *переменное магнитное поле*.

Если возникающий ток своим магнитным полем усиливал бы переменное магнитное поле, то ток в проводнике создавался бы всё большими изменениями магнитного поля. Тогда и сам ток становился бы всё больше и больше (вспомните закон электромагнитной индукции). В таком случае в проводнике выделялось бы всё больше и больше тепла (вспомните закон Джоуля и Ленца). Внутренняя энергия проводника при этом бы возрастала. В итоге увеличивалась бы и сила тока в проводнике, и переменное магнитное поле, пронизывающее проводник, и внутренняя энергия проводника. Ясно, что подобный «сценарий» развития событий противоречит закону сохранения энергии.

Явление самоиндукции. Одним из ярких проявлений правила Ленца является частный случай электромагнитной индукции – явление самоиндукции. Рассмотрим это явление. Пусть электрическая цепь содержит две лампы (рис. 181). Одна из ламп L_1 включена последовательно с катушкой, а вторая лампа L_2 – последовательно с реостатом. Замкнув ключ, мы увидим, что лампочка L_1 загорается заметно позже, чем лампочка L_2 . Ток в цепи, содержащей реостат (лампа L_2), возникает практически мгновенно. Ток в цепи, содержащей катушку (лампа L_1), нарастает постепенно и лишь через некоторое время достигает своего наибольшего значения. График зависимости силы тока I в катушке от времени t показан на рисунке 182.

Результаты опыта легко объяснить. В момент замыкания ключа через катушку проходит нарастающий (переменный) ток. В соответствии с явлением электромагнитной индукции **переменное магнитное поле катушки порождает вихревое электрическое поле**. Это вихревое электрическое поле действует на заряженные частицы. В том числе оно действует на электроны, движущиеся в самой катушке и создающие ток. В соответствии с правилом Ленца **вихревое электрическое поле препятствует нарастанию тока**. По этой причине ток в катушке и лампе L_1 (рис. 182) нарастает не мгновенно, а постепенно.

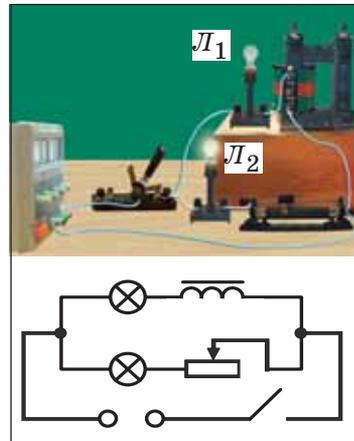


Рис. 181

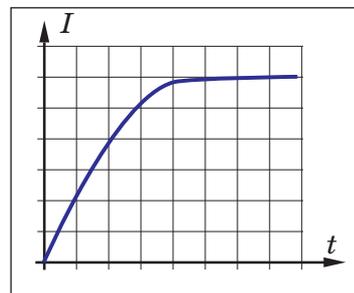


Рис. 182

При отключении источника *вихревое электрическое поле*, наоборот, *препятствует убыванию тока*. И ток в замкнутой цепи прекращается не мгновенно, а постепенно.

Воздействие вихревого электрического поля, созданного магнитным полем переменного тока, на сам этот ток называют явлением самоиндукции.

Зададимся вопросом: является ли самоиндукция фундаментальным (основным) физическим явлением? Нет, самоиндукция есть частный случай электромагнитной индукции! По этой причине явление самоиндукции должно подчиняться такому же закону, что и явление электромагнитной индукции.



23.5. Чем определяется величина вихревого электрического поля при явлении электромагнитной индукции?

В соответствии с законом электромагнитной индукции величина вихревого электрического поля определяется быстротой изменения магнитного поля. А чем больше вихревое электрическое поле, тем больше и его «тормозящее» действие на ток в катушке при явлении самоиндукции.

Это легко подтвердить опытом. Будем замыкать и размыкать ключ в цепи, изображённой на рисунке 181. При этом за счёт явления самоиндукции сила тока в катушке не успевает достигнуть сколь-нибудь значительной величины и лампа L_1 светит тускло. Если же замыкать и размыкать цепь ещё чаще, то сила тока в катушке станет так мала, что лампа L_1 не светит вовсе.

Особенно сильно явление самоиндукции при резком изменении тока, например в момент размыкания электрической цепи. Это находит практическое применение в системе зажигания двигателя внутреннего сгорания. Система зажигания содержит аккумулятор, электромагнит – катушку зажигания, устройство прерывания и свечу зажигания. При работе двигателя между электродами свечи должна возникать искра, которая воспламеняет топливо. Для того, чтобы «проскочила» искра, необходимо напряжение 20 000–25 000 В. Но напряжение аккумулятора только 12 В! Вот тут «в игру вступает» катушка зажигания. Катушка зажигания подключена к аккумулятору, через катушку идёт ток. В нужные моменты времени устройство прерывания размыкает цепь, и благодаря явлению самоиндукции возникает сильное вихревое электрическое поле. Это поле и создаёт напряжение в десятки тысяч вольт на электродах свечи зажигания.

Если увеличить или уменьшить число витков в катушке, взять катушку с сердечником или без него, то тем самым мы изменим индуктивность катушки. Изменив индуктивность, легко заметить, как изменится явление самоиндукции (рис. 181). Вы знаете, что чем больше число витков в катушке, тем сильнее магнитное поле, создаваемое током, проходящим через катушку. Наличие железного сердечника также усиливает магнитное поле. Поэтому для катушки с большей индуктивностью (с большим числом витков и при наличии железного сердечника) явление самоиндукции – явление «торможения» тока – более значительно.

Правило Ленца, закон сохранения энергии и правило Ленца, **явление самоиндукции**, система зажигания двигателя внутреннего сгорания.

23.1 ● Для изучения явления электромагнитной индукции была собрана электрическая цепь (рис. 181). Катушка содержит 3600 витков. При проведении первого опыта в цепь были включены все витки катушки, а при проведении второго опыта – 2400 витков. На рисунке 183, а, б показаны графики зависимости силы тока I от времени t , полученные в опытах. Какой из графиков соответствует первому опыту, а какой – второму? Ответ обосновать.

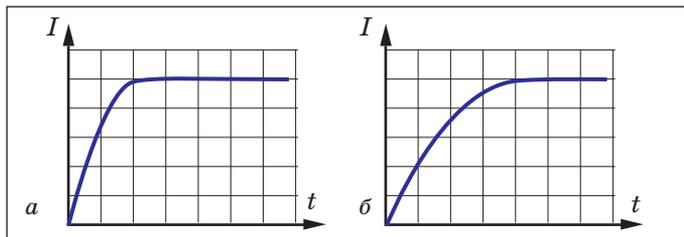


Рис. 183

23.2 ● В каком случае неоновая лампа вспыхнет ярче (рис. 176, б) – если катушка имеет сердечник или сердечника в катушке нет? Ответ обосновать.

23.3 ● Почему при отключении электрической цепи в ключе (рубильнике) часто проскакивает искра?

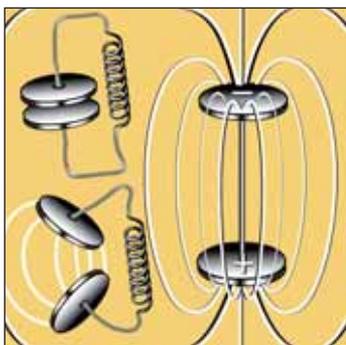
23.4 ● Почему отключение мощных электродвигателей от сети производят, плавно и медленно уменьшая силу тока в электродвигателе при помощи реостата?

23.5 ● Объясните явление, описанное российским физиком Э. Х. Ленцем (1804–1865): «Искра при открытии цепи является сильнее тогда, когда употребляют для закрытия длинную проволоку, нежели короткую, хотя самый ток в первом случае бывает слабее по причине худой проводимости длинной проволоки. Искра при открытии цепи будет сильнее, когда длинную соединительную проволоку наматывают на цилиндр в виде спирали, а ещё сильнее, когда цилиндр будет железный».

Примечание. «Открытие цепи» – размыкание электрической цепи.

«Закрытие цепи» – замыкание электрической цепи.

§ 24. СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ



Разряд батареи¹ будем представлять не как простое движение электричества в одном направлении, но как течение его то в одну, то в другую сторону между двух обкладок в виде колебаний.

Из работы выдающегося немецкого учёного Г. Гельмгольца (1821–1894) «О сохранении силы»

Вам уже известно, что такое колебания.

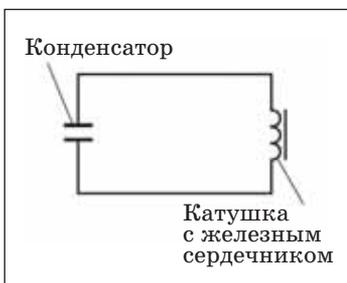


Рис. 184

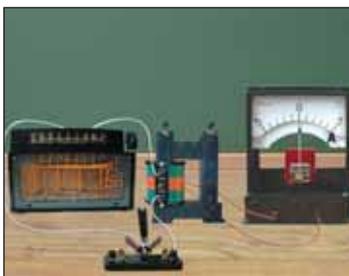


Рис. 185

высококочувствительный электроизмерительный прибор – гальванометр. Гальванометр подключим к отдельной катушке с небольшим числом витков. Витки этой катушки намотаны поверх катушки колебательного контура.

Колебательный контур. Помимо уже изученных нами механических колебаний существуют и другие виды колебаний, например электромагнитные колебания. *Электромагнитные колебания* – изменения заряда, силы тока, напряжения, повторяющиеся точно (или почти точно) через определённые промежутки времени в электрической цепи. Электромагнитные колебания, как и механические, подразделяют на *свободные* и *вынужденные* колебания.

Простейшую электрическую цепь, в которой могут возникать свободные электромагнитные колебания, называют колебательным контуром. Колебательный контур состоит из конденсатора и катушки (рис. 184).

Соберём колебательный контур из батареи конденсаторов и катушки с большим числом витков, надетой на железный сердечник (рис. 185). Для обнаружения электромагнитных колебаний используем

¹ Имеется в виду батарея конденсаторов.

Зарядим конденсатор и замкнём цепь ключом. Мы увидим, что стрелка гальванометра совершит несколько колебаний. Значит, через катушку контура ток протекает то в одном, то в другом направлении¹. Это свидетельствует о том, что в контуре происходят свободные электромагнитные колебания.



24.1. Какие процессы происходят в колебательном контуре, почему возникают свободные электромагнитные колебания?

В начальный момент времени конденсатор заряжен, цепь разомкнута, и тока в цепи нет (рис. 186, а). Замкнём цепь. Конденсатор начнёт разряжаться, в цепи возникнет ток (рис. 186, б). Может ли конденсатор разрядиться мгновенно? Может ли при разрядке конденсатора ток мгновенно достигнуть максимального значения? Нет! Этому препятствует явление самоиндукции. Переменное магнитное поле тока в катушке порождает вихревое электрическое поле. Это вихревое электрическое поле препятствует моментальному нарастанию тока в цепи. В результате ток будет нарастать постепенно, и конденсатор будет разряжаться в течение некоторого времени.

В тот момент времени, когда конденсатор полностью разрядится, заряд конденсатора, а значит, и энергия электрического поля равны нулю. Но в соответствии с законом сохранения энергии энергия не может «исчезнуть». Если энергия электрического поля равна нулю, значит, энергия магнитного поля тока максимальна! Следовательно, в этот момент времени максимален и ток в катушке (рис. 186, в).

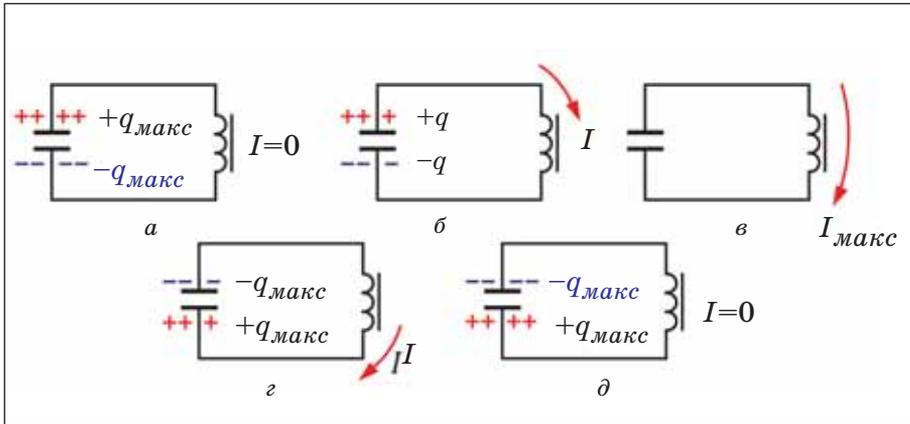


Рис. 186

¹ Переменное магнитное поле тока в катушке контура порождает вихревое электрическое поле, которое и создаёт ток в цепи гальванометра.

Может ли этот ток прекратиться мгновенно? Нет! Этому вновь препятствует явление самоиндукции. Вихревое электрическое поле, порождённое переменным магнитным полем, препятствует моментальному исчезновению тока. По этой причине ток в цепи не прекратится мгновенно, а будет убывать постепенно. Заряды продолжат своё движение, и конденсатор будет пополняться зарядами – заряжаться (рис. 186, *г*).

Через некоторое время ток, постепенно убывая, станет равным нулю, будет равна нулю и энергия магнитного поля. Энергия же электрического поля зарядов в конденсаторе в этот момент времени максимальна (почему?). Следовательно, в этот момент времени и заряд конденсатора максимален (рис. 186, *д*).

Какие изменения произошли с зарядом конденсатора в сравнении с первоначальным моментом времени (рис. 186, *а* и рис. 186, *д*)? Произошла *перезарядка* конденсатора! Далее процесс разрядки повторится, через некоторое время конденсатор вновь перезарядится. Таким образом, **благодаря явлению самоиндукции в колебательном контуре могут происходить свободные электромагнитные колебания.**



24.2. Что называют периодом и частотой колебаний?

Выясним, от чего зависит период и частота свободных электромагнитных колебаний в контуре. Вновь обратимся к опыту (рис. 185).

Уменьшим емкость конденсатора. Теперь при перезарядке конденсатора стрелка гальванометра совершает более частые колебания. Значит, *при уменьшении ёмкости конденсатора частота свободных электромагнитных колебаний в контуре увеличивается.* Действительно, при меньшей ёмкости конденсатора на его пластинах накапливается меньший заряд. В итоге потребуется меньшее время на перезарядку конденсатора, что и приводит к увеличению частоты колебаний в контуре.



24.3. Как изменится период свободных электромагнитных колебаний в контуре при уменьшении ёмкости конденсатора?

Уменьшим индуктивность катушки (как это можно сделать?). Теперь стрелка гальванометра совершает более частые колебания. Значит, *при уменьшении индуктивности катушки частота свободных электромагнитных колебаний в контуре увеличивается.* Действительно, при меньшей индуктивности катушки её переменное магнитное поле будет порождать более слабое вихревое электрическое поле.

Такое поле в меньшей степени препятствует и нарастанию тока, и убыванию тока в катушке. В итоге потребуются меньше времени на перезарядку конденсатора, что и приводит к увеличению частоты колебаний.



24.4. Как изменится период свободных электромагнитных колебаний в контуре при уменьшении индуктивности катушки?

24.5. Что называют гармоническими колебаниями?

Выясним, как при свободных электромагнитных колебаниях в контуре изменяются напряжение и сила тока в цепи с течением времени.

Для этого подключим колебательный контур к осциллографу и подадим напряжение с контура на горизонтально расположенные пластины электронно-лучевой трубки (рис. 187). Между пластинами возникнет электрическое поле, оно будет смещать поток электронов, движущихся в трубке, в вертикальном направлении. На вертикально расположенные пластины электронно-лучевой трубки непосредственно от осциллографа подаётся напряжение, заставляющее электронный луч периодически смещаться по экрану трубки в горизонтальном направлении. В итоге на экране осциллографа мы будем наблюдать *осциллограмму* – график зависимости напряжения от времени. На рисунке 188 изображена такая осциллограмма для колебательного контура.

График похож на синусоиду, однако с уменьшающейся амплитудой.

Это позволяет сделать вывод, что **свободные электромагнитные колебания, происходящие в колебательном контуре, являются гармоническими колебаниями.**

Затухание колебаний несложно объяснить – цепь колебательного контура обладает электрическим сопротивлением. По этой причине при прохождении тока выделяется так называемое «джоулево тепло». Иными словами, с течением времени энергия электрического и магнитного полей превращается во внутреннюю энергию проводников, составляющих электрическую цепь контура.

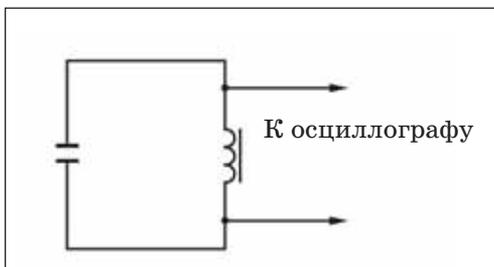


Рис. 187

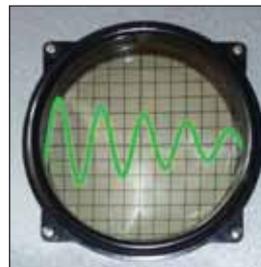


Рис. 188

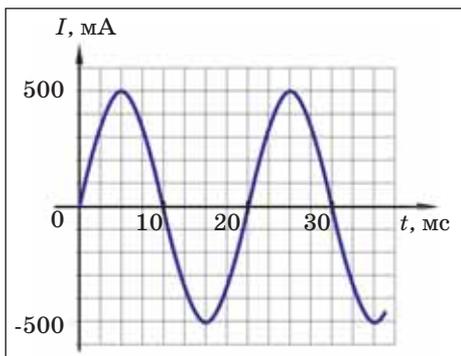


Рис. 189

Пример решения задачи.

На рисунке 189 изображён график зависимости силы тока от времени в катушке колебательного контура. Электрическое сопротивление контура крайне мало. Определите амплитуду колебаний силы тока, период, частоту и круговую частоту колебаний. Запишите формулу зависимости силы тока I от времени t . В какие моменты времени энергия магнитного поля тока имеет наибольшее значение? В какие моменты времени энергия

электрического поля имеет наибольшее значение? В какие моменты времени заряд на пластинах конденсатора максимален?

Дано:

График

$$I_{\text{макс}} - ? \quad T - ?$$

$$\nu - ? \quad \omega - ?$$

$$I = f(t) - ?$$

Решение:

На рисунке 189 изображён график гармонических колебаний силы тока в колебательном контуре. Воспользуемся определением амплитуды и периода колебаний. По графику определим данные величины:

$$I_{\text{макс}} = 500 \text{ мА},$$

$$T = 20 \text{ мс}.$$

Не составит труда вычислить частоту и круговую частоту колебаний:

$$\nu = \frac{1}{T},$$

$$\omega = 2\pi\nu,$$

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

$$\nu = 50 \text{ Гц}.$$

$$\omega = 100 \pi \text{ Гц}.$$

Так как в колебательном контуре совершаются гармонические колебания, то зависимость силы тока I от времени t определяется выражением

$$I = I_{\text{макс}} \sin \omega t.$$

или

В рассмотренном случае

$$I = 0,5 \sin 100 \pi t.$$

Энергия магнитного поля тока зависит от силы тока в цепи. Амплитудные значения силы тока соответствуют моментам времени 5, 15, 25 мс и так далее. Следовательно, в эти же моменты времени и энергия магнитного поля будет принимать наибольшие значения.

В моменты времени 0, 10, 20, 30 мс и так далее сила тока в катушке контура равна нулю. Значит, в эти моменты времени равна нулю и энергия магнитного поля тока. Тогда в соответствии с законом сохранения энергии в эти же моменты времени (0, 10, 20, 30 мс и так далее) энергия электрического поля будет иметь наибольшее значение.

Из опытов (§ 22) нам известно, что энергия электрического поля конденсатора зависит от величины заряда на его пластинах. Таким образом, в моменты времени 0, 10, 20, 30 мс и так далее максимальна не только энергия электрического поля, но и заряд на пластинах конденсатора.

Ответ: $T = 0,02$ с, $\nu = 50$ Гц, $\omega = 100\pi$ Гц.

Свободные электромагнитные колебания, колебательный контур, зависимость периода свободных электромагнитных колебаний от ёмкости конденсатора и индуктивности катушки контура, **гармонический характер свободных электромагнитных колебаний.**

24.1 ● Частота электромагнитных колебаний силы тока в колебательном контуре равна 2 кГц. Определите период колебаний силы тока в контуре. Определите период колебаний напряжения в контуре.

24.2 ● Амплитуда колебаний силы тока в контуре составляет 100 мА. Частота колебаний 100 Гц. Запишите уравнение зависимости силы тока I в колебательном контуре от времени t .

24.3 ● Зависимость силы тока I в катушке колебательного контура от времени t задана уравнением

$$I = 0,03 \sin 200\pi t.$$

Определите амплитуду тока, круговую частоту и период колебаний тока.

24.4 ● В колебательном контуре (рис. 185) происходят электромагнитные колебания с частотой 4 Гц. Пренебрегая затуханием колебаний, начертите график зависимости силы тока в контуре I от времени t . Амплитуду силы тока принять равной 150 мкА. В начальный момент времени сила тока в контуре равна 0.

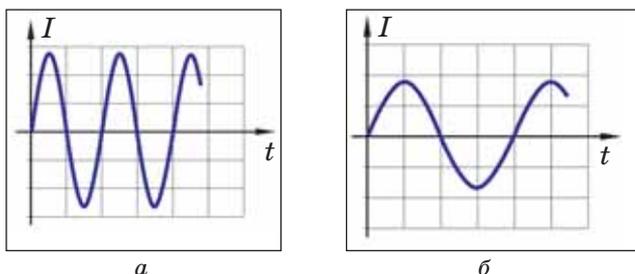


Рис. 190

24.5 ● На рисунке 190, а, б представлены графики колебаний силы тока в одном и том же колебательном контуре. Но в одном из случаев в катушке контура находился железный сердечник, а в другом случае сердечник был удалён. На каком из рисунков представлен график колебаний силы тока в катушке с сердечником? Ответ обосновать. Масштабы графиков одинаковы.

§ 25. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК



Вскоре после опубликования доклада Фарадея об открытии явления электромагнитной индукции учёный получил письмо, подписанное инициалами Р. М. Оно содержало описание первого в мире генератора переменного тока. Несмотря на тщательные розыски историков науки, имя изобретателя так и не было установлено.

По материалам книги Б. Ржонсницкого «Тесла»

Вы уже знаете, что колебания могут быть свободными и вынужденными.

Одной из основ современной промышленности является электроэнергетика, в которой используется переменный ток. Выясним, что такое переменный ток и как его получают.

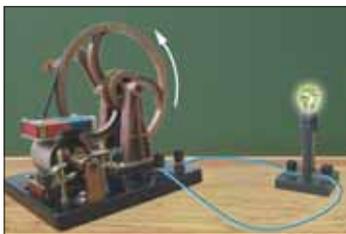


Рис. 191

Генератор переменного тока. К модели генератора (источника) тока подключим лампу накаливания (рис. 191). Приведём генератор во вращение – лампа светится, следовательно, по цепи идёт ток. При небольшой частоте вращения генератора накал лампы меняется, значит, ток в цепи не постоянный.

Увеличим частоту вращения, лампа будет светиться ярче, изменение накала лампы незаметно. Каким – постоянным или переменным – будет при этом ток?

Подключим к лампе осциллограф (рис. 192). На экране прибора мы будем наблюдать осциллограмму, которая позволяет судить о том, как происходят колебания напряжения на лампе. Но в соответствии с законом Ома для участка цепи напряжение на лампе определяет силу тока в лампе. Следовательно, происходят и колебания силы тока, протекающего через лампу.



25.1. К какому виду колебаний относятся колебания, наблюдаемые на экране осциллографа (рис. 192)?



Рис. 192

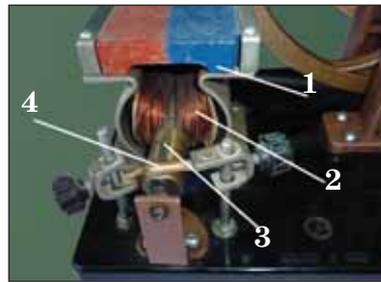


Рис. 193

Рассмотрим устройство генератора и выясним, по какой причине возникают колебания напряжения при вращении генератора (рис. 193). В неподвижной части генератора – статоре 1 – закреплены дугообразные магниты. Статор является источником магнитного поля. Между полюсами магнита расположена подвижная часть генератора – ротор 2. Ротор содержит обмотку – катушку из медной проволоки, концы которой соединены с коллектором 3. С помощью щёток 4 осуществляется подвижный электрический контакт внешней цепи с ротором генератора.

Если ротор генератора привести во вращение, то обмотка – катушка – будет вращаться в магнитном поле. При движении проводочной обмотки – катушки – вместе с ней движутся и электроны, находящиеся в проводнике.

Как известно, на движущиеся электроны магнитное поле действует силой, которая направлена перпендикулярно скорости электронов вдоль проводника (рис. 194, а). Под действием этой силы электроны смещаются вдоль проводника. Возникает электрический ток – «магнитоэлектрический насос» перекачивает электроны в одном направлении.

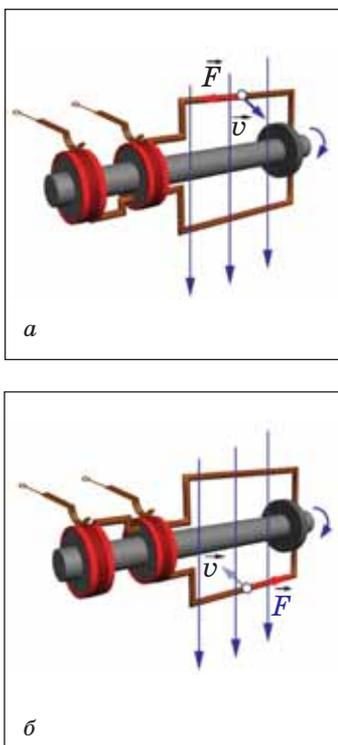


Рис. 194

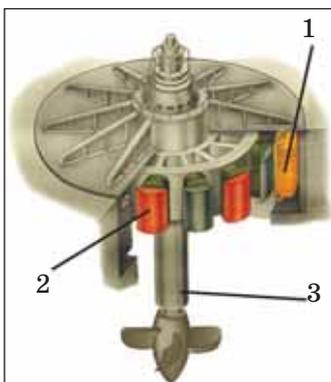


Рис. 195. Схема гидрогенератора:
1 – статор; 2 – ротор;
3 – водяная турбина

Когда обмотка повернётся на пол-оборота, электроны вместе с проводником будут двигаться уже не вправо, а влево (рис. 194, б). При этом сила, действующая на электроны со стороны магнитного поля, изменит своё направление на противоположное.

«Магнитоэлектрический насос» теперь будет перекачивать электроны в обратном направлении.

Таким образом, генератор является источником *переменного напряжения*. Колебания напряжения и силы тока в цепи, подключённой к генератору, например в электрической лампе, будут происходить только до тех пор, пока ротор генератора приводят во вращение. То есть в данном случае колебания силы тока и напряжения являются *вынужденными электромагнитными колебаниями*.

В промышленных генераторах электрической энергии используется то же физическое явление, что и в рассмотренной нами модели генератора. Отличие заключается в том, что в промышленных установках источник магнитного поля является подвижной частью – ротором генератора. Обмотки – катушки генератора – располагаются в неподвижной части – статоре генератора.

На рисунке 195 изображена схема генератора, устанавливаемого на гидроэлектростанциях – ГЭС. Ротор представляет собой не один, а несколько электромагнитов; такие роторы называют многополюсными. Почему используются многополюсные роторы? Допустим, простейший ротор имеет одну пару магнитных полюсов и турбина совершает 120 оборотов в минуту.

Если бы ротор имел две пары полюсов, то для выработки электроэнергии было бы достаточно вращения турбины с частотой 60 оборотов в минуту. При четырёх парах полюсов хватило бы 30 оборотов в минуту и так далее.

На гидроэлектростанциях ротор генератора приводится во вращение с помощью водяной турбины. Представление о размерах промышленных гидрогенераторов можно составить из следующих цифр: диаметр рабочего колеса турбины, например Красноярской гидроэлектростанции, 7,5 м, масса турбины 1400 т (это масса двадцати тысяч взрослых людей). Ежесекундно через турбину проходит 600 м^3 воды, которые падают на лопатки турбины с высоты тридцатипятиэтажного дома. На тепловых электростанциях ротор генератора приводится во вращение паровой турбиной.

Переменный ток. В промышленных генераторах происходит преобразование механической энергии в электрическую. Электрическая энергия поступает на заводы и предприятия, в осветительную сеть жилых домов и различных учреждений в виде переменного тока.

Переменный ток – вынужденные электромагнитные колебания.

Промышленные генераторы поддерживают в электрических цепях гармонические колебания напряжения и силы тока. В этом легко убедиться, наблюдая соответствующую осциллограмму напряжения (рис. 196).

Частота переменного тока, применяемого в осветительных сетях и промышленности, составляет в России 50 Гц. Пятьдесят раз за секунду «электронный поток» течёт в одном направлении и пятьдесят раз за секунду – в обратном направлении.



Рис. 196

Выясним, как измеряют силу тока и напряжение в цепи переменного тока. Подключим к источнику лампу накаливания; включим в электрическую цепь вольтметр и амперметр, предназначенные для измерения переменного напряжения и силы тока (рис. 197).

Графики зависимости напряжения U и силы тока I от времени t для данной цепи изображены на рисунке 198. Переменный ток – это вынужденные гармонические колебания напряжения и силы тока. Поэтому графики на рисунке 198 являются синусоидами.

В некоторые моменты времени, например, 0,02, 0,04, 0,06 с и так далее напряжение на лампе и сила тока в цепи равны нулю. Но электроизмерительные приборы – вольтметр и амперметр – неизменно показывают некоторые определенные значения напряжения и силы тока.



25.2. Что же в таком случае показывают приборы в цепи переменного тока?

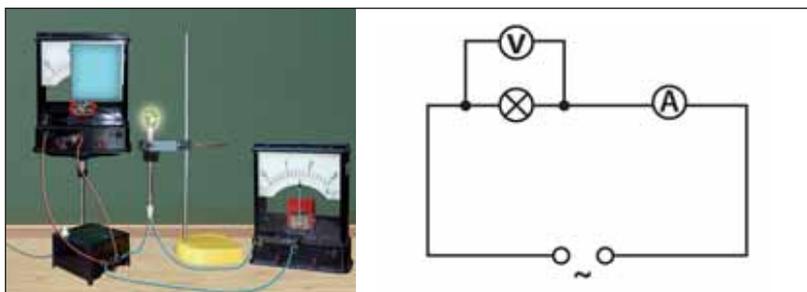


Рис. 197. Лампа в цепи переменного тока. Знак «~» указывает на то, что цепь подключена к источнику переменного напряжения

Оказывается, приборы, предназначенные для измерения переменного напряжения и силы тока, показывают и не мгновенные, и не амплитудные значения величин. Приборы сконструированы таким образом, что они измеряют некоторые «усреднённые» значения – их называют *действующими значениями напряжения и силы тока*. В цепях переменного тока в случае гармонических колебаний действующие значения в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудных значений напряжения и силы тока.

Так, например, если амперметр в цепи, изображённой на рис. 197, показывает значение силы тока

$$I = 1,6 \text{ А},$$

то максимальное значение (амплитуда) силы тока равно

$$I_{\text{макс}} = \sqrt{2} I.$$

$$I_{\text{макс}} = 1,4 \cdot 1,6 \text{ А},$$

$$I_{\text{макс}} = 2,2 \text{ А}.$$

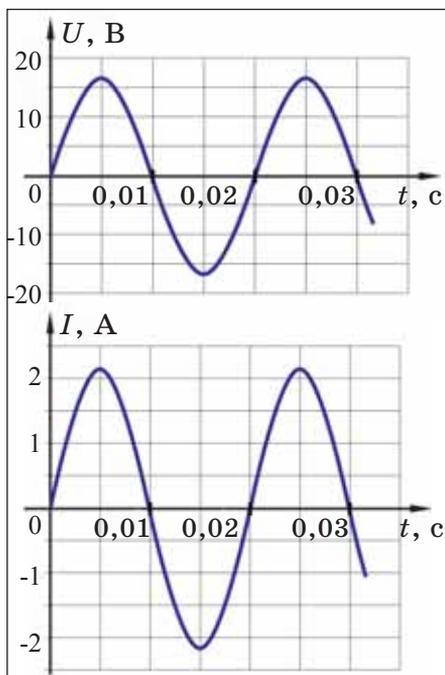


Рис. 198



25.3. Лампа включена в цепь переменного тока (рис. 197). График зависимости напряжения на лампе U от времени t представлен на рисунке 198. Чему равна амплитуда напряжения на лампе? Какое значение напряжения показывает вольтметр, подключённый к лампе?



Конденсатор и катушка в цепи переменного тока.



25.4. Каково устройство конденсатора?

Включим последовательно с лампой в цепь постоянного тока конденсатор (рис. 199). При этом лампа не светится – ток в цепи отсутствует. В этом ничего удивительного нет. Конденсатор является разрывом электрической цепи.

Включим затем лампу и конденсатор в цепь переменного тока (рис. 200). Лампа светится! По цепи идёт ток, несмотря на то, что цепь фактически разомкнута.



25.5. Как объяснить наблюдаемое явление?

При подключении конденсатора к источнику переменного напряжения происходит зарядка и разрядка конденсатора. В те моменты времени, когда переменное напряжение на зажимах источника велико, происходит зарядка конденсатора, накопление зарядов на пластинах конденсатора. Заряды движутся по цепи к конденсатору, в цепи есть ток.

В те моменты времени, когда переменное напряжение на зажимах источника мало, происходит разрядка конденсатора, сток зарядов с пластин конденсатора. Заряды движутся по цепи от конденсатора, в цепи есть ток.

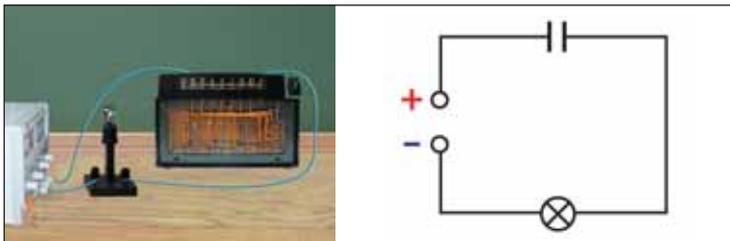


Рис. 199. Конденсатор в электрической цепи постоянного тока

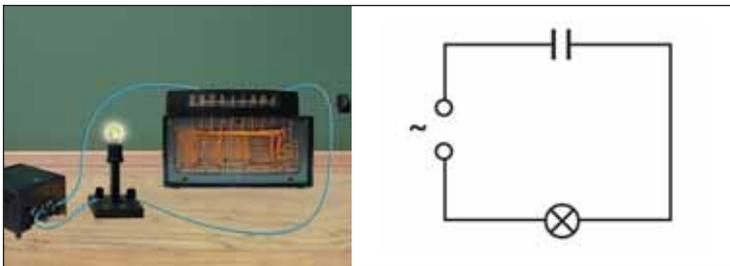


Рис. 200. Конденсатор в электрической цепи переменного тока



25.6. Изменится ли ток в цепи, если увеличить ёмкость конденсатора?

Увеличим ёмкость конденсатора – при этом лампа светится ярче. Это также нетрудно объяснить. При большей электроёмкости конденсатора на его пластинах может накапливаться больший заряд. Значит, по электрической цепи будет «курсировать» больший заряд – к конденсатору (при его зарядке) или от конденсатора (при его разрядке), поэтому и сила тока в такой цепи больше.

Пронаблюдаем также, какие явления происходят в цепи переменного тока, если в цепь последовательно с лампой включить катушку (рис. 201). Сила тока в цепи становится заметно меньше. Это свидетельствует о значительном увеличении сопротивления цепи. Почему?

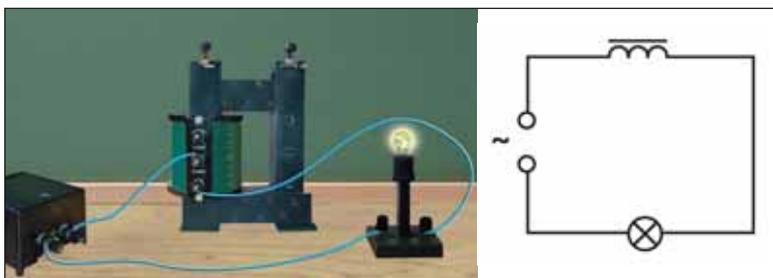


Рис. 201. Катушка в электрической цепи переменного тока

Причиной «увеличения сопротивления» служит явление самоиндукции. Переменный ток создает в катушке переменное магнитное поле, которое порождает вихревое электрическое поле. Это электрическое поле действует на электрические заряды (электроны), создающие ток в катушке. В соответствии с известным вам правилом Ленца вихревое электрическое поле «препятствует» изменениям тока в катушке. В итоге ток не может «подрасти» до прежнего амплитудного значения, которое было в цепи без вихревого электрического поля катушки. Это и означает «увеличение сопротивления» электрической цепи.



25.7. Какая физическая величина характеризует магнитные свойства катушки?

25.8. От чего зависит индуктивность катушки?

Замкнём сердечник, на котором расположена катушка, железной перемычкой. Сила тока в цепи ещё больше уменьшится, накал лампы становится очень слабым либо свечение лампы не видно вовсе.



25.9. Как объяснить уменьшение силы тока в катушке при замыкании сердечника железной перемычкой?

Генератор переменного тока, устройство промышленного генератора ГЭС, переменный ток – вынужденные электромагнитные колебания, действующее значение силы тока и напряжения, $I_{\text{макс}} = \sqrt{2}I$, физические процессы, происходящие на участке цепи переменного тока, содержащей конденсатор или катушку.

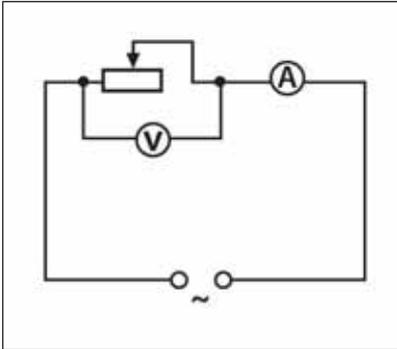


Рис. 202

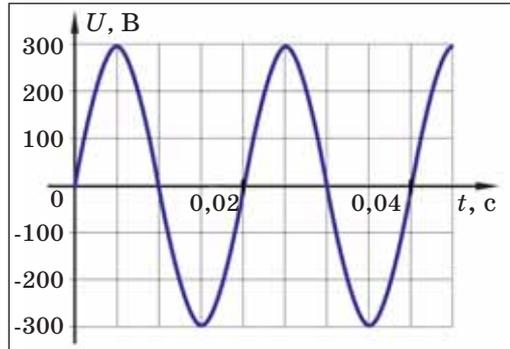


Рис. 203

25.1 ● Реостат включён в электрическую цепь согласно схеме, изображённой на рисунке 202. Амперметр показывает значение силы тока 1,2 А. Каково показание вольтметра, если сопротивление обмотки реостата, включённой в электрическую цепь, составляет 20 Ом? Какая мощность выделяется на реостате?

Как изменится мощность, выделяющаяся на реостате, при смещении подвижного контакта реостата вправо?

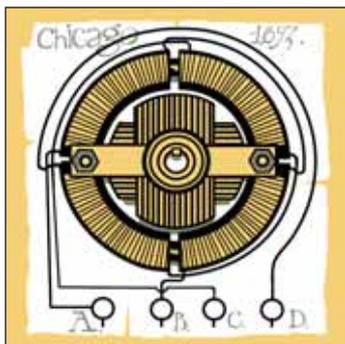
25.2 ● На рисунке 203 изображён график зависимости напряжения на резисторе сопротивлением 0,5 кОм от времени. Начертите график зависимости силы тока, проходящего через данный резистор, от времени. Какое значение силы тока покажет амперметр переменного тока, включённый последовательно с данным резистором? Во сколько раз уменьшится показание амперметра при замене резистора на резистор сопротивлением 5,1 кОм? (Считать, что амплитуда напряжения на рассматриваемом участке цепи при замене резистора не изменяется.)

25.3 ● Почему изоляция проводов в сети переменного тока должна быть рассчитана на большее напряжение, чем то, что показывает вольтметр, включённый в сеть?

25.4 ● Почему возрастает накал лампы, если увеличивается частота вращения модели генератора (рис. 191)?

25.5 ● Сколько пар полюсов должен иметь ротор гидрогенератора, вращающегося с частотой 100 оборотов в минуту, чтобы генератор вырабатывал переменный ток стандартной частоты 50 Гц?

§ 26. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ



Одним из первых триумфов переменного тока стала Всемирная электрическая выставка, проведённая в Чикаго в 1893 году в честь 300-летия открытия Америки Колумбом.

Из истории электротехники

Вы уже знаете, что такое переменный ток.



Рис. 204

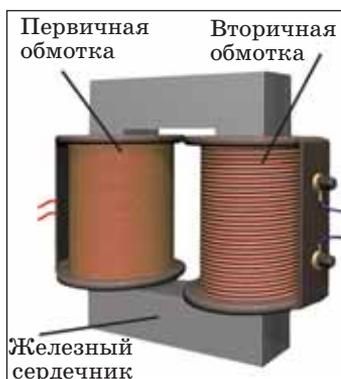


Рис. 205

Трансформатор. Первыми источниками электроэнергии были гальванические элементы, изобретённые итальянским физиком А. Вольта в 1800 г. В таких элементах протекают химические реакции, в ходе которых происходит разделение электрических зарядов. В результате химические источники тока (аккумуляторы, гальванические элементы – «батарейки») поддерживают в цепи постоянный ток. Лампы накаливания также первоначально питались от генераторов постоянного тока.

Однако в настоящее время в большинстве случаев и в промышленности, и в осветительных сетях используется переменный ток. Основное преимущество переменного тока перед током постоянным заключается в том, что переменный ток можно достаточно просто преобразовать. Преобразование (трансформация) переменного тока позволяет изменить напряжение в электрической цепи. Для преобразования переменного тока используется **трансформатор**¹ (рис. 204). Простейший трансформатор состоит из двух катушек – обмоток трансформатора, расположенных на замкнутом железном сердечнике (рис. 205).

¹ От латинского *transformo* – преобразую.

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. К источнику *переменного* напряжения подключим *первичную обмотку* трансформатора (рис. 206). Тогда по первичной обмотке будет протекать переменный ток, который создаст переменное магнитное поле. Так как первичная обмотка расположена на *железном сердечнике*, то переменное магнитное поле будет сосредоточено в основном в сердечнике. *Вторичная обмотка* трансформатора расположена на том же железном сердечнике; следовательно, вторичную обмотку также будет пронизывать переменное магнитное поле.



Рис. 206



26.1. В чём заключается явление электромагнитной индукции?

В соответствии с явлением электромагнитной индукции переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле. По этой причине каждый виток вторичной обмотки, пронизываемый переменным магнитным полем, становится источником переменного электрического напряжения. Чем больше будет витков во вторичной обмотке, тем в итоге больше будет и напряжение на вторичной обмотке. Таким образом, изменяя число витков во вторичной обмотке, можно получать электрическое напряжение большее или меньшее в сравнении с напряжением на первичной обмотке.

Основное соотношение между напряжением U_1 на первичной обмотке, напряжением U_2 на вторичной обмотке, числом витков N_1 в первичной обмотке, числом витков N_2 во вторичной обмотке имеет вид

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (26.1)$$

Если напряжение на вторичной обмотке больше, чем напряжение на первичной обмотке ($\frac{U_1}{U_2} < 1$), то такой трансформатор называют *повышающим*. Если напряжение на вторичной обмотке меньше, чем напряжение на первичной обмотке ($\frac{U_1}{U_2} > 1$), то такой трансформатор называют *понижающим*.



26.2. Какой – повышающий или понижающий – трансформатор изображён на рисунке 206?

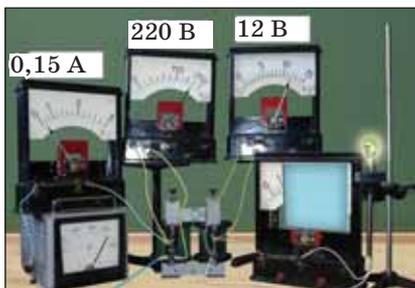


Рис. 207

Подключим к концам вторичной обмотки электрическую лампу или иной потребитель электрической энергии (рис. 207). Во вторичной обмотке и лампе (потребителе) будет протекать некоторый ток, будет потребляться некоторая электрическая энергия. Но если энергия потребляется в цепи вторичной обмотки, необходимо чтобы определённая электрическая энергия поступала в первичную обмотку от источника напряжения. (Ведь закон сохранения энергии «не отменён».)



26.3. Как вычисляют электрическую мощность?

Пусть, к примеру, сила тока в первичной обмотке I_1 , напряжение на первичной обмотке U_1 . В этом случае мощность P_1 , поступающая от источника напряжения, составит $P_1 = U_1 I_1$.

Если напряжение на вторичной обмотке U_2 , а сила тока в цепи вторичной обмотки I_2 , то мощность P_2 , потребляемая во вторичной обмотке, равна $P_2 = U_2 I_2$.

Представим себе идеальный случай:

- при прохождении тока по первичной и вторичной обмоткам не происходит нагревание проводников,
- переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле только в витках обмоток трансформатора. В таком идеальном случае электрические мощности P_1 и P_2 будут равны. Вся энергия, полученная первичной обмоткой трансформатора, будет полностью «перекачана» во вторичную обмотку трансформатора.

При работе же реального трансформатора подобное равенство выполняется приближённо:

$$P_1 \approx P_2,$$

или

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2. \quad (26.2)$$

Проанализируем соотношение (26.2). Представим, что у нас имеется понижающий трансформатор (рис. 206):

$$U_2 < U_1.$$

Тогда равенство (26.2) будет выполняться, если

$$I_2 > I_1.$$

При этом во сколько раз понижается напряжение, во столько же раз увеличивается сила тока.



26.4. Больше или меньше сила тока во вторичной обмотке трансформатора, изображённого на рисунке 207, по сравнению с силой тока в первичной обмотке?

Передача электроэнергии. На электростанциях всего мира ежегодно вырабатывается гигантское количество электроэнергии. Работу промышленности, железнодорожного транспорта, современных бытовых приборов невозможно представить без использования электрической энергии.

Однако при всех достоинствах электрической энергии у неё имеется и существенный недостаток. К сожалению, мы не имеем возможности в больших масштабах запасать эту энергию впрок. Образно говоря, в настоящее время нет технических возможностей создавать «энергетические консервы». Выработанная на электростанции энергия должна быть незамедлительно передана потребителям и израсходована¹. По этой причине от электростанций к большим городам, крупным промышленным предприятиям проложены линии электропередачи – ЛЭП (рис. 208).

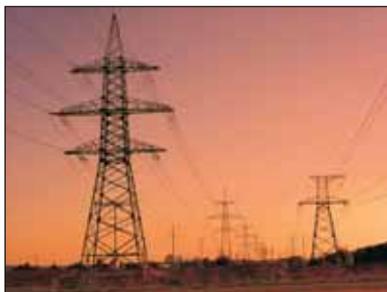


Рис. 208

Но при прохождении тока по ЛЭП ему необходимо «преодолеть» сопротивление проводников – проводов линии электропередачи. На это тратится часть электрической энергии и выделяется некоторое количество теплоты. Количество теплоты Q , выделившееся при прохождении тока в проводнике, вычисляется по формуле закона Джоуля и Ленца:

$$Q = I^2 R t, \quad (26.3)$$

где I – сила тока в проводнике;

R – сопротивление проводника;

t – время прохождения тока.



26.5. Как должна быть сконструирована линия электропередачи, чтобы количество теплоты, выделяющееся в проводах ЛЭП, было как можно меньше?

Проанализируем соотношение (26.3). Для уменьшения количества теплоты можно уменьшить либо силу тока в проводах ЛЭП, либо сопротивление проводов, либо время передачи электроэнергии по ЛЭП.

¹ Расходование электроэнергии не означает, что речь идёт об убыли, уменьшении энергии. При использовании электрической энергии происходит её превращение в иные виды энергии – механическую энергию, внутреннюю энергию.

Ясно, что время передачи уменьшить нельзя – передача электроэнергии должна осуществляться бесперебойно.



26.6. От каких физических величин зависит сопротивление проводника?

Сопротивление проводника рассчитывается по формуле

$$R = \frac{\rho l}{s}, \quad (26.4)$$

где ρ – удельное сопротивление вещества проводника;

l – длина проводника;

s – площадь его поперечного сечения.

Сопротивление проводов можно уменьшить, если уменьшить их длину. Но длина провода – это удвоенное расстояние от электростанции до потребителя, а длину ЛЭП не уменьшить. Сопротивление проводов можно уменьшить, если увеличить площадь их поперечного сечения. Но применение более толстых проводов потребует большего расхода металла на их изготовление. Провода будут тяжелее, и это, в свою очередь, потребует использования более прочных опор линии электропередачи. Сопротивление проводов будет меньше, если использовать металлы с малым удельным сопротивлением. К таким металлам относятся серебро, медь и алюминий; их удельные сопротивления равны:

$$\text{серебро} - 0,016 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}},$$

$$\text{медь} - 0,017 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}},$$

$$\text{алюминий} - 0,028 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}.$$

Экономически целесообразно использовать алюминиевые провода.

Таким образом, сопротивление проводов ЛЭП существенно уменьшить не представляется возможным. Следовательно, единственный вариант уменьшения количества теплоты, выделяющегося в проводах ЛЭП, – это уменьшение силы тока в линии электропередачи. Ведь при уменьшении силы тока в 10 раз потери энергии уменьшатся в 100 раз!

Но при уменьшении силы тока уменьшится и энергия, ежесекундно передаваемая по линии электропередачи, уменьшится мощность. Для того чтобы передаваемая мощность осталось прежней, необходимо при уменьшении силы тока во столько же раз *увеличить напряжение*:

$$P = UI.$$

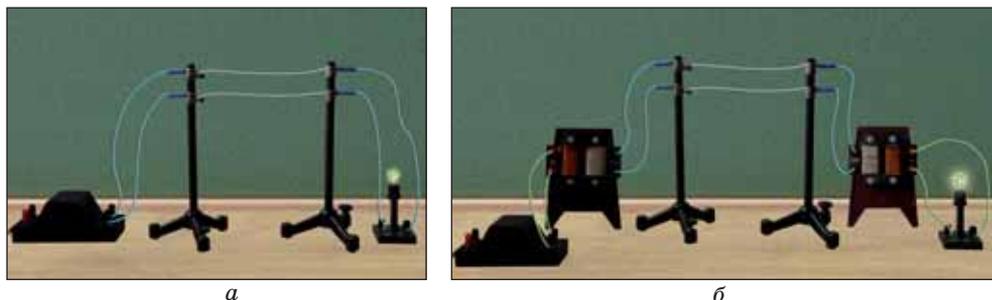


Рис. 209

Повысить же напряжение в линии электропередачи можно с помощью трансформатора.

Таким образом, перед тем, как отправить электроэнергию в «путешествие» по ЛЭП, производят повышение напряжения. Для этого используют *повышающие трансформаторы*. Напряжение, вырабатываемое генератором электростанции, повышают от 16 000–20 000 В до напряжения 500 000 В и даже 1 150 000 В. В итоге в линии электропередачи электроэнергия передаётся при малой силе тока, а значит, и с малыми потерями энергии.

Перед тем как электроэнергия поступит к потребителю, производят понижение напряжения. Для этого используют *понижающие трансформаторы*.

Пронаблюдаем действие линии электропередачи на модели, изображённой на рисунке 209, а, б. От «электростанции» – источника переменного напряжения – необходимо осуществить передачу электроэнергии «потребителю» – низковольтной лампе накаливания по длинным проводникам – «линии электропередачи».

Если передачу электроэнергии производить при низком напряжении 4 В, то лампа светится тускло (рис. 209, а). Это свидетельствует о значительных потерях электроэнергии в самой линии электропередачи.

Используя повышающий трансформатор, повысим напряжение в линии электропередачи до 220 В. Перед тем как подать электроэнергию потребителю – лампе накаливания, с помощью понижающего трансформатора вновь понизим напряжение до 4 В (рис. 209, б). Несмотря на то, что в электрическую цепь включены дополнительные сопротивления (первичные и вторичные обмотки трансформаторов), лампа светит ярче. Это свидетельствует о том, что количество теплоты, выделяющееся в линии электропередачи, уменьшилось – к потребителю поступает бóльшая мощность.

Трансформатор, $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$, повышающий трансформатор, понижающий трансформатор, $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$, **передача электроэнергии, ЛЭП.**

- 26.1** ● Первичная обмотка трансформатора (рис. 206) содержит 570 витков. Сколько витков во вторичной обмотке трансформатора? [Подсказка. Воспользуйтесь соотношением (26.1).]
- 26.2** ● Какова сила тока во вторичной обмотке трансформатора (рис. 207)? [Подсказка. Воспользуйтесь соотношением (26.2).]
- 26.3** ● Какова сила тока в ЛЭП при передаче мощности 1 МВт под напряжением 35 кВ, под напряжением 110 кВ? В каком случае потери электроэнергии при передаче меньше? во сколько раз?
- 26.4** ● Какова (в процентах) потеря энергии в ЛЭП, работающей под напряжением 110 кВ, при передаче мощности 2 МВт на расстояние 55 км по алюминиевым проводам сечением 25 мм²?
- 26.5** ● Почему трансформатор нельзя подключать к источнику постоянного напряжения?

§ 27. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ. СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН



Я полагаю, что распространение магнитных сил от магнитного полюса похоже на колебания взволнованной водной поверхности.

Из письма М. Фарадея, сданного на хранение в архив Лондонского королевского общества в 1832 г.

Вам уже известно, что в природе существует электромагнитное поле.

Вспомним известное. Напомним факты, известные вам из курса физики 8 класса.

– Взаимодействие электрически заряженных частиц происходит благодаря тому, что вокруг частиц существуют электромагнитные поля. Электромагнитное поле одной заряженной частицы действует на другую заряженную частицу. И наоборот, электромагнитное поле второй заряженной частицы действует на первую заряженную частицу. Идея о существовании в природе электромагнитного поля впервые была высказана английским физиком М. Фарадеем (1791–1867).

– Теория электромагнитного поля была разработана Д. К. Максвеллом (1831–1876). Из теории Максвелла следовало, что при колебаниях электрически заряженных частиц при их ускоренном движении возникают изменения – колебания электромагнитного поля. При этом переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле. Переменное магнитное поле порождает, в свою очередь, переменное электрическое поле. В результате колебания электромагнитного поля распространяются в пространстве со скоростью, равной скорости света.

Колебания электромагнитного поля, распространяющиеся в пространстве с определённой скоростью, называют электромагнитной волной.

В вакууме (пустоте) скорость электромагнитных волн примерно равна 300 000 км/с (более точно: $c = 2,9979 \cdot 10^8$ м/с). Эта скорость является наибольшей, предельной скоростью, с которой может происходить какой-либо физический процесс. *Предельную скорость, скорость электромагнитных волн в вакууме, принято обозначать буквой c .*

$$c \approx 300\,000 \text{ км/с.}$$

В какой-либо среде скорость распространения электромагнитных волн меньше. Она зависит от свойств среды и частоты колебаний электромагнитного поля.

– В 1886–1889 годах немецкий физик Г. Герц (1857–1894) экспериментально обнаружил предсказанные Максвеллом электромагнитные волны. Герц изучил свойства электромагнитных волн, измерил их скорость. Тем самым теория электромагнитного поля, созданная Максвеллом, получила беспорное экспериментальное подтверждение.

– В 1895–1897 годах русский физик и электротехник А. С. Попов (1859–1906) сконструировал первый радиоприёмник и первый радиопередатчик. С этого момента электромагнитные волны (радиоволны) находят самое широкое применение. В наше время жизнь человека уже невозможно представить без сотового телефона, радио, телевидения – средств передачи информации, основанных на практическом применении электромагнитных волн.

Свойства электромагнитных волн. Во времена открытия Г. Герцем электромагнитных волн изучение их свойств было трудной физической задачей. В наше же время, используя современные радиоустройства, можно достаточно просто провести опыт по изучению свойств электромагнитных волн.

Основными приборами при проведении таких опытов являются:

– *Излучатель электромагнитных волн* (рис. 210, а). Излучатель снабжён рупорной антенной, электромагнитные волны излучаются вдоль оси рупора.

– *Приёмник электромагнитных волн* (рис. 210, б). Рупорная антенна приёмника улавливает электромагнитные волны. С помощью специального радиотехнического устройства колебания электромагнитного поля преобразуются в переменный ток.

Этот переменный ток направляется в громкоговоритель. В результате при приёме электромагнитных волн возникает звуковой сигнал. Используя такие излучатель и приёмник, изучим основные свойства электромагнитных волн.

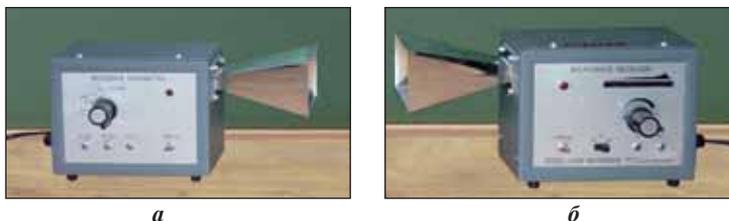


Рис. 210

Частичное поглощение электромагнитных волн диэлектриком (изолятором). Расположим излучатель и приёмник на расстоянии 1–2 м друг от друга. Звук, издаваемый громкоговорителем, свидетельствует о приёме электромагнитных волн (рис. 211, а). Поместим между излучателем и приёмником пластинку из диэлектрического материала, например пластмассы. При этом громкость сигнала уменьшится (рис. 211, б). Это свидетельствует о том, что при прохождении электромагнитных волн через слой диэлектрика происходит *частичное поглощение* электромагнитной энергии веществом диэлектрика.

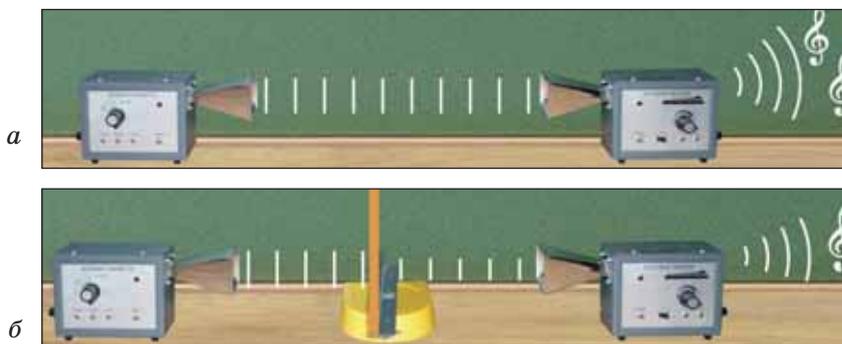


Рис. 211

Отражение электромагнитных волн от металла. Заменяем пластину диэлектрика металлической пластинкой – звук исчезает, приёмник не регистрирует электромагнитную волну (рис. 212, а). Означает ли это, что металл полностью поглощает электромагнитную волну? Нет, в данном случае наблюдается *отражение* электромагнитных волн. Как убедиться в этом?

Развернём излучатель и приёмник под некоторым углом друг к другу. При определённом расположении металлической пластины сигнал слышен (рис. 212, б).

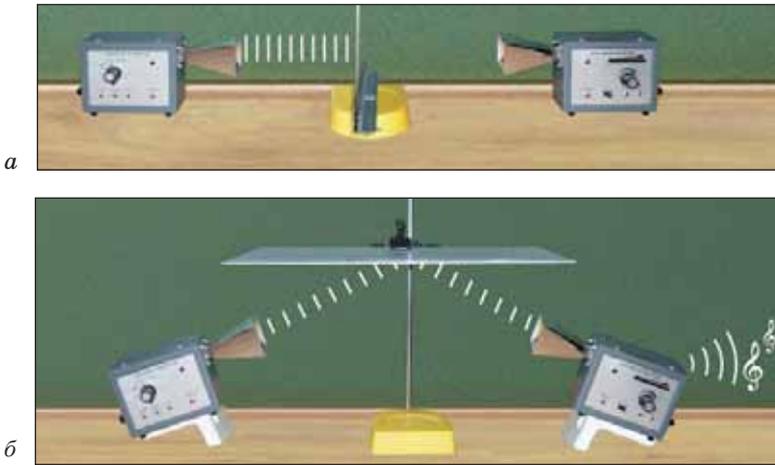


Рис. 212



27.1. Будет ли регистрироваться сигнал, если излучатель, приёмник и металлическую пластину расположить так, как это изображено на рисунке 213?

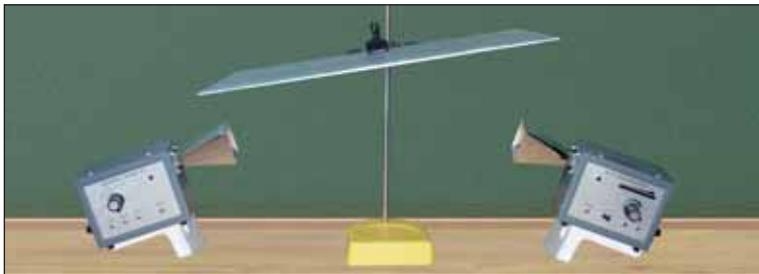


Рис. 213



27.2. Как, исходя из результатов опытов (рис. 212, 213), можно сформулировать закон отражения электромагнитных волн от проводящей поверхности?

Почему происходит отражение электромагнитных волн от металла? «Пришедшая» электромагнитная волна – переменное электромагнитное поле – действует с некоторой силой на заряженные частицы – свободные электроны в металле¹. В результате заряженные частицы начинают совершать вынужденные колебания. Колеблющиеся электроны порождают вокруг себя переменное электромагнитное поле, таким образом и возникает «отражённая от металла» электромагнитная волна.

Преломление электромагнитных волн изолятором (диэлектриком). Поместим на пути электромагнитных волн трёхгранную призму из диэлектрика, например парафина (рис. 214, а). Сигнал регистрируется. Если убрать призму, то сигнал, свидетельствующий о приёме электромагнитных волн, исчезает (рис. 214, б).

Результаты опыта объясняются тем, что на границе «воздух – парафин» и на границе «парафин – воздух» электромагнитная волна изменяет направление своего распространения, то есть преломляется. Преломление – изменение направления распространения электромагнитных волн на границе раздела двух сред.

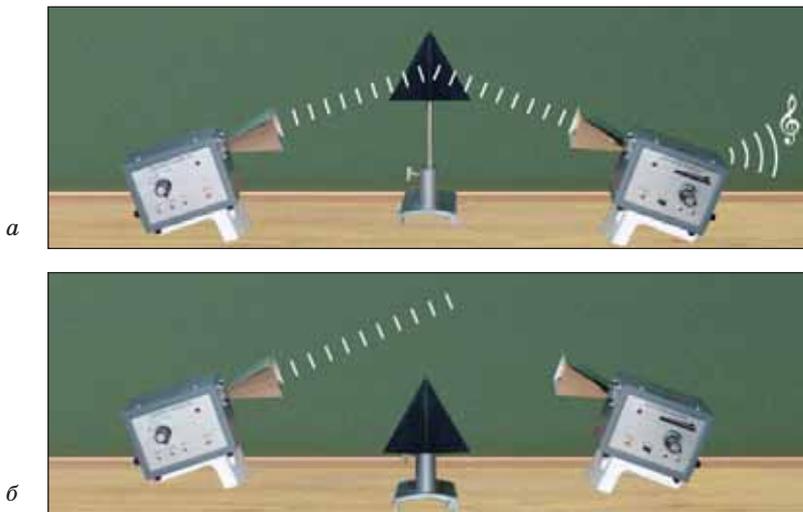


Рис. 214

¹ Металлы – проводники. Проводимость металлов электронная, то есть в металлах имеются свободные электроны, способные перемещаться под действием электрического поля.

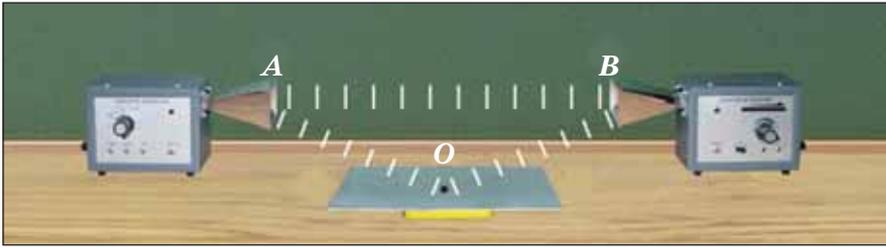


Рис. 215

Интерференция и дифракция электромагнитных волн. Как вам известно, отличительной особенностью волнового процесса любой природы являются явления интерференции и дифракции. Интерференция – наложение волн, приводящее к установлению в каждой точке пространства определённой амплитуды колебаний (рис. 162). Дифракция – огибание волной препятствия (рис. 166).

Для наблюдения интерференции расположим излучатель и приёмник на некотором расстоянии друг от друга и поместим между ними металлическую пластину (рис. 215). Теперь в приёмное устройство поступают *две волны*. Первая волна распространяется непосредственно от излучателя в приёмник (из точки *A* в точку *B*). Вторая волна распространяется, отразившись от металлической пластины, и проходит при этом расстояние *AOB*.

Будем медленно перемещать вверх или вниз металлическую пластину (рис. 215). При этом громкость звука периодически увеличивается и уменьшается. Почему? Слышимое нами изменение громкости звукового сигнала является следствием интерференции электромагнитных волн в приёмном устройстве. Перемещая пластину, мы тем самым уменьшаем или увеличиваем расстояние *AOB*, проходимое одной из электромагнитных волн.



27.3. Являются ли когерентными электромагнитные волны, достигающие приёмника (рис. 215)?

27.4. Каковы условия образования интерференционного максимума и интерференционного минимума? (Подсказка. Смотрите рисунок 163.)

Когда расстояние *AOB* отличается от расстояния *AB* на целое число длин волн λ , тогда две электромагнитные волны, достигшие приёмного устройства, *усиливают* друг друга. При разности хода электромагнитных волн в целое число длин волн

$$\lambda, 2\lambda, 3\lambda, 4\lambda \text{ и так далее}$$

образуется интерференционный максимум. В результате в такие моменты мы слышим громкий звуковой сигнал.

Когда расстояние AOB отличается от расстояния AB на целое число длин волн λ плюс половина длины волны $\frac{\lambda}{2}$, тогда две электромагнитные волны, достигшие приемного устройства, *ослабляют* друг друга. При разности хода электромагнитных волн в целое число волн плюс половина длины волны

$$\frac{\lambda}{2}, \lambda + , 2\lambda + \frac{\lambda}{2}, 3\lambda + \frac{\lambda}{2}, 4\lambda + \frac{\lambda}{2} \text{ и так далее}$$

образуется интерференционный минимум. В результате в такие моменты мы слышим слабый звуковой сигнал.

Используя излучатель и приемник, также можно продемонстрировать явление дифракции электромагнитных волн.

Итак, для электромагнитных волн мы пронаблюдали характерные волновые явления – отражение, преломление, дифракцию и интерференцию. Помимо этого для электромагнитных волн наблюдаются и другие волновые явления. Это обусловлено тем, что **электромагнитные волны являются поперечными волнами**. Поперечный характер электромагнитных волн подтверждён экспериментально, и это же следует из теории электромагнитного поля Максвелла.

Электромагнитная волна; скорость электромагнитных волн $c \approx 300\,000$ км/с; свойства электромагнитных волн: частичное поглощение изолятором (диэлектриком), отражение от металла, преломление изолятором (диэлектриком), интерференция, дифракция; электромагнитная волна является поперечной волной.

27.1 ● В излучателе, используемом в опытах по изучению свойств электромагнитных волн, частота электромагнитных колебаний составляет 10 ГГц. Какова длина волны, излучаемой данным прибором?

27.2 ● На какой частоте передаётся сигнал бедствия SOS, если в соответствии с международным соглашением длина радиоволны должна составлять 600 м?

27.3 ● В работе «О лучах электрической силы», опубликованной в 1888 году, Г. Герц указывает, что в опытах им использовалась призма из твёрдой смолы (асфальта) с основанием 1,2 м и высотой 1,5 м. Для изучения каких свойств электромагнитных волн необходима подобная призма?

27.4 ● Сила тока I в колебательном контуре, излучающем электромагнитную волну, изменяется с течением времени по закону

$$I = 0,02 \sin (6 \cdot 10^7 \pi t).$$

Определите частоту колебаний контура, длину излучаемой электромагнитной волны.

27.5 ● Предложите схему опыта, который позволил бы наблюдать явление дифракции электромагнитных волн.

§ 28. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОВОЛН



Чудеса науки современной далеко превосходят чудеса древней мифологии.

*Р. У. Эмерсон (1803–1882),
американский философ и писатель*

Вам уже известно, что в природе существуют электромагнитные волны.

Принципы радиосвязи. Практическое применение электромагнитных волн ведёт свой отчёт с 7 мая 1895 года. В этот день А. С. Поповым на заседании Русского физико-химического общества в Петербургском университете был продемонстрирован приёмник электромагнитных волн – «грозоотметчик». Новая область техники быстро развивалась, и уже в 1901 году итальянский радиоинженер Маркони осуществил радиотелеграфную связь между Европой и Америкой через Атлантический океан.

За прошедшее с тех пор время радиотехнические передающие и приёмные устройства многократно изменились и усложнились. Помимо телеграфных сообщений теперь с помощью электромагнитных волн можно передать речь, музыку и изображение. Выясним, какие же действия необходимо осуществить для установления радиосвязи, каковы основные принципы радиосвязи? Первый шаг – преобразовать звуковые колебания в электромагнитные. Для этой цели можно использовать *электродинамический микрофон*.

Устройство электродинамического микрофона показано на рисунке 216. Между полюсами магнита 1 расположена катушка 2, прикрепленная к мембране 3. Если на мембрану воздействует звуковая волна, то мембрана колеблется. При этом катушка микрофона совершает колебания между полюсами магнита. В соответствии с явлением электромагнитной индукции в катушке возникает переменный ток. Следовательно, с помощью микрофона механические колебания воздуха (звук) преобразуются в электромагнитные колебания (переменный ток).

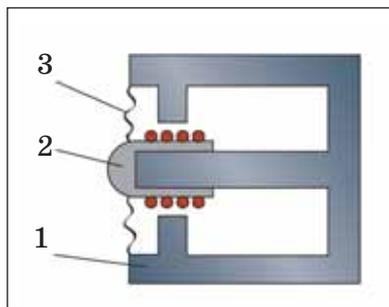


Рис. 216

Казалось бы, для того чтобы излучить электромагнитные волны, эти возникшие электромагнитные колебания (переменный ток) необходимо направить в антенну. Тогда электромагнитные волны, распространяясь в пространстве, достигнут приёмной антенны, и в антенне возникнет переменный ток. Этот переменный ток можно будет направить в катушку громкоговорителя.



28.1. Каково устройство громкоговорителя (рис. 217)?

Пусть по катушке громкоговорителя протекает переменный ток. Тогда под действием силы со стороны магнитного поля катушка и прикреплённый к ней диффузор будут совершать колебания. Колебания диффузора вызывают колебания воздуха – возникает звук.

Однако подобные действия не приведут к успеху! Почему?

Оказывается, **энергия излучаемой электромагнитной волны пропорциональна частоте колебаний в четвёртой степени** (при прочих равных условиях).

При уменьшении частоты колебаний в 2 раза излучаемая энергия уменьшается в 2^4 , то есть в 16 раз. При уменьшении частоты колебаний в 10 раз излучаемая энергия уменьшается в 10 000 раз. Электромагнитные колебания с частотой, такой же, как и частота звуковых колебаний (от 20 до 20 000 Гц), не могут привести к излучению сколько-нибудь заметной электромагнитной волны. Частота таких электромагнитных колебаний невысока, а значит, в этом случае крайне мала и энергия возникающих электромагнитных волн.

Для излучения электромагнитных волн необходимо использовать электромагнитные колебания с частотой сотни тысяч – десятки миллионов герц. Но если электромагнитные колебания такой частоты и удастся преобразовать в механические колебания, то никакое человеческое ухо их не воспримет. Значит, никакой информации человек не получит и в этом случае.

Таким образом, имеется определённое противоречие.

– С помощью электромагнитных колебаний низкой (звуковой) частоты можно воспроизвести информацию (звуки, речь, музыку). Но такие колебания «энергетически слабы», они практически не излучают электромагнитные волны.

– Электромагнитные колебания высокой частоты «энергетически сильны», они излучают электромагнитные волны. Но такие колебания не содержат информации.



28.2. Каким же образом разрешить имеющееся противоречие и передать информацию с помощью электромагнитных волн?

Чтобы практически осуществить радиосвязь, необходимо дополнительно провести *модуляцию* и *демодуляцию* (*детектирование*).

Модуляция – процесс изменения высокочастотных электромагнитных колебаний низкочастотными электромагнитными колебаниями, содержащими полезную информацию. В простейших случаях под воздействием низкочастотных колебаний может изменяться, например, амплитуда или частота высокочастотных колебаний.

Модулированными высокочастотными, а следовательно, «высокоэнергичными» электромагнитными колебаниями излучаются электромагнитные волны. Когда эти электромагнитные волны достигают приёмного устройства, производится демодуляция (детектирование).

Демодуляция (детектирование) – процесс выделения из модулированных высокочастотных электромагнитных колебаний низкочастотных колебаний, содержащих полезную информацию. Далее эти колебания (переменный ток) направляют в громкоговоритель и получают звук.



Схематично основные процессы, происходящие при осуществлении радиосвязи, представлены на рисунке 218.

С помощью микрофона *1* звуковые колебания преобразуются в электромагнитные колебания низкой (звуковой) частоты. Усиление (увеличение мощности) этих колебаний происходит в усилителе низкой частоты *2*.

Генератор высокочастотных колебаний *3* вырабатывает высокочастотные электромагнитные колебания. Эти колебания модулируют (изменяют), используя специальный модулятор *4*. В итоге в усилитель *5* поступают модулированные высокочастотные электромагнитные колебания, в которых «зашифрована» полезная информация. Модулированные высокочастотные колебания в передающей антенне *6* создают переменный высокочастотный ток. Проводник – антенна *6* – излучает электромагнитные волны.

Электромагнитные волны, достигнув проводника – приёмной антенны *7*, – вызывают в ней и в приёмном контуре *8* вынужденные колебания. Возникшие модулированные высокочастотные колебания усиливаются (усилитель высокой частоты *9*). В специальном устройстве – демодуляторе *10* – происходит выделение из модулированных высокочастотных колебаний низкочастотных электромагнитных колебаний. Иными словами, происходит «расшифровка» и выделение полезной информации. Низкочастотные электромагнитные колебания усиливают (усилитель низкой частоты *11*) и направляют в громкоговоритель *12*. С помощью громкоговорителя электромагнитные колебания преобразуются в звуковые колебания.



Рис. 217

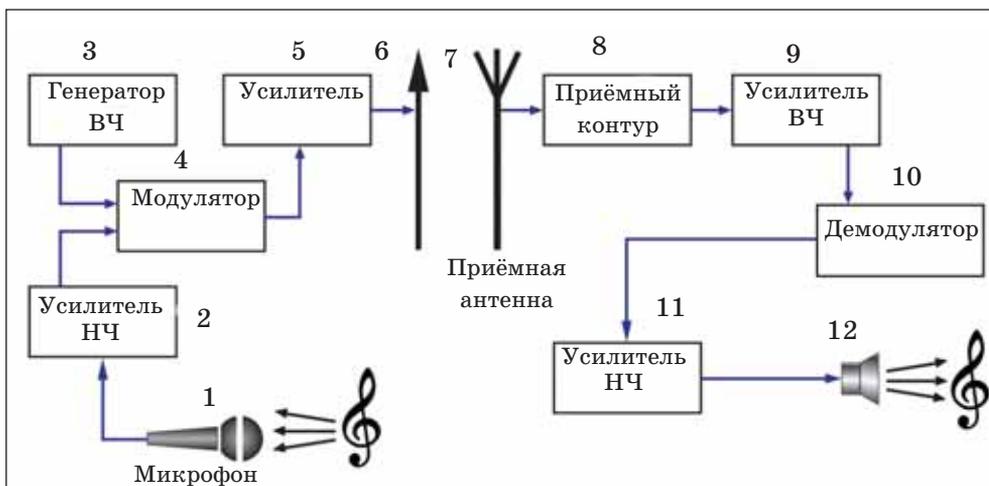


Рис. 218

Схема осуществления телевидения – передачи изображения с помощью электромагнитных волн – в общих чертах похожа на схему передачи звука. С помощью телевизионной передающей камеры отдельные элементы изображения преобразуются в серию электрических импульсов – видеосигнал. Этими сигналами модулируют (изменяют) электромагнитные колебания, вырабатываемые генератором высокочастотных колебаний. В итоге электромагнитная волна, излучённая передающей антенной, несёт информацию не только о звуке, но и об изображении. В телевизионном приёмнике происходит процесс демодуляции (детектирования). Низкочастотные электромагнитные колебания, как и при радиовещании, направляются на громкоговоритель для воспроизведения звука. Видеосигнал управляет движением электронов в электронно-лучевой трубке телевизора – кинескопе – либо процессами, приводящими к созданию изображения на экране плазменного или жидкокристаллического телевизора. Одно изображение на экране телевизора сменяется другим 25 раз в секунду. При такой частоте смены кадров зрение человека не успевает реагировать на «мелькание» кадров, и изображение воспринимается как непрерывное.

Распространение радиоволн. Электромагнитные волны, используемые для радиосвязи, радиовещания и телевидения принято условно подразделять в зависимости от длины волны на *диапазоны: длинные волны (10 000–1000 м), средние волны (1000–100 м), короткие волны (100–10 м) и ультракороткие волны (менее 10 м)*. Такое разделение на отдельные диапазоны связано с тем, что радиоволны с различной длиной волны по-разному распространяются у поверхности Земли.



28.3. В чём заключается явление дифракции волн?

Для длинных волн наиболее существенно явление дифракции – огибание волной выпуклой поверхности Земли. По этой причине длинные волны используются для дальней и сверхдальней радиосвязи. Средние волны в меньшей степени испытывают дифракцию у поверхности Земли. Они распространяются «за горизонт» на меньшее расстояние (порядка 1000 км). Средние радиоволны используют в радиовещании, радиотелефонной связи.

Для коротких волн явление дифракции не оказывает существенно влияния на характер их распространения. Отличительная особенность волн этого диапазона – отражение от ионосферы. Ионосферу образуют верхние слои земной атмосферы на высоте 100–300 км. В ионосфере газы частично ионизированы под влиянием солнечного излучения и потоков частиц – «солнечного ветра». Короткие волны хорошо отражаются от ионосферы.

Благодаря отражениям от ионосферы и от поверхности Земли с помощью коротких волн можно осуществить радиосвязь на любых расстояниях. Этот диапазон волн применяют для радиотелефонной связи, радиовещания, для любительской связи.



28.4. В чём заключается явление интерференции волн?

Особенность радиосвязи в диапазоне коротких волн – изменение качества связи при изменении состояния ионосферы в зависимости от времени года и времени суток. На качество связи влияет и наложение радиоволн, достигших приёмной антенны при отражении от различных участков ионосферы.

Ультракороткие волны не огибают поверхность Земли в результате дифракции. Они также не отражаются ионосферой, а свободно проходят через неё. По этой причине ультракороткие волны используются в пределах прямой видимости «радиопередатчик – радиоприёмник». Радиоволны этого диапазона применяются для космической связи, радиоастрономии, телевидения.



28.5. На рисунке 219 изображена схема распространения радиоволн различных диапазонов. Укажите названия диапазонов.

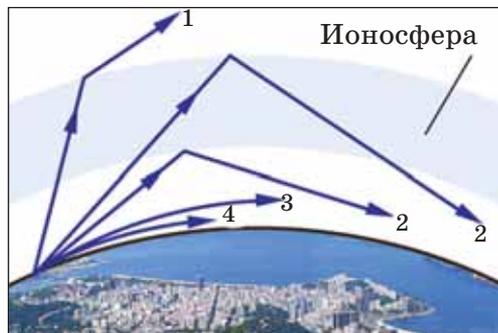


Рис. 219

Радиолокация. В 1897 году А.С. Попов, проводя опыты по установлению радиосвязи между кораблями военно-морского флота, обратил внимание на интересный факт. Связь между двумя кораблями прерывалась в момент прохождения между ними третьего корабля. «Наблюдалось также влияние промежуточного корабля, – писал А. С. Попов, – ... взаимодействие приборов прекращалось, пока суда не сходили с одной прямой линии». Если вспомнить уже известные вам свойства электромагнитных волн, то легко понять, что наблюдавшееся явление объясняется отражением радиоволн от корпуса проходящего корабля. Так было положено начало радиолокации. **Радиолокация – обнаружение и точное определение местонахождения объекта с помощью отражённых радиоволн.**



28.6. Как осуществляется эхолокация?

В радиолокационных установках – радарх – используются ультракороткие электромагнитные волны. Излучающая антенна радара имеет форму вогнутого зеркала (рис. 220). Это позволяет излучать электромагнитные волны остронаправленным пучком, подобно лучу прожектора.



Рис. 220

Радиолуч достигает объекта и отражается. Отражённая волна улавливается, как правило, той же антенной.

Направление радиолуча радара позволяет определить направление, с которого пришёл отражённый сигнал. А каким образом определяется расстояние до объекта? Для этого радаром излучаются электромагнитные волны кратковременными импульсами продолжительностью в миллионную долю секунды. Во время пауз – промежутков между импульсами – принимается отражённый сигнал. Пусть время, за которое радиоволна достигла объекта и вернулась обратно к радару, составляет t . Скорость электромагнитных волн известна:

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Тогда расстояние L до объекта равно

$$L = \frac{ct}{2}.$$

Радиолокационные установки позволяют обнаружить самолёты на расстоянии в несколько сот километров. В аэропортах радары позволяют контролировать взлетающие и идущие на посадку самолёты, обеспечивая тем самым безопасность полётов.

Радиолокационные методы нашли применение и в астрономии. Астрономами были измерены расстояния от Земли до Луны, до некоторых планет Солнечной системы. Причём расстояния в десятки и сотни миллионов километров измерены с удивительной точностью. Чтобы составить представление о точности таких измерений, приведём пример. Вообразите, что вам удалось измерить длину письменного стола с погрешностью в одну стотысячную долю миллиметра. Даже в этом случае точность вашего измерения была бы ещё в 1,5 раза ниже, чем точность радиолокационного определения расстояния до планет Солнечной системы.

Космические объекты – планеты Солнечной системы, само Солнце, другие звёзды, галактики – излучают не только видимый свет, но и радиоволны. Это космическое радиоизлучение изучается учёными-астрономами с помощью радиотелескопов, состоящих из чувствительных приёмников радиоволн и огромных приёмных антенн. Например, антенна крупнейшего радиотелескопа Российской академии наук состоит из 895 подвижных прямоугольных элементов (металлических щитов) размером $11,4 \times 2$ м, расположенных по кругу диаметром 576 м. Радиотелескоп работает в диапазоне длин волн 1–50 см, и с его помощью исследуют астрономические объекты: как самые близкие – Солнце и тела Солнечной системы, так и самые удалённые в пространстве – радиогалактики.

Электродинамический микрофон, громкоговоритель, **зависимость энергии электромагнитной волны от частоты колебаний, модуляция, демодуляция (детектирование)**, блок-схема радиосвязи, физические принципы осуществления телевидения, **распространение радиоволн, радиолокация.**

28.1 ● Кратчайшее расстояние от Земли до Марса (во время так называемого Великого противостояния) составляет 56 млн км, а наибольшее расстояние – 400 млн км. Через сколько времени радиосигнал, посылаемый с Земли, может достигнуть Марса?

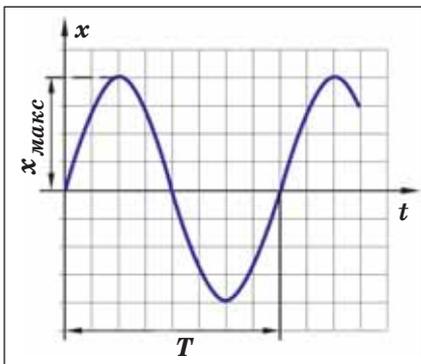
28.2 ● На каком расстоянии от антенны радара находится самолёт, если отражённый от него радиосигнал возвратился обратно через 0,3 мс?

28.3 ● Почему для охвата телевизионным вещанием большей территории антенну телевизионного передатчика стараются расположить как можно выше? (Так, например, высота башни Останкинского телецентра в Москве составляет 540 м.)

28.4 ● Укажите существенные различия в условиях распространения радиоволн на Земле и на Луне.

28.5 ● Для осуществления радио- и телевизионной связи удобны геостационарные спутники связи. Геостационарный спутник имеет период обращения 24 ч и «висит» над одной точкой земной поверхности. По этой причине отпадает необходимость поворачивать и «настраивать на спутник» передающие и приёмные антенны. Определите высоту орбиты над земной поверхностью геостационарного спутника, запущенного в плоскости земного экватора.

Самое важное в разделе «Колебания и волны»



1. *Колебания* – периодически повторяющийся процесс.

Характеристики колебаний:

амплитуда,

период T (с),

частота ν (Гц),

круговая частота ω (Гц).

$$\nu = \frac{1}{T},$$

$$\omega = 2\pi\nu.$$

2. Колебания подразделяют на *свободные, вынужденные* и *автоколебания*.

3. *Свободные колебания при малой амплитуде колебаний являются гармоническими.*

Примерами свободных колебаний служат колебания маятника, груза на пружине, электромагнитные колебания в колебательном контуре.

4. С практической точки зрения наиболее важный пример вынужденных электромагнитных колебаний – *переменный ток*. Повышение (понижение) напряжения переменного тока производят с помощью *трансформатора*.

5. *Волна* – колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени. Расстояние, на которое распространяется волна за период колебания, называют *длиной волны*.

$$\lambda = \nu T.$$

$$\nu = \lambda \nu.$$

6. Волны подразделяются на *продольные* и *поперечные*.

7. Продольные механические волны с частотой колебаний от 16 до 20 000 Гц воспринимаются человеком как *звук*.

Звуки различаются по *высоте* и *громкости* звучания.

8. Для волновых процессов наблюдаются явления *отражения, преломления, интерференции, дифракции волн*.

9. В природе существует *электромагнитное поле*. Распространяющиеся в пространстве колебания электромагнитного поля – *электромагнитная волна*.

Скорость электромагнитных волн в вакууме $c \approx 300\,000$ км/с.

С помощью электромагнитных волн (радиоволн) осуществляют *радиосвязь, телевизионное вещание, радиолокацию*.



II.1. Изготовьте маятник длиной 80–100 см. Поочерёдно отклоняйте маятник на угол 10, 20, 30, 40, 50, 60° от вертикали. Всякий раз измеряйте время, за которое маятник совершает 10 колебаний. Сделайте вывод, зависит ли период колебаний маятника от амплитуды колебаний.

II.2 ● Вычислите скорость электромагнитных волн, распространяющихся в воде, если длина волны 20 000 м при частоте колебаний 1,7 кГц.

II.3. Возможна ли ситуация, при которой длина звуковой волны изменилась, а высота звука, воспринимаемая человеческим ухом, осталась прежней? Ответ обосновать.

II.4 ● Свободные электромагнитные колебания происходят в колебательном контуре (рис. 181). Как изменится период колебаний, если удалить сердечник из катушки? Ответ обосновать.



II.5. Подготовьте сообщение по теме «Физические принципы сотовой связи».

P. S.



Изучая механические и электромагнитные колебания и волны, мы выяснили, какие физические величины их характеризуют, на какие виды подразделяют колебания, какие физические явления происходят при распространении волн. Мы познакомились также и с наиболее важными примерами практического применения радиоволн.

Колебательные и волновые процессы крайне широко распространены в природе и применяются в технике. Поэтому неудивительно, что многие вопросы, касающиеся колебаний и волн, ещё не изучались.

– Нам известно, как рассчитать частоту колебаний маятника. Но не приводилась формула для расчёта частоты электромагнитных колебаний в колебательном контуре.

– Мы знаем, что переменный ток – это вынужденные электромагнитные колебания. Но закон Ома для цепи переменного тока нам не известен.

– Мы выяснили, что волна – это процесс распространения колебаний, а значит, и энергии в пространстве с течением времени. Но не изучался вопрос, как зависит энергия, переносимая волной, от ее амплитуды и частоты колебаний.

– Мы знаем, что длина волны определяется произведением скорости распространения волны и периода колебаний. Но не выяснили, зависит ли скорость распространения волны от периода (частоты) колебаний.

– Нам известно, что скорость распространения звуковых волн в газах, жидкостях и твёрдых телах различна. Но не обсуждался, например, вопрос, как зависит скорость звука в газе от его химического состава.

– Мы знаем, что при радио- и телевидении необходимо осуществлять процесс модуляции и демодуляции (детектирования). Но не рассматривалось, как практически производят модуляцию и демодуляцию электромагнитных колебаний.

Раздел 3. СВЕТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

В этом разделе учебника вы впервые познакомитесь со световыми явлениями, столь важными в жизни каждого человека. Выясните, что такое свет и изучите основные законы оптики. Узнаете, как устроен глаз человека, а также фотоаппарат, микроскоп, телескоп и другие оптические приборы.

§ 29. Электромагнитная природа света

Удивительное открытие физиков
Шкала электромагнитных излучений
Измерение скорости света

§ 30. Прямолинейное распространение света

Геометрическая оптика
Закон прямолинейного распространения света
Солнечные и лунные затмения

§ 31. Отражение света

Закон отражения света
Плоское зеркало
Лабораторная работа «Изучение явления отражения света»

§ 32. Преломление света. Явление дисперсии

Закон преломления света
Дисперсия света

§ 33. Линзы

Собирающие и рассеивающие линзы
Изображения, даваемые линзами
Формула линзы

§ 34. Лабораторная работа «Изучение явления преломления света и измерение оптической силы линзы»

§ 35. Оптические приборы. Глаз. Очки

Фотоаппарат
Глаз. Очки
Микроскоп
Телескоп

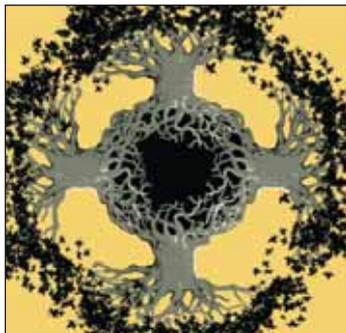
§ 36. Интерференция и дифракция света

Интерференция и дифракция света
Дифракционная решётка
Лабораторная работа «Наблюдение интерференции и дифракции света»

Заключение к разделу «Световые явления»

P. S.

§ 29. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПРИРОДА СВЕТА



Как прекрасно почувствовать единство целого комплекса явлений, которые при непосредственном восприятии казались разрозненными.

А. Эйнштейн

Вам уже известно, что существуют электромагнитные волны.

Удивительное открытие физиков. Сотовая телефонная связь, телевидение, радиовещание являются примерами практического применения *радиоволн* (рис. 221).

Но радиоволны – не единственный вид излучения, встречающийся в технике и природе. Если поднести руку к батарее центрального отопления, то, даже не прикасаясь к ней, мы можем определить, горячая батарея или нет. Это связано с тем, что всякое нагретое тело излучает так называемое *инфракрасное излучение*. В курсе физики 8 класса рассказывалось о простейшем теплоприёмнике, с помощью которого регистрируют инфракрасное (тепловое) излучение (рис. 222).



29.1. Каково устройство и принцип действия теплоприёмника, изображённого на рисунке 222?

Благодаря органу зрения человек реагирует на свет – *видимое излучение* – и получает большую часть информации (рис. 223).

Важнейшим для нас источником света является Солнце. Помимо видимого света Солнце является также источником *ультрафиолетового излучения*. Именно ультрафиолетовое излучение вызывает загар (рис. 224). Ультрафиолетовое излучение, создаваемое специальными кварцевыми лампами, применяют для обеззараживания воздуха в целях профилактики и борьбы с инфекционными заболеваниями.



Рис. 221



Рис. 222



Рис. 223

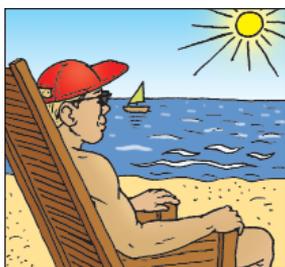


Рис. 224

В 1895 году немецким физиком В. Рентгеном было обнаружено ранее неизвестное излучение, которое в дальнейшем получило название *рентгеновского излучения*. Это излучение возникает при ударе в анод потока электронов, ускоренных электрическим полем, создаваемым между катодом и анодом рентгеновской трубки (рис. 225).

Рентгеновские лучи проникают через вещество, по-разному поглощаясь различными веществами. Поэтому рентгеновскими лучами можно «просветить» тело человека и получить на фотоплёнке изображение костей и внутренних органов (рис. 226). В современных рентгеновских аппаратах изображение может быть выведено на экран монитора и сохранено в базе данных. С помощью рентгеновского излучения выявляют скрытые дефекты рельсов, металлических труб, сварных швов. Этот метод контроля качества технических деталей называют рентгенодефектоскопией. В аэропортах рентгенотелевизионные установки позволяют увидеть содержимое багажа с целью обнаружения предметов, представляющих опасность для пассажиров.

Ещё одним видом излучения является *гамма-излучение*, обнаруженное учёными при изучении радиоактивности. Гамма-излучение порождается радиоактивными веществами. Излучение обладает большой проникающей способностью. Одним из примеров практического применения этого вида излучения является гамма-дефектоскопия – метод обнаружения внутренних дефектов в изделиях при помощи гамма-излучения (рис. 227).

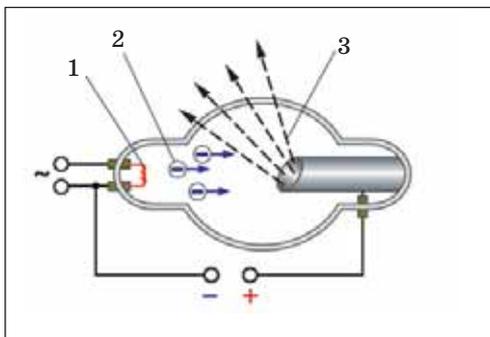


Рис. 225.

Схема рентгеновской трубки:

1 – катод. Катод испускает электроны за счёт термоэлектронной эмиссии;

2 – поток электронов, ускоряемых электрическим полем. Электрическое напряжение между катодом и анодом трубки составляет десятки тысяч вольт;

3 – анод. При торможении электронов, достигших анода, возникает рентгеновское излучение



Рис. 226

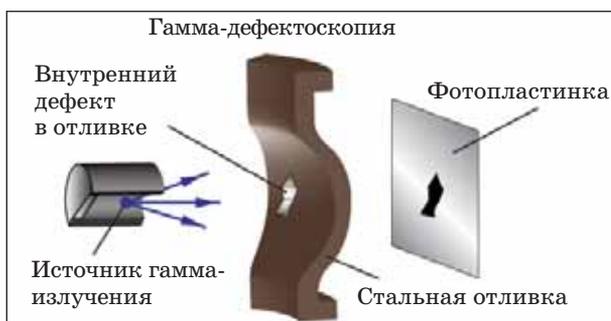


Рис. 227

В медицине применяется так называемая лучевая терапия для уничтожения быстрорастущих опухолевых клеток при лечении онкологических заболеваний.

Есть ли что-нибудь общее между столь разными видами излучений – от радиоволн до гамма-излучений? Одним из замечательных достижений физики конца девятнадцатого – начала двадцатого веков было обнаружение удивительного факта. Все рассматриваемые нами виды излучений имеют одну и ту же физическую природу! **Все виды излучений – от радиоволн до гамма-излучения – являются электромагнитными излучениями.**

Шкала электромагнитных излучений. Различные виды излучений создаются различными способами (радиоантенной, нагретым веществом, торможением быстрых электронов и т. д.). Различные виды излучений регистрируются различными способами (радиоприёмником, органом зрения, фотопластинкой и т. д.). Различные виды излучений имеют разные физические свойства. Однако общая природа этих видов излучений позволяет объединить их в *единую шкалу электромагнитных излучений*.

На цветной вклейке учебника (рис. I) изображена шкала электромагнитных излучений с указанием длин волн и частот колебаний. Обратите внимание – различные виды электромагнитного излучения охватывают огромный диапазон длин волн и частот. Так, самые длинные радиоволны имеют длину волны в десятки тысяч метров (10^4 м) и частоту колебаний в десятки тысяч герц (10^4 Гц). Самое коротковолновое гамма-излучение имеет длину волны в одну тысячную миллиардной доли метра (10^{-12} м) и частоту колебаний в сотни миллиардов миллиардов герц (10^{20} Гц). Видимое излучение имеет длину волны от 0,76 до 0,40 мкм. Принципиальных различий между отдельными видами электромагнитных излучений нет. По этой причине указанные на шкале границы диапазонов излучений имеют ориентировочный характер.

Однако при анализе шкалы мы обнаружим, что изменения в длине волны и частоте колебаний приводят в итоге к *изменению свойств* электромагнитных излучений.

Это и позволяет выделить в единой шкале электромагнитных излучений отдельные виды излучений: **радиоволны, инфракрасное излучение, видимое излучение, ультрафиолетовое излучение, рентгеновское излучение, гамма-излучение.**

Измерение скорости света. На единую природу различных видов излучения указывает то, что скорость их распространения в вакууме одинакова. Эта скорость называется скоростью света. Скорость света огромна – почти 300 000 км/с; для того, чтобы «обежать» вокруг Земли, свету требуется время всего 0,13 с!

В настоящее время скорость света в вакууме принято считать равной 299 792 458 м/с.



Как же была измерена скорость света? Впервые значение скорости света было определено датским астрономом О. Ремером в 1675 году. Он использовал результаты наблюдений за затмениями одного из спутников планеты Юпитер (рис. 228). Астрономы имеют возможность наблюдать за затмениями спутника Юпитера большую часть года, и происходят эти затмения часто (каждые двое суток). Ремер обнаружил, что промежуток времени между двумя затмениями непостоянен. Учёный объяснил это тем, что за время между двумя затмениями спутника Юпитера Земля успевает переместиться по своей орбите. Поэтому свету, отражённому от спутника Юпитера, требуется дополнительное время для прохождения этого добавочного расстояния.

Результат, полученный Ремером, имел принципиально важное значение, так как в то время среди учёных существовало два противоположных мнения о скорости света. Одни учёные полагали, что скорость света бесконечно велика и свет распространяется мгновенно. Другие же учёные считали скорость света конечной величиной. Ремер как раз и подтвердил вывод о конечной скорости распространения света.

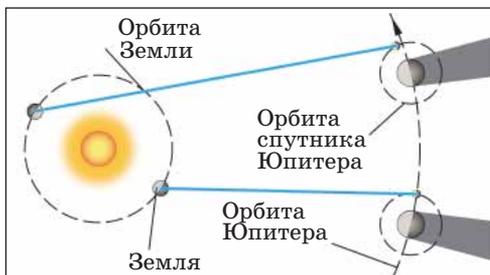


Рис. 228

рости распространения света.

В земных условиях скорость света впервые была измерена французским физиком А. Физо в 1849 году (рис. 229). Свет от источника проходил через прорезь в зубчатом колесе и, отразившись от зеркала, возвращался обратно. Если зубчатое колесо привести во вращение, то место прорези может занять зубец и свет не

вернется к наблюдателю. При увеличении частоты вращения на месте зубца вновь может оказаться промежуток между зубцами колеса, и отражённый свет вновь будет виден.

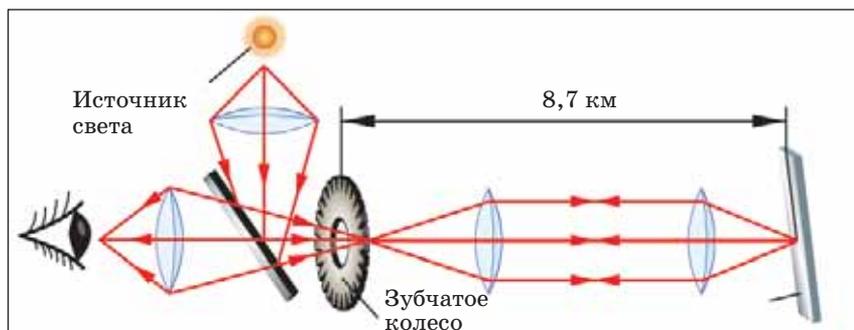


Рис. 229

В одном из опытов Физо расстояние между зеркалом и зубчатым колесом составляло 8,7 км, зубчатое колесо содержало 720 зубцов. Первое появление отражённого света наблюдалось при частоте 25 об/с. По этим данным было получено значение скорости света около $3 \cdot 10^8$ м/с. В дальнейшем скорость света в вакууме – одна из фундаментальных физических постоянных – измерялась многократно различными методами всё с более высокой точностью.

Радиоволны, инфракрасное излучение, видимое излучение, ультрафиолетовое излучение, рентгеновское излучение, гамма-излучение; **шкала электромагнитных излучений, скорость света $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с**, астрономический и лабораторный методы измерения скорости света.

29.1 ● Заполните обобщающую таблицу. (Подсказка. Воспользуйтесь таблицей «Шкала электромагнитных излучений», изображённой на цветной вклейке учебника, рис. 1).

Название диапазона излучения	Длина волны излучения, м	Частота излучения, Гц	Каким способом создаётся излучение	Основные характерные свойства	Примеры применения на практике

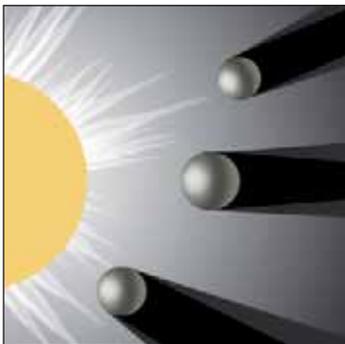
29.2 ● При изучении излучения нагретых тел установлено, что чем выше температура тела, тем меньше длина волны, которая соответствует максимуму излучения, испускаемого телом. Приведите примеры, подтверждающие данную закономерность.

29.3 ● Скорость света впервые попытался определить Г. Галилей. Два наблюдателя, снабжённые фонарями с задвижками, располагались в тёмную ночь на таком расстоянии друг друга, на каком ещё был виден свет фонаря. Когда первый наблюдатель открывал задвижку, второй, увидев свет, открывал свою. Почему этот эксперимент не дал результата и не позволил измерить скорость света?

29.4 ● Свет частотой $508,6 \cdot 10^{12}$ Гц в воздухе имеет длину волны 589,3 нм, а в воде 442,1 нм. Вычислить скорость света в воздухе и в воде. В какой среде скорость света больше? во сколько раз?

29.5 ● С какой скоростью электроны достигают анода рентгеновской трубки, если кинетическая энергия электрона при попадании в анод составляет 50 000 эВ? Электронвольт (эВ) – внесистемная единица измерения энергии. 1эВ равен энергии, которую приобретает электрон, пройдя ускоряющее напряжение в 1В. $1\text{эВ} = 1,60219 \cdot 10^{-19}$ Дж. Масса электрона $9,1095 \cdot 10^{-31}$ кг.

§ 30. ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА



Шар раскалённый, золотой
Пошлёт в пространство луч огромный,
И длинный конус тени тёмной
В пространство бросит шар другой.

А. Блок (1880–1921), русский поэт

Вы уже знаете, что видимый свет является электромагнитным излучением.

Геометрическая оптика. Световые явления известны людям издавна. Живя в мире разнообразных световых явлений, люди не могли не обратить внимания на восходы и закаты Солнца, появление радуги на небе или «лунной дорожки» на поверхности озера. Поэтому ещё до установления природы света учёными древнего мира накапливались результаты наблюдений и опытов, устанавливались законы, которым подчиняются световые явления. Так возник раздел физики, который получил название «Оптика».

Оптика – наука о свете и световых явлениях.

Первоначально основным понятием оптики было понятие светового луча – узкого пучка света, распространяющегося в прозрачной среде. В направлении светового луча происходит распространение световой энергии.

Учёными были установлены законы, которым подчиняются распространение световых лучей, их отражение от зеркальных поверхностей, преломление лучей при переходе из одной прозрачной среды в другую. Эти законы составили содержание геометрической оптики.

Геометрическая оптика – раздел оптики, в котором рассматривается распространение света на основе представлений о световых лучах без выявления физической природы света.

Закон прямолинейного распространения света. Закон прямолинейного распространения света был сформулирован древнегреческим математиком Евклидом более двух тысяч лет назад.

Свет в прозрачной однородной среде распространяется прямолинейно.

Такие геометрические понятия, как «луч», «прямая», возникли из представления о прямолинейности распространения света (рис. 230).

Одним из опытных доказательств закона прямолинейного распространения света является образование тени. Тень – область пространства за непрозрачным предметом, в которую не попадает свет (рис. 231).

Если использовать два небольших по размерам источника света, то образуется несколько теней (рис. 232). Одна из них – *полная тень* (область *A*). Это область пространства, куда не проникает свет ни от одного из двух источников света S_1 и S_2 .

Две другие области *B* и *C* – полутени. Это области пространства, куда не проникает свет от одного из двух источников – или S_1 , или S_2 . Наиболее светлая область *D* – область, куда проникает свет от обоих источников.



Рис. 230



Рис. 231

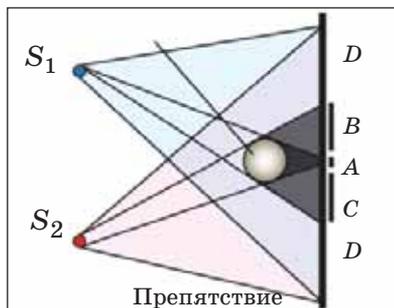


Рис. 232



30.1. Как изменится характер тени и полутени, отбрасываемой препятствием (рис. 232), если один из источников света погасить?

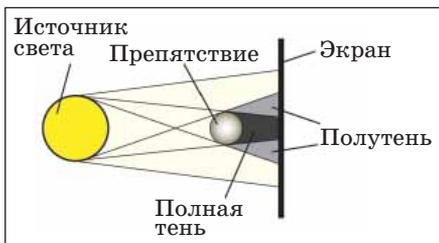


Рис. 233

Полутень можно получить, если использовать и один источник света, но значительных размеров (рис. 233). Ведь такой протяжённый источник света можно мысленно представить как множество небольших по размеру (точечных) источников света. Для каждого такого источника препятствие даёт на экране свою «персональную» тень, и в итоге образуются области полутени и даже полной тени.

Солнечные и лунные затмения.

Одним из самых зрелищных астрономических явлений, наблюдаемых людьми, являются солнечные и лунные затмения. Затмения также являются доказательством прямолинейности распространения света.

На рисунке 234 изображена схема солнечного затмения¹. В момент солнечного затмения Солнце, Луна и Земля располагаются на одной прямой. Тень от Луны падает на поверхность Земли. В тех местах на Земле, куда упала тень, Солнце не будет видно. На небе в этот момент вокруг чёрного диска Луны сияет лишь солнечная корона – наружные части раскалённой атмосферы Солнца (рис. 235).

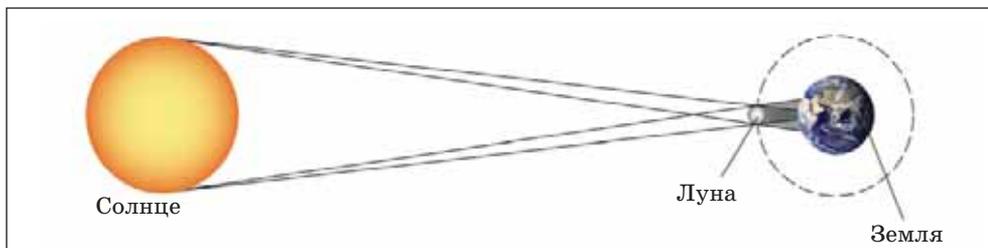


Рис. 234

¹ На рисунках 234–236 изображения Солнца, Луны, Земли выполнены без соблюдения масштаба.

Поэтому солнечное затмение длится непродолжительное время – всего несколько минут. В тех местах на Земле, куда падает полутень Луны, лишь часть Солнца закрыта Луной – здесь наблюдается *частичное солнечное затмение*.



30.2. Будет ли наблюдаться солнечное затмение за пределами области тени и полутени Луны?

На рисунке 236 изображена схема лунного затмения. В момент лунного затмения Солнце, Земля и Луна располагаются на одной прямой. Если Луна попадает в тень, отбрасываемую Землёй, то она не освещается Солнцем и будет казаться тёмной.

Рис. 235

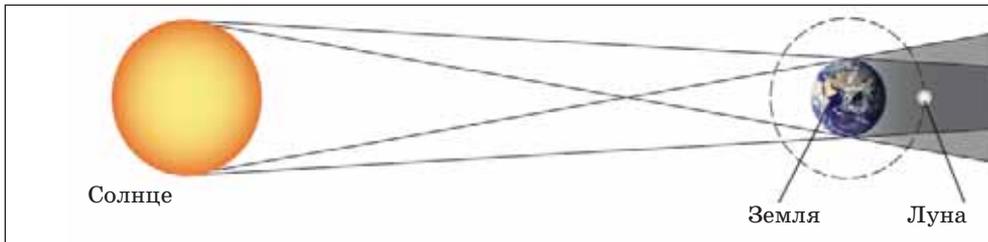


Рис. 236



30.3. На какой части Земли – дневной или ночной – возможно наблюдение лунного затмения?

К настоящему времени движения Земли и Луны тщательно изучены учёными-астрономами. Благодаря этому удалось рассчитать даты солнечных и лунных затмений на десятки и сотни лет вперёд. Например, известно, что в Москве полные солнечные затмения наблюдались в 1450, 1476 и 1887 гг. Следующее полное солнечное затмение в Москве придется на 16 октября 2126 г. Однако в прежние времена истинные научные знания были доступны не всем, а лишь избранным (например, жрецам). Тайные знания в таких условиях становились пружинами власти, которые позволяли управлять людьми.

Оптика, световой луч, геометрическая оптика, закон прямолинейного распространения света, тень, полная тень, полутень, солнечные и лунные затмения.

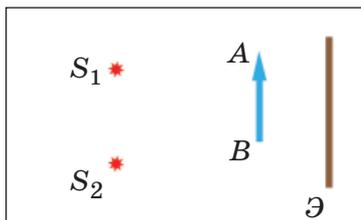


Рис. 237



Рис. 238

30.1 ● На рисунке 237 показано положение источников света S_1 и S_2 малых размеров и предмета АВ. Сделайте чертёж в тетради и укажите на экране Э области тени и полутени. Построение обосновать.

30.2 ● В романе "Фараон" польского писателя Б. Пруса описывается жизнь Древнего Египта, противостояние молодого фараона и всемогущих жрецов. Фараон стягивает к храмам войска. Секретные же агенты жрецов подстрекают толпу на штурм храмов. И в момент штурма происходят следующие события.

«Несмотря на полдень тьма сгущалась. Но ярость толпы была уже так велика, что мало кто замечал эти перемены...

...Внезапно где-то над храмом прозвучал голос, который, казалось, не мог принадлежать человеку:

– Отвращаю лик свой от проклятого народа, и да низойдёт на землю тьма!

И случилось ужасное. С каждым словом Солнце утрачивало свою яркость... При последнем же стало темно, как ночью. В небе зажглись звёзды, а вместо Солнца стоял чёрный диск в кольце огня...

Толпа в ужасе бежала, пала ниц и молила о пощаде.»

Какое явление и каким образом было использовано древнеегипетскими жрецами в ситуации, описываемой в романе?

30.3 ● Можно ли наблюдать солнечное затмение, находясь на других планетах Солнечной системы? Ответ обосновать.

30.4 ● В одном из рассказов Конан Дойля «Обряд дома Месгрейвов» описывается старинный документ, содержащий следующие строки:

«Где было Солнце? – Над дубом.

Где была тень? – Под вязом.»

Герой рассказа знаменитый сыщик Шерлок Холмс сообразил, что эти слова являются ключом к разгадке расследуемого им происшествия. «Я связал вместе два удилища, что дало мне шесть футов, и мы с моим клиентом отправились обратно к тому месту, где рос вяз. Солнце как раз касалось в эту минуту вершины дуба. Я воткнул свой шест в землю, отметил направление тени и измерил её. В ней было девять футов. (1 британский фут = 0,305 м.)

Какую тень отбрасывал бы старый вяз, если высота дерева составляла 64 фута?

30.5 ● При изучении звёздного неба для наблюдения на небосводе нужной звезды применяют так называемую звёздную указку (рис. 238). При использовании указки руководитель наблюдений наводит на звезду одну из реек указки. Почему остальные наблюдатели, смотрящие вдоль других реек, параллельных рейке руководителя, увидят ту же самую звезду?

§ 31. ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА



Как аукнется, так и откликнется.

Русская пословица

Вам уже известно, что законы распространения света изучает геометрическая оптика.

Закон отражения света. В предыдущем параграфе было отмечено, что в прозрачной однородной (то есть везде одинаковой) среде свет распространяется прямолинейно. А что же происходит, если на пути света встречается некоторое тело – преграда? В этом случае часть света отражается от поверхности тела, возвращаясь в ту же среду, из которой свет шёл¹. Такое явление называется *отражением света*.

Выясним, каким закономерностям подчиняется явление отражения света. Для этого используем специальный прибор (рис. 239). В приборе имеется осветитель 1, с помощью которого создаётся узкий световой пучок 2. Световой пучок скользит по круглому экрану – диску 3. По краю диска нанесена градусная шкала. В центре диска крепится преграда 4, от которой и происходит отражение света.

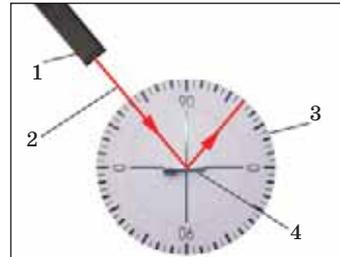


Рис. 239

Укрепим в центре диска стекло или гладкую полированную полоску металла. Направим световой луч от осветителя к центру диска. Мы увидим, что падающий луч отражается от гладкой (зеркальной) поверхности. Мысленно восстановим из точки падения луча перпендикуляр OO' к отражающей поверхности (рис. 240).

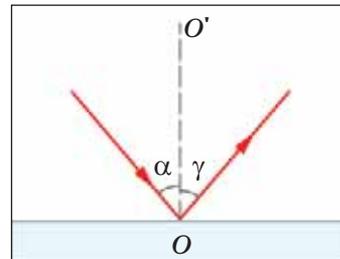


Рис. 240

¹ При попадании на поверхность тела одновременно часть световой энергии поглощается веществом. При этом происходит превращение световой энергии во внутреннюю энергию тела.

Назовём *угол α между падающим лучом и перпендикуляром*, восстановленным к отражающей поверхности в точке падения, *углом падения*. Угол γ между отражённым лучом и перпендикуляром, восстановленным к отражающей поверхности в точке падения, назовём *углом отражения*.

Передвигая осветитель, будем менять угол падения. При этом угол отражения также будет меняться. Но всякий раз, измеряя эти углы, мы обнаружим, что они равны. Одновременно на опыте видно, что луч падающий, луч отражённый и перпендикуляр, восстановленный к отражающей поверхности в точке падения, лежат в одной плоскости (в плоскости экрана).

Таким образом, отражение света происходит по следующему закону:

Угол отражения равен углу падения.
 Луч падающий, луч отражённый и перпендикуляр, восстановленный к отражающей поверхности в точке падения, лежат в одной плоскости.

Продолжим рассмотрение явления отражения, но теперь на пути светового луча поместим шероховатую поверхность, например полоску белой бумаги (рис. 241). Мы увидим, что отражённый световой луч исчез. Вместо этого вокруг точки падения светового луча на отражающую поверхность наблюдается пятно света, рассеянного по всем направлениям.

Отражение света в случае гладких поверхностей получило название зеркального отражения. Отражение же света, происходящее от шероховатых поверхностей, называют рассеянным отражением.

Пусть на гладкую поверхность падает пучок света, в котором световые лучи параллельны (рис. 242). Тогда в соответствии с законом отражения света и отражённые световые лучи также будут параллельны друг другу. В итоге ширина светового пучка не изменяется.

При рассеянном же отражении света нет отчётливо выраженного отражённого луча (рис. 241).



31.1. Свидетельствуют ли результаты опыта по отражению света от шероховатых поверхностей о нарушении закона отражения света?



Рис. 241

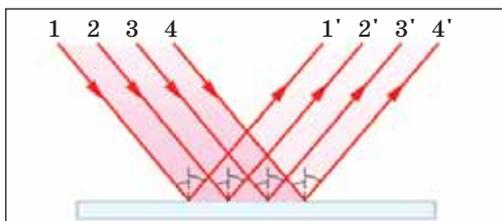


Рис. 242

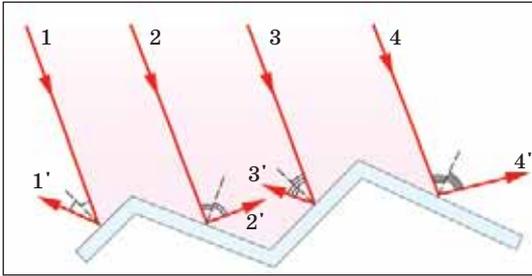


Рис. 243



Рис. 244

Обратимся к рисунку 243, на котором изображены неровности отражающей поверхности (в увеличенном масштабе). Пусть на эту шероховатую поверхность падает пучок света, в котором световые лучи параллельны. Каждый из этих световых лучей будет отражаться в соответствии с законом отражения.



31.2. Равны ли углы падения для лучей 1, 2, 3, 4 (рис. 243)?

Отражённые лучи $1'$, $2'$, $3'$, $4'$ (рис. 243) будут иметь различные углы отражения. По этой причине отражённые лучи не параллельны друг другу, и происходит рассеяние света.

Рассеянное отражение весьма важно. Ведь только благодаря явлению рассеянного отражения свет, отражённый от различных тел, может достигать органов зрения людей и вызывать зрительное восприятие. Не будь рассеянного отражения, мы могли бы видеть только самосветящиеся предметы – источники света.

Плоское зеркало. Часто мы встречаемся со случаем, когда отражение света происходит от плоской поверхности – плоского зеркала. Выясним, как возникает изображение в плоском зеркале, какие особенности оно имеет (рис. 244).

Пусть человек смотрит в зеркало (непосредственно сам источник света он не видит – источник света закрыт от него преградой). Что происходит, если лучи света, отражённые от зеркала, попадают в орган зрения человека – глаз¹? Световая энергия воздействует на клетки зрительного нерва. В них возникают электрические импульсы, которые по волокнам зрительного нерва передаются в кору головного мозга.

¹ Строение глаза рассматривается в § 35 учебника.

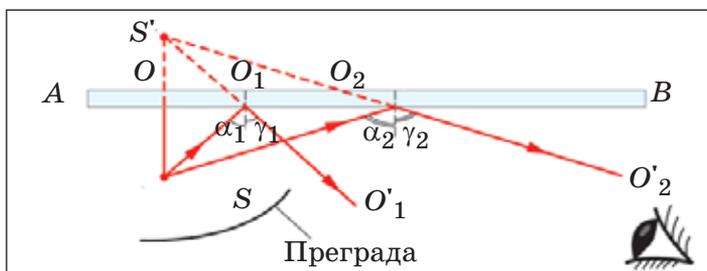


Рис. 245

Рассмотрим рисунок 245: AB – плоское зеркало, а в точке S помещён источник света. Построим ход двух произвольных световых лучей SO_1 и SO_2 , падающих на зеркало. Лучи отражаются от зеркала в соответствии с законом отражения.

$$\gamma_1 = \alpha_1, \quad \gamma_2 = \alpha_2.$$

Отражённые лучи O_1O_1' и O_2O_2' являются расходящимися ($\alpha_1 \neq \alpha_2$ и $\gamma_1 \neq \gamma_2$).

При этом мозг человека «знает», что световые лучи распространяются по прямым линиям. Поэтому мозг человека совершает «привычную операцию» и мысленно продолжает прямолинейный ход отражённых световых лучей (O_1O_1' и O_2O_2' на рисунке 245). В итоге человек воспринимает отражённые лучи как исходящие из одной точки S' – точки, которая находится за зеркалом (рис. 245). Эту точку S' , из которой как будто бы исходят световые лучи, называют *мнимым изображением*¹ точки S в плоском зеркале.

Ясно, что и изображение любого предмета в плоском зеркале также будет мнимым, так как изображение предмета образуется совокупностью изображений отдельных точек предмета.

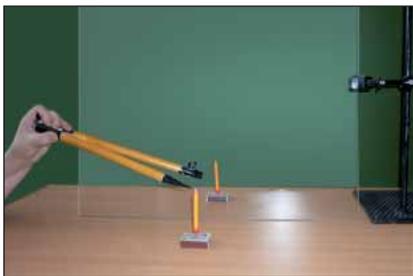


Рис. 246

По рисунку 245, пользуясь признаками равенства треугольников, несложно доказать, что

$$SO = S'O.$$

Таким образом, *плоское зеркало даёт мнимое, симметрично расположенное изображение* (рис. 246).

¹ Изображение S' называют мнимым, так как фактически световая энергия в точку S' не поступает.

Лабораторная работа «Изучение явления отражения света»

Оборудование: плоское зеркало, источник тока, лампочка на подставке, соединительные провода, экран со щелью, транспортир.

Задание 1. Проверка закона отражения света.

1. На лист бумаги поставьте зеркало, направьте на него узкий пучок света и наблюдайте отражение света (рис. 247).

2. Обведите карандашом зеркало, отметьте ход падающего и отраженного световых лучей. Проведите перпендикуляр к плоскости зеркала в точке падения света.

3. Измерьте угол падения α и угол отражения γ .

4. Повторите опыт несколько раз, меняя угол падения. Заполните таблицу.

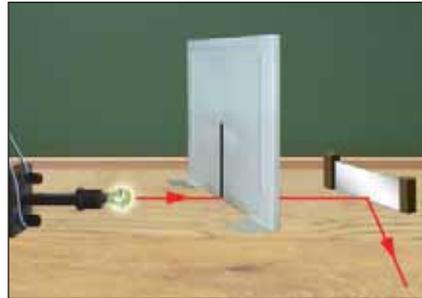


Рис. 247

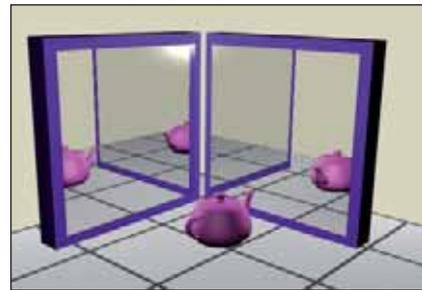


Рис. 248

Угол падения α , °	75	60	45	30	15	0
Угол отражения γ , °						

5. Сделайте вывод, каково соотношение между углом отражения и углом падения света.

Задание 2. Пронаблюдайте изображение предмета, даваемого плоским зеркалом. Убедитесь, что изображение является мнимым, равно по размерам предмету и располагается симметрично по отношению к зеркалу.



Задание 3. Пронаблюдайте изображение в двух зеркалах, сложенных под некоторым углом φ (рис. 248). Определите число изображений в обоих зеркалах при разных значениях угла между ними. Результаты наблюдений занесите в таблицу.

Угол φ между зеркалами, °	90	60	45	30
Число изображений в зеркалах				

Угол падения, угол отражения, закон отражения света, зеркальное отражение, рассеянное отражение, плоское зеркало, мнимое изображение, характеристика изображения, даваемого плоским зеркалом.

31.1 ● На рисунке 249 показаны световые лучи 1, 2, 3, падающие на зеркало ABC. Сделайте чертёж в тетради и укажите дальнейший ход световых лучей. Построение обосновать. Укажите, сколько градусов составляют углы падения и отражения для данных световых лучей.

31.2 ● Угол между отражённым и падающим лучами составляет 50° . Чему равен угол падения? угол отражения? Сделайте чертёж. Ответ обосновать.

31.3 ● На рисунке 250 показан зеркало AB и предмет MN. Сделайте чертёж в тетради и постройте изображение, даваемое зеркалом.

31.4 ● Почему в качестве киноэкрана нельзя использовать зеркало?

31.5 ● Человек приближается к плоскому зеркалу со скоростью $0,3$ м/с. С какой скоростью он сближается со своим изображением?

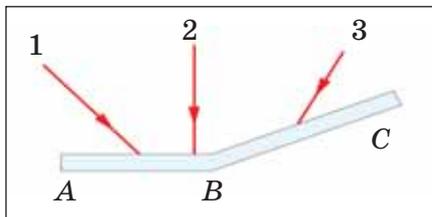


Рис. 249

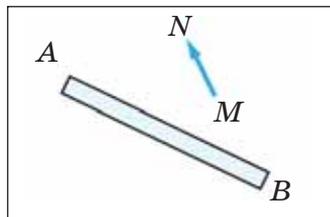


Рис. 250

§ 32. ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА. ЯВЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ



Цветное коромысло через реку повисло.

Загадка

Вам уже известно, что законы распространения света изучает геометрическая оптика.

Закон преломления света. В предыдущем параграфе было отмечено, что если на пути света оказывается преграда, то свет может отразиться. А что происходит, если преграда будет прозрачным телом?

В этом случае часть света проходит в следующую среду, меняя при этом направление своего распространения. Такое явление называют *преломлением света*.

Выясним, каким закономерностям подчиняется явление преломления света. Для этого используем уже известный нам прибор для изучения законов геометрической оптики. Укрепим в центре диска стеклянный полуцилиндр. Направим световой луч от осветителя к центру диска. Мы увидим, что падающий луч не только отражается на границе «воздух – стекло», но и преломляется (рис. 251).

К границе раздела двух сред «воздух – стекло» в точке падения луча мысленно восстановим перпендикуляр $O'O''$.



32.1. Как называют угол между падающим лучом и перпендикуляром, восстановленным к границе раздела двух сред в точке падения?

Назовем *углом β между преломленным лучом и перпендикуляром*, восстановленным к границе раздела двух сред в точке падения, *углом преломления* (рис. 252). Из опыта видно, что луч падающий, луч преломлённый и перпендикуляр, восстановленный к границе раздела двух сред в точке падения, лежат в одной плоскости (в плоскости экрана).

Передвигая осветитель, будем менять угол падения α . При этом угол преломления β также будет меняться. Всякий раз, измеряя эти углы, мы обнаружим, что *при переходе света из воздуха в стекло угол преломления меньше угла падения*. И только если падающий луч перпендикулярен поверхности (угол падения равен нулю), преломление света не происходит (угол преломления также равен нулю).

Преломление света происходит и на границе «воздух – вода», в этом случае угол преломления также меньше угла падения. Например, при угле падения 45° угол преломления равен 32° (рис. 253).



Рис. 251

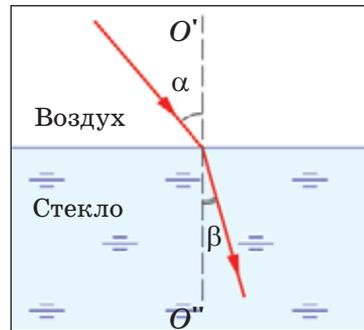


Рис. 252

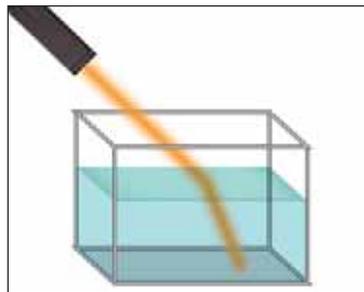


Рис. 253

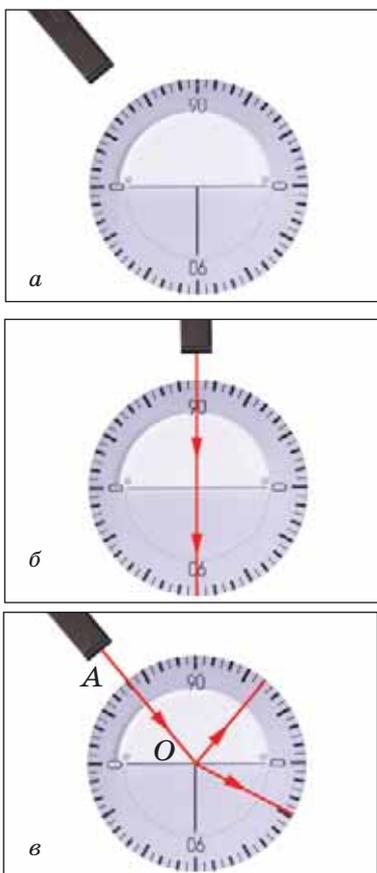


Рис. 254

луч света вдоль радиуса полуцилиндра. При этом на границе «воздух – стекло» (точка A на рисунке 254, в) преломление света не происходит. Почему? Вспомним факт, известный из геометрии: радиус, проведённый в точку касания, перпендикулярен касательной. Следовательно, угол падения светового луча на границе «воздух – стекло» (точка A) равен нулю. Поэтому «радиальный» световой луч не меняет направление. Пройдя через стекло, световой луч достигает границы «стекло – воздух» (точка O на рис. 254, в) и преломляется.

Передвигая осветитель, будем менять угол падения α . При этом угол преломления β также будет меняться. Всякий раз, измеряя эти углы, мы обнаруживаем, что *при переходе света из стекла в воздух угол преломления больше угла падения.*

Опыты показывают, что при переходе света из менее плотной прозрачной среды в более плотную прозрачную среду свет меняет направление распространения – преломляется.

(Слова «менее плотная прозрачная среда» и «более плотная прозрачная среда» требуют уточнения. В данном случае речь идёт не о плотности вещества тех сред, в которых распространяется свет, а о сравнении их оптических свойств. Из двух сред оптически более плотной считается та среда, где скорость распространения света меньше.)

Пронаблюдаем явление преломления при переходе света из более плотной среды в менее плотную, например из стекла в воздух. Вновь используем прибор для изучения законов геометрической оптики, но теперь расположим стеклянный полуцилиндр иным образом (рис. 254, а).

Направив луч света перпендикулярно поверхности стекла, мы увидим, что преломление света не происходит (рис. 254, б). Как и в предыдущих опытах, если угол падения равен нулю, то и угол преломления равен нулю.

Передвинем осветитель и направим луч света вдоль радиуса полуцилиндра. При этом на границе «воздух – стекло» (точка A на рисунке 254, в) преломление света не происходит. Почему? Вспомним факт, известный из геометрии: радиус, проведённый в точку касания, перпендикулярен касательной. Следовательно, угол падения светового луча на границе «воздух – стекло» (точка A) равен нулю. Поэтому «радиальный» световой луч не меняет направление. Пройдя через стекло, световой луч достигает границы «стекло – воздух» (точка O на рис. 254, в) и преломляется.

Передвигая осветитель, будем менять угол падения α . При этом угол преломления β также будет меняться. Всякий раз, измеряя эти углы, мы обнаруживаем, что *при переходе света из стекла в воздух угол преломления больше угла падения.*

Преломление света происходит и на границе «вода – воздух», в этом случае угол преломления также больше угла падения (рис. 255).

При переходе света из более плотной среды в менее плотную среду наблюдается ещё одно интересное явление. Увеличивая угол падения, мы обнаруживаем, что угол преломления, возрастая, достигает 90° . (Этот случай изображён на рис. 256, а.) И если угол падения ещё увеличить, то свет не преломляется, а *полностью отражается, возвращаясь в первую среду*.

Это явление получило название *явление полного отражения света*. Явление полного отражения наблюдается только в том случае, если световой луч, распространяясь в прозрачной среде, достигает границы менее плотной прозрачной среды. И явление возможно только в том случае, если угол падения светового луча больше некоторого предельного значения угла падения.

Например, когда свет, преломляясь, переходит из воды в воздух, предельный угол составляет 49° . При угле падения больше, чем предельный угол, световой луч отражается от границы «вода – воздух» как от зеркала. Преломлённого луча нет, свет полностью отражается, возвращаясь в воду (рис. 256, б).

Таким образом, при преломлении света обнаруживаются следующие закономерности:

- Угол преломления увеличивается с ростом угла падения.
- При переходе света из менее плотной прозрачной среды в более плотную прозрачную среду угол преломления меньше угла падения.
- При переходе света из более плотной прозрачной среды в менее плотную прозрачную среду угол преломления больше угла падения. Если угол падения превышает некоторое предельное значение, то свет не преломляется, а наблюдается его полное отражение.
- Луч падающий, луч преломлённый и перпендикуляр, восстановленный к границе раздела двух сред в точке падения, лежат в одной плоскости.

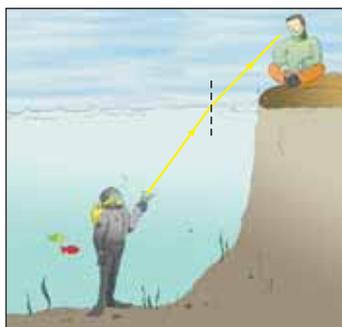
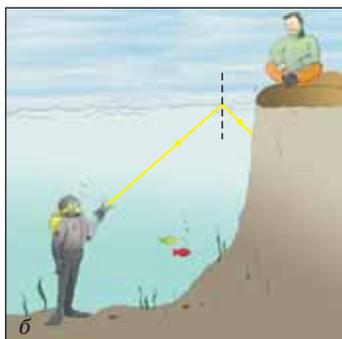


Рис. 255



а



б

Рис. 256

Выяснив основные закономерности явления преломления света, зададим себе и главный вопрос – какова *причина* этого явления. Почему свет преломляется – меняет направление распространения при переходе из одной прозрачной среды в другую? Учёные-физики установили: **преломление света объясняется тем, что скорость света в различных средах неодинакова**. Например, скорость света в стекле меньше, чем в воде, а скорость света в воде меньше, чем в воздухе. Именно различия в скорости света и приводят к преломлению света на границе раздела двух прозрачных сред.

Дисперсия света. В 1666 году великим английским физиком И. Ньютоном было сделано замечательное открытие, связанное с преломлением света. Ньютон направил узкий пучок света на стеклянную призму (рис. 257). При прохождении белого света через призму свет не только преломляется, но и разделяется на отдельные цветные лучи. В результате после призмы образовался цветной «веер» – широкая разноцветная полоска, называемая спектром¹. В спектре выделяют следующие цвета: красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий, фиолетовый².

По результатам опыта Ньютон делает важнейший вывод о составе и свойствах света.

Белый свет состоит из лучей различной преломляемости, и лучи разной преломляемости дают разные цвета³.

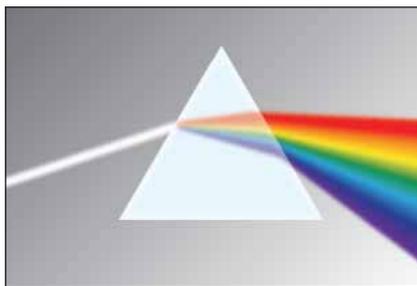


Рис. 257

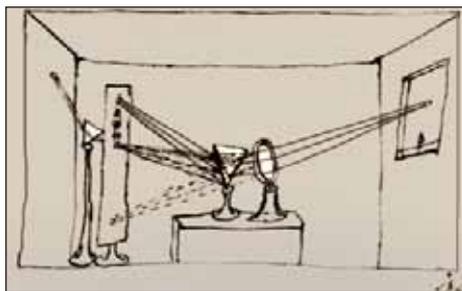


Рис. 258. Воспроизведён рисунок, собственноручно выполненный Ньютоном

¹ От латинского *spectrum* – видение.

² Существуют специальные фразы, позволяющие запомнить чередование цветов в спектре. Например: **Каждый Охотник Желает Знать, Где Сидит Фазан** или: **Как Однажды Жан-Звонарь Головой Свалил Фонарь**. (Сам Ньютон выделял в спектре пять цветов: красный, жёлтый, зелёный, синий и пурпурный.)

³ Цвет – одно из свойств предметов, воспринимаемое как осознанное зрительное ощущение.

Фиолетовые лучи преломляются больше всего, тогда как красные лучи – наиболее «стойкие» и испытывают наименьшее преломление.

Для изучения спектра Ньютон проделал узкое отверстие в экране, и тонкий пучок лучей определённого цвета направил на вторую призму (рис. 258). И опыт показал следующее. Этот «цветной» тонкий пучок света преломляется призмой, причём степень преломления зависит от цвета. Дальнейшего же расщепления пучка света не происходит.

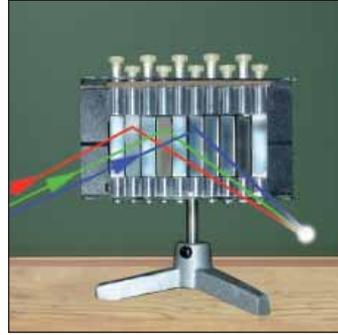


Рис. 259

С современной точки зрения, когда нам известна электромагнитная природа света, результаты оптических опытов Ньютона объясняются следующим образом. В вакууме скорости электромагнитных волн с любой длиной волны одинаковы и равны скорости света ($c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с). В веществе же скорости распространения электромагнитных волн с различными длинами волн неодинаковы. Преломление света, как уже упоминалось в данном параграфе, объясняется различием скорости света в разных средах. Значит, для электромагнитных волн (света), имеющих различную скорость распространения в веществе, и степень преломления будет различна.

Зависимость степени преломления света от длины волны света называется явлением дисперсии¹.

Белый свет является совокупностью электромагнитных волн, имеющих различные длины волн. При преломлении света в призме благодаря явлению дисперсии происходит разделение света на отдельные волны – образуется спектр. Если, например, с помощью зеркал вновь собрать отдельные лучи вместе на экране, то мы опять получим белый свет. Схема такого опыта изображена на рисунке 259.

Каждой длине волны соответствует своё определённое цветовое восприятие. Так, красный цвет дают световые волны длиной 0,66 мкм, зелёный – волны длиной 0,55 мкм, а фиолетовый – волны длиной 0,40 мкм. Длина световой волны очень мала. Представьте, что длина световой волны увеличена до размеров ручки, которой вы пишете. При таком увеличении длина ручки составила бы около 50 км.

¹ От латинского *dispersio* – рассеяние.



Рис. 260

Открытие дисперсии света позволило Ньютону объяснить многие оптические явления. *Во-первых, образование радуги.* Радуга возникает тогда, когда солнце освещает завесу дождя (рис. 260). Свет преломляется в каплях дождя, но ввиду дисперсии степень преломления зависит от цвета. Поэтому мы и видим различные цвета в несколько различных направлениях – образуется радуга. *Во-вторых, цвета окружающих человека тел.* При падении

белого света на поверхность какого-нибудь тела часть длин может поглощаться, а часть отражаться. Поэтому мы и воспринимаем такую поверхность как имеющую определённый цвет. Светофильтры, если они пропускают не все лучи, входящие в состав белого света, также воспринимаются как обладающие определённым цветом.



32.2. Каким цветом будет восприниматься зелёная трава, если смотреть на неё через красный светофильтр?

Угол преломления, явление полного отражения света, закономерности, которым подчиняется явление преломления света, физическая причина преломления света, опыт Ньютона по разложению белого света в спектр, КОЖЗГСФ, явление дисперсии, образование радуги, цвета тел.

32.1 ● На рисунке 261 показаны световые лучи 1, 2, 3, падающие на поверхность водоёма. Сделайте чертёж в тетради и изобразите примерный ход световых лучей. Построение обосновать.

32.2 ● Проведя построение хода светового луча, обоснуйте утверждение: «Световой луч, проходя через стеклянную призму, отклоняется к основанию призмы».

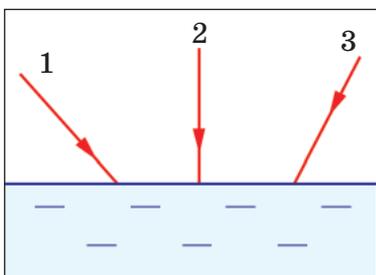


Рис. 261

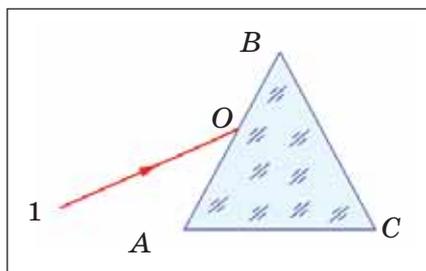


Рис. 262

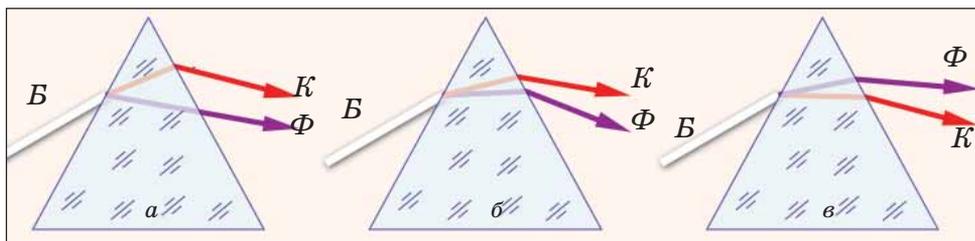


Рис. 263

(Подсказка. Пусть световой луч 1 падает на боковую грань АВ призмы (рис. 262). В точке падения светового луча (точка О на рисунке 262) восстановите перпендикуляр к преломляющей грани АВ на границе «воздух – стекло». Изобразите примерный дальнейший ход светового луча в призме после его преломления на грани АВ. Рассмотрите преломление светового луча при достижении им преломляющей грани ВС на границе «стекло – воздух».)

32.3 ● На каком из рисунков 263, а–в верно показан ход световых лучей при преломлении в призме? (Б – белый свет, К – красный свет, Ф – фиолетовый свет). Ответ обосновать.

32.4 ● На рисунке 264 приведён график зависимости угла преломления β от угла падения α при преломлении света на границе «воздух – вода». На сколько изменяется угол преломления при увеличении угла падения от 20° до 70° ? Во сколько раз изменяется угол преломления при указанном изменении угла падения?

32.5 ● В таблице приведены значения длин волн и скоростей различных световых лучей при прохождении их через стеклянную призму.

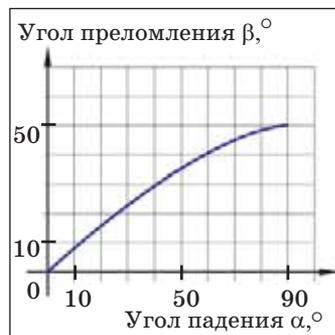


Рис. 264

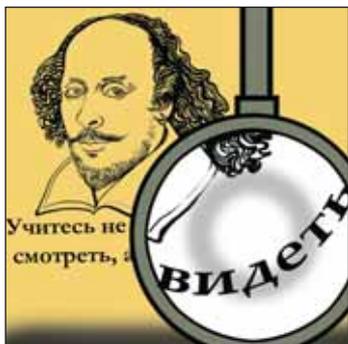
Свет	Длина волны, мкм	Скорость света в стекле, км/с
Красный	0,66	198 100
Жёлтый	0,59	197800
Зелёный	0,55	197 500
Синий	0,48	196900
Фиолетовый	0,40	195 800

Зная результаты опытов по дисперсии света (рис. 257) и проанализировав данную таблицу, выскажите предположение о том, как степень преломления света связана с длиной волны и скоростью света в стекле.

§ 33. ЛИНЗЫ

Учитесь не смотреть, а видеть.

*Уильям Шекспир (1564–1616),
выдающийся английский драматург и поэт*



Вы уже знакомы с явлением преломления света.

Собирающие и рассеивающие линзы.

Законы геометрической оптики позволяют конструировать и рассчитывать действие различных оптических приборов – от гигантских телескопов до очков. Основной деталью многих оптических приборов являются линзы.

Линзой называют прозрачное тело, ограниченное сферическими поверхностями (рис. 265). Одна из поверхностей может быть и плоской (рис. 266). Линию, проходящую через центры поверхностей и центр линзы, называют *главной оптической осью линзы* (линии O_1O_2 на рисунке 265, линии O_1O на рисунке 266). По внешнему виду линзы можно подразделить на *выпуклые* и *вогнутые*.



33.1. Какие из линз, сечения которых изображены на рисунках 265 и 266, являются выпуклыми? какие вогнутыми?

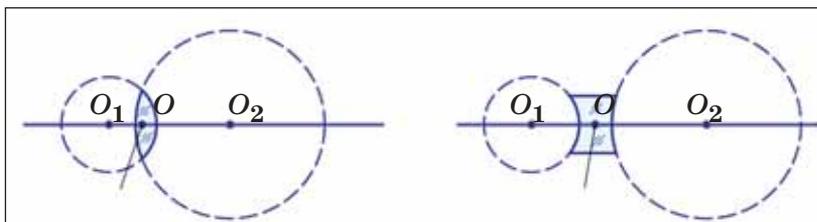


Рис. 265

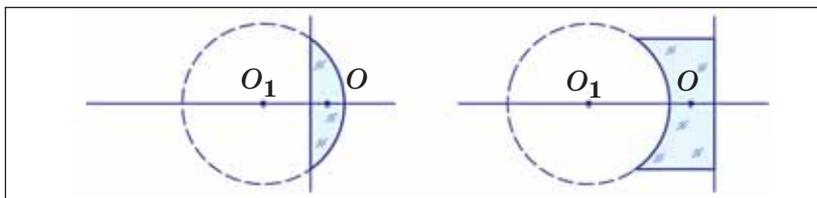


Рис. 266

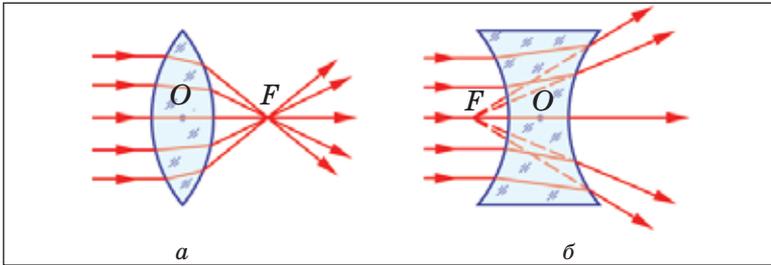


Рис. 267

По оптическим же свойствам линзы подразделяют на **собирающие** и **рассеивающие**.

Направим параллельный пучок световых лучей вдоль главной оптической оси линзы (рис. 267, а, б). Мы убедимся, что *выпуклая стеклянная линза будет собирающей, а вогнутая – рассеивающей*.

При прохождении света через собирающую линзу световые лучи, параллельные главной оптической оси, собираются в одной точке на главной оптической оси. Эту точку называют *главным фокусом линзы* F (рис. 267, а). Фокусов у линзы два – по одному с каждой стороны линзы. На рисунке 268, а изображено условное обозначение собирающей линзы, её главная оптическая ось и фокусы.

При прохождении света через рассеивающую линзу световые лучи, параллельные главной оптической оси, дают расширяющийся пучок лучей. Но если мысленно продолжить преломленные световые лучи, то продолжения лучей сойдутся в одной точке на главной оптической оси. Эту точку называют *мнимым главным фокусом рассеивающей линзы* F (рис. 267, б). На рисунке 268, б изображены условное обозначение рассеивающей линзы, её главная оптическая ось и мнимые фокусы.

Расстояние OF от центра линзы до её фокуса получило название *фокусного расстояния линзы*. Фокусное расстояние линзы, как и точку фокуса, принято обозначать буквой F .

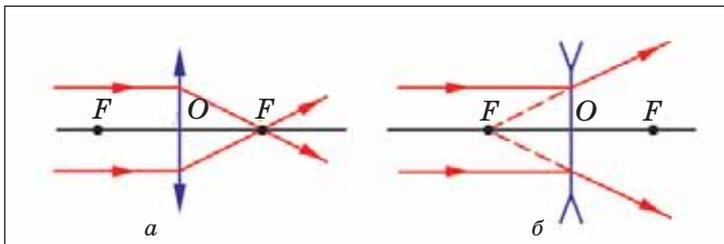


Рис. 268

Помимо фокусного расстояния преломляющие свойства линз характеризуют *оптической силой*. Чем больше преломляющее действие линзы, чем «круче» преломляются световые лучи, тем больше оптическая сила линзы. Оптическая сила линзы – это величина, обратная её фокусному расстоянию. Оптическую силу линзы обозначают буквой D и рассчитывают по формуле

$$D = \frac{1}{F} .$$

Единица измерения оптической силы называется диоптрия (от греческого *dioptr̄* – видящий насквозь), сокращённо – дп.



33.2. Чему равно фокусное расстояние линзы, имеющей оптическую силу 1 дп?

Принято считать оптическую силу собирающей линзы положительной величиной, а оптическую силу рассеивающей линзы – отрицательной величиной.



33.3. Какими – собирающими или рассеивающими – являются линзы, имеющие оптическую силу -3 дп, $+2$ дп?

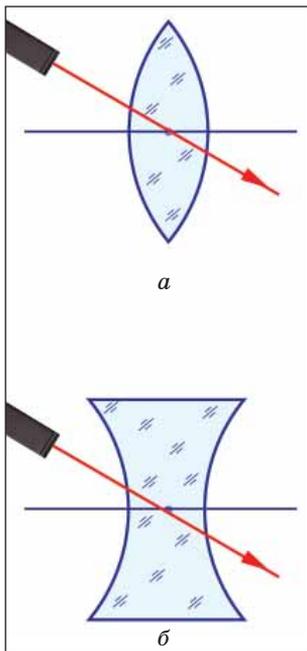


Рис. 269

Изображения, даваемые линзами. Всем известно, что, используя линзу, можно получить изображение. Если линза собирающая, то с её помощью можно получить изображение предмета на экране. Изображение на экране возникает в точке пересечения световых лучей. Такое изображение, даваемое непосредственно самими световыми лучами, называют *действительным изображением*. В случае рассеивающей линзы, которая даёт расходящиеся лучи, изображение может быть только мнимым.

Выясним, как определить местонахождение изображения предмета, даваемого линзой. Изображение предмета складывается из изображений отдельных его точек. Для того чтобы определить местонахождение изображения отдельной точки, нужно использовать два луча, исходящие из этой точки предмета; построить ход этих лучей через линзу и определить точку их пересечения. Это точка пересечения лучей и будет искомым изображением.

Ход одного луча через линзу нам уже известен – *световой луч, параллельный главной оптической оси, преломляется линзой так, что проходит через её фокус. (В случае рассеивающей линзы через фокус проходит не сам преломленный луч, а его продолжение.)*

В качестве второго луча, необходимого для построения изображения, используем луч, проходящий через центр линзы. На опыте легко убедиться, что *световой луч, проходящий через центр линзы, не меняет своего направления* (рис. 269, а, б).

Выполним построение изображения для случая рассеивающей линзы (рис. 270). Пусть AB – предмет, который рассматривается через рассеивающую линзу, находящуюся в точке O . Проведём через центр линзы луч BO ; этот луч, проходя через линзу, не изменит своего направления. Луч BC , параллельный главной оптической оси, проходя через линзу, преломится так, что мысленное продолжение луча пройдёт через фокус линзы F .

Как и в случае плоского зеркала, глаз и мозг человека мысленно «соберут» расходящиеся лучи. И наблюдатель будет считать, что лучи исходят из точки B' – точки мнимого изображения. Таким образом, с помощью рассеивающей линзы получают мнимое уменьшенное прямое (неперевернутое) изображение $A'B'$ предмета AB .

Мнимое изображение даёт и собирающая линза, если расстояние от линзы до предмета меньше её фокусного расстояния (рис. 271). В этом случае наблюдатель увидит мнимое увеличенное прямое изображение предмета.

Если расстояние от собирающей линзы до предмета больше её фокусного расстояния, то лучи, преломленные линзой, пересекаются. Поставив в точке пересечения лучей экран, можно будет наблюдать действительное изображение предмета.

Если расстояние от собирающей линзы до предмета больше фокусного расстояния, но меньше двух фокусных расстояний, то собирающая линза даёт действительное увеличенное перевёрнутое изображение предмета (рис. 272, а).

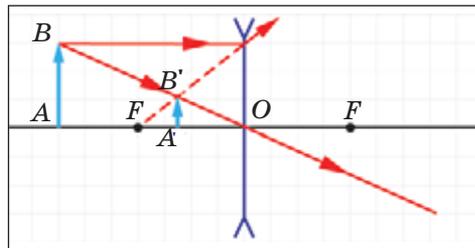


Рис. 270

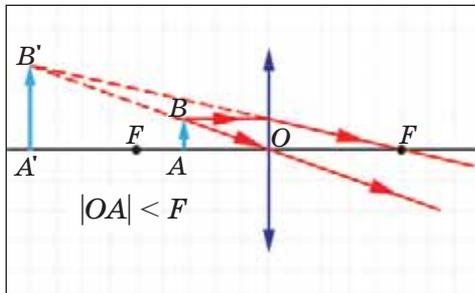


Рис. 271

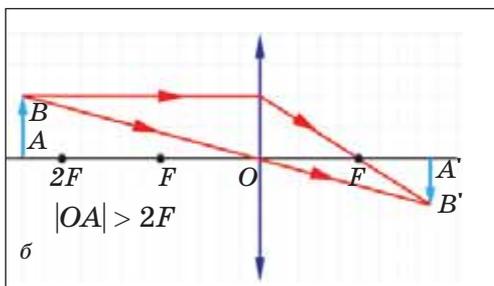
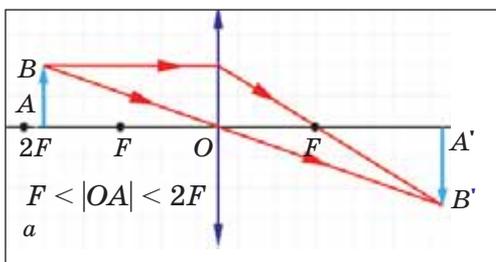


Рис. 272

Изображение на экране наблюдается только тогда, когда экран находится на определённом расстоянии от линзы. Если предмет передвинуть, удалив или приблизив его к линзе, то нужно будет передвинуть и экран, чтобы вновь получить изображение предмета. Следовательно, существует определённое соотношение между расстоянием от линзы до предмета a , расстоянием от линзы до изображения b , фокусным расстоянием линзы F .

Укажем это соотношение:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F}. \quad (33.1)$$

Величина, обратная фокусному расстоянию F , есть оптическая сила линзы D :

$$D = \frac{1}{F}.$$

Тогда

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = D. \quad (33.2)$$

Соотношения (33.1) и (33.2) называют формулой линзы. В таком виде формула применима для случая собирающей линзы.

Каким будет изображение в случае, если расстояние от собирающей линзы до предмета превышает два фокусных расстояния линзы? Из построения хода лучей видно, что в этом случае собирающая линза даёт действительное уменьшенное перевёрнутое изображение (рис. 272, б).

Формула линзы. Пусть с помощью собирающей линзы на экране получено изображение некоторого предмета (рис. 273).

Введём обозначения:

a – расстояние OA от линзы до предмета;

b – расстояние OA' от линзы до изображения;

F – фокусное расстояние линзы OF .



Приведём вывод формулы линзы. Рассмотрим треугольники AOB и $A'O'B'$ (рис. 273). Треугольники подобны (докажите это). Из подобия треугольников следует, что

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{OA'}{OA}.$$

Или, используя введённые ранее обозначения величин, имеем

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{b}{a}. \quad (33.3)$$

Рассмотрим треугольники OFC и $A'B'F$. Треугольники подобны (докажите это). Из подобия треугольников следует, что

$$\frac{A'B'}{OC} = \frac{FA'}{OF}.$$

Или, используя введённые ранее обозначения величин, имеем

$$\frac{A'B'}{OC} = \frac{b-F}{F}. \quad (33.4)$$

Легко доказать (докажите), что

$$AB = OC. \quad (33.5)$$

Тогда из соотношений (33.4) и (33.5) имеем

$$\frac{b}{a} = \frac{b-F}{F},$$

или

$$\frac{b}{a} = \frac{b}{F} - 1,$$

$$\frac{b}{a} + 1 = \frac{b}{F},$$

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F}.$$

Последнее соотношение и является формулой линзы.

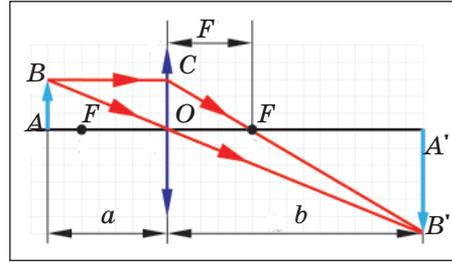


Рис. 273

Линзы: выпуклые и вогнутые, собирающие и рассеивающие; главная оптическая ось линзы, главный фокус линзы, мнимый главный фокус рассеивающей линзы; фокусное расстояние линзы, оптическая сила линзы, $D = \frac{1}{F}$, диоптрия (Дп); $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = D$.

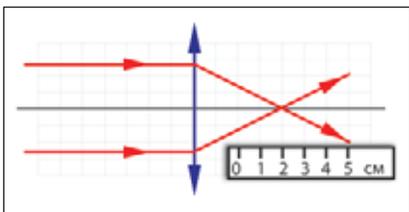


Рис. 274

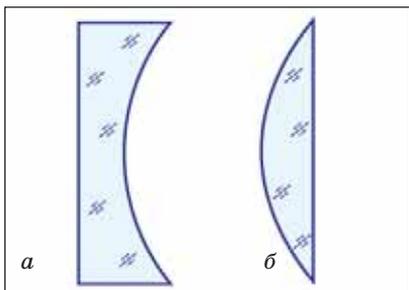


Рис. 275

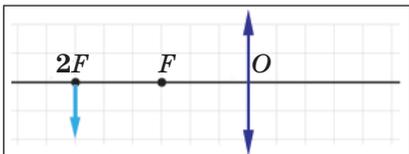


Рис. 276

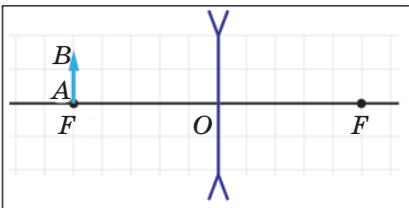


Рис. 277

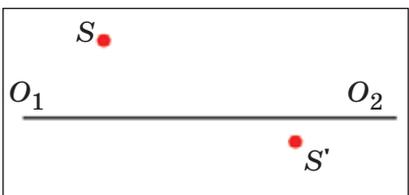


Рис. 278

33.1 ● В романе Ж. Верна «Таинственный остров» описывается, как герой романа Сайрес Смит смог разжечь костер. «Он показал ... прибор, заменивший ему линзу. Это были два стекла, снятые с часов ... Наполнив их водой и скрепив их края с помощью глины, Сайрес Смит сфабриковал настоящее зажигательное стекло, которое сосредоточило лучи солнца на охапке сухого мха и воспламенило его». Какова была оптическая сила изготовленной Сайресом Смитом линзы, если он держал её от сухого мха на расстоянии 7,5 см?

33.2 ● На рисунке 274 изображён ход световых лучей через собирающую линзу. Определите фокусное расстояние и оптическую силу линзы.

33.3 ● Выполняя лабораторную работу, ученик получил чёткое изображение спирали светящейся лампы накаливания на экране. Каково фокусное расстояние и оптическая сила линзы, если расстояние от линзы до лампы 40 см, а расстояние от линзы до экрана – 20 см?

33.4 ● Какую оптическую силу – положительную или отрицательную – будет иметь линзы, сечения которых изображены на рисунке 275, а, б?

33.5 ● Постройте изображение предмета, находящегося на расстоянии $2F$ от собирающей линзы (рис. 276). Охарактеризуйте изображение.

33.6 ● Постройте изображение предмета, даваемого рассеивающей линзой, в случае, если предмет находится в фокусе линзы (рис. 277). Каким – увеличенным или уменьшенным – будет изображение предмета? во сколько раз?

33.7 ● На рисунке 278 указаны главная оптическая ось собирающей линзы O_1O_2 , положение предмета S и его действительного изображения S' . Проведя построение, определите положение центра линзы и её фокусов.

33.8 ● Расстояние от линзы до горящей свечи 60 см. Чтобы получить чёткое изображение свечи на экране, его необходимо расположить от линзы на расстоянии, которое в 4 раза меньше, чем расстояние от линзы до свечи. Каким – увеличенным или уменьшенным, прямым или перевернутым – будет изображение свечи на экране? Какова оптическая сила и фокусное расстояние линзы?

33.9 ● Расстояние от предмета до экрана 2,4 м. Линзу с каким фокусным расстоянием надо взять и где следует её поместить, чтобы получить на экране изображение предмета, увеличенное в 5 раз?

33.10 ● Плосковыпуклая и плосковогнутая линзы изготовлены из одного сорта стекла (рис. 279). Линзы имеют такие радиусы кривизны преломляющих поверхностей, что если линзы пододвинуть вплотную друг к другу, то они образуют тонкую плоскопараллельную пластинку. (Плоскопараллельной называют пластинку, преломляющие поверхности которой параллельны.) Чему равна оптическая сила плосковогнутой линзы, если оптическая сила плосковыпуклой линзы составляет 5 дп?

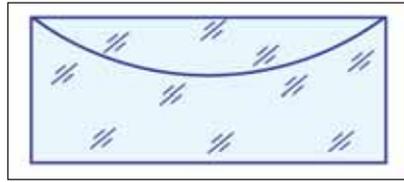


Рис. 279

§ 34. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

«ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИЛЫ ЛИНЗЫ»



Верховным судьёй всякой физической теории является опыт.

*Л. Д. Ландау (1908–1968),
выдающийся физик-теоретик,
лауреат Нобелевской премии*

Вам уже известны основные закономерности явления преломления и основные свойства линз.

Оборудование: источник тока, низковольтная лампа на подставке, экран со щелью, стеклянная плоскопараллельная пластинка, призма, транспортер, собирающая линза, измерительная лента.



Задание 1. Изучение явления преломления.

1. Подключите лампу к источнику тока, поставьте экран со щелью, и на листе белой бумаги, расположенной на столе, получите узкий световой пучок.

2. Поставьте на пути светового пучка стеклянную пластинку матовой поверхностью на бумагу. Обведите карандашом пластинку, отметьте ход падающего и преломленного световых лучей (рис. 280). Проведите перпендикуляр к границе «воздух – стекло» и «стекло – воздух».

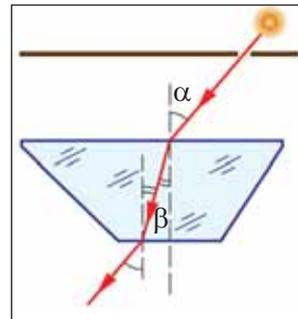


Рис. 280

3. Измерьте углы падения и преломления. Сделайте вывод о том, каково соотношение между углами падения и преломления на границе «воздух – стекло» и «стекло – воздух».

4. Изменяя угол падения света на границу «воздух – стекло», выясните, как при этом изменяется угол преломления света.



Задание 2. Наблюдение явления полного отражения.

Направьте световой пучок на боковую скошенную грань стеклянной пластинки и наблюдайте преломление света на границе «стекло – воздух». Увеличивая угол падения света, добейтесь полного отражения света (рис. 281). Оцените, чему равен предельный угол полного отражения. Изобразите ход светового луча.



Задание 3. Наблюдение явления дисперсии света.

Направьте световой пучок на угол стеклянной пластинки (или на угол призмы). Пронаблюдайте происходящее при этом явление дисперсии света (рис. 282). Перечислите цвета, которые вам удалось различить в спектре.



Задание 4. Измерение фокусного расстояния собирающей линзы.

1. Направьте световой пучок на угол стеклянной пластинки (рис. 283). Пронаблюдайте ход преломлённого светового луча.



34.1. Как, исходя из результатов данного наблюдения (рис. 283), объяснить, почему выпуклая линза является собирающей?

2. Используя собирающую линзу, получите на экране изображение удалённого источника света. От удалённого источника света на линзу падают практически параллельные световые лучи (рис. 284). Такие лучи собираются в фокусе линзы, поэтому в данном случае расстояние от линзы до экрана будет практически равно фокусному расстоянию линзы. Измерьте фокусное расстояние линзы.

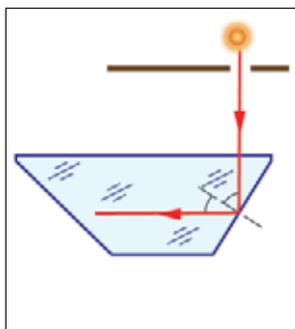


Рис. 281

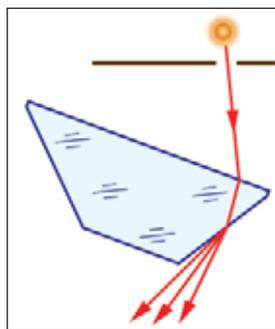


Рис. 282

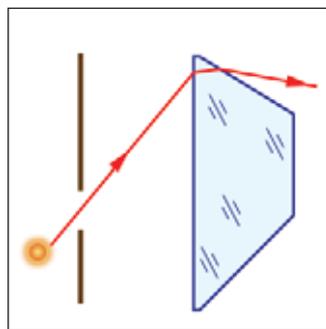


Рис. 283



Задание 5. Определение оптической силы и фокусного расстояния собирающей линзы.

1. Подключите лампу к источнику тока. Лампу, собирающую линзу и экран расположите на одной прямой (рис. 285). Перемещая лампу, линзу или экран, добейтесь на экране чёткого изображения лампы.

Измерьте расстояние a от линзы до лампочки и расстояние b от линзы до экрана.

Используя формулы линзы

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = D,$$

вычислите оптическую силу линзы.

2. Вычислите фокусное расстояние линзы.

3. Повторите измерения несколько раз, изменяя расстояние между линзой и лампой, между линзой и экраном. Вычислите среднее значение оптической силы и фокусного расстояния собирающей линзы. Сравните результат с результатом, полученным ранее при выполнении задания 4 лабораторной работы.

34.1 ● На рисунке 286 указаны главная оптическая ось рассеивающей линзы O_1O_2 , положение предмета S и его мнимого изображения S' . Проведя построение, определите положение центра линзы и её фокусов.

34.2 ● На рисунке 287 изображена экспериментальная установка по определению оптической силы линзы. Какой результат получен в данном эксперименте?

34.3 ● Линза объектива старинного фотоаппарата имеет фокусное расстояние 13,5 см. Расстояние от линзы до фотопластины, на которой фокусируется изображение, составляет 18 см. На каком расстоянии от фотоаппарата следует расположить букет цветов, чтобы получить его чёткое изображение?

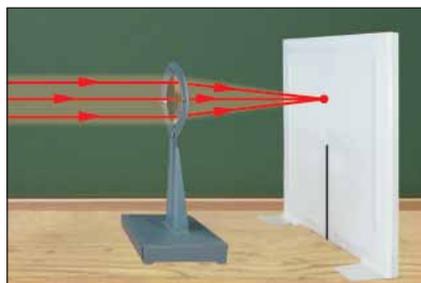


Рис. 284

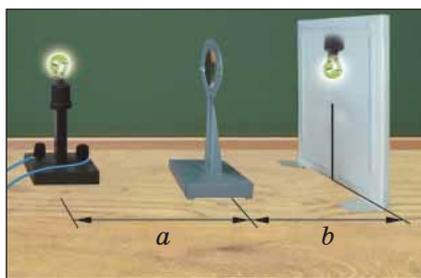


Рис. 285

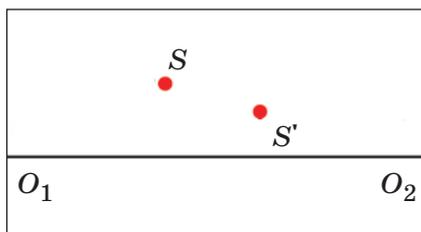


Рис. 286

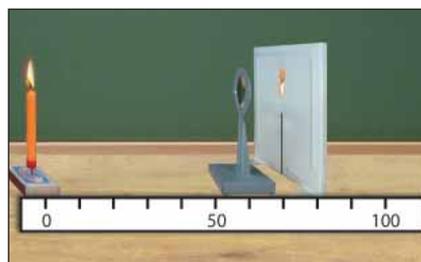


Рис. 287

34.4 ● Фокусное расстояние собирающей линзы равно 10 см. Постройте график зависимости расстояния b (линза – экран), на котором получают чёткое изображение предмета), от расстояния a (линза – предмет).

34.5 ● Изобразите ход световых лучей, преломлённых собирающей линзой, если источник света находится в одном из фокусов линзы. Ответ обосновать.

§ 35. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ. ГЛАЗ. ОЧКИ



Мартышка к старости слаба глазами стала;
А у людей она слыхала,
Что это зло ещё не так большой руки:
Лишь стоит завести очки.

*Басня И. А. Крылова (1769–1844)
«Мартышка и Очки»*

Вам уже известны основные свойства линз.

Фотоаппарат. Одним из самых распространённых оптических приборов в наше время является *цифровой фотоаппарат*. Фотоаппарат – устройство, с помощью которого получают неподвижное изображение предмета (рис. 288).

Основная часть фотоаппарата – *объектив*, состоящий из нескольких линз. Объектив создаёт уменьшенное действительное и перевёрнутое изображение предмета на специальной электронной матрице¹. Матрица состоит из светочувствительных полупроводниковых элементов, в которых под действием световой энергии возникает определённый электрический сигнал. Размеры светочувствительного элемента – пиксела – составляют около 0,005 мм, а общее их число достигает несколько десятков миллионов (десятки мегапикселей).



Рис. 288

¹ Ранее в фотоаппаратах для фиксации (запоминания) изображения предмета использовалась фотоплёнка, в которой под действием света происходили химические превращения. Поток света регулировался затвором, открывавшим доступ света к фотоплёнке на строго определённое время.

Полученный с матрицы электрический сигнал обрабатывается имеющимися в цифровом фотоаппарате электронными устройствами и сохраняется в полупроводниковом приборе – *флэш-памяти*. При необходимости изображение, сохранённое как набор электрических сигналов, может быть передано с флэш-памяти на компьютер и распечатано в виде фотографий.

Глаз. Очки. Глаз – орган зрения человека – образно можно назвать живым фотоаппаратом (рис. 289). «Корпусом» такого «фотоаппарата» является твёрдая оболочка – *склера* 1. Передняя часть склеры – *роговица* 2 – прозрачна. За роговицей располагается *радужная оболочка* 3, которая и определяет цвет глаз у людей. Через отверстие в радужной оболочке – *зрачок* 4 – свет проникает в глаз. В зависи-

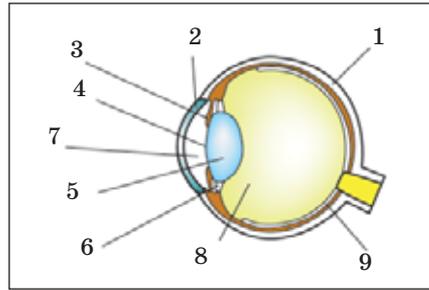


Рис. 289

мости от освещения диаметр зрачка изменяется от 2 мм (при ярком свете) до 8 мм (в сумерках). За радужной оболочкой находится прозрачный упругий *хрусталик* 5. Хрусталик представляет собой выпуклую линзу и крепится к склере с помощью *мышцы* 6. Между роговицей и радужной оболочкой имеется *водянистая жидкость* 7, а позади хрусталика – прозрачное *стекловидное тело* 8, заполняющее глаз.

Роговица, водянистая жидкость, хрусталик и стекловидное тело образуют сложный «объектив» нашего природного фотоаппарата с оптической силой около 60 дп. Оптическая система глаза, как и объектив фотоаппарата, создаёт действительное уменьшенное и перевёрнутое изображение предметов. Но если в фотоаппарате изображение получается на светочувствительной матрице, то в глазу – на *сетчатке глаза* 9 (рис. 289).

Сетчатка глаза представляет собой разветвлённые окончания нервных волокон зрительного нерва. Свет, падая на сетчатку глаза, вызывает в клетке нерва – «природном пикселе» – химическое изменение вещества, сопровождающееся возникновением электрического импульса. Электрический импульс по зрительному нерву передаётся в кору головного мозга, создаётся зрительное восприятие.

Изображение на сетчатке глаза получается в перевёрнутом виде, но мозг человека вносит свои коррективы, и в итоге мы воспринимаем предметы в тех положениях, в каких они действительно находятся.

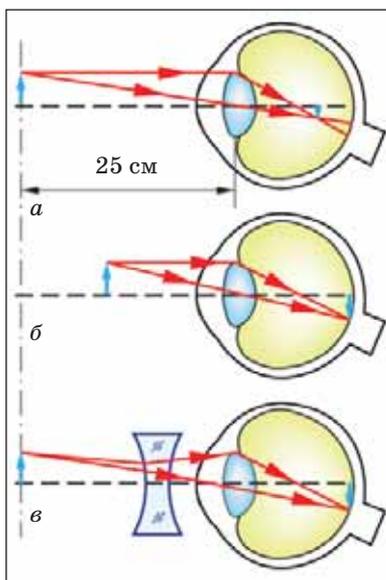


Рис. 290

Рассматривая и близкие, и удалённые предметы, человек, как правило, видит их отчётливое изображение. Каким же образом на сетчатке глаза возникает чёткое изображение предметов, удалённых на разное расстояние, при неизменном расстоянии между «линзой» – хрусталиком глаза и «экраном» – сетчаткой? Это достигается благодаря тому, что мышцы, удерживающие хрусталик, могут сжимать хрусталик и изменять его кривизну. При изменении кривизны хрусталика изменяется его оптическая сила. Это и позволяет глазу рассматривать предметы, находящиеся на разных расстояниях. Свойство глаза приспособляться к ясному видению предметов путём изменения кривизны хрусталика называется *аккомодацией*¹.

Аккомодация глаза имеет свой предел.

Поэтому предметы, находящиеся очень близко от глаза (на расстоянии 10–12 см), отчётливо рассмотреть не удаётся, как сильно бы ни напрягли зрение. Для человека с нормальным зрением расстояние, при котором детали предмета можно рассмотреть без напряжения, составляет 25 см. Это расстояние называют *расстоянием наилучшего зрения*. Именно на таком расстоянии следует располагать книгу при чтении, таким должно быть расстояние до тетради, когда вы пишете в ней.

Более 95% людей рождаются с нормальным зрением. Однако нарушение правил гигиены зрения (расположение книги близко от глаз, чтение или работа с мелкими предметами при слабом или неправильном освещении, работа при слишком ярком свете) могут привести к возникновению дефектов зрения. Наиболее часто встречаются такие недостатки зрения, как *близорукость* и *дальнозоркость*.

При близорукости изображение предмета, расположенного на расстоянии 25 см от глаза, создаётся не на самой сетчатке, а перед ней (рис. 290, а). Поэтому на самой сетчатке изображение неотчётливое. Чтобы изображение оказалось на сетчатке, близорукий человек вынужден приближать предмет ближе к глазу (рис. 290, б). Для исправления близорукости применяют очки с рассеивающими линзами (рис. 290, в).

¹ От латинского *accomodatio* – приспособление.

При дальнозоркости¹ изображение предмета, расположенного на расстоянии 25 см, создаётся глазом не на самой сетчатке, а за сетчаткой (рис. 291, а). Поэтому на самой сетчатке изображение неотчетливое. Чтобы изображение оказалось на сетчатке, дальнозоркий человек вынужден удалять предмет на расстояние более 25 см (рис. 291, б). Для исправления дальнозоркости применяют очки с собирающими линзами (рис. 291, в).

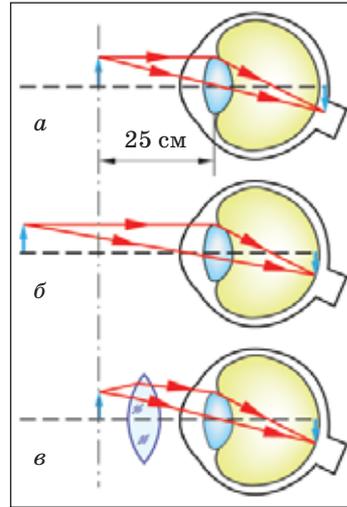


Рис. 291

Микроскоп. Для получения увеличенного изображения предмета используется микроскоп (рис. 292). Оптическая система микроскопа состоит из собирающих линз – объектива 1 и окуляра 2. Рассматриваемый предмет располагают на столике 3. Для лучшей видимости на предмет направляют пучок света, отражённый от зеркала 4. Предмет AB (рис. 293) помещают на небольшом расстоянии от переднего фокуса объектива и получают увеличенное действительное перевёрнутое изображение $A'B'$ предмета AB .

Окуляр располагают таким образом, чтобы изображение $A'B'$ находилось от него на расстоянии, меньшем фокусного расстояния окуляра. При этом окуляр даёт сильно увеличенное мнимое изображение $A''B''$ предмета AB .

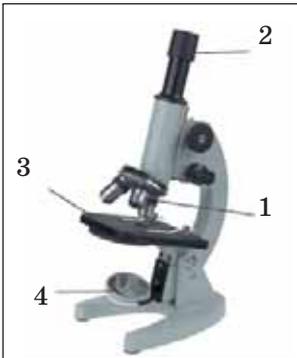


Рис. 292

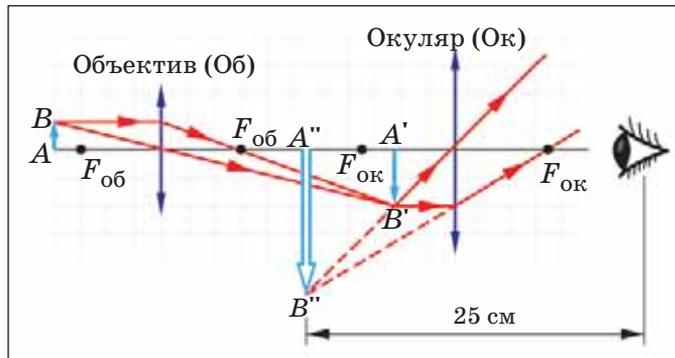


Рис. 293

¹ Термин «дальнозоркость» не означает способности видеть далеко и зорко. Люди, страдающие дальнозоркостью, хотя и видят удалённые предметы, но видят их неотчётливо, не различают подробностей.

Подбирая соответствующие значения фокусных расстояний объектива и окуляра, можно получить с помощью микроскопа увеличение в 500–1000 раз. Это позволяет, например, биологам исследовать клетки растений и животных, медикам – проводить микрохирургические операции, а инженерам – контролировать качество полупроводниковых микросхем.

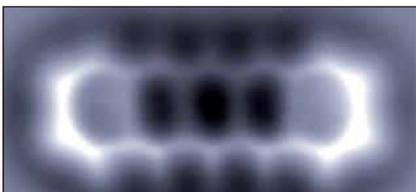


Рис. 294. Изображение отдельной молекулы вещества пентацена. Продолговатая молекула пентацена состоит из 22 атомов углерода и 14 атомов водорода. Длина молекулы составляет всего 1,4 нм, а расстояние между соседними атомами углерода в молекуле 0,14 нм, что приблизительно в миллион раз меньше диаметра песчинки. На изображении чётко видны шестиугольные структуры пяти углеродных колец

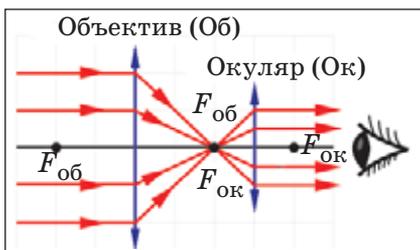


Рис. 295

От предмета, который находится от телескопа на огромном расстоянии, на объектив астрономического прибора падает практически параллельный пучок световых лучей. Эти лучи собираются объективом в его фокальной плоскости (рис. 295). Собиранную объективом световую энергию окуляр направляет на сетчатку глаза, и мы без напряжения отчётливо видим изображение небесного светила.

В наше время в научных исследованиях кроме световых микроскопов применяют электронные микроскопы. Электронный микроскоп – прибор, в котором вместо световых лучей используются пучки электронов, ускоренные электрическим полем с напряжением 30–100 кВ. С помощью электронных микроскопов получают изображения объектов, увеличенные в миллион раз! Это позволяет учёным фотографировать отдельные молекулы и атомы (рис. 294).

Телескоп. Для наблюдения удалённых небесных тел (галактик, звёзд, планет и их спутников) в астрономии используют *телескопы*. Основные виды оптических телескопов – *рефракторы* и *рефлекторы*.

В рефракторе¹ – линзовом телескопе, как и в микроскопе, имеются объектив и окуляр.



35.1. На каком расстоянии от собирающей линзы находится изображение предмета, удалённого от линзы на очень большое расстояние?

¹ От латинского *refractus* – преломлённый.

Первый телескоп-рефрактор был изготовлен в 1609 году Г. Галилеем (рис. 296). С его помощью Галилей обнаружил горы и кратеры на Луне, пятна на Солнце, четыре крупнейших спутника Юпитера, гигантские скопления звёзд в Млечном Пути.

При использовании телескопа на сетчатку глаза падает световой энергии во столько раз больше, во сколько раз площадь объектива телескопа больше площади зрачка глаза. Поэтому чем больше диаметр объектива, тем лучше видны небесные объекты.

Технические сложности изготовления линз большого размера (больше одного метра) привели к тому, что все крупнейшие современные телескопы – это телескопы-рефлекторы¹. Основной частью такого телескопа является вогнутое зеркало. Телескоп-рефлектор был изобретён Ньютоном и изготовлен им собственноручно в 1668 году. Этот телескоп имеет металлическое вогнутое зеркало диаметром всего лишь 2,5 см (рис. 297).

Ход лучей в телескопе-рефлекторе показан на рисунке 298. В открытую трубу 1 телескопа свет от далекого небесного объекта поступает параллельным пучком лучей. Вогнутое зеркало – объектив 2 – отражает свет и образует сходящийся световой пучок. После отражения от плоского вспомогательного зеркала 3 свет проходит через окуляр 4 и поступает на сетчатку глаза наблюдателя либо на фотопластинку или светочувствительную матрицу.



Рис. 296



Рис. 297

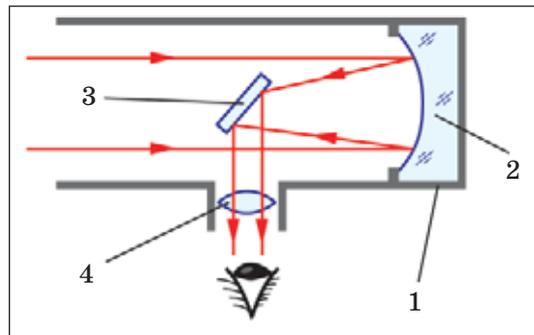


Рис. 298

¹ От латинского *reflectere* – отражать.

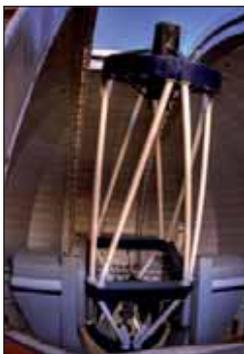


Рис. 299



Рис. 300

Крупнейший в России телескоп снабжён зеркалом диаметром 6 м. Масса этого зеркала 42 т, подвижные части телескопа имеют массу 650 т (рис. 299). Телескоп был изготовлен в 1975 году и установлен в предгорьях Северного Кавказа на высоте 2000 м над уровнем моря.

В 1993–1996 годах на Гавайях на высоте более 4000 м вступили в действие два телескопа-рефрактора с диаметром зеркала 10 м. Зеркала этих телескопов не сплошные, а изготовлены из 36 отдельных шести-гранных элементов (сегментов). В перспективе астрономы надеются получить в своё распоряжение ещё более грандиозные телескопы.



35.2. Почему большие телескопы-рефракторы устанавливают в горной местности на высоте несколько тысяч метров над уровнем моря?

Главным «врагом» оптических телескопов является атмосфера. Во-первых, атмосфера прозрачна не для всех диапазонов электромагнитного излучения, она поглощает большую часть инфракрасного и ультрафиолетового излучений. Во-вторых, движение воздушных масс искажает изображение, создаваемое телескопом; в 7–10 раз понижает разрешающую способность¹ телескопа. В 1990 году на орбиту вокруг Земли была выведена первая автоматическая обсерватория – космический телескоп Хаббл (рис. 300). Диаметр зеркала телескопа Хаббла 2,4 м, масса телескопа (с приборами) 12,5 т; телескоп вращается вокруг Земли на высоте более 500 км. В 2009 г. запущен космический телескоп Гершель. С его помощью ведётся изучение инфракрасного излучения от объектов в Солнечной системе, Млечном Пути и от внегалактических объектов, находящихся на расстояниях в миллиарды световых лет от Земли.

¹ Разрешающая способность астрономического прибора – возможность различать и регистрировать отдельно два близко расположенных небесных объекта.

Фотоаппарат, строение глаза: склера, роговица, радужная оболочка, зрачок, хрусталик, водянистое тело, стекловидное тело, сетчатка глаза; **аккомодация**, расстояние наилучшего зрения, **близорукость, дальновзоркость, очки**, микроскоп, электронный микроскоп, телескоп: рефрактор, рефлектор.

35.1 ● Рассмотрите в зеркало зрачки своих глаз при слабом освещении, а затем при сильном. Что вы заметили? Как объяснить наблюдаемое явление?

35.2 ● На какой – более близкий или более дальний – предмет переводит взгляд человек, если кривизна хрусталика его глаза меняется так, как показано на рисунке 301?

35.3 ● Оптическая сила объектива микроскопа составляет 500 дп. Чему равно фокусное расстояние объектива?

35.4 ● Как практически отличить очки для близоруких людей от очков для дальновзорких людей? Рукой линз очков не касаться.

35.5 ● Самый большой телескоп-рефрактор принадлежит Йеркской обсерватории (США) и имеет диаметр объектива 102 см. Во сколько раз объектив такого телескопа «собирает» больше световой энергии в сравнении с глазом человека? Диаметр зрачка человека принять равным 8 мм.



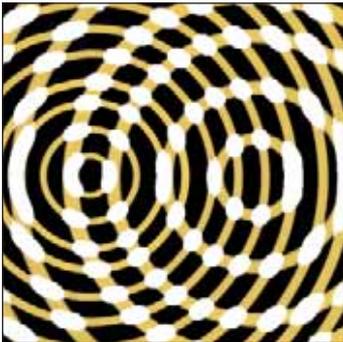
Рис. 301



§ 36. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ И ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Нельзя не удивляться, что темнота происходит от присоединения света к свету.

Д. Ф. Араго (1786–1853), французский учёный и политический деятель



Вам уже известно, в чем заключаются явления интерференции и дифракции.

Интерференция и дифракция света. Свет – электромагнитная волна, поэтому для света, как и для любых других волн, должны наблюдаться явления интерференции и дифракции. Напомним, что *интерференция – это наложение двух или нескольких волн, при котором в различных точках пространства наблюдается усиление или ослабление результирующих колебаний. Явление интерференции возможно только в том случае, если волны являются когерентными.*

Ещё одно волновое явление – дифракция. *Явление дифракции – огибание волной препятствия.* Дифракция волн наиболее заметна, если препятствие на пути распространения волны по своим размерам сравнимо с длиной волны. Только в этом случае волны отклоняются от прямолинейного распространения на заметные углы.

Опыт по интерференции и дифракции света, неопровержимо подтвердивший волновую природу света, был проведён в начале 19 века английским учёным Т. Юнгом. Схема этого классического опыта приведена на рисунке 302.

Свет проходит через малое отверстие S и попадает на два отверстия S_1 и S_2 . Два пучка света от отверстий S_1 и S_2 , накладываясь друг на друга, образуют на экране чередующиеся светлые и тёмные полосы. Элементом первостепенной важности в опыте Юнга было отверстие S . Световая волна, проходя через это отверстие, испытывала дифракцию и благодаря этому достигала и отверстия S_1 , и отверстия S_2 . Отверстия S_1 и S_2 делили эту единую световую волну на две волны. Таким образом, световые волны, выходящие из отверстий S_1 и S_2 , являются когерентными (ведь они – две части одной и той же волны). Световые волны от источников S_1 и S_2 также дифрагируют (световой пучок расширяется, огибая отверстие). Накладываясь, когерентные волны от двух источников на экране усиливают или ослабляют друг друга в зависимости от разности хода.

Если разность хода $d_2 - d_1$ (рис. 302) равна целому числу длин волн, то в точке M наблюдается интерференционный максимум. Если же разность хода $d_2 - d_1$ равна целому числу длин волн плюс половина длины волны, то наблюдается интерференционный минимум.

Т. Юнгу впервые удалось определить длину световой волны.



36.1. Чему равна длина волны фиолетового света? красного света?

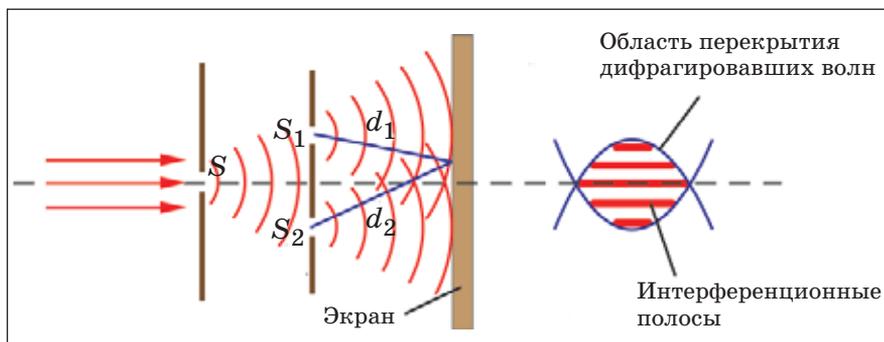


Рис. 302

Томас Юнг (1773–1829). Выдающийся английский учёный с редкостной разносторонностью и широтой научных поисков, многогранным дарованием и огромной интуицией физика.

Известный врач и замечательный физик, астроном и механик, металлург и египтолог, океанограф и ботаник, знаток музыки и искусный музыкант, отличный живописец и способный гимнаст.



В одной из своих работ Т. Юнг писал: «Везде, где две части одного и того же света попадают в глаз различными путями..., свет становится сильным там, где разность путей есть целое кратное некоторой длины¹ ... и эта длина различна для света различных цветов».

Используя представления о волновой природе света, Т. Юнгу удалось объяснить картину колец Ньютона. Кольца Ньютона – разноцветные кольца, возникающие в месте соприкосновения плосковыпуклой линзы со стеклянной пластинкой (рис. 303).

Как же возникают кольца Ньютона? При падении света на линзу (рис. 304) происходит отражение волн от выпуклой поверхности линзы (волна 1) и от поверхности стеклянной пластинки (волна 2). Световые волны 1 и 2 когерентны (почему?). Разность хода этих световых волн определяется удвоенной толщиной воздушного зазора между линзой и стеклянной пластинкой. В результате интерференции световых волн 1 и 2 возникает усиление и ослабление света. Но белый свет состоит из световых волн с различной длиной волны. Поэтому интерференционные максимумы для света с разной длиной волны будут находиться на различных расстояниях от центра линзы.

Так возникают разноцветные кольца – интерференционные максимумы для света различной длины волны.

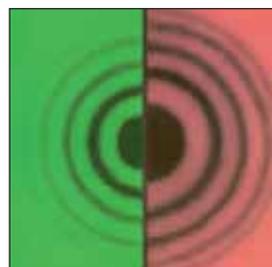


Рис. 303. Кольца Ньютона при освещении зелёным и красным светом

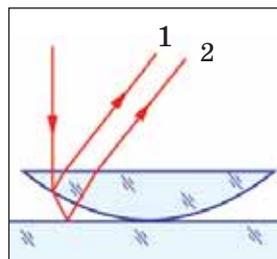


Рис. 304

¹ Имеется в виду длина волны света.

Если поверхность линзы гладкая и не имеет дефектов (царапин, бугорков), то образуются интерференционные кольца правильной формы – как на рисунке 303. В противном случае форма колец будет искажена. Таким образом, явление интерференции света позволяет контролировать качество обработки оптических изделий.

Т. Юнг гениально просто объяснил и разноцветную окраску мыльных пузырей (рис. 305). Свет, падающий на мыльную плёнку, отражается и от наружной поверхности плёнки (волна 1) и от внутренней поверхности плёнки (волна 2).

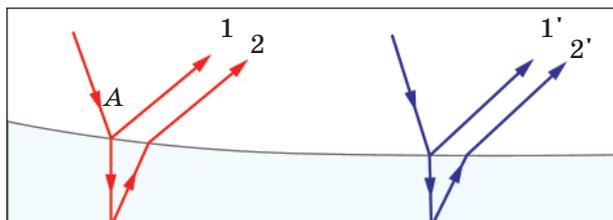


Рис. 305

Световые волны 1 и 2, 1' и 2' когерентны (почему?). В результате интерференции происходит усиление и ослабление света. Но так как в разных местах плёнки её толщина неодинакова, то в одном месте плёнки происходит, например, усиление красного света (точка А на рисунке 305), а в другом месте плёнки – усиление фиолетового света (точка В на рисунке 305)¹. По этой причине при освещении плёнки мыльного пузыря белым светом мы наблюдаем её разноцветную окраску.



36.2. Почему пятна бензина на поверхности воды имеют радужную окраску?

Яркая, переливающаяся всеми цветами радуги окраска некоторых раковин, крыльев стрекоз также объясняется интерференцией света.

Дальнейшее развитие волновая теория света получила в трудах французского учёного О. Френеля. Им была разработана математическая теория явления дифракции, которая сохранила своё научное значение до настоящего времени.

На рисунке 306 показан вид дифракционных картин, возникающих при огибании светом тонкой проволоки и при прохождении света через узкую щель. Возникающие картины есть результат интерференции волн, дифрагировавших на препятствии (отверстии).

¹ Напомним, что усиление света – интерференционный максимум – происходит в случае, если разность хода волн равна целому числу длин волн света.

Огюстен Френель (1788–1827).

Французский физик, один из создателей волновой оптики. Разработал теорию дифракции света, предложив математический метод расчёта дифракционных картин. Изобрёл несколько интерференционных приборов.

Его имя внесено в список выдающихся учёных и инженеров Франции 18–19 веков, помещённый на Эйфелевой башне.



36.3. На опыте обнаружено, что при освещении светом небольшого круглого препятствия (например, маленького металлического шарика) в центре тени всегда наблюдается светлое пятно. Как объяснить результат эксперимента?



Рис. 306. Дифракция света:
a – дифракционная картина, возникающая при освещении проволоки диаметром 0,1 мм;
б – дифракционная картина, возникающая при освещении вертикальной щели шириной 0,15 мм.
 В качестве источника света использован лазер с длиной волны излучения 630 нм

Дифракционная решётка. Дифракционная решётка – оптический прибор, действие которого основано на явлении дифракции. Решётка – это совокупность большого числа узких, регулярно расположенных щелей, пропускающих свет и разделённых непрозрачными промежутками (рис. 307). Общее число оптических щелей в дифракционной решётке высокого качества превышает 100 000, а на один миллиметр решётки может приходиться 1000 и более щелей.

Пусть на дифракционную решётку падает свет с определённой длиной волны (рис. 308). На щелях решётки происходит дифракция света – огибание световой волной препятствия. Световые волны от каждой щели дифракционной решётки когерентны и поэтому интерферируют.



Рис. 307

В результате на экране образуются интерференционные максимумы в тех точках, для которых разность хода интерферирующих волн равна целому числу длин волн света.

Этих интерференционных максимумов будет несколько:

- центральный максимум (точка O на рисунке 308) соответствует нулевой разности хода волн;
- первые максимумы (точки M_1 и M'_1 на рисунке 308) соответствуют разности хода волн в одну длину волны;
- вторые максимумы (точки M_2 и M'_2 на рисунке 308) соответствуют разности хода волн в две длины волны и так далее.

Если направить на дифракционную решётку свет с другой длиной волны, то вновь возникнут интерференционные максимумы. Но эти максимумы будут располагаться в других точках экрана, ведь волнам теперь необходимо «набрать» другую разность хода.

Что будет происходить, если на дифракционную решётку направить белый свет – смесь световых волн с различной длиной волны? Решётка разложит свет в спектры (рис. 309). Таким образом, дифракционная решётка, как и призма, является *спектральным прибором*. Но если при прохождении света через призму возникает один спектр, то после дифракционной решётки спектров будет несколько. Положение дифракционного максимума в таких спектрах зависит от длины волны света. Таким образом, с помощью дифракционной решётки несложно измерить длину волны света.



36.4. Какова физическая причина разложения белого света в спектр при прохождении света через призму? Какова физическая причина разложения белого света в спектры при прохождении его через дифракционную решётку?

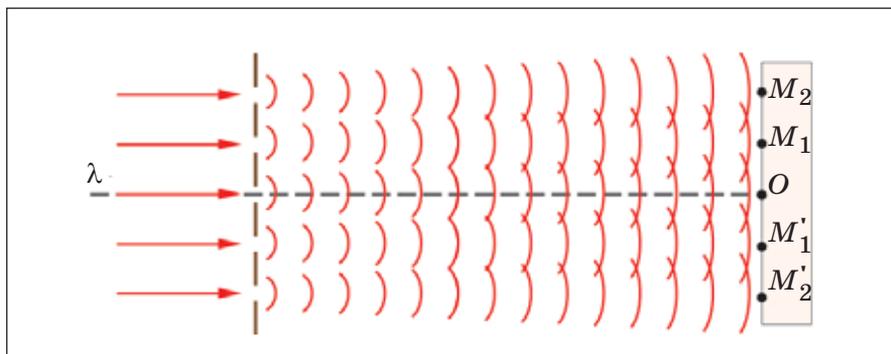


Рис. 308



Рис. 309

Лабораторная работа

«Наблюдение интерференции и дифракции света».

Оборудование: стакан с мыльным раствором, проволочное кольцо с ручкой, две стеклянные пластины, штангенциркуль, рамка картонная, в которой натянута проволока диаметром 0,1–0,3 мм, CD-диск, лампа с прямой нитью накала (одна на класс).

Указания к работе

Задание 1. Используя мыльный раствор и проволочное кольцо с ручкой, получите мыльную плёнку и наблюдайте её через светофильтр и в белом свете. Опишите наблюдаемое явление и объясните его.



Рис. 310

Задание 2. Стеклянные пластины сложите узкими гранями и сожмите пальцами (рис. 310). Ввиду определённых неровностей граней между ними остаётся некоторый воздушный зазор. Регулируя нажим пальцев на пластинки, наблюдайте изменяющуюся по окраске картину. Объясните наблюдаемое явление.

Задание 3. Пронаблюдайте дифракцию света на узкой щели. В качестве источника света используйте светящуюся лампу с вертикально расположенной прямой нитью накала. В качестве щели используйте зазор между губками штангенциркуля, располагая щель вертикально вплотную к глазу. Регулируя величину зазора от 0,3 до 0,8 мм, наблюдайте за изменением дифракционной картины. Выполните зарисовки в тетради.

Задание 4. Пронаблюдайте дифракцию света на нити. В качестве источника света используйте светящуюся лампу с вертикально расположенной прямой нитью накала. В качестве нити используйте тонкую проволоку, натянутую в картонной рамке. Расположите нить вертикально вплотную к глазу и наблюдайте дифракционную картину. Выполните зарисовку в тетради.

Задание 5. Пронаблюдайте спектры, возникающие при отражении света от CD-диска. Объясните наблюдаемое явление.

Явление интерференции света, явление дифракции света, опыт Юнга, кольца Ньютона, окраска мыльной плёнки, дифракционная решётка, дифракционный спектр.

Заключение к разделу «Световые явления»

1. Электромагнитные волны принято подразделять на отдельные виды излучения: *радиоволны, инфракрасное излучение, видимое излучение, ультрафиолетовое излучение, рентгеновское излучение, гамма-излучение.*

2. Видимый человеком свет – электромагнитные волны с длиной волны от 760 до 400 нм. *Разные длины волн создают различные цветовые ощущения.*

3. Волновая природа света неопровержимо подтверждена явлениями *интерференции и дифракции.*

4. В однородной среде свет *распространяется прямолинейно.* Это приводит к образованию теней, возникновению солнечных и лунных затмений.

5. На границе раздела двух сред свет *отражается.* Зеркало даёт мнимое симметрично расположенное изображение предмета.

6. Скорость света в вакууме $c \approx 300\,000$ км/с.

При переходе света из одной прозрачной среды в другую свет *преломляется.* Явление преломления обусловлено неодинаковостью скорости света в различных средах.

7. Явление преломления лежит в основе действия линз.

Линзы подразделяют на собирающие и рассеивающие.

Линзы характеризуют фокусным *расстоянием F* и *оптической силой D .*

$$D = \frac{1}{F}, \text{ дп.}$$

8. *Глаз человека* – сложнейший оптический орган зрения, «природный фотоаппарат». Недостатки зрения (близорукость, дальновидность) могут быть исправлены *с помощью очков.*

III.1 ● Какова должна быть минимальная частота электромагнитного излучения, чтобы оно создавало зрительное ощущение при попадании на сетчатку глаза?

III.2 ● Какого размера должно быть вертикально расположенное плоское зеркало, чтобы человек мог видеть себя «в полный рост»?

III.3 ● Человек читает газету, держа её на расстоянии 35 см. Каким недостатком зрения он обладает? Очки с какими линзами – собирающими или рассеивающими – ему необходимы?



III.4. Если рассматривать дно водоёма, то оно кажется ближе, чем есть на самом деле. Каким – действительным или мнимым – является изображение предмета, находящегося на дне водоёма? Используя пластиковую бутылку с водой, монетку, линейку и карандаш, определите, во сколько раз кажущаяся глубина «водоёма» меньше его фактической глубины.

Дайте физическое обоснование пословице: «Не зная броду, не суйся в воду».

III.5 ● Две собирающие линзы с оптическими силами 10 и 20 дп соответственно расположены так, что их главные оптические оси совпадают (рис. 311). Расстояние между центрами линз составляет 15 см. На одну из линз падают световые лучи, параллельные главной оптической оси. Сделайте чертёж в тетради и укажите дальнейший ход световых лучей.

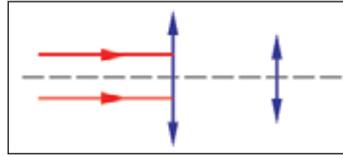


Рис. 311

P. S.



В этом разделе изучены основные вопросы, связанные с природой света и световыми явлениями.

– Мы выяснили, что свет – это электромагнитные волны определённого диапазона длин волн. Волновую природу света убедительно подтверждают явления интерференции и дифракции света. Но не обсуждался вопрос, продольными или поперечными являются световые волны. Учёные выяснили, что *свет – поперечные волны*. Поперечность световых волн также подтверждена опытами. (Оптические явления, подтверждающие поперечность световых волн, в учебнике не изложены, они остались «вне поля нашего зрения».)

– Явление преломления света при переходе света из одной прозрачной среды в другую обусловлено различием скорости света в разных средах. Однако не выяснено, как *именно степень преломления света связана со скоростью световых волн в веществе*.

– Опытным путём было установлено, что при преломлении света с увеличением угла падения возрастает и угол преломления световых лучей. Но *математическая формула закона преломления не изучалась*.

– Было установлено, что преломляющие свойства линзы характеризуются её фокусным расстоянием (оптической силой). Но не выяснено, например, как *оптическая сила линзы зависит от кривизны её поверхностей и оптических свойств вещества линзы*.

– Известно, что тела, нагретые до определённой температуры (звёзды, Солнце, спираль лампы накаливания), являются источниками света. Но пока нам совершенно *неизвестно, как происходит излучение энергии нагретым телом*.

Раздел 4. Элементы квантовой физики

В этом разделе учебника вы познакомитесь с современной точкой зрения на природу света. Изучение этого вопроса послужило в своё время толчком к созданию новых физических теорий – квантовой физики. В общих чертах вы узнаете, какие закономерности «работают» в электронных оболочках атомов, какие силы главенствуют в ядре атома. В заключительных параграфах раздела рассказывается о важнейших задачах современной физики.



Вспомните сведения, уже известные вам из курсов физики и химии, и ответьте на вопросы:

- Каково строение атома?
- Каково соотношение между размерами атома и атомного ядра?
- Из каких частиц состоит ядро атома?
- Что является источником энергии, выделяющейся в ядерных реакторах на атомных электростанциях?

§ 37. Возникновение квантовой физики

Кризис классической физики

Гипотеза М. Планка

Корпускулярно-волновой дуализм

Пример решения задачи

§ 38. Линейчатые спектры. Квантовая структура атома

Лабораторная работа «Наблюдение линейчатых спектров»

Квантовая теория Н. Бора

Спектральный анализ

§ 39. Строение атомного ядра. Энергия связи ядра

Протонно-нейтронная модель атомного ядра

Ядерные силы. Энергия связи ядра

Пример решения задачи

§ 40. Явление радиоактивности. Ядерные реакции

Явление радиоактивности

Ядерные реакции

Деление урана. Ядерный реактор

Термоядерные реакции

§ 41. Методы регистрации частиц.

Классификация элементарных частиц

«Глаза» и «уши» современной физики

Важнейший факт

Античастицы

Классификация элементарных частиц

§ 42. Фундаментальные взаимодействия

Виды взаимодействий

Взаимодействия и классификация частиц

Великие планы «великого объединения»

Самое важное в разделе «Элементы квантовой физики»

P. S.

§ 37. ВОЗНИКНОВЕНИЕ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ



Человеческое воображение не в состоянии создать образ, обладающий одновременно и свойствами корпускулы¹, и свойствами волны. Однако природа богаче воображения человека. При её изучении надо руководствоваться не тем, что доступно воображению человека, а тем, что дают наблюдения и опыт.

Д. В. Сивухин. Общий курс физики. Том 5, часть 1

Вы знаете, что всякое нагретое тело излучает энергию.

Кризис классической физики. К началу двадцатого века в физике были достигнуты значительные успехи. Сформулированные Ньютоном законы механического движения позволили учёным точнейшим образом рассчитывать движение планет и даже предвосхитить открытие одной из них. В 1846 году астрономами была открыта самая дальняя планета Солнечной системы – Нептун. Её координаты были рассчитаны по тем отклонениям (возмущениям), которые она вносила своим тяготением в движение ближайшей «соседки» – планеты Уран.

Созданная Максвеллом теория электромагнетизма позволила объяснить электрические и магнитные явления, предсказать существование электромагнитных волн. Учёными было выяснено, что свет – это электромагнитные волны, которые ничем, кроме длины волны, не отличаются от других электромагнитных волн.

¹ Корпускула – частица.

Однако в науке того времени существовал ряд проблем, не находивших своего теоретического объяснения в рамках сложившейся к началу 20 века *классической физики*. Решение этих проблем привело в итоге к пересмотру взглядов на законы природы, к созданию новых фундаментальных научных теорий. Одной из таких проблем являлась проблема электромагнитного излучения, испускаемого и поглощаемого нагретым телом. Как вы знаете, любое нагретое тело излучает энергию. Тело, нагретое до комнатной температуры, является источником инфракрасного излучения. Спираль лампы накаливания (с температурой 3000 °С) излучает свет видимого диапазона. Дуга электросварки (4000 °С) – мощный источник ультрафиолетового излучения.



37.1. Сравните длины волн инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучений.

На опыте установлено, что нагретое тело излучает электромагнитные волны различных частот. Длина волны излучения, на которую приходится большая часть излучаемой энергии, определяется температурой тела. Чем выше температура тела, тем короче длина волны излучения, соответствующая максимуму излучения.

Было установлено, что и общее количество энергии, ежесекундно излучаемой нагретым телом, также зависит от его температуры. С повышением температуры мощность теплового излучения возрастает.

Нагретое тело состоит из огромного числа атомов. В состав атома входят заряженные частицы – электроны, находящиеся в движении (в начале 20 века этот факт уже был известен учёным). Следовательно, каждый атом представляет собой «излучатель» электромагнитных волн. Поэтому физики считали, что все экспериментально установленные закономерности теплового излучения должны объясняться теоретически на основе законов электромагнетизма Максвелла.

Законы электромагнетизма объясняют и позволяют абсолютно точно рассчитать, например, излучение радиоволн при колебаниях электронов в проводниках антенны. Казалось бы, с физической точки зрения излучение отдельных атомов вещества ничем, кроме размера излучателей, не отличается от излучения радиоантенны. Однако физиков-теоретиков поджидало удивительное разочарование – попытки применить законы электромагнетизма к теоретическому обоснованию закономерностей теплового излучения были безуспешными. *Теория электромагнитного поля не позволяла рассчитать энергию электромагнитного излучения «атомных антенн»!*

В качестве ещё одной проблемы упомянем явление внутреннего фотоэффекта. Как вам известно из курса физики 8 класса, существуют вещества с особыми электрическими свойствами – полупроводники.

Электрическое сопротивление полупроводников зависит от различных причин, и в том числе от того, падает ли на кристалл полупроводника световая энергия.

Под действием света в кристалле полупроводника появляются свободные носители заряда, что приводит к уменьшению сопротивления полупроводника. Изменение электрического сопротивления полупроводника при поглощении им света (электромагнитного излучения) называют *внутренним фотоэффектом*.

При изучении явления фотоэффекта учёные обнаружили удивительный факт – для явления фотоэффекта, образно говоря, важно не количество световой энергии, а её «качество». Свет коротких волн «освобождает» электроны «из оков кристаллической решётки» в полупроводнике. Воздействие же более длинноволнового излучения не вызывает фотоэффекта, а лишь ведёт к нагреванию полупроводникового кристалла. Эта особенность поглощения электромагнитной энергии, как и закономерности теплового излучения, *не нашли своего объяснения в рамках классической физики!*

Гипотеза М. Планка. В 1900 году выдающийся немецкий физик-теоретик М. Планк высказал гипотезу, которая легла в основу новых физических теорий:

Тела излучают свет не непрерывно, а отдельными порциями – квантами¹.

Опираясь на данную гипотезу, М. Планк разработал теорию теплового излучения, которая полностью согласовывалась с экспериментом. По теории Планка атомы вещества испускают свет отдельными порциями – квантами. Энергия кванта E зависит от частоты электромагнитного излучения и равна

$$E = h\nu, \quad (37.1)$$

где ν – частота излучения;

h (читается: аш) – постоянная величина (постоянная Планка),

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}.$$



37.2. Во сколько раз изменяется энергия кванта при увеличении частоты электромагнитного излучения в 2 раза?

37.3. Во сколько раз изменяется энергия кванта при увеличении длины волны электромагнитного излучения в 2 раза?

¹ От латинского *quantum* – сколько.



Макс Планк (1858–1947). Выдающийся немецкий физик-теоретик. В противоположность физическим воззрениям о непрерывности всех процессов ввёл представление о квантовой природе излучения.

Как основатель квантовой теории предопределил основное направление развития физики с начала двадцатого века.

Часто при обсуждении квантовых идей используют следующую наглядную картину. Вообразите, что нагретое вещество, излучающее свет, – это грозовая туча. Излучённые веществом кванты – капли дождя. Какова же дальнейшая судьба «световых капель» – «солются» ли они в единый «световой поток» или продолжают независимое «индивидуальное» движение и в дальнейшем?

Ответ на этот вопрос был дан в 1905 году великим физиком А. Эйнштейном. Он ввёл в науку представление о световых частицах – квантах:

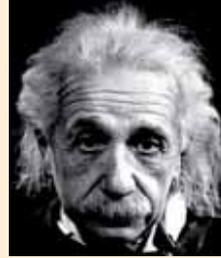
Свет не только излучается, но и поглощается веществом отдельными неделимыми порциями – квантами.

Образно говоря, «световые капли», «ударившись» в вещество, не «расплёскиваются» на отдельные брызги, а полностью поглощаются веществом как единое целое. Энергия квантов вычисляется по формуле М. Планка (37.1), а скорость кванта всегда (и в вакууме, и в веществе) равна скорости света $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с.

На основе квантовых представлений Эйнштейном была разработана теория фотоэффекта, успешно объяснившая все закономерности данного явления.

Представления о свете как о потоке частиц получили в физике название *корпускулярных* представлений. (От латинского *corpusculum* – частичка, тельце. Корпускулами в физике называют малые частицы материи.) Конечно же, корпускулярные взгляды на природу света являлись для физиков совершенно необычными. Но таким образом удалось разработать не только теорию теплового излучения и теорию фотоэффекта, но объяснить и многие другие физические явления. *Корпускулярные свойства света* нашли своё подтверждение в экспериментах.

Альберт Эйнштейн (1879–1955). Великий физик. Разработал теорию броуновского движения, что окончательно утвердило в науке молекулярно-кинетическую теорию строения вещества. Им создано новое учение о пространстве-времени (теория относительности). Ввёл в физику представление о частицах света – фотонах, разработал теорию фотоэффекта.



В качестве примера опишем один из таких опытов, проведённых академиком С. И. Вавиловым в первой четверти двадцатого века. При проведении опыта между наблюдателем и светящейся лампой устанавливали диск с прорезью. Диск совершал один оборот в секунду. Пока лампа горела ярко, наблюдатель при каждом обороте видел лампу светящейся. Когда же через лампу пропускали меньший ток и её свечение уменьшалось, наблюдатель видел лампу не при каждом обороте диска.

Такие результаты опыта можно объяснить, только исходя из квантовой теории. Если источник света, например раскалённая вольфрамовая нить лампы, излучает свет не непрерывно, а отдельными частицами – квантами, то число ежесекундно выбрасываемых квантов будет различно. Это число квантов может быть и больше, и меньше некоторого среднего значения, определяемого мощностью лампы. Человеческий глаз способен зарегистрировать свет, если на сетчатку глаза ежесекундно попадает не менее 52 квантов зелёного света. При большой мощности лампы число излучаемых квантов всегда больше 52, и наблюдатель видел свет. Но после того как уменьшили мощность лампы, в некоторые моменты времени лампой излучалось больше, а в некоторые моменты меньше, чем 52 кванта.

И в итоге при одних оборотах диска наблюдатель мог видеть свет, а при других оборотах число квантов, излучаемых лампой, было недостаточно для воздействия на сетчатку глаза.



Корпускулярно-волновой дуализм¹. При изучении природы света физики впервые столкнулись с поистине загадочной ситуацией. Одни физические явления (например, интерференция и дифракция) неопровержимо свидетельствуют о наличии у света волновых свойств. Другие физические явления (например, процессы теплового излучения и фотоэффект) столь же неопровержимо указывают на то, что свет – поток частиц (квантов). Такая ситуация получила в физике название *корпускулярно-волнового дуализма* (двойственности).

¹ От латинского *dualis* – двойственный.

Физикам пришлось осознать, что прежние привычные и наглядные представления: частица – только сгусток вещества, волна – только колебание, распространяющееся в пространстве, *неприменимы в атомных масштабах (микром мире)!*

Оказалось, что понятия и принципы классической физики, применявшиеся при изучении «большого мира», неприменимы вовсе или ограничено применимы в области микромира. Физикам потребовалось разработать иные представления и законы. Эти законы стали основой квантовой физики.

Первоначально законы квантовой физики касались только природы света, но в дальнейшем оказалось, что их необходимо использовать и при решении других физических задач, например при рассмотрении движения электронов в атоме. Так *в двадцатом веке возникли квантовая физика, квантовая электродинамика и другие разделы квантовой физики.*

Пример решения задачи.

Чему равна энергия кванта зелёного света с длиной излучения 550 нм? Выразите энергию в электронвольтах. (Электронвольт – энергия, приобретаемая электроном при прохождении им ускоряющего напряжения в 1 вольт. $1 \text{ эВ} = 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.)

Дано: $\lambda = 550 \text{ нм}$ $E - ?$	СИ $5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$	Решение: Энергия кванта вычисляется по формуле $E = h\nu, \quad (37.2)$
--	-------------------------------------	---

где ν – частота излучения;

h – постоянная Планка.

Длина волны излучения, его частота и скорость излучения связаны между собой известным соотношением

$$c = \lambda\nu, \quad (37.3)$$

где $c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – скорость света.

Из соотношений (37.2)–(37.3) имеем

$$E = \frac{hc}{\lambda}.$$

$$E = 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Так как $1 \text{ эВ} = 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, то энергия кванта зелёного света в электронвольтах равна

$$E = 3,6 \cdot 10^{-19} \cdot \frac{1 \text{ эВ}}{1,60219 \cdot 10^{-19}} = 2,2 \text{ эВ}.$$

Ответ: $E = 2,2 \text{ эВ}$.

Кризис классической физики (проблема теплового излучения, явление фотоэффекта), **М. Планк, А. Эйнштейн, квантовый характер излучения и поглощения света, квант, постоянная Планка $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с,** корпускулярно-волновой дуализм.

- 37.1** ● Почему свечение лампы накаливания приобретает красноватый оттенок при уменьшении напряжения в осветительной сети?
- 37.2** ● Как изменились частота и длина волны света, если энергия квантов увеличилась в 4 раза?
- 37.3** ● Чему равна энергия кванта ультрафиолетового излучения с частотой $2,47 \cdot 10^{15}$ Гц? Чему равна длина волны данного излучения?
- 37.4** ● При какой частоте электромагнитного излучения энергия кванта будет равна кинетической энергии электрона, движущегося со скоростью, составляющей 10 % от скорости света?
- 37.5** ● Лазерная указка имеет мощность 1,5 мВт. Сколько квантов ежесекундно излучается указкой, если длина волны излучения составляет 660 нм?

§ 38. ЛИНЕЙЧАТЫЕ СПЕКТРЫ. КВАНТОВАЯ СТРУКТУРА АТОМА



Наблюдение, размышление и опыт – вот что составляет... научный метод.

*Р. Фейнман (1918–1988),
выдающийся американский физик-теоретик,
лауреат Нобелевской премии*

Вам уже известно явление дисперсии света.

Лабораторная работа «Наблюдение линейчатых спектров»

Оборудование: проекционный аппарат, регулятор напряжения, спектральные трубки с водородом, гелием, криптоном, источник высокого напряжения (эти приборы являются общими для всего класса), стеклянная пластинка со скошенными гранями.

Указания к работе

Спектральная трубка состоит из двух стеклянных цилиндрических баллончиков, герметично соединённых между собой узкой трубочкой (рис. 312). В баллончиках укреплены металлические контакты-электроды, которые выведены наружу. Спектральные трубки наполнены газом при пониженном давлении – водородом, гелием или криптоном.

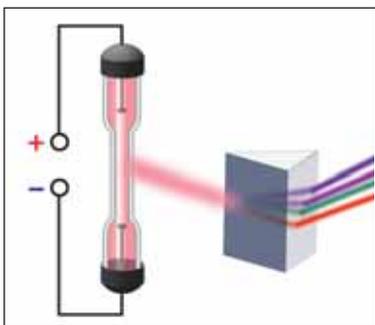


Рис. 312

Если к трубке подвести напряжение в несколько тысяч вольт, то через газ будет протекать электрический ток. Как говорят, будет происходить газовый разряд.

Электроны, движущиеся в трубке, ускоряются электрическим полем, сталкиваются с атомами газа и передают им при этом часть своей энергии. Атомы, получившие избыток энергии, излучают свет. В результате газ в трубке светится.

Так как газ состоит из практически не взаимодействующих между собой атомов, то каждый атом газа излучает свет *независимо от других атомов вещества*. Иными словами, световое излучение, возникающее при газовом разряде, это излучение отдельных атомов газа. Для изучения этого атомарного излучения воспользуемся призмой (рис. 312).



38.1. В чём заключается явление дисперсии света?

Направим свет, возникающий при газовом разряде, на призму и пронаблюдаем возникший спектр. Этот спектр атомарного излучения совершенно не похож на тот спектр, что образует свет, излучаемый нагретым телом, например спиралью лампы накаливания. В случае лампы накаливания возникает *сплошной* спектр. Спектр же атомов газа – набор отдельных цветных линий различной яркости, разделённых тёмными промежутками. Такие спектры называют *линейчатými*.

Задание 1. Стекло́нную пластинку со скошенными гранями расположите перед глазом горизонтально (пластинка выполняет роль призмы). Пронаблюдайте сплошной спектр, даваемый спиралью лампы накаливания проекционного аппарата. Температуру спирали лампы можно изменять, регулируя напряжение, подаваемое на лампу. Пронаблюдайте, как при этом меняется сплошной спектр излучения спирали.

Задание 2. Пронаблюдайте линейчатые спектры водорода, гелия, крипто́на. Изобразите спектры в тетради, отметив расположение наиболее ярких линий (или запишите, в какой последовательности располагаются линии).

Сделайте вывод, отличаются ли линейчатые спектры различных газов.

Квантовая теория Н. Бора. Как вам известно из курса физики 7 класса, научная загадка строения атома вещества была разрешена великим английским физиком Э. Резерфордом. Опытным путём было достоверно установлено, что атом имеет массивное положительно заряженное ядро малых размеров, вокруг которого движутся электроны. Такие представления о строении атома получили в физике название *планетарной модели атома*.

При создании этой модели (1911 г.), полностью подтверждённой экспериментально, физики столкнулись с так называемой *проблемой устойчивости атома*. В чём же заключалась эта проблема? Электрон вращается вокруг ядра, то есть движется с центростремительным ускорением. Следовательно, в соответствии с классической теорией электромагнетизма Максвелла ускоренно движущийся электрон должен быть источником непрерывного излучения. Однако такого не наблюдается; атом излучает свет, только получив избыток энергии.

Верный путь разрешения противоречий между экспериментом и теорией был указан знаменитым датским физиком-теоретиком Н. Бором. Им была предложена первая квантовая теория атома. Основные идеи, которыми руководствовался Н. Бор, могут быть сформулированы в виде следующих утверждений:

– **Энергия электрона в атоме не может быть произвольной. Электрон в атоме может находиться только в строго определённых неизменных со временем энергетических состояниях. Находясь в таком состоянии, атом не излучает энергию.**

– **Атом излучает (или поглощает) энергию в форме кванта электромагнитного излучения только при переходе из одного энергетического состояния в другое. При этом энергия излучаемого или поглощаемого кванта E равна разности состояний энергии атома.**

$$E = E_n - E_m, \quad (38.1)$$

где E_n и E_m – энергии состояний с номером n и m соответственно.

Нильс Бор (1885–1962). Великий датский физик. Создатель первой квантовой теории атома. Внёс значительный вклад в разработку основ квантовой теории, в теорию ядерных реакций, в том числе деления атомных ядер. Глава знаменитой международной школы физиков, организатор сотрудничества физиков всего мира.



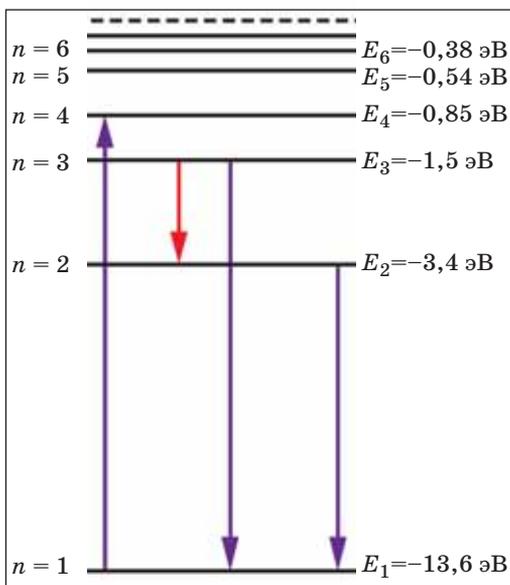


Рис. 313. Энергетическая диаграмма атома водорода

Опираясь на квантовые представления, Н. Бору удалось вычислить энергии состояний для атома водорода. Наглядно энергетические состояния атома представляют в виде *энергетической диаграммы*, где каждое энергетическое состояние атома изображают определённой горизонтальной чертой – *энергетическим уровнем* (рис. 313).

Значение энергий состояний указаны на диаграмме в электронвольтах¹. Пусть вас не смущает знак минус перед значением энергии. Это обусловлено тем, что на диаграмме энергия свободного электрона, не «привязанного» к ядру атома, взята равной нулю. Поэтому энергия электрона, взаимодействующе-

го с ядром и находящегося «ниже уровня свободы», принимает отрицательные значения.

Уровень 1 с минимальной энергией называют *основным (или нормальным) состоянием атома*. В основном состоянии атом может находиться сколь угодно долго. Если же атом получает избыток энергии, то он переходит в возбуждённое состояние с номером уровня 2, 3, 4, 5 и так далее. Например, на энергетической диаграмме (рис. 313) условно показан процесс поглощения энергии атомом и переход атома из первого основного состояния в *возбуждённое состояние* с номером уровня 4. В возбуждённом состоянии атом пребывает не более одной десятиллионной доли секунды и затем из возбуждённого состояния самопроизвольно переходит в состояние с меньшей энергией. При этом излучаются кванты, энергия которых определяется соотношением (38.1). Так, на энергетической диаграмме (рис. 313) в качестве примера изображены переходы с уровня 3 на уровень 2 и на уровень 1, с уровня 2 на уровень 1.

Теория Н. Бора смогла *объяснить возникновение линейчатых спектров*. При переходе электрона в атоме с одной «энергетической ступеньки» на другую излучается квант строго определённой энергии, а значит, и строго определённой частоты и длины волны излучения.

¹ Напомним, что $1 \text{ эВ} = 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.



В качестве примера приведём расчёт длины волны излучения, соответствующего переходу электрона с уровня 3 на уровень 2 в атоме водорода (красная линия спектра).

<i>Дано:</i>	<i>СИ:</i>	<i>Решение:</i>
$E_3 = -1,5 \text{ эВ}$	$-2,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$	В соответствии с теорией Н. Бора энергия кванта E равна
$E_2 = -3,4 \text{ эВ}$	$-5,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$	
$\lambda - ?$		$E = E_3 - E_2 .$ (38.2)

С другой стороны, энергия кванта определяется частотой излучения ν :

$$E = h\nu , \quad (38.3)$$

где h – постоянная Планка.

Длина волны излучения λ , его частота ν и скорость света связаны между собой известным соотношением

$$c = \lambda\nu . \quad (38.4)$$

Из (38.2) – (38.4) окончательно имеем

$$\lambda = \frac{hc}{E_3 - E_2} .$$

$$\lambda = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 2,9979 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{5,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} - 2,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} = 6,6 \cdot 10^{-7} \text{ м} ,$$

$$\lambda = 660 \text{ нм} .$$

Действия с единицами измерений:

$$\frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\text{Дж}} = \text{м} .$$

Итак, значение длины волны излучения, вычисленное по теории Н. Бора, составляет 660 нм. Вычисленное нами значение совпадает со значением длины волны, измеренной в эксперименте.

Спектральный анализ. Атомы разных химических элементов различаются зарядом атомного ядра и числом электронов, находящихся в атоме. По этой причине энергия взаимодействия электрона и ядра в атомах разных химических элементов не одинакова. Как следствие, атомы разных химических элементов имеют различный набор энергетических состояний, *возбужденные атомы различных химических элементов излучают кванты разной энергии и, следовательно, имеют разные линейчатые спектры.*

Атомы любого химического элемента создают «индивидуальный» линейчатый спектр, не совпадающий со спектрами других химических элементов. (Спектры излучения некоторых химических элементов приведены на рисунке II цветной вклейки.) Различия в линейчатых спектрах позволяют осуществлять спектральный анализ. **Спектральный анализ – определение химического состава вещества по его спектру.**

Чувствительность этого метода так велика, что позволяет определить химический состав образца массой не более одной десятиллиардной доли грамма. В настоящее время составлены таблицы спектров атомов всех химических элементов, и метод спектрального анализа нашёл широкое применение в металлургии, геологии, производстве чистых полупроводников, криминалистике и так далее.

Благодаря спектральному анализу установлен химический состав звёзд. Звёзды и галактики находятся невообразимо далеко от Земли – свет от них идёт к нам десятки, сотни и тысячи лет! Несмотря на это, учёные по спектру света далёких звёзд и галактик определяют химический состав небесных тел, а также их температуру и даже скорость движения. Нельзя не согласиться с утверждением, что «самым выдающимся открытием астрономии было открытие того, что *звёзды состоят из таких же атомов, что и Земля...* Ведь два химических элемента были даже обнаружены на звёздах прежде, чем на Земле: гелий¹ (он был открыт на Солнце, поэтому так и назван) и технеций (его обнаружили на некоторых холодных звёздах)»².

Методом спектрального анализа было установлено, что основными химическими элементами, входящими в состав звёзд (в том числе и Солнца), являются водород и гелий.

Газоразрядная трубка, **линейчатый спектр, квантовая теория атома Н. Бора**, энергетическая диаграмма атома водорода, энергетический уровень, основное (нормальное) состояние атома, возбуждённое состояние атома, $E = E_n - E_m$, **спектральный анализ.**

38.1 ● В 1868 г. в момент солнечного затмения в спектре Солнца была обнаружена ярко-жёлтая линия, первоначально принятая учёными за линию излучения натрия. Впоследствии было установлено, что длина волны этой линии не совпадает с длиной волны в спектре натрия и не принадлежит ни одному из ранее известных химических элементов. Рассмотрите спектры излучения (цветная вклейка, рисунок II) и выскажите предположение, спектру какого химического элемента принадлежит данная линия.

¹ От греческого *helios* – солнце.

² Изречение выдающегося физика-теоретика двадцатого века Р. Фейнмана.

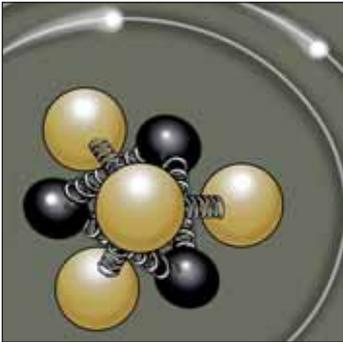
38.2 ● Определите энергию квантов, которые могут быть излучены при переходе электрона в атоме водорода с энергетического уровня 4 на уровень 2. Энергетическая диаграмма состояний атома водорода приведена на рисунке 313.

38.3 ● Во сколько раз энергия кванта, излучаемого атомом водорода при переходе электрона с энергетического уровня 2 на уровень 1, больше энергии кванта, излучаемого атомом водорода при переходе электрона с энергетического уровня 6 на уровень 2? Во сколько раз различаются частоты излучений?

38.4 ● Проведя соответствующий расчёт, покажите, что зрение человека не воспринимает излучение, испускаемое атомом водорода при переходе электрона с энергетического уровня 5 на энергетический уровень 3.

38.5 ● Какое минимальное ускоряющее электрическое напряжение должен пройти электрон, чтобы при столкновении с атомом водорода он мог бы перевести его из основного энергетического состояния в возбуждённое состояние?

§ 39. СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДРА



Кто решится утверждать, что мы знаем всё, что может быть познано?

Галилео Галилей

Вам уже известна планетарная модель атома.

Протонно-нейтронная модель атомного ядра. В 1932 г. произошло одно из важнейших событий в ядерной физике – был открыт нейтрон. Нейтрон¹ – нейтральная (не имеющая электрического заряда) частица с массой чуть больше массы ядра атома водорода. Ядро атома водорода – частица, получившая название протон². До 1932 г. были известны только электрически заряженные частицы – электроны, протоны, ионы, ядра атомов. Нейтрон – это первая из нейтральных частиц, обнаруженная учёными.

¹ От латинского *neuter* – ни тот, ни другой.

² От греческого *protos* – первый.

После открытия нейтрона была предложена протонно-нейтронная модель атомного ядра, получившая в дальнейшем экспериментальное подтверждение. Согласно этой модели **ядро атома состоит из протонов и нейтронов**.

Так как электрический заряд протона численно равен заряду электрона, а нейтрон лишён электрического заряда, то число протонов в ядре равно числу электронов в электронных оболочках атомов. Из курса химии вам известно, что порядковый номер химического элемента в периодической системе Менделеева равен числу электронов в электронных оболочках атома. Таким образом, **порядковый номер элемента в периодической системе Менделеева совпадает с числом протонов в ядре атома**.



39.1. Сколько протонов содержится в ядре атома гелия? в ядре атома лития?

В атомной и ядерной физике массу частиц измеряют, как правило, не в килограммах или граммах, а в атомных единицах массы (а. е. м.).

$$1 \text{ а. е. м.} = 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Массы протона (p), нейтрона (n), электрона (e), выраженные в атомных единицах массы, равны соответственно

$$m_p = 1,00728 \text{ а. е. м.,}$$

$$m_n = 1,00866 \text{ а. е. м.,}$$

$$m_e = 0,0005486 \text{ а. е. м.}$$

Массы протона и нейтрона приблизительно одинаковы и равны 1 а. е. м., масса электрона мала в сравнении с массой протона или нейтрона. Значит, масса атома (атомного ядра) в атомных единицах массы, округлённая до целого числа, численно равна общему числу протонов и нейтронов в ядре атома. Это позволяет определять число нейтронов в ядре. Обратимся к периодической системе Менделеева (смотрите цветную вклейку в учебнике).

Например, для гелия (с округлением массы атома до целого числа в атомных единицах массы) имеем



Что означают указанные числа?

2 – порядковый номер химического элемента в периодической системе Менделеева, значит, в ядре атома гелия два протона;

4 – округлённое значение массы ядра, значит, в ядре атома гелия содержится (помимо двух протонов) ещё и два нейтрона.



39.2. Для алюминия в периодической системе Менделеева указано:



Сколько протонов в ядре атома алюминия? Сколько нейтронов в ядре атома алюминия?

Протонно-нейтронная модель объяснила существование изотопов¹.

Изотопы – разновидности химического элемента, различающиеся по массе ядра.

То, что атомы одного и того же химического элемента могут иметь различную массу, экспериментально доказал в 1912 году выдающийся английский физик Дж. Дж. Томсон. Пропустив пучок ионов неона через электрические и магнитные поля, он обнаружил, что пучок ионов, отклоняясь, расщепился на две части. Это свидетельствует о том, что инертные свойства ионов различны. Как показали измерения, масса ионов неона составляет или 20 или 22 а. е. м.

Ядра изотопов химического элемента содержат **одинаковое число протонов**, и значит, изотопы имеют один и тот же заряд ядра. Поэтому у атомов-изотопов одинаковое число электронов, одинаковые электронные оболочки и, как следствие, одинаковые химические свойства. По этой причине все изотопы определённого химического элемента занимают одну клетку в периодической системе Менделеева.



39.3. Чем же объясняется различие в массе ядер у изотопов?

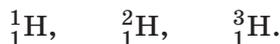
Например, химический элемент с наибольшим зарядом ядра из тех, что имеются в природе, – это уран².

Уран имеет изотопы: уран-238 и уран-235:



В ядре более тяжёлого изотопа урана (${}_{92}^{238}\text{U}$) содержится 146 нейтронов. В ядре более лёгкого изотопа урана (${}_{92}^{235}\text{U}$) содержится 143 нейтрона.

Самый лёгкий химический элемент – водород – также имеет изотопы:



¹ От греческого *isos* – равный и *topos* – место.

² Химические элементы с ещё большим зарядом ядра (то есть имеющие в периодической системе Менделеева номер больше 92) в природе не встречаются, а получены искусственно.

В ядре лёгкого водорода (${}^1_1\text{H}$) только один протон. Более тяжёлый водород (${}^2_1\text{H}$) содержит в атомном ядре один протон и один нейтрон. Изотоп называют дейтерием. Самый тяжёлый водород (${}^3_1\text{H}$) имеет ядро, состоящее из одного протона и двух нейтронов. Изотоп ${}^3_1\text{H}$ называют тритием.

Как следует из рассмотренных примеров, изотопы одного и того же химического элемента различаются числом нейтронов в ядре.

В настоящее время для всех химических элементов их изотопы либо обнаружены в природе, либо получены искусственно.

Ядерные силы. Энергия связи ядра. После того как было установлено, что атомное ядро состоит из протонов и нейтронов, возник вопрос, что же удерживает эти частицы в ядре. Силы всемирного тяготения между частицами слишком малы. Электрические силы между протоном и нейтроном не действуют, а между двумя протонами действуют силы отталкивания. Значит, устойчивость атомного ядра обеспечена какими-то силами притяжения, отличающимися и от сил всемирного тяготения, и от сил электромагнитного взаимодействия.

Взаимодействие, существующее между протоном и нейтроном, получило название *сильного взаимодействия*. Силы, действующие в ядре между протонами и нейтронами, называют *ядерными силами*.

Каковы же характерные особенности ядерных сил? Во-первых, эти силы во много раз больше сил электромагнитных и тем более гравитационных. Ведь атомное ядро – система, устойчивая к внешнему воздействию. Ни высокие температуры, ни огромные давления не приводят к изменению ядра. Во-вторых, ядерные силы проявляют свою «хватку» только на малых расстояниях, сравнимых с размерами атомного ядра (10^{-15} м). Будь это не так, ядерные силы влияли бы на движение частиц при атомных, а не при ядерных масштабах расстояний¹.

Сильное взаимодействие протонов и нейтронов в ядре характеризуют величиной «энергия связи». *Энергия связи – это энергия, которую необходимо затратить, чтобы разделить ядро на отдельные протоны и нейтроны.*

Проведём аналогию² процессов деления и образования атомных ядер с процессами испарения и конденсации. Для того чтобы «разрушить» жидкость – разделить её на отдельные молекулы, необходимо затратить определённую энергию. И наоборот, при конденсации пара, когда отдельные молекулы объединяются в капельки жидкости, происходит выделение точно такого же количества теплоты.

¹ Напомним, что размер атома 10^{-10} м, то есть в сто тысяч раз больше размера ядра.

² Аналогия – сходство предметов, явлений, процессов в каких-либо свойствах.

Следовательно, одновременно *энергия связи* – это энергия, которая выделяется при образовании атомного ядра из отдельных протонов и нейтронов.

Как рассчитать энергию связи? Соответствующие расчёты можно провести, применив знаменитую формулу А. Эйнштейна.

Эйнштейном было установлено универсальное соотношение между энергией покоящегося тела E_0 и его массой m :

$$E_0 = mc^2, \quad (39.1)$$

где c – скорость света в вакууме.

Что означает данное соотношение? Если покоящееся тело (система тел) имеет массу m , то оно обладает энергией E_0 . Когда тело движется, то его полная энергия равна сумме кинетической энергии тела и энергии, содержащейся в покоящемся теле. Осознание того, что любое покоящееся тело обладает энергией, было величайшим открытием двадцатого века. Величина этой энергии и выражается через массу тела соотношением Эйнштейна.

Вычислим в качестве примера энергию частицы E_1 , масса которой в точности равна 1 а. е. м.

$$E_1 = mc^2.$$

$$E_1 = 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot (2,9979 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}})^2,$$

$$E_1 = 14,924 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}.$$

Выразим эту энергию в мегаэлектронвольтах (МэВ).

$$1 \text{ эВ} = 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Тогда

$$1 \text{ МэВ} = 1,60219 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}.$$

Выразим энергию E_1 в МэВ (мегаэлектронвольтах).

$$E_1 = 14,924 \cdot 10^{-11} \frac{1 \text{ МэВ}}{1,60219 \cdot 10^{-13}}.$$

$$E_1 = 931,5 \text{ МэВ}. \quad (39.2)$$

Какие выводы можно сделать, анализируя формулу

$$E_0 = mc^2 ?$$

Если масса системы тел изменяется (увеличивается или уменьшается), то изменяется (увеличивается или уменьшается) энергия системы. При разделении ядра на отдельные протоны и нейтроны энергия возрастает, значит, масса частиц больше массы ядра. При образовании ядра из отдельных протонов и нейтронов энергия уменьшается, значит, масса ядра меньше массы протонов и нейтронов. Эти неожиданные выводы подтверждаются опытами! Масса ядра атома, как показывают точнейшие измерения масс, действительно всегда меньше общей массы всех протонов и нейтронов, составляющих ядро.

Обозначим число протонов в ядре Z , а число нейтронов – N . Тогда общая масса протонов и нейтронов, составляющих ядро, равна

$$Zm_p + Nm_n,$$

где m_p – масса протона;

m_n – масса нейтрона.

Если массу ядра обозначить как $M_{яд}$, то уменьшение массы ядра Δm составит

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - M_{яд}. \quad (39.3)$$

Измерив уменьшение массы ядра атома Δm (или, как говорят физики, измерив *дефект массы*), можно вычислить энергию связи ядра $E_{св}$:

$$E_0 = mc^2,$$

$$\Delta E_0 = \Delta mc^2.$$

Следовательно, энергия связи равна

$$E_{св} = \Delta mc^2, \quad (39.4)$$

или с учётом (39.3)

$$E_{св} = (Zm_p + Nm_n - M_{яд})c^2. \quad (39.5)$$

Вычислим также удельную энергию связи $E_{удельн}$. Удельной энергией связи называют энергию связи, приходящуюся на одну частицу ядра.

$$E_{удельн} = \frac{E_{св}}{Z + N}. \quad (39.6)$$

Массы ядер всех химических элементов определены экспериментально. Значения масс ядер некоторых изотопов приведены в таблице.

Масса ядер некоторых изотопов, а. е. м.

Изотоп	Масса ядра изотопа	Изотоп	Масса ядра изотопа
${}^1_1\text{H}$ (водород)	1,00728	${}^{10}_5\text{B}$ (бор)	10,01020
${}^2_1\text{H}$ (дейтерий)	2,01355	${}^{11}_5\text{B}$ (бор)	11,00657
${}^3_1\text{H}$ (тритий)	3,01550	${}^{12}_6\text{C}$ (углерод)	11,99671
${}^3_2\text{He}$ (гелий)	3,01492	${}^{14}_7\text{N}$ (азот)	13,99923
${}^4_2\text{He}$ (гелий)	4,00150	${}^{15}_7\text{N}$ (азот)	14,99627
${}^6_3\text{Li}$ (литий)	6,01348	${}^{16}_8\text{O}$ (кислород)	15,99052
${}^7_3\text{Li}$ (литий)	7,01436	${}^{17}_8\text{O}$ (кислород)	16,99474
${}^8_4\text{Be}$ (бериллий)	8,00312	${}^{27}_{13}\text{Al}$ (алюминий)	26,97433

Знание массы ядер изотопов позволяет вычислить энергию связи и удельную энергию связи.



График зависимости удельной энергии связи от числа частиц (протонов и нейтронов) в ядре изображён на рисунке 314.

Наибольшую удельную энергию связи имеют ядра, содержащие в своём составе 50–60 частиц.

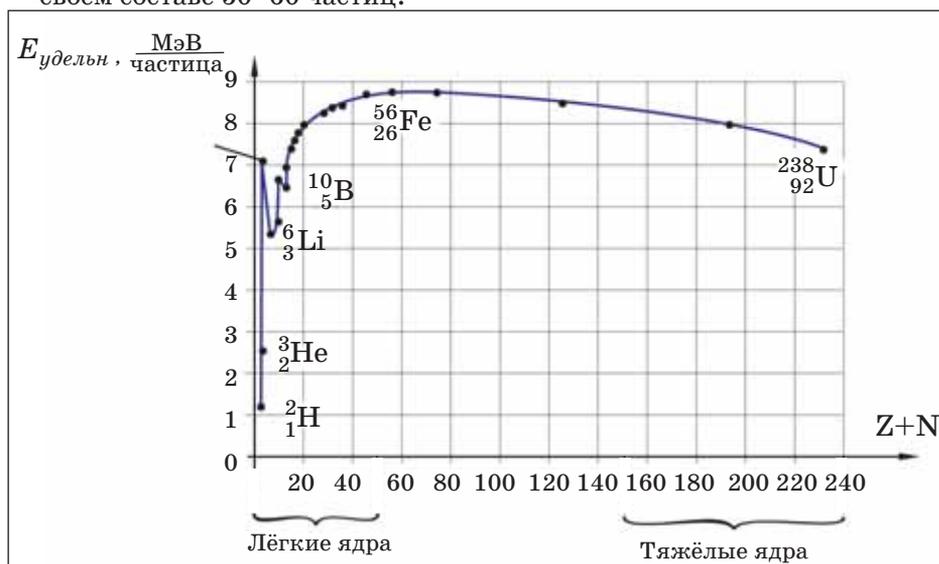


Рис. 314



39.4. Чему равна (приблизённо) масса ядер, содержащих в своем составе 50–60 частиц? Используя периодическую систему Менделеева, укажите химические элементы, имеющие такой состав ядра.

Атомные ядра таких химических элементов (хром, марганец, железо, никель, кобальт) наиболее устойчивы.

Пример решения задачи. Вычислите энергию связи и удельную энергию связи изотопа лития ${}^7_3\text{Li}$ (в МэВ и МэВ/частица соответственно).

Дано: Изотоп ${}^7_3\text{Li}$ $E_{св} - ?$ $E_{удельн} - ?$	Решение: Определим число протонов Z и число нейтронов N в ядре изотопа лития ${}^7_3\text{Li}$. $Z = 3, N = 4.$
---	---

Для расчёта дефекта массы воспользуемся формулой (39.3).

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - M_{яд.}$$

$$\Delta m = 3 \cdot 1,007\,28 \text{ а.е.м.} + 4 \cdot 1,008\,66 \text{ а.е.м.} - 7,014\,36 \text{ а.е.м.},$$

$$\Delta m = 7,056\,48 \text{ а.е.м.} - 7,014\,36 \text{ а.е.м.},$$

$$\Delta m = 0,042\,12 \text{ а.е.м.}$$

Дальнейший расчёт энергии связи можно провести по формулам (39.4) и (39.5). Однако есть и более простой вариант. Из соотношения (39.2) известно, что 1 а.е.м. соответствует энергии

$$E_1 = 931,5 \text{ МэВ.}$$

Это позволяет составить следующую пропорцию:

$$\frac{E_{св} - \Delta m}{E_1 - 1 \text{ а. е. м.}}$$

и вычислить энергию связи.

$$E_{св} = \frac{931,5 \text{ МэВ} \cdot 0,042\,12 \text{ а. е. м.}}{1 \text{ а. е. м.}},$$

$$E_{св} = 39,23 \text{ МэВ.}$$

Далее не составит труда определить и удельную энергию связи [формула (39.6)].

$$E_{удельн} = \frac{E_{св}}{Z + N}.$$

$$E_{удельн} = \frac{39,23 \text{ МэВ}}{7 \text{ частиц}},$$

$$E_{удельн} = 5,604 \text{ МэВ/частица}.$$

Ответ: $E_{св} = 39,23 \text{ МэВ}$, $E_{удельн} = 5,604 \text{ МэВ/частица}$.

Протонно-нейтронная модель ядра атома, физический смысл порядкового номера химического элемента в периодической системе Менделеева, изотоп, Дж. Дж. Томсон, сильное взаимодействие, ядерные силы, энергия связи, $E_0 = mc^2$, 931,5 МэВ/а.е.м., дефект массы, $E_{св} = \Delta mc^2$, $\Delta m = Zm_p + Nm_n - M_{яд}$, $E_{св} = (Zm_p + Nm_n - M_{яд})c^2$, удельная энергия связи, $E_{удельн} = \frac{E_{св}}{Z + N}$.

39.1 ● Масса ядра изотопа составляет (округлённо) 37 а. е. м. Известно, что ядро содержит 20 нейтронов. Сколько протонов входит в состав данного ядра? Изотопом какого химического элемента является ядро?

39.2 ● Ядра изотопов гелия ${}^4_2\text{He}$ и ${}^3_2\text{He}$ проходят одинаковое ускоряющее напряжение и приобретают одинаковую кинетическую энергию. (Первоначально изотопы покоились.) Во сколько различаются скорости и импульсы изотопов после ускорения?

39.3 ● Вычислите энергию связи ядра алюминия ${}^{27}_{13}\text{Al}$ (в МэВ).

39.4 ● На рисунке 315 изображена схема простейшего масс-спектрографа – прибора, позволяющего определить массы изотопов. В камере ионизатора образуются ионы изотопов, которые ускоряются электрическим полем и через щель влетают в область магнитного поля. Под действием силы со стороны магнитного поля изотопы движутся с центростремительным ускорением по дуге окружности определённого радиуса. После поворота в магнитном поле на 180° изотопы попадают на фотопластинку и вызывают её потемнение.

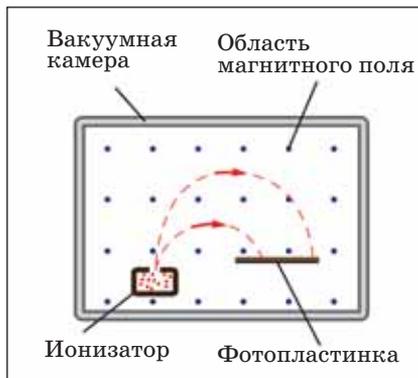
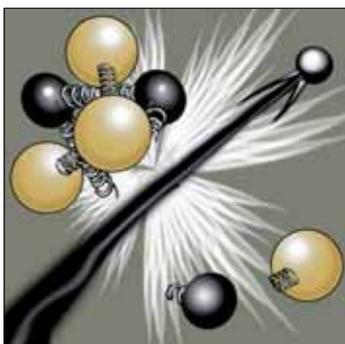


Рис. 315

Пусть в камере ионизатора образуются изотопы калия, которые влетают в область магнитного поля с одинаковыми скоростями и на них со стороны магнитного поля действуют одинаковые силы. Известно, что масса более тяжёлого изотопа калия равна (округлённо) 41 а. е. м. Чему равна масса другого изотопа, если расстояния от щели до мест потемнения фотопластинки составляют 20,5 и 19,5 см?

39.5 ● Чему равна (в кг) масса одного атома изотопа ${}^4_2\text{He}$? Сколько атомов содержится в 1 г гелия? Вычислите, какая энергия выделяется при образовании одного ядра ${}^4_2\text{He}$ из отдельных протонов и нейтронов (энергия связи). Определите, сколько энергии выделяется при образовании ядер гелия, содержащихся в 1 г вещества; выразите эту энергию в Дж. Сколько килограммов каменного угля требовалось бы сжечь, чтобы выделилось такое же количество энергии? Удельная теплота сгорания каменного угля составляет 27 МДж/кг.

§ 40. ЯВЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ



Знание и могущество – одно и то же.

Ф. Бэкон (1561–1626), английский философ.

Вам уже известно, что в ядре атома протоны и нейтроны взаимодействуют ядерными силами.

Явление радиоактивности. Явление радиоактивности было открыто французским физиком А. Беккерелем в 1896 г. Экспериментируя с препаратами, содержащими уран, Беккерель выяснил, что уран самопроизвольно, без всякого внешнего воздействия, является источником излучения, ранее неизвестного науке. Как это было установлено? Препарат, содержащий уран, располагали рядом с фотопластинкой, и через некоторое время обнаруживалось потемнение фотопластинки, вызванное излучением.

Выдающийся вклад в исследование этого явления был сделан английским физиком Э. Резерфордом, а также французскими учёными М. Склодовской-Кюри и П. Кюри. Ими было открыто ещё несколько «активных элементов», в том числе и радий¹. Поэтому явление самопроизвольного излучения получило название *радиоактивности*.

Исследования учёных позволили установить, что радиоактивное излучение имеет сложную структуру и состоит из трёх компонент, различающихся, в частности, по проникающей способности.

¹ Название химического элемента радий происходит от латинского *radius* – луч.

Пьер Кюри (1859–1906).

Мария Склодовская-Кюри (1867–1934).

Выдающиеся исследователи явления радиоактивности. Супругами Кюри были открыты новые радиоактивные элементы – полоний и радий. Лауреаты Нобелевской премии по физике. Мария Склодовская-Кюри – единственная в истории науки женщина – дважды лауреат Нобелевской премии.



Отдельные компоненты радиоактивного излучения назвали α -, β -, γ -излучением. Наименьшей проникающей способностью обладает α -излучение, которое не проходит даже через лист тонкой бумаги. У β -излучения проникающая способность больше, и β -излучение поглощается слоем алюминия толщиной в несколько миллиметров. Для ослабления потока γ -излучения, например в 10 раз, требуется уже слой свинца толщиной в несколько сантиметров.

Если узконаправленный поток радиоактивного излучения пропустить через область сильного магнитного поля, то излучение удаётся разделить на отдельные компоненты. Две компоненты (α - и β -излучение) отклоняются в противоположные стороны, значит, излучения обладают электрическим зарядом противоположных знаков. Гамма-излучение не отклоняется магнитным полем, оно электрически нейтрально.

Дальнейшее изучение физической природы радиоактивного излучения позволило учёным установить, что

α -излучение – поток ядер гелия, движущихся со скоростью, равной десяткам тысяч километров в секунду;

β -излучение – поток сверхбыстрых электронов, вылетающих из ядра атома со скоростью, близкой к скорости света;

γ -излучение – электромагнитное излучение с длиной волны от 10^{-10} до 10^{-13} м.

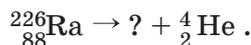
Явление радиоактивности сопровождается выделением колоссальной энергии. Так, например, один грамм радия за три месяца выделяет столько энергии, что её хватило бы для подъёма шестнадцатикилограммовой гири на высочайшую вершину мира – Эверест. И энергия выделяется непрерывно на протяжении десятков лет!

Такая энергия не может выделиться ни при каком *химическом* превращении вещества. Эти и другие факты привели учёных к выводу о том, что **при радиоактивности изменяется ядро атома.** Из ядра выбрасывается или ядро гелия (α -излучение) или электрон (β -излучение), а также возникает коротковолновое электромагнитное излучение (γ -излучение).

Явление радиоактивности – возникновение радиоактивного излучения в процессе самопроизвольного превращения одного атомного ядра в другое.

Превращения атомных ядер, происходящие при радиоактивности, можно записать в виде уравнений (сходных с уравнениями химических реакций).

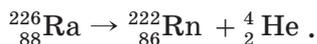
1. α -распад (на примере изотопа радия).



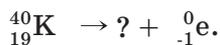
Как определить заряд нового ядра, образовавшегося при α -распаде? Необходимо использовать *закон сохранения электрического заряда*. Заряд ядра радия составляет «+88» (восемьдесят восемь зарядов протона), заряд ядра гелия равен «+2». Следовательно, заряд нового ядра равен «+86». Но заряд ядра равен порядковому номеру в периодической системе Менделеева. Таким образом, при α -распаде из ядра радия образуется ядро радона (${}_{86}\text{Rn}$).

Осталось определить массу ядра изотопа радона. В процессе данного радиоактивного распада ядро радия покидает α -частица (${}^4_2\text{He}$), масса которой приблизительно равна 4 а. е. м. Значит, масса ядра изотопа радона равна 222 а. е. м.

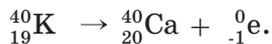
Таким образом,



2. β -распад (на примере изотопа калия).



Заряд электрона обозначен как «-1», масса электрона указана 0 а. е. м. Почему? Масса электрона составляет всего 0,0005486 а. е. м., поэтому при округлении массы электрона до целого числа и указывается 0 а. е. м. Тогда легко сообразить, что в рассматриваемом случае при β -распаде образуется изотоп с зарядом ядра атома «+20» и массой ядра 40 а. е. м.



3. γ -распад.

При γ -распаде не изменяется заряд ядра, а масса ядра незначительно уменьшается (почему?).



Математическая зависимость, которой подчиняется явление радиоактивности, была обнаружена Резерфордом и английским учёным Ф. Содди в 1903 г. в их совместных экспериментальных исследованиях. Установленный закон радиоактивного распада был сформулирован ими следующим образом: «Во всех случаях, когда отделили один из радиоактивных продуктов и исследовали его активность¹ независимо от радиоактивности вещества, из которого он образовался, было обнаружено, что активность во всех исследованиях уменьшается со временем по закону геометрической прогрессии».

Радиоактивные свойства химических элементов принято характеризовать физической величиной, называемой периодом полураспада. *Период полураспада* – это промежуток времени, в течение которого исходное число радиоактивных ядер уменьшается в два раза. Значения периодов полураспада различных радиоактивных изотопов находятся в самом широком диапазоне – от доли микросекунды до десятка миллиардов лет.

Обозначим период полураспада T . Пусть в начальный момент времени t_0 исходное число атомных ядер составляло N_0 . Сколько нераспавшихся ядер (обозначим их число N_1) осталось по прошествии промежутка времени, равного периоду полураспада?

$$t_1 = T, N_1 = \frac{N_0}{2} .$$

Сколько нераспавшихся атомных ядер останется после того, как пройдёт время, равное двум периодам полураспада? Закон радиоактивного распада – это закон геометрической прогрессии. За второй период полураспада вновь распадётся *половина* от исходного числа ядер. Значит, нераспавшимися останется четверть от первоначально-го числа ядер N_0 .

$$t_2 = 2T, N_2 = \frac{N_1}{2} = \frac{N_0}{2^2} .$$

Рассуждая аналогичным образом, получим

$$t_3 = 3T, N_3 = \frac{N_2}{2} = \frac{N_0}{2^3} .$$

$$t_n = nT, N = \frac{N_0}{2^n} = N_0 2^{-n},$$

где

$$n = \frac{t}{T} .$$

¹ Активностью радиоактивного препарата называют число распадов атомных ядер, происходящих в препарате за единицу времени.

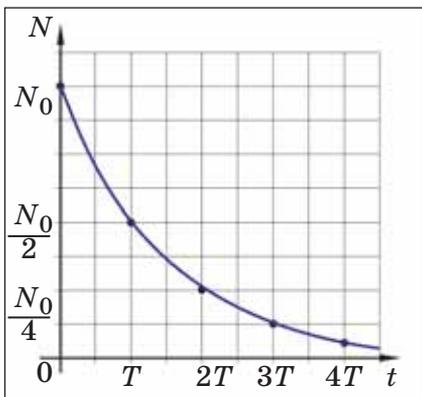


Рис. 316

Таким образом, математическое выражение закона радиоактивного распада имеет вид

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}},$$

где N_0 – число атомных ядер в первоначальный момент времени;

N – число атомных ядер, оставшихся нераспавшимися через время t .

График, иллюстрирующий закон, представлен на рисунке 316.

Пример решения задачи.

Воздействие космического излучения на верхние слои атмосферы приводит к образованию радиоактивного изотопа углерода $^{14}_6\text{C}$. В составе углекислого газа этот изотоп поглощается растениями и накапливается там. В итоге каждый грамм свежесрубленной древесины излучает 1050 β -частиц в час. Оцените, каков возраст древесины, обнаруженной археологами на месте стоянки древнего охотника, если 100 мг этой древесины имеют активность 26 распадов в час. Период полураспада $^{14}_6\text{C}$ составляет

$$T = 5700 \text{ лет.}$$

Решение

После того, как дерево было срублено, оно не поглощает углекислый газ, поступление радиоактивного изотопа прекращается. По этой причине активность древесины с течением времени уменьшается. Если к современному времени распад оставшегося радиоактивного углерода приводит к излучению 26 β -частиц в час в 100 мг древесины, то активность 1 г такой древесины составляла бы 260 распадов в час.

Это в $1050/260 = 4$ раза меньше первоначальной активности древесины. Если активность уменьшилась в 4 раза, то в соответствии с законом радиоактивного распада прошло время, равное двум периодам полураспада.

$$t = 2T.$$

$$t = 11\,400 \text{ лет.}$$

Ответ: $t = 11\,400$ лет.

Радиоактивные изотопы находят применение в науке, промышлен-

ности, сельском хозяйстве, медицине. Например, излучение, создаваемое радиоактивным веществом, направляют на большие клетки раковой опухоли и таким образом разрушают их. В промышленности и строительстве радиоактивным излучением просвечивают металлические изделия (трубы нефтепроводов, корпуса химических установок) для обнаружения возможных скрытых изъянов (дефектов).

Следует знать, что радиоактивное излучение вредно действует на живые организмы, и поэтому нужно соблюдать особые меры предосторожности при использовании радиоактивных веществ. Опасность радиоактивного излучения обусловлена в первую очередь тем, что оно вызывает *ионизацию вещества*. Это нарушает нормальный ход химических реакций в таком сложном механизме, как биологическая клетка.

Чем бóльшая энергия радиоактивного излучения будет поглощена веществом на единицу массы, тем большее ионизационное воздействие произведёт излучение. Поэтому в качестве единицы измерения воздействия излучения можно было бы выбрать отношение Дж/кг.

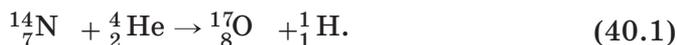
Но необходимо дополнительно учесть, что различные виды излучения оказывают различное воздействие на живые организмы. Гамма-излучение и потоки нейтронов обладают наибольшей проникающей способностью и представляют наибольшую опасность. По этой причине биологическое действие различных видов излучения характеризуют величиной, называемой *эквивалентная доза*. Единица измерения эквивалентной дозы в СИ называется *зиверт (Зв)*¹.

Природные радиоактивные изотопы, содержащиеся в земной коре, космическое излучение создают *естественный радиационный фон*, который *составляет около 2 мЗв за один год*. Человек подвергается воздействию излучения также и при проведении медицинских обследований, для них санитарными нормами установлена годовая эффективная доза в 1 мЗв.

Ядерные реакции. Изменения атомных ядер могут происходить не только самопроизвольно при радиоактивных распадах; изменения могут происходить и при столкновении ядер с другими ядрами или частицами. *Превращения, происходящие с ядрами при их взаимодействии с другими ядрами или частицами, называют ядерными реакциями.*

¹ Единица измерения эквивалентной дозы названа в честь шведского радиофизика Р. Зиверта (1896–1966), одного из основоположников радиобиологии.

Исторически первой ядерной реакцией была реакция превращения ядра азота в ядро кислорода при бомбардировке азота α -частицами.

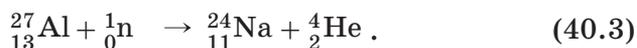


Такая реакция была осуществлена в 1919 году Э. Резерфордом.

В 1932 году, ускорив протоны электрическим полем с напряжением в несколько сотен тысяч вольт, физикам удалось расщепить ядро лития на две α -частицы.



Новый этап в осуществлении ядерных реакций наступил после открытия нейтрона. Нейтрон – частица, не имеющая электрического заряда, – при сближении с ядром не испытывает электрического отталкивания. Следовательно, нейтроны могут успешно проникать в ядро и вызывать их превращения. Ядерные реакции, происходящие под действием нейтронов, первым осуществил великий итальянский физик Э. Ферми. Например, при облучении нейтронами (${}_0^1\text{n}$) алюминиевой фольги наблюдается искусственная радиоактивность:



Деление урана. Ядерный реактор. Одной из ядерных реакций, происходящих под действием нейтронов, является реакция деления урана. При попадании нейтрона ядро урана делится на два осколка, при этом освобождается 2 или 3 нейтрона. Ядра-осколки, отталкиваясь

друг от друга электрическими силами, приобретают большую кинетическую энергию. В результате выделяется энергия около 200 МэВ при расщеплении одного ядра урана.

Главной особенностью деления урана является то, что при определенных условиях эта реакция становится цепной реакцией деления (рис. 317). Нейтроны, освобожденные при делении ядра урана, попадают в следующие ядра урана и вызывают их деление. Новые освобожденные нейтроны делят другие ядра урана, и таким образом процесс деления не прекращается.

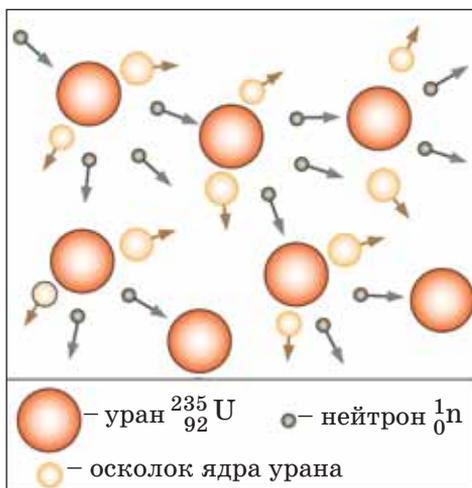


Рис. 317

Неуправляемая цепная реакция с взрывообразным выделением колоссальной энергии и катастрофическими последствиями происходит при взрыве атомной бомбы. В ходе Второй мировой войны 6 и 9 сентября 1945 года американскими военно-воздушными силами были сброшены атомные бомбы на японские города Хиросима и Нагасаки. Это привело к гибели сотен тысяч людей и разрушению городов.

Управляемая реакция деления урана с постепенным выделением энергии осуществляется при работе ядерного реактора (рис. 318). Основными элементами ядерного реактора являются:

– *ядерное горючее*. Это изотопы урана $^{235}_{92}\text{U}$, $^{238}_{92}\text{U}$ и другие изотопы, способные к цепной реакции;

– *замедлитель нейтронов*. Ядра урана наиболее эффективно делятся под воздействием медленных нейтронов. В качестве замедлителя используют воду, графит;

– *регулирующие стержни*. С их помощью управляют ходом реакции. Если ввести регулирующие стержни в зону ядерной реакции, то нейтроны будут поглощены веществом стержней и цепная реакция деления урана прекратится;

– *теплоноситель*. Служит для отвода энергии из реактора (используются вода, жидкий натрий и другие вещества).

Первый ядерный реактор был запущен в США в 1942 году под руководством Э. Ферми. В нашей стране ядерный реактор заработал в 1946 году; научный руководитель проекта – академик И. В. Курчатов. В 1954 году вступила в действие первая в мире атомная электростанция в г. Обнинске.

В настоящее время сотни ядерных реакторов действуют более чем в тридцати странах мира. Около 20 % электроэнергии, получаемой в мире, вырабатывается в ядерных реакторах, и в будущем роль атомной энергетики будет только возрастать.

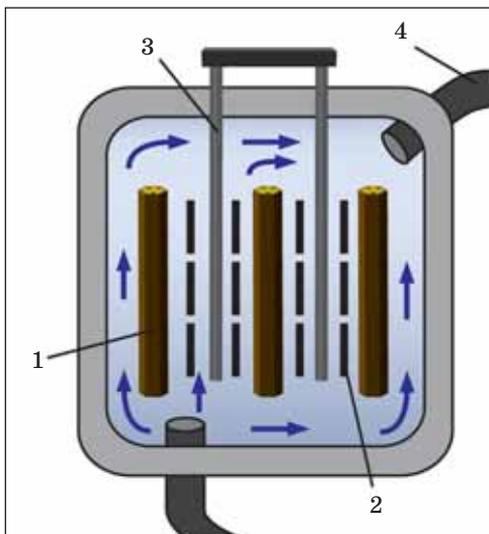


Рис. 318

- 1 – ядерное горючее;
2 – замедлитель нейтронов;
3 – регулирующие стержни;
4 – теплоноситель

Энергетическую «выгодность» реакции деления урана несложно объяснить, руководствуясь графиком зависимости удельной энергии связи от числа частиц в ядре атома (рис. 314). Из графика видно, что деление ядра урана на отдельные частицы – протоны и нейтроны – требует затрат энергии около 7,5 МэВ на одну частицу. После же деления ядра урана образуются два «осколка» – элементы средней части периодической системы Менделеева (с числом частиц в ядре около 100). Для таких элементов энергия связи составляет около 8,5 МэВ на одну частицу. В итоге энергетическая «выгода» составляет

$$8,5 \text{ МэВ} - 7,5 \text{ МэВ} = 1 \text{ МэВ}$$

на одну частицу. Значит, происходит выделение около 200 МэВ при делении одного ядра атома.

Термоядерные реакции. График зависимости удельной энергии связи от числа частиц в ядре (рис. 314) позволяет спрогнозировать *ещё один вид энергетически выгодных реакций*. Изотопы наиболее лёгкого элемента водорода – дейтерий ${}^2_1\text{H}$ и тритий ${}^3_1\text{H}$ – имеют малую энергию связи. В случае объединения двух таких лёгких ядер в одно более тяжёлое ядро (например, ядро гелия ${}^4_2\text{He}$) образуется атомное ядро с большей энергией связи. Следовательно, такие реакции должны сопровождаться выделением энергии.

Как вы знаете, частицы в атомном ядре удерживаются ядерными силами, которые действуют только на сверхмалых расстояниях (порядка 10^{-15}м). Что же необходимо, чтобы два ядра смогли объединиться в одно ядро более тяжёлого элемента? Нужно чтобы ядра сблизилась на столь малое расстояние, чтобы «в игру вступили» ядерные силы. Но сближению препятствуют силы электрического отталкивания, действующие между положительно заряженными ядрами. Для преодоления сил электрического отталкивания ядра изотопов водорода изначально должны обладать большой кинетической энергией. Большая кинетическая энергия теплового движения ядер означает, что вещество обладает высокой температурой. Реакции слияния лёгких ядер могут протекать только при огромных температурах в десятки миллионов (!) градусов. Поэтому такие реакции называют *термоядерными*.

Термоядерные реакции – это реакции слияния лёгких ядер при сверхвысокой температуре.

Именно термоядерные реакции являются источником энергии, излучаемой звёздами. На стадии зарождения звезды из газового водородного облака силы всемирного тяготения сжимают водород до

такой степени, что в центре образовавшейся звезды температура возрастает до десятков миллионов градусов. В результате начинают протекать термоядерные реакции; звезда в течение миллиардов лет светит, излучая энергию, а в недрах звезды «выпекаются» более тяжёлые химические элементы.



40.1. Чем объясняется присутствие химического элемента гелия в составе Солнца?



На Земле термоядерные реакции были первоначально осуществлены в виде неуправляемого термоядерного взрыва (1953 год). Температурные условия, необходимые для осуществления термоядерной реакции, были достигнуты при этом путём взрыва ядерного заряда.

В настоящее время учёные работают над созданием установок, в которых мог бы протекать **управляемый термоядерный синтез**. Эта научно-техническая задача является очень важной, а её решение крайне привлекательно. Ведь при образовании всего одного грамма гелия в результате слияния ядер изотопов водорода выделяется столько же энергии, сколько её выделяется при сгорании десяти тонн нефти.

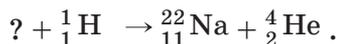
Одной из основных проблем, возникающих при попытке осуществить управляемый термоядерный синтез, является проблема удержания дейтерий-тритиевой смеси с температурой в десятки миллионов градусов. Ещё в середине двадцатого века было предложено для удержания термоядерной смеси использовать магнитное поле особой конфигурации. Построенные с того времени в России, Америке, Японии, Франции экспериментальные установки подтвердили перспективность идеи создания «магнитных стенок».

Для объединения усилий учёных различных стран в 1992 году было подписано Международное соглашение о разработке проекта международного экспериментального термоядерного реактора. В настоящее время разработка технического проекта завершена, и в 2010 году на юге Франции начато строительство термоядерного реактора. Можно надеяться, что в недалёкой перспективе рукотворное термоядерное «солнце» станет новым источником энергии во благо людей.

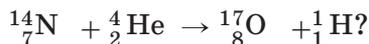
Явление радиоактивности, природа α -, β -, γ -излучения, ядерные реакции, расчёт энергии, выделяющейся или поглощающейся при ядерной реакции, цепная реакция деления урана, неуправляемая цепная реакция (атомная бомба), ядерный реактор, термоядерная реакция, энергия звёзд, управляемый термоядерный синтез.

40.1 При радиоактивном распаде изотопа радона ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ образуется изотоп полония ${}^{218}_{84}\text{Po}$. К какому виду – α или β – относится данный вид радиоактивного распада?

40.2 Допишите недостающие обозначения в ядерной реакции:

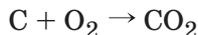


40.3 Выделяется или поглощается энергия в ядерной реакции



Ответ обосновать.

40.4 При делении одного ядра изотопа урана на два осколка выделяется энергия 200 МэВ. При химической реакции горения топлива



при образовании одной молекулы углекислого газа выделяется энергия 3,4 эВ.

Во сколько раз реакция деления урана энергетически более выгодна, чем реакция горения топлива?

40.5 Измерив количество солнечной энергии, поступающей на квадратный метр земной поверхности, учёные определили, что каждую секунду Солнце излучает $3,83 \cdot 10^{20}$ МДж энергии. На сколько тонн в связи с этим уменьшается масса Солнца за 1 с? за 1 год? Сравните вычисленное вами ежегодное уменьшение массы Солнца с его полной массой.

§ 41. МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЦ. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ



Радость видеть и понимать есть самый прекрасный дар природы.

А. Эйнштейн

Вам уже известно, что существуют различные элементарные частицы.

«Глаза» и «уши» современной физики.

В физике элементарными принято называть частицы, которые на современном уровне развития науки нельзя считать состоящими из более простых частиц. В процессе взаимодействия с другими частицами элементарная частица ведёт себя как единое целое.

Существенной проблемой физики элементарных частиц является обнаружение и регистрация частиц, которые так малы. Например, размеры частиц, составляющих ядро атома, – протонов и нейтронов – порядка 10^{-13} см (десятитысячная миллиардной доли сантиметра!).

Обнаружение и регистрация приборами отдельных элементарных частиц оказывается возможным при использовании в устройстве прибора «принципа лавины». Если на горном склоне скопились тысячи тонн снега, то порой для схода лавины бывает достаточно падения одного камня или крика неосторожного туриста. Точно так же и в регистрирующих приборах попадание одной частицы способно вызвать заметный эффект – срабатывание прибора. Одним из регистрирующих приборов является *счётчик Гейгера* (рис. 319). Основными элементами счётчика являются два электрода: металлический цилиндр *1* и тонкий проводник *2*, расположенный вдоль оси цилиндра. Электроды находятся в небольшом герметическом резервуаре *3*, наполненном газом – аргоном или неоном. К электродам прикладывают напряжение несколько сотен вольт.

Если, например, квант гамма-излучения попадает в счётчик, то квант ионизирует атом и в итоге возникает свободный электрон. Под действием электрического поля электрон движется к проводнику (аноду) и, ускоряясь, приобретает энергию, достаточную для ударной ионизации газа. В процессе ударной ионизации свободный электрон, сталкиваясь с атомом, выбивает из атома ещё один электрон; при каждом столкновении электрона с атомом число свободных электронов увеличивается. В результате возникает электронная лавина, и ток через счётчик резко возрастает.



41.1. Чему будет равно напряжение U на резисторе сопротивлением R (рис. 319) при силе тока I через счётчик?

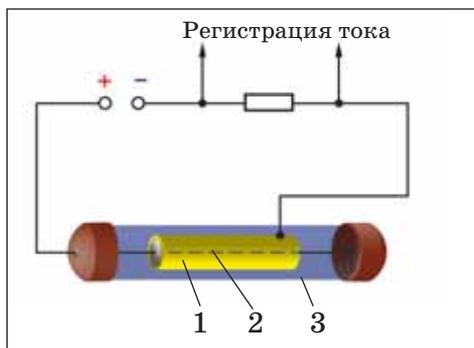


Рис. 319



Рис. 320

При возникновении электронной лавины возрастает ток через счётчик. Из-за этого увеличивается напряжение на резисторе R . Этот импульс напряжения и фиксирует регистрирующая аппаратура счётчика.

Счётчик Гейгера используется не только при проведении научных исследований. Этот счётчик является чувствительным элементом (детектором) во многих типах дозиметров. *Дозиметр* – это прибор для измерения дозы или мощности дозы ионизирующего излучения (рис. 320). К другому типу приборов относится *камера Вильсона*. Об этом приборе, изобретённом в 1910–1912 годах, великий физик Э. Резерфорд писал, что это «самый оригинальный и удивительный прибор в истории науки». В камере Вильсона частица, влетевшая в прибор, отмечает свой путь мельчайшими капельками жидкости. Этот видимый след, образованный частицей, называют *треком* (рис. 321).



Рис. 321

Камера Вильсона представляет собой герметически закрытую ёмкость *1*, заполненную парами воды, спирта и ацетона (рис. 322). При резком опускании поршня *2* пары, заполняющие камеру, расширяются и, совершив работу, охлаждаются. Охлаждённый пар становится *пересыщенным*. Это состояние пара является *неустойчивым*, и пар будет конденсироваться, образуя капельки жидкости. Но конденсация пара не происходит на «пустом месте». Центрами конденсации являются ионы, которые и «обрастают» молекулами жидкости.

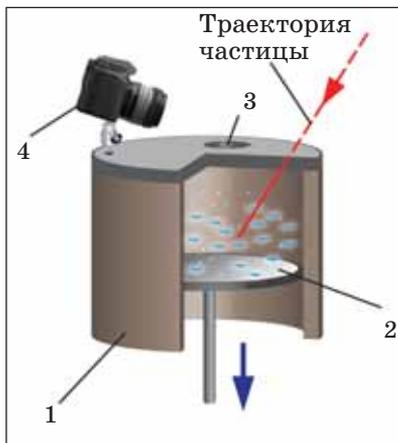


Рис. 322

Ионы же образуются вдоль траектории частицы, которая, влетев в камеру Вильсона, по ходу своего движения «срывает» электроны с ближайших атомов. В результате из-за ионизации воздуха вдоль траектории частицы возникает первоначально незримый «ионный след». Затем на этих ионах происходит конденсация пара и образование мельчайших капелек жидкости. Следы – треки частиц, образовавшихся в камере Вильсона, – наблюдают через смотровое окно *3* и фотографируют с помощью автоматического фотографического устройства *4* (рис. 322).



41.2. Почему камеру Вильсона физики часто называют туманной камерой?

По длине трека можно определить энергию частицы. Ведь чем больше первоначальная энергия частицы, тем большее число атомов сможет ионизировать частица, а значит, тем длиннее трек частицы. Если же камеру Вильсона поместить в магнитное поле, то тогда на заряженную частицу, пролетающую через прибор, будет действовать сила со стороны магнитного поля. В результате трек частицы искривится, и по кривизне трека удаётся определить отношение заряда частицы к её массе. Так удаётся установить, какой именно частице принадлежит трек, известна ли эта частица учёным или обнаружена новая, ранее неизвестная частица. Распутывая хитросплетения треков, оставленных частицами, учёные-физики, как настоящие детективы, разгадывают тайны природы.

Важнейший факт. Физики установили, что в мире элементарных частиц возможны взаимные превращения одних частиц в другие. Например, нейтрон, будучи не в составе атомного ядра, а в свободном состоянии, распадается на протон, электрон и частицу антинейтрино. Квант гамма-излучения большой энергии, взаимодействуя с веществом, превращается в две частицы – электрон и частицу позитрон. Следует подчеркнуть, что речь идёт об удивительном и необычном процессе! Происходят именно превращения одних частиц в другие, а не «сборка» новой конструкции – новой частицы из «остатков» прежних частиц. Действительно, внутри кванта гамма-излучения, движущегося со скоростью света, не могли «существовать» частицы электрон и позитрон, скорость которых всегда меньше скорости света.

Все превращения элементарных частиц строго подчиняются законам сохранения – закону сохранения энергии, закону сохранения импульса, закону сохранения электрического заряда¹.

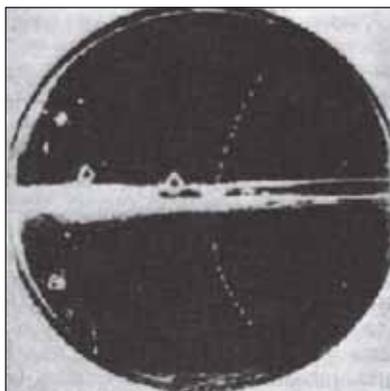


Рис. 323. Трек частицы, обнаруженной К. Андерсоном.

В середине камеры Вильсона была расположена свинцовая пластина. Пролетев через пластину, частица «теряла» часть своей энергии, уменьшала скорость. По этой причине кривизна трека в нижней части камеры больше

¹ Помимо перечисленных здесь законов сохранения существуют и другие законы сохранения, которые не изучаются в школьном курсе физики.

Античастицы. В 1932 году американский физик К. Андерсон поместил камеру Вильсона в сильное магнитное поле и сфотографировал треки частиц, искривлённые магнитным полем. Им были обнаружены необычные треки частиц. Радиус кривизны и толщина трека свидетельствовали о том, что эти следы принадлежат электронам. Но треки этих частиц были «завернуты» магнитным полем в противоположную сторону в сравнении с треками электронов (рис. 322).

Так была обнаружена частица с массой, равной массе электрона, но имеющая *положительный* электрический заряд, численно равный заряду электрона.

Эту частицу назвали позитроном¹. Позитрон по отношению к электрону является античастицей. Античастица имеет то же значение массы, что и частица, но отличается от неё знаком электрического заряда. В дальнейшем «двойники»-античастицы были обнаружены физиками для всех элементарных частиц. Это позволило учёным сделать вывод, что из античастиц может быть построено антивещество точно таким же образом, как вещество из частиц. В экспериментах на ускорителях заряженных частиц был получен, например, антигелий, ядро которого состоит из двух антипротонов и одного антинейтрона.



Классификация элементарных частиц. В настоящее время учёным уже известно несколько сотен (около 400) элементарных частиц. Некоторые из этих частиц существуют длительное время, стабильны, как, например, протон или электрон. «Жизненный срок» других частиц – миллионная и миллиардная доля секунды или даже ещё более короткий интервал времени, после чего происходит их превращение в другие элементарные частицы. Масса некоторых частиц мала, например, масса электрона составляет $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Другие частицы более «массивны». Так, масса протона составляет 1836,1 масс электрона, а масса частицы, открытой в 1964 году и названной «омега минус-гиперон», равна 3273 масс электрона.

После открытия значительного числа различных частиц перед физиками неизбежно возникла проблема их классификации и поиска ответа на закономерный вопрос, все ли открытые ими частицы являются элементарными. Эта проблема сходна с той, что в 1869 году решил выдающийся химик Д. И. Менделеев, перед которым стояла задача классификации химических элементов. Д. И. Менделеевым, как вам известно, была предложена периодическая система химических элементов.

¹ От латинского *positivus* – положительный.

В этой системе все известные к тому времени химические элементы были расположены по периодам и рядам в порядке возрастания их массы.

Проводя классификацию элементарных частиц, учёные подразделили их на следующие группы.

1. **Квант электромагнитного излучения.** Эту частицу называют фотоном. Фотон всегда движется со скоростью, равной скорости света. Фотон электрически нейтрален, существует до тех пор, пока не провзаимодействует с веществом и не поглотится им. Масса фотона равна нулю.

2. **Лептоны**¹. К лептонам учёные относят шесть частиц (а значит, и шесть античастиц). Именно к классу лептонов относится *электрон* – частица, входящая в состав атома любого химического элемента. Масса любого из лептонов (кроме одного) меньше массы других элементарных частиц.

3. **Адроны**². Самые массивные частицы – адроны – подразделяют на две подгруппы:

- частицы *мезоны*³,
- частицы *барионы*⁴.

Именно к группе барионов относятся известные нам протоны и нейтроны, составляющие ядро атома любого химического элемента.

По современным научным представлениям, адроны не являются истинно элементарными частицами, в отличие от лептонов. Адроны имеют внутреннюю структуру и состоят из других, более элементарных частиц – **кварков**. Частицы из подгруппы мезонов состоят из кварка и антикварка. Частицы из подгруппы барионов состоят из трёх кварков. Всего кварков шесть (а значит, и шесть антикварков). Идея о существовании кварков была высказана в семидесятых годах прошлого века. И экспериментальные факты, накопленные к настоящему времени, полностью подтверждают эту идею; физики убеждены в реальности кварковой структуры адронов (мезонов и барионов).

Таким образом, основу нашего мира от ядра атома до звёздных галактик составляет небольшое число элементарных частиц – кварков и лептонов, а также частиц – квантов, обеспечивающих их взаимодействие.

¹ От греческого *leptos* – тонкий, лёгкий.

² От греческого *handros* – большой, сильный.

³ От греческого *mesos* – средний, промежуточный.

⁴ От греческого *barys* – тяжёлый.

Элементарные частицы, счётчик Гейгера, трек, превращения элементарных частиц, античастицы, позитрон, фотон, лептоны, адроны (мезоны и барионы), кварки.

§ 42. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ



И это чудо, что, несмотря на поразительную сложность мира, мы можем обнаружить в его явлениях определённую закономерность.

*Э. Шредингер (1887–1961),
выдающийся австрийский физик-теоретик,
лауреат Нобелевской премии,
один из создателей квантовой физики*

Вам уже известно, что существуют различные группы элементарных частиц.

Виды взаимодействий. При изучении курса физики мы познакомились с различными силами, с различными видами взаимодействий, встречающихся в природе. Из механики нам известны сила тяготения, сила упругости и сила трения. Изучая электричество и магнетизм, мы узнали о силах, действующих на заряженную частицу со стороны электрического и магнитного полей. При знакомстве со строением атомного ядра нам стало известно о ядерных силах.

Некоторые из названных сил имеют «родственное» происхождение. Например, сила упругости и сила трения обусловлены взаимодействием между атомами соприкасающихся тел или одного деформированного тела. Следовательно, и сила упругости, и сила трения имеют электромагнитное происхождение.

Анализируя различные силы, рассматривая различные случаи взаимодействия тел, частиц и полей, учёные пришли к выводу, что *в природе можно выделить четыре основных фундаментальных вида взаимодействий.*

Фундаментальными взаимодействиями являются гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое взаимодействия.

Гравитационное взаимодействие безраздельно царит в мире космических объектов. Именно гравитационные силы – силы всемирного тяготения – управляют движением гигантских звёздных скоплений (галактик), движением звёзд в галактиках, планет в Солнечной системе и так далее.

В *электромагнитном взаимодействии* принимают участие любые заряженные частицы и кванты электромагнитного поля – фотоны. Благодаря электромагнитному взаимодействию в природе существуют отдельные атомы, молекулы, а также их «коллективы» – жидкости, твёрдые тела.

Именно электромагнитные силы дают возможность десяткам тысяч миллиардов атомов «собраться» в единое целое – биологическую клетку, основу жизни.

Примером *сильного взаимодействия* являются ядерные силы, которые обеспечивают существование атомных ядер. В отличие от гравитационных и электромагнитных сил, простирающих своё действие на большие расстояния, сильное взаимодействие является короткодействующим. Сильное взаимодействие проявляет себя только на малых расстояниях 10^{-15} – 10^{-14} м (именно таков размер атомного ядра).

Слабое взаимодействие (об этом виде взаимодействия ранее не упоминалось) заявляет о себе только в микромире – мире элементарных частиц. Это взаимодействие является ещё более короткодействующим, его радиус действия примерно 10^{-18} м (миллиардная миллиардной доли метра!). В слабом взаимодействии участвуют все известные нам элементарные частицы, кроме фотонов. Примером процесса со слабым взаимодействием может служить распад свободного (не находящегося в атомном ядре) нейтрона¹.



Взаимодействия и классификация частиц. В предыдущем параграфе при обсуждении вопроса о классификации частиц было отмечено, что в основу классификации частиц положены их массы. Первоначально такая точка зрения в физике была общепринятой, и это нашло своё отражение в названии отдельных групп частиц. Так, например, термин «лептон» происходит от греческого *leptos* – тонкий, лёгкий. (Напомним, что лептоном является такая частица, как электрон.)



42.1. Что означают термины «мезон» и «барион»?

¹ Среднее «время жизни» свободного нейтрона около 15 мин.

Однако ситуация изменилась в 1975 году, когда была открыта частица, относящаяся к лептонам, но с массой почти в два раза больше, чем у протона. Таким образом, величина массы частицы не может являться основным признаком, по которому частицу относят к той или иной группе. Учёные пришли к выводу, что **в основе классификации элементарных частиц должна лежать способность (или неспособность) частицы участвовать в том или ином виде взаимодействия.**

Было выяснено, что *все без исключения элементарные частицы участвуют в гравитационном взаимодействии.*

Помимо гравитационного взаимодействия

– *фотоны (кванты электромагнитного взаимодействия) участвуют в электромагнитном взаимодействии;*

– *лептоны участвуют в слабом взаимодействии, а при наличии у частицы электрического заряда – и в электромагнитном взаимодействии;*

– *адроны (мезоны и барионы) участвуют и в сильном, и в слабом взаимодействии, а при наличии у частицы электрического заряда – и в электромагнитном взаимодействии.*



42.2. Сравните лептоны и адроны по их способности к участию в фундаментальных взаимодействиях.

Великие планы «великого объединения». При изучении фундаментальных взаимодействий учёные обратили внимание на *огромное различие величин сильного, электромагнитного, слабого и гравитационного взаимодействий.* Сравним эти взаимодействия, например для случая взаимодействия двух протонов в атомном ядре. Соответствующие расчёты приводят к следующим результатам. «Силы» различных видов фундаментальных взаимодействий – сильного, электромагнитного, слабого и гравитационного – находятся в отношении $1 : 10^{-2} : 10^{-10} : 10^{-38}$. Для наглядности представим себе силу различных взаимодействий в виде условной шкалы высот. Пусть в этой шкале сильное взаимодействие соответствует высоте Останкинской телебашни. Тогда электромагнитное взаимодействие окажется на уровне одноэтажного дома, слабое – ростом с пуговицу, а гравитационное – намного меньше всех известных в природе расстояний.

Несмотря на такие разительные отличия в силе взаимодействий, учёные предпринимают попытки к объединению взаимодействий, то есть к описанию различных взаимодействий в рамках единой теории.

В этом направлении сделаны уже существенные шаги в понимании механизмов фундаментальных взаимодействий.

Физики-теоретики в рамках одной научной теории смогли предложить описание слабого и электромагнитного взаимодействий. Оказалось, что эти два взаимодействия являются различными проявлениями единого *электрослабого взаимодействия*. Теория электрослабого взаимодействия была проверена экспериментально. Так, в ЦЕРНе (Европейская организация ядерных исследований) на ускорителе провели опыты по столкновению встречных пучков протонов и антипротонов. В результате взаимодействия протонов и антипротонов возникали частицы, существование которых и было предсказано теорией электрослабого взаимодействия.

Таким образом, число фундаментальных взаимодействий теперь сокращено до трёх – сильное, электрослабое и гравитационное.

Объединение слабого и электромагнитного взаимодействий является очень важным научным результатом. Почему? Напомним, что в «дофарадеевские» и «домаксвелловские» времена в физике совершенно независимо друг от друга изучались электрические, магнитные и оптические явления. Высказанная Фарадеем идея существования электрических и магнитных полей и созданная Максвеллом теория электромагнитного поля позволили:

- обнаружить взаимосвязь электрического и магнитного полей;
- открыть электромагнитные волны;
- установить электромагнитную природу света.

В итоге именно объединение электричества и магнетизма определило пути развития электротехники, радиотехники, средств связи. Успехи учёных в теоретическом объяснении электромагнетизма привели к выдающимся практическим результатам, во многом определяющим до настоящего времени состояние технической цивилизации. Можно надеяться, что и объединение слабого и электромагнитного взаимодействий приведёт в перспективе к осязаемым практическим результатам.

В настоящее время физиками-теоретиками разрабатываются планы «великого объединения» трёх видов взаимодействий: сильного, электромагнитного и слабого. В перспективе – включение в этот список и гравитационного взаимодействия. Единая теория всех взаимодействий позволит понять, как возникла и по каким законам развивается наша Вселенная, и использовать новые знания в качестве новых возможностей развития человеческой цивилизации.

Фундаментальные взаимодействия: гравитационное, электромагнитное, слабое, сильное; классификация частиц по их способности (неспособности) участвовать в определённом фундаментальном взаимодействии, электрослабое взаимодействие.

Самое важное в разделе «Элементы квантовой физики»

1. В двадцатом веке в процессе изучения микромира учёными была создана *квантовая физика*.

2. Электромагнитная энергия излучается и поглощается отдельными порциями – *квантами*. Энергия кванта E равна

$$E = h\nu,$$

где h – постоянная Планка;

ν – частота излучения.

3. *Атом – квантовая система*. Атом излучает и поглощает энергию квантами. Первая квантовая теория атома была разработана Н. Бором. Атомы разных химических элементов поглощают и излучают различные кванты. Это позволяет осуществлять *спектральный анализ вещества*.

4. *Атомное ядро содержит протоны и нейтроны*. Частицы в ядре удерживаются мощными ядерными силами. Атомные ядра с одинаковым числом протонов, но различным числом нейтронов являются изотопами одного и того же химического элемента. Ядра атомов некоторых элементов нестабильны и самопроизвольно испытывают *радиоактивные превращения*. При этом испускается α -, β - или γ - излучение.

5. Энергия связи протонов и нейтронов в ядре атома, энергия, выделяющаяся или поглощающаяся в ядерных реакциях, вычисляется на основе *формулы Эйнштейна*

$$E_0 = mc^2,$$

где m – масса тела;

c – скорость света в вакууме.

6. На практике важными источниками энергии являются:
– *реакция деления* тяжёлых элементов (цепная реакция деления урана в ядерном реакторе);

– *реакция термоядерного синтеза* лёгких элементов (протекает в недрах звёзд).

7. Для элементарных частиц возможны их различные взаимные превращения. *Элементарные частицы* участвуют в различных видах фундаментальных взаимодействий. Фундаментальными являются *гравитационное, электромагнитное, слабое, сильное* взаимодействия. Грандиозная задача современной физической науки – *создание единой теории* различных видов взаимодействий.

IV.1 ● Вообразите, что в ядре изотопа алюминия ${}_{13}^{27}\text{Al}$ удалось заменить все протоны на нейтроны, а все нейтроны – на протоны.

Ядро какого химического элемента возникло бы в результате такой замены?

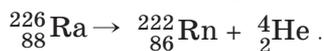
IV.2 ● Из-за радиоактивного распада общее количество ядер изотопа ${}_{53}^{131}\text{I}$ в образце с течением времени уменьшается. Процент распавшихся с течением времени ядер от общего числа ядер радиоактивного изотопа приведён в таблице:

Время, сут	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Процент распавшихся ядер, %	0	16	29	41	50	58	65	70	75	79	82	85	88

Используя данные, приведённые в таблице, начертите график зависимости процента нераспавшихся ядер радиоактивного изотопа от времени. Количество ядер изотопа в начальный момент времени примите за 100%.

IV.3 ● Как изменяется число протонов, число нейтронов в ядре и масса атомного ядра при его γ -распаде?

IV.4 ● При α -распаде радия образуется радон ${}_{86}^{222}\text{Rn}$:



Скорость α -частицы 15 Мм/с. Вычислите кинетическую энергию α -частицы (ответ приведите в джоулях и электронвольтах). Вычислите импульс α -частицы. Чему равен импульс образовавшегося ядра радона ${}_{86}^{222}\text{Rn}$, если считать, что до распада ядро радия покоилось?

IV.5 ● При какой частоте излучения энергия фотона будет равна энергии покоящегося электрона?

P. S.



При изучении раздела «Элементы квантовой физики» мы познакомились с некоторыми понятиями физики микромира.

– Вы узнали, что электромагнитное излучение испускается и поглощается отдельными порциями – квантами. Вам известна формула для расчёта энергии кванта. Но не изучалась, например, *квантовая теория фотоэффекта, не рассматривались примеры практического применения этого явления.*

– Вам известно, что атом при переходе электрона с одного энергетического уровня на другой излучает (или поглощает) определённый квант энергии. В результате атомами вещества может излучаться свет только строго определённых длин волн. Но не выяснено, *как экспериментально измерить длину волны излучаемого света.*

– Вам известно, что атомное ядро состоит из протонов и нейтронов. Но не определено, *при каком соотношении между числом протонов и нейтронов ядро является наиболее устойчивым.*

– Вам известно, что ядра атомов некоторых элементов подвержены самопроизвольному радиоактивному распаду. Но не указано, *каким математическим закономерностям подчиняется явление радиоактивности.*

– Вам известно, что при изучении элементарных частиц используют различные измерительные приборы – счётчики и трековые камеры. Но не рассматривалось, *как по длине, толщине трека, его искривлению в магнитном поле определить заряд и массу частицы.*

– Вы познакомились с классификацией элементарных частиц; узнали, какие взаимодействия являются фундаментальными. Но не обсуждался вопрос о том, *как свойства и особенности взаимодействия элементарных частиц отражаются на общих свойствах и законах нашей Вселенной.*

Заключение

Indokti diskant et ament meminsse periti.
(Неучёные пусть учатся, а знающие пусть помнят.)

Вы завершили изучение основ физики.

Выдающийся французский математик, физик и философ Жюль Анри Пуанкаре (1854 – 1912) в одной из своих работ писал: «Одна вещь меня поражает, а именно: сколь многие молодые люди, получившие среднее образование, далеки от того, чтобы применять к реальному миру те механические законы, которые им были преподаны. И это не только потому, что они к этому неспособны, но и потому, что об этом даже и не думают. Для них мир науки и мир реальности отделены друг от друга непроницаемой перегородкой».

Надеемся, что изученный курс физики позволил «пробить брешь» в «преграде Пуанкаре».

Надеемся, что для вас мир физики не сосредоточен теперь только на страницах учебника и в учебном кабинете. Если в окружающем мире вы научились подмечать действие физических законов, если, наблюдая то или иное явление, вы предпринимаете попытки его научного объяснения, то время на изучение школьного курса физики потрачено не напрасно.

Перед тем как попрощаться с учебником физики 9 класса, советуем вам

- ещё раз прочитать заключительные разделы каждой главы «Самое важное в разделе»,
- ещё раз прочитать эпиграфы к параграфам и дать им объяснение с физической точки зрения,
- выполнить итоговые задания.

Итоговое задание 1. По плану ответа подготовьте ответ:

- о явлении механического движения,
- о явлении реактивного движения,
- о явлении резонанса,
- о явлении дисперсии света,
- о явлении радиоактивности.

Итоговое задание 2. По плану ответа подготовьте ответ:

- о I законе Ньютона,
- о II законе Ньютона,
- о III законе Ньютона,
- о законе всемирного тяготения,
- о законе прямолинейного распространения света,
- о законе отражения света,
- о законе прямолинейного распространения света,
- о законе преломления света.

Итоговое задание 3. По плану ответа подготовьте ответ о величинах, указанных в таблице на заднем форзаце учебника.

Итоговое задание 4. По плану ответа подготовьте ответ об опыте:

- по определению гравитационной постоянной,
- по изучению свойств электромагнитных волн,
- по измерению скорости света,
- по наблюдению явления дисперсии света.

Итоговое задание 5. По плану ответа подготовьте ответ:

- об акселерометре,
- о рентгеновской трубке,
- о линзе,
- о счётчике Гейгера,
- о камере Вильсона,
- о ядерном реакторе.

Спасибо за работу!

Ответы к заданиям

1.2. $S_{1x} = 0$, $S_{1y} = 5$ м; $S_{2x} = -6$ м, $S_{2y} = 0$; $S_{3x} = 5$ м, $S_{3y} = 3$ м. 1.5. Скорость первого тела больше скорости второго тела в 4 раза. 2.1. $5,6$ м/с². 2.2. $0,5$ м/с², направление ускорения противоположно направлению начальной скорости. 2.3. 39 м. 2.4. 44 м. 3.1. 1 м/с; $2,5$ м. 3.2. 2 м/с²; 400 м; 20 м/с. 3.3. 3 с; 45 м. 3.4. 96 м. 3.5. 300 м. 4.1. 10 м/с². 4.2. $0,64$ с; $1,6$ с⁻¹. 4.3. $5,7$ мм/с. 4.4. 42 с⁻¹. 4.5. $0,63$ м/с; 5 см. 5.2. $0,5$ м/с². 5.3. $0,4$ кг. 5.6. $9,8$ м/с²; $9,8$ м/с; $4,9$ м; 2 с; $19,6$ м/с. 5.8. $0,5$ м/с²; 25 см; $0,5$ м/с; $0,6$ м/с²; 30 см; $0,6$ м/с. 6.1. $6,5$ м/с². 6.2. 50 Н; 0 Н. 6.3. 160 кН. 6.4. $0,2$ м/с²; $4,5$ кН. 6.5. $0,9$ Н. 7.1. $0,5$ м/с²; 24 с; 144 м. 7.3. 2 с; 20 м. 7.4. $8,7$ кН. 7.5. 24 Н; 60 м/с. 8.2. В 21 раз. 8.3. $2 \cdot 10^{30}$ кг; в 330 000 раз. 8.6. 1 ч 25 мин. 8.7. 10 Н. 8.8. 360 м. 8.9. $3,6$ км/с. 8.10. $1,6$ м/с². 9.2. 1 Н. 9.3. На 5 мм. 9.4. $5,0$ м/с². 9.5. 4 к. 10.1. $0,3$. 10.2. 88 Н. 10.3. 2 Н. 10.4. $0,15$ м/с². 10.5. Уменьшить в 1,4 раза. 11.1. 420 кг·м/с; 910 м/с. 11.2. $0,0315$ кг·м/с; $31,5$ г. 11.3. $1,6$ м/с. 11.5. 12 кг·м/с. 12.2. $0,02$ кг·м/с; 1 м/с. 12.3. $1,5$ кг·м/с; $21,5$ кг·м/с. 12.4. $0,5$ кг·м/с. 12.5. $2,4$ Н. 13.2. $2,6$ ГДж. 13.3. $2,2$ кДж. 13.4. $0,38$ Дж. 13.5. 19 м. 14.1. 480 м/с. 14.2. 80 Дж. 14.3. 12 кДж; $-9,2$ кДж; 0 Дж. 14.4. $7,9$ м/с; $2,4$ м. 14.5. 4 м/с; 20 м/с²; 3 Н. I.1. 9 м/с. I.2. 10 м/с; $0,2$ Н. I.5. 52% . 15.2. $0,67$ Гц; $1,5$ с; $4,2$ Гц. 15.3. 2 с; $0,5$ Гц; $3,14$ Гц. 15.4. 48 колебаний. 16.1. $v = 0,13 \sin 4t$. 16.2. Масштаб по оси T : 1 кл. $-0,2$ с. 16.5. $0,6$ с. 18.3. 2 с; $0,5$ Гц; 1 м. 18.5. В 4 раза. 19.2. 820 м. 19.3. $0,8$ м/с. 20.1. 77 см. 20.2. $2,7$ км. 20.3. Увеличится в 4,34 раза. 20.5. $4,3$ с. 21.1. 1620 м. 21.5. Порядка 1 кГц. 22.1. $5 \cdot 10^{15}$ м/с²; $5 \cdot 10^{-15}$ Н; 4 см; $2 \cdot 10^{-16}$ Дж; $2 \cdot 10^{-16}$ Дж. 22.2. 80 мВ; 15 мкВт. 22.4. На 8 мм. 22.5. $1,8 \cdot 10^{-17}$ Н. 24.1. $0,5$ мс; $0,5$ мс. 24.3. $0,03$ А; 200 л Гц; 10 мс. 25.1. 24 В; 29 Вт. 25.2. $0,4$ А; в 10 раз. 25.5. 30. 26.1. 31. 26.2. 2,8 А. 26.3. 30 А; 9 А; потери электроэнергии меньше во втором случае, в 10 раз. 26.4. 2%. 27.1. 3 см. 27.2. $0,5$ МГц. 27.4. 30 МГц; 10 м. 28.1. Интервал времени от 190 до 1300 с. 28.2. 45 км. 28.5. 36 000 км. II.2. 34 Мм/с. 29.4. 299 700 км/с; 224 900 км/с; в воздухе скорость больше в 1,333 раза. 29.5. $1,3 \cdot 10^8$ м/с. 30.4. 29 м. 31.2. 25° ; 25° . 31.5. $0,6$ м/с. 32.4. На 30° ; в 3 раза. 33.1. 13 дп. 33.2. 4 см; 25 дп. 33.3. 13 см; 7,5 дп. 33.8. 12 см; 8,3 дп. 33.9. Линзу с фокусным расстоянием 33 см следует поместить на расстоянии 2 м от экрана. 33.10. -5 дп. 34.2. 6,7 дп. 34.3. 54 см. 35.3. 2 мм. 35.5. В 16000 раз. III.1. $3,9 \cdot 10^{14}$ Гц. 37.3. $1,64 \cdot 10^{-18}$ Дж; 121 нм. 37.4. $6,178 \cdot 10^{17}$ Гц. 37.5. $5,0 \cdot 10^{15}$. 38.2. $2,55$ эВ; $0,65$ эВ; $1,9$ эВ. 38.3. В 3,4 раза. 38.5. 10,2 В. 39.2. Скорость ядра изотопа ${}^3_2\text{He}$ больше скорости ядра изотопа ${}^4_2\text{He}$ в 1,15 раза; импульс ядра изотопа ${}^3_2\text{He}$ меньше импульса ядра изотопа ${}^4_2\text{He}$ в 1,15 раза. 39.3. 225 МэВ. 39.4. 39 а. е. м. 39.5. $6,6 \cdot 10^{-27}$ кг; $1,5 \cdot 10^{23}$; 28 МэВ; 680 ГДж; 25 т. 40.4. В 11 млн раз; 3 т. 40.5. $4,26 \cdot 10^6$ т; $1,34 \cdot 10^{14}$ т; ежегодное уменьшение массы Солнца составляет $6,7 \cdot 10^{-12}\%$ от полной массы Солнца. IV.4. $7,5 \cdot 10^{-13}$ Дж; 4,7 МэВ; $1,0 \cdot 10^{-19}$ кг·м/с; $1,0 \cdot 10^{-19}$ кг·м/с. IV.5. $1,24 \cdot 10^{20}$ Гц.

Предметно-именной указатель

А

Автоколебания *137*
 Адрон *299*
 Аккомодация *248*
 Акселерометр *24*
 Амплитуда колебаний *118*
 Анализ спектральный *274*
 Античастицы *298*
 Аристотель *35*
 Архимед *35*

Б

Барион *299*
 Беккерель А. *284*
 Близорукость *248*
 Бор Н. *271*

В

Ватт (единица измерения) *100*
 Вектор *11*
 Вес тела *75*
 Взаимодействие
 - гравитационное *301*
 - сильное *278, 301*
 - слабое *301*
 - фундаментальное *300–302*
 - электромагнитное *301*
 - электрослабое *303*
 Волна
 - механическая *141*
 - поперечная *141*
 - продольная *142*
 - электромагнитная *197*
 Время *9*
 Высота звука *150*

Г

Галилей Г. *35*
 Герц (единица измерения) *119*
 Главная оптическая ось линзы *236*
 Глаз *247*
 Гравитационная постоянная *61*
 Громкость звука *151*
 Гюйгенс Х. *36*

Д

Дальнозоркость *249*
 Движение
 - криволинейное *29*
 - механическое *9*
 - неравномерное *18*
 - прямолинейное *11*
 - равномерное *13*
 - равноускоренное *19*
 - реактивное *87*
 Демодуляция
 (детектирование) *205*
 Дефект массы *280*
 Джоуль (единица измерения) *99*
 Диоптрия *238*
 Дисперсия света *233*
 Дифракция
 - волн *161*
 - света *254*
 Дифракционная решётка *257*
 Длина волны *143*

Ж

Жёсткость тела (пружины) *71*

З

Закон
 - всемирного тяготения *60*
 - второй Ньютона *40*
 - Гука *70*

- отражения света 224
- сохранения импульса 84
- - энергии 97
- первый Ньютона 37, 39
- прямолинейного распространения света 219
- радиоактивного распада 288
- третий Ньютона 43
- Затмение
- лунное 221
- солнечное 220
- Звук 146
- Зиверт (единица измерения) 289

И

- Излучение
- альфа 285
- бета 285
- гамма 214, 285
- инфракрасное 213
- рентгеновское 214
- ультрафиолетовое 213
- Изображение мнимое 226, 239
- Изотопы 277
- Импульс тела 84
- Индуктивность 169
- Интерференция
- волн 158
- света 253–256
- Искусственный спутник Земли 67

К

- Камера Вильсона 296
- Квант 265
- Кварк 299
- Кеплер И.* 35
- Колебания
- гармонические 121
- механические вынужденные 133
- - свободные 115
- электромагнитные 176

- Колебательный контур 176
- Кольца Ньютона 255
- Коперник Н.* 35
- Корпускула 266
- Корпускулярно-волновой дуализм 267
- Коэффициент трения скольжения 80
- Курчатов И. В.* 285
- Кюри П.* 285

Л

- Лептон 299
- Линза
- рассеивающая 237
- собирающая 237
- Линия электропередачи 193
- Луч световой 219

М

- Масса тела 40
- Масс-спектрограф 283
- Материальная точка 11
- Мезон 299
- Микроскоп 249
- Модель ядра
- протонно-нейтронная 275
- Модуляция 205
- Мощность 100

Н

- Невесомость 77
- Нейтрон 275
- Ньютон (единица измерения) 43
- Ньютон И.* 35

О

- Оптика 218
- геометрическая 219
- Оптическая сила линзы 238

Отражение

- волн 153

- света 223

Очки 242, 243

П

Переменный ток 185

Перемещение тела 11

Период вращения 32

- колебаний 118

- полураспада 287

Планк М. 266

Планка

- гипотеза 265

- постоянная 265

Плоское зеркало 225

Позитрон 298

Правило Ленца 172

Преломление света 229

Принцип относительности 39

Проекция вектора 12

Путь 11

Р

Работа механическая 99

Радиоактивность 284, 286

Радиолокация 208

Реактор ядерный 291

Реакции

- термоядерные 292

- ядерные 289

- цепные деления урана 290

Резерфорд Э. 287

Резонанс 135

С

Самоиндукция 174

Свободное тело 37

Сила 40

- равнодействующая 42

- реакции опоры 49

- трения 78

- - покоя 78

- - скольжения 79

- тяжести 63

- упругости 70

Силы ядерные 278

Система отсчёта 10

- инерциальная 39

- неинерциальная 39

- тел замкнутая 84

Склодовская-Кюри М. 284

Скорость

- мгновенная 18

- первая космическая 67

- равномерного движения 13

- света 197

Спектр излучения

- линейчатый 270

- сплошной 270

Счётчик Гейгера 295

Т

Телескоп 250

Тело отсчета 10

Тембр звука 153

Траектория 11

Трансформатор 190

У

Ультразвук 156

Ускорение

- равноускоренного движения 19

- свободного падения 64

- центростремительное 31

Уровень энергетический 271

Ф

Ферми Э. 290
Фокус линзы главный 237
Фокусное расстояние линзы 237
Фотоаппарат 246
Фотон 299
Фотоэффект внутренний 265
Френель О. 257

Ц

Центр тяжести 63
Циолковский К. Э. 88

Ч

Частота вращения 32
- колебаний 118
- круговая (циклическая) 120

Э

Эквивалентная доза 289
Электроёмкость 165
Электромагнитная индукция 168
Элементарные частицы 298
Энергия 96
- кинетическая 97, 98
- механическая 97, 98
- покоящегося тела 279
- потенциальная 98
- связи 278
- - удельная 280
Эйнштейн А. 267

Ю

Юнг Т. 255

Я

Ядро атома 276

Краткий справочник по курсу физики 7-8 классов¹

1. *Вещество* состоит из отдельных частиц – атомов и молекул, которые находятся в непрерывном хаотическом – тепловом – движении.

Вещества различаются по плотности. *Плотность – масса единицы объема вещества.*

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

$$1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Величина	Плотность	Масса	Объем
Обозначение	ρ	m	V
Единица измерения	г/см ³ , кг/м ³	г, кг	см ³ , м ³

2. Давление – величина, численно равная силе, действующей на единицу площади поверхности перпендикулярно поверхности. Давление измеряется в паскалях (Па).

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

Величина	Давление	Сила	Площадь
Обозначение	p	F	s
Единица измерения	Па	Н	м ²

3. Давление, производимое атмосферой, около 100 кПа. Давление газа определяется его плотностью и температурой. Давление, производимое столбом жидкости, зависит от плотности и высоты столба жидкости.

$$p = \rho gh$$

Величина	Давление столба жидкости	Плотность жидкости	Высота столба жидкости
Обозначение	p	ρ	h
Единица измерения	Па	кг/м ³	м

¹ В справочнике не приводятся формулы из раздела механики, имеющиеся в учебнике физики 9 класса, а также некоторые формулы по теме «Электрический ток», указанные в § 22 учебника.

4. На тело, погружённое в жидкость или газ, действует *выталкивающая (архимедова) сила*.

$$F_{арх} = \rho g V$$

Величина	Аrchимедова сила	Плотность жидкости, газа	Объём погружённой части тела
Обозначение	$F_{арх}$	ρ	V
Единица измерения	Н	кг/м ³	м ³

5. *Внутренняя энергия тела* – энергия движения и взаимодействия всех частиц тела (атомов, молекул).

Количество теплоты – энергия, которую тело получает или отдаёт в результате теплообмена (то есть без совершения работы).

$$\Delta U = Q + A$$

Величина	Внутренняя энергия	Количество теплоты	Работа внешних сил
Обозначение	U	Q	A
Единица измерения	Дж	Дж	Дж

(ΔU – изменение внутренней энергии)

6. Количество теплоты, выделяющееся при химической реакции горения топлива, называется теплотой сгорания топлива.

Удельная теплота сгорания топлива – это количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании 1 кг топлива.

$$Q = qm$$

Величина	Количество теплоты, выделяющееся при сгорании топлива	Удельная теплота сгорания топлива	Масса топлива
Обозначение	Q	q	m
Единица измерения	Дж	Дж/кг	кг

7. Физическая величина, показывающая, насколько эффективно используется двигателем энергия топлива, называется *коэффициентом полезного действия (КПД) теплового двигателя*.

$$\text{КПД} = \frac{A}{Q} \cdot 100\%$$

Величина	КПД	Работа, совершённая двигателем	Количество теплоты, полученное двигателем
Обозначение	КПД	A	Q
Единица измерения	%	Дж	Дж

8. *Количество теплоты, необходимое для нагревания тела*, зависит от его массы, изменения температуры и рода вещества. *Удельная теплоёмкость вещества* показывает, какое количество теплоты необходимо для изменения температуры вещества массой 1 кг на 1 °С.

Величина	Количество теплоты	Удельн. теплоём.	Масса	Конечная температура	Начальн. температура
Обозначение	Q	c	m	t_2	t_1
Единица измерения	Дж	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$	кг	°С	°С

$$Q = mc(t_2 - t_1)$$

9. *Процессы плавления и кристаллизации, парообразования и конденсации* сопровождаются поглощением и выделением энергии. *Удельная теплота плавления* показывает, какое количество теплоты необходимо для превращения в жидкость 1 кг кристаллического вещества, находящегося при температуре плавления. *Удельная теплота парообразования* показывает, какое количество теплоты необходимо для превращения в пар 1 кг жидкости без изменения её температуры.

Величина	Количество теплоты	Масса	Удельная теплота плавления	Удельная теплота парообразования
Обозначение	Q	m	λ	L
Единица измерения	Дж	кг	Дж/кг	Дж/кг

$$Q = \lambda m$$

$$Q = Lm$$

10. *Насыщенный пар находится в равновесии со своей жидкостью.*

Величина	Относительная влажность	Давление водяного пара	Давление насыщенного водяного пара
Обозначение	φ	p	$p_{нас}$
Единица измерения	%	Па	Па

$$\varphi = \frac{p}{p_{нас}}$$

11. *Сопротивление проводника* зависит от длины проводника, площади поперечного сечения и от того, из какого вещества изготовлен проводник.

Величина	Сопротивление проводника	Удельное сопротивление	Длина проводника	Площадь поперечного сечения проводника
Обозначение	R	ρ	l	s
Единица измерения	Ом	Ом·мм ² /м	м	мм ²

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

12. *Количество теплоты, выделяющееся при прохождении тока в проводнике*, зависит от силы тока в проводнике, его сопротивления и времени прохождения тока.

Величина	Количество теплоты	Сила тока	Сопротивление	Время
Обозначение	Q	I	R	t
Единица измерения	Дж	А	Ом	с

$$Q = I^2 R t$$

Оглавление

Обращение к ученику	3
Раздел 1. ОСНОВЫ МЕХАНИКИ	7
§ 1. Механическое движение. Равномерное движение	9
§ 2. Равноускоренное движение. Ускорение	18
§ 3. Решение задач по теме «Равноускоренное движение». Лабораторная работа «Определение ускорения равноускоренного движения»	24
§ 4. Движение по окружности	29
§ 5. Законы Ньютона	35
§ 6. Решение задач с использованием законов Ньютона	48
§ 7. Лабораторная работа «Проверка II закона Ньютона»	56
§ 8. Закон всемирного тяготения	60
§ 9. Сила упругости	70
§ 10. Сила трения.....	78
§ 11. Импульс. Закон сохранения импульса.....	83
§ 12. Лабораторная работа «Опытная проверка закона сохранения импульса»	92
§ 13. Механическая энергия. Работа. Мощность	96
§ 14. Вывод формул для расчёта механической энергии	102
Самое важное в разделе «Основы механики»	110
P. S.	112
Раздел 2. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ	113
§ 15. Свободные механические колебания	115
§ 16. Решение задач по теме «Свободные механические колебания» ..	125
§ 17. Лабораторная работа «Изучение колебаний маятника»	131
§ 18. Вынужденные колебания. Резонанс	133
§ 19. Механические волны	140
§ 20. Звук	145
§ 21. Волновые явления	153
§ 22. Повторение темы «Электрические и магнитные явления» ..	164
§ 23. Явление самоиндукции.....	171
§ 24. Свободные электромагнитные колебания	176
§ 25. Переменный ток	182
§ 26. Преобразование и передача электроэнергии	190
§ 27. Электромагнитные волны. Свойства электромагнитных волн..	196
§ 28. Практическое применение радиоволн	203
Самое важное в разделе «Колебания и волны»	210
P. S.	211

Раздел 3. СВЕТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ	212
§ 29. Электромагнитная природа света	213
§ 30. Прямолинейное распространение света	218
§ 31. Отражение света	223
§ 32. Преломление света. Явление дисперсии	228
§ 33. Линзы	236
§ 34. Лабораторная работа «Изучение явления преломления света и определение оптической силы линзы».....	243
§ 35. Оптические приборы. Глаз. Очки	246
§ 36. Интерференция и дифракция света	253
Самое важное в разделе «Световые явления»	260
P. S.	261
Раздел 4. Элементы квантовой физики	262
§ 37. Возникновение квантовой физики.....	263
§ 38. Линейчатые спектры. Квантовая структура атома.....	269
§ 39. Строение атомного ядра. Энергия связи ядра	275
§ 40. Явление радиоактивности. Ядерные реакции.....	284
§ 41. Методы регистрации частиц. Классификация элементарных частиц	294
§ 42. Фундаментальные взаимодействия	300
Самое важное в разделе «Элементы квантовой физики»	304
P. S.	306
Заключение	307
Ответы к заданиям	309
Предметно-именной указатель	310
Краткий справочник по курсу физики 7-8 классов	314

Андрюшечкин Сергей Михайлович

ФИЗИКА

9 класс

Обобщённые планы построения ответов предложены академиком РАО *А.В. Усовой*

Автор выражает признательность за помощь в подготовке учебника
О.Я. Евдокимовой, К.А. Лоушко, И.Г. Кузнецовой

Концепция оформления и художественное редактирование – *Е.Д. Ковалевская*

Подписано в печать 17.03.15. Формат 70 × 90/16.
Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура Журнальная.
Объём 20 п.л. Тираж 3 000 экз. Заказ №

Общероссийский классификатор продукции ОК-005-93, том 2; 953005 – литература учебная

Издательство «Баласс»
109147 Москва, Марксистская ул, д. 5, стр. 1
Почтовый адрес: 111123 Москва, а/я 2, «Баласс»
Телефоны для справок: (495) 672-23-12, 672-23-34, 368-70-54
<http://www.school2100.ru> E-mail: izd@balass.su

Отпечатано в филиале «Смоленский полиграфический комбинат»
ОАО «Издательство “Высшая школа”»
214020 Смоленск, ул. Смольянинова, 1