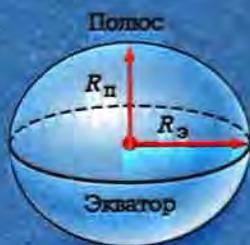
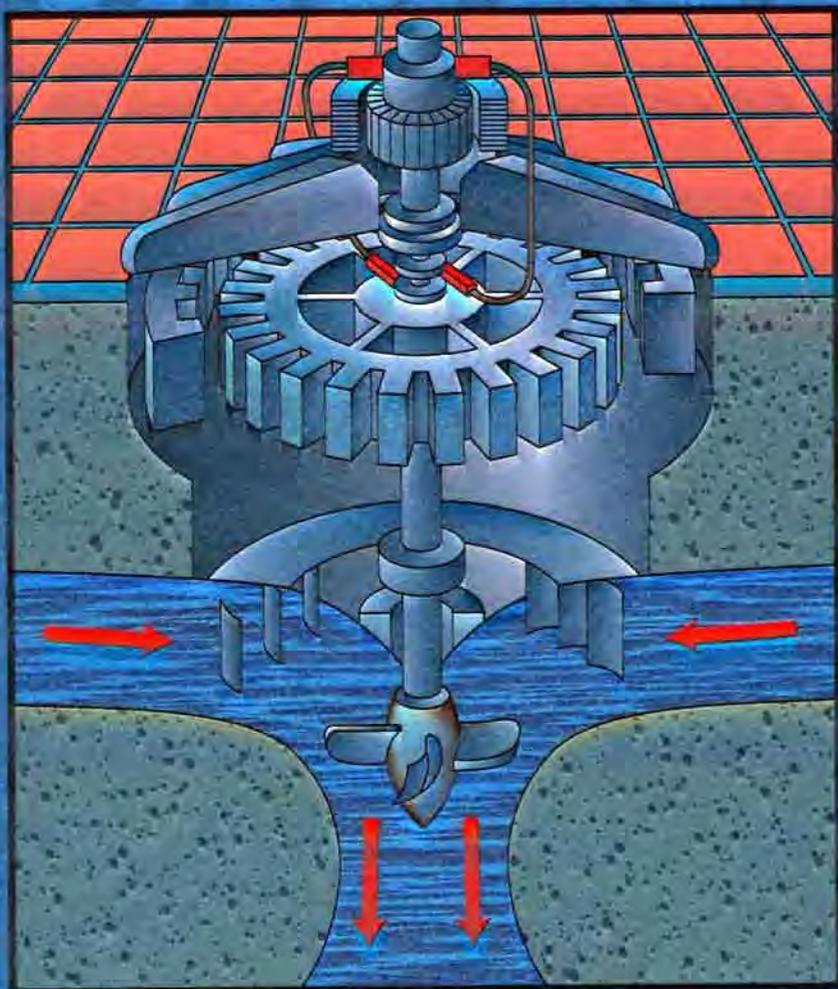


А. В. Перышкин, Е. М. Гутник

ФИЗИКА



К л а с с



ДРОФА



Аристотель



Демокрит



Птолемей



К. Птолемей

(90-160)

V-I века до н. э.

0

I век

100

II

XVIII век 1800

XIX век



Т. Юнг

(1773-1829)



Дж. Максвелл

(1831-1879)



К. Э. Циолковский

(1857-1935)



Ф. Савиди

(1877-1956)



Д.И. Менделеев

(1834-1907)



А. С. Попов

(1859-1905)



А. Эйнштейн

(1879-1965)



М. Фарадей

(1791-1867)



А. Беккерель

(1852-1908)



Э. Резерфорд

(1871-1935)



О. Ган

(1879-1968)



Г. Герц

(1857-1894)



Дж. Чедвик

(1891-1974)



(1473-1543)

Н. Коперник



(1564-1642)

Г. Галилей



(1643-1727)

И. Ньютон

200 1400 XV век 1500 XVI век 1600 XVII век 1700

1900 XX век 2000



(1902-1984)

Ф. Штрассман



(1901-1954)

Э. Ферми



(1902-1984)

П. Дирак



(1903-1960)

И. В. Курчатов



(1901-1976)

В. Гейзенберг



(1902-1994)

Д. Д. Иваненко



(1907-1966)

С. П. Королев

А. В. Перышкин, Е. М. Гутник

ФИЗИКА

9

класс

Учебник
для общеобразовательных
учреждений

Рекомендовано
Министерством образования и науки
Российской Федерации

14-е издание, стереотипное

Москва



дрофа

2009

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72
П27

- П27 **Перышкин, А. В.**
Физика. 9 кл. : учебник для общеобразоват. учреждений / А. В. Перышкин, Е. М. Гутник. — 14-е изд., стереотип. — М. : Дрофа, 2009. — 300, [4] с. : ил. ; 1 л. цв. вкл.

ISBN 978-5-358-06901-5

Настоящая книга является продолжением учебников А. В. Перышкина «Физика. 7 кл.» и «Физика. 8 кл.». Она завершает курс физики основной школы и соответствует требованиям федерального компонента государственного стандарта по физике, утвержденного в 2004 г.

В учебник включены следующие основные разделы: «Законы взаимодействия и движения тел», «Механические колебания и волны. Звук», «Электромагнитные явления», «Строение атома и атомного ядра. Использование энергии атомных ядер».

При доработке учебника сохранена методологическая концепция, разработанная известным педагогом и методистом А. В. Перышкиным. Этот учебник отличает ясность, краткость и доступность изложения. На основе знаний, полученных в 7 и 8 классах, изложение материала ведется на более высоком уровне.

Достоинством учебника являются также подробно описанные и снабженные рисунками демонстрационные опыты и экспериментальные задачи, рекомендуемые программой по физике.

Учебник рекомендован Министерством образования и науки Российской Федерации, включен в Федеральный перечень учебников.

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72

ISBN 978-5-358-06901-5

© ООО «Дрофа», 1999
© ООО «Дрофа», 2008, с изменениями

Вы приступаете к изучению последних тем курса физики основной школы.

В 9 классе вам предстоит не только получить новые знания, но расширить и углубить уже имеющиеся. Особенно часто вы будете обращаться к полученным ранее знаниям при изучении первой главы учебника, которая называется «Законы взаимодействия и движения тел».

На первый взгляд в этой главе излагаются многие из тех вопросов, с которыми вы уже встречались при изучении физики в 7 классе. К ним относится, например, механическое движение и его относительность, закон инерции, взаимодействие тел как причина изменения их скорости, всемирное тяготение и некоторые другие вопросы.

На самом же деле изучение этой главы расширяет ваши знания и поднимает их на новый, более высокий уровень — уровень законов. Так, если в 7 классе вы изучали равномерное движение, то в 9 классе перейдете к рассмотрению движения неравномерного (о котором ранее только кратко упоминалось).

В связи с этим вы познакомитесь с такой важной физической величиной, как ускорение, узнаете, что является причиной его возникновения, поймете, почему в одних случаях тело движется прямолинейно, а в других — криволинейно, и многое, многое другое.

Вы познакомитесь также с основой основ механики — тремя законами Ньютона, законом сохранения импульса, законом всемирного тяготения и научитесь применять их для объяснения различных происходящих вокруг нас явлений.

Но вы должны быть готовы к тому, что для успешного освоения этой главы понадобятся некоторые элементарные сведения о векторных величинах, об их проекциях и модулях, полученные вами в курсе геометрии.

Вам не придется повторять эту тему по учебнику геометрии, поскольку весь необходимый математический материал в краткой и доступной форме включен в соответствующие параграфы учебника физики. Поэтому любой ученик при желании сможет усвоить эту тему.

Для ребят, интересующихся физикой, в учебник помещен дополнительный материал, отмеченный знаком *.

Но чтобы избежать ошибок при решении задач, вам следует сразу и твердо заучить, как обозначаются векторы, их модули и проекции на выбранную ось, а также в каком случае проекция считается положительной, а в каком — отрицательной. Кроме того, внимательно изучите образцы решения задач.

Отметим, что во второй, третьей и четвертой главах в основном используется более привычный для вас математический аппарат, чем в первой главе.

Знания, полученные при изучении первой главы, понадобятся вам для понимания материала трех остальных глав учебника. Например, сведения об ускорении будут полезны при рассмотрении таких важных явлений, как механические колебания и переменный электрический ток, возникновение электромагнитного поля и излучение электромагнитных волн.

Знание второго и третьего законов Ньютона поможет вам понять, в частности, суть опытов по исследованию строения атомов вещества. А с помощью закона сохранения импульса вы сможете, например, объяснить, почему при делении атомного ядра его осколки разлетаются в противоположные стороны.

Таким образом, на конкретных примерах вы убедитесь в том, что перечисленные законы применимы не только в механике, но и в других разделах физики.

Глава I

ЗАКОНЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ

§ 1. Материальная точка. Система отсчета

В окружающем нас мире все находится в непрерывном движении. Под движением в общем смысле этого слова подразумевают любые изменения, происходящие в природе. Наиболее простым видом движения является *механическое движение*.

Из курса физики 7 класса вы знаете, что механическим движением тела называется изменение его положения в пространстве относительно других тел, происходящее с течением времени.

При решении различных научных и практических задач, связанных с механическим движением тел, нужно уметь описывать это движение, т. е. определять траекторию, скорость, пройденный путь, положение тела и некоторые другие характеристики движения для любого момента времени.

Например, запуская летательный аппарат с Земли на другую планету, ученые должны предварительно рассчитать, где находится эта планета относительно Земли в момент посадки на нее аппарата. А для этого необходимо выяснить, как меняются с течением времени направление и модуль скорости этой планеты и по какой траектории она движется.

Из курса математики вы знаете, что положение *точки* можно задать с помощью координатной прямой или прямоугольной системы координат (рис. 1). Но как задать положение тела, имеющего размеры? Ведь каждая точка этого тела будет иметь свою собственную координату.

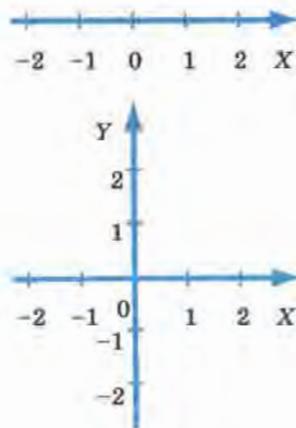


Рис. 1

При описании движения тела, имеющего размеры, возникают и другие вопросы. Например, что следует понимать под скоростью тела, если оно, перемещаясь в пространстве, одновременно вращается вокруг собственной оси? Ведь скорость разных точек этого тела будет различна как по модулю, так и по направлению. Например, при суточном вращении Земли диаметрально противоположные ее точки движутся в противоположных направлениях, причем чем ближе к оси расположена точка, тем меньше ее скорость.

Каким же образом можно задать координату, скорость и другие характеристики движения тела, имеющего размеры? Оказывается, во многих случаях вместо движения реального тела можно рассматривать движение так называемой *материальной точки*, т. е. *точки, обладающей массой этого тела*.

Для материальной точки можно однозначно определить координату, скорость и другие физические величины, так как она не имеет размеров и не может вращаться вокруг собственной оси.

Материальных точек нет в природе. Материальная точка — это понятие, использование которого упрощает решение многих задач и при этом позволяет получить достаточно точные результаты.

Тело можно считать материальной точкой только в тех случаях, когда его размерами (а значит, и формой, и вращением) можно пренебречь, поскольку они несущественны в условиях решаемой задачи.

Материальная точка — это понятие, вводимое в механике для обозначения тела, которое рассматривается как точка, имеющая массу.

Практически всякое тело можно рассматривать как материальную точку в тех случаях, когда расстояния, проходимые точками тела, очень велики по сравнению с его размерами.

Например, материальными точками считают Землю и другие планеты при изучении их движения вокруг Солнца. В данном случае различия в движении разных точек любой планеты, вызванные ее суточным вращением, не влияют на величины, описывающие годовое движение.

Но при решении задач, связанных с суточным вращением планет (например, при определении времени восхода Солнца в разных местах поверхности земного шара), считать планету материальной точ-

кой бессмысленно, так как результат задачи зависит от размеров этой планеты и скорости движения точек ее поверхности.

За материальную точку правомерно принять самолет, если требуется, например, определить среднюю скорость его движения на пути из Москвы в Новосибирск. Но при вычислении силы сопротивления воздуха, действующей на летящий самолет, считать его материальной точкой нельзя, поскольку сила сопротивления зависит от размеров и формы самолета.

Часто движущееся тело можно принимать за материальную точку даже в том случае, если его размеры соизмеримы с проходимыми им расстояниями.

Например, человек, стоящий на ступеньке движущегося эскалатора (рис. 2, а), перемещается так, что в любой момент времени все его точки движутся одинаково. Такое движение называется **поступательным**¹. Поэтому если мы хотим описать движение человека (т. е. определить, как меняется со временем его скорость, путь и т. д.), то достаточно рассмотреть движение только одной его точки. При этом решение задачи значительно упрощается.

При прямолинейном движении тела достаточно одной координатной оси для определения его положения.

Например, положение тележки с капельницей (рис. 2, б), движущейся по столу прямолинейно и поступательно, в любой момент времени можно определить с помощью линейки, расположенной вдоль траектории движения (тележка с капельницей принимается за материальную точку). Линейку в этом опыте удобно принять за тело отсчета, а ее шкала может служить координатной осью. (Напомним, что **телом отсчета** называется тело, относительно которого рассматривается изменение положения других тел в пространстве.)

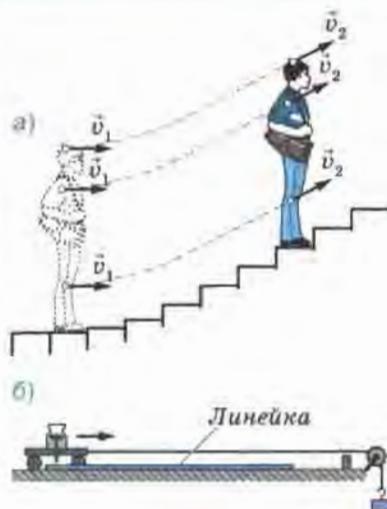


Рис. 2

¹ Поступательным может быть как прямолинейное, так и криволинейное движение. Например, поступательно движется кабина колеса обозрения. Отличительным признаком поступательного движения является то, что любая прямая, мысленно проведенная через две произвольные точки поступательно движущегося тела, остается параллельной своему первоначальному направлению.

Положение тележки с капельницей будет определяться относительно нулевого деления линейки.

Но если мы захотим определить, например, путь, который прошла тележка за определенный промежуток времени, или скорость ее движения, то помимо линейки нам понадобится прибор для измерения времени — **часы**.

В данном случае роль такого прибора выполняет капельница, из которой через равные промежутки времени падают капли. Поворачивая кран, можно добиться того, чтобы капли падали с интервалом, например, в 1 с. Посчитав число промежутков между следами капель на линейке, можно определить соответствующий промежуток времени.

Из приведенных примеров ясно, что для определения положения движущегося тела в любой момент времени, вида движения, скорости тела и некоторых других характеристик движения необходимы тело отсчета, связанная с ним система координат (или одна координатная ось, если тело движется вдоль прямой) и прибор для отсчета времени.

Система координат, тело отсчета, с которым она связана, и прибор для измерения времени образуют систему отсчета, относительно которой рассматривается движение тела.

Конечно, во многих случаях мы не сможем непосредственно измерить координаты движущегося тела в любой момент времени. У нас нет реальной возможности, например, расположить измерительную ленту и расставить наблюдателей с часами вдоль многокилометрового пути движущегося автомобиля, плывущего по океану лайнера, летящего самолета, снаряда, вылетевшего из артиллерийского орудия, различных небесных тел, движение которых мы наблюдаем, и т. д.

Тем не менее знание законов физики позволяет определить координаты тел, движущихся в различных системах отсчета, в частности в системе отсчета, связанной с Землей.

? Вопросы

1. Обладает ли материальная точка массой? Имеет ли она размеры?

2. Материальная точка — это реальный объект или абстрактное понятие?

3. С какой целью используется понятие «материальная точка»?

4. В каких случаях движущееся тело обычно рассматривают как материальную точку?

5. Приведите пример, показывающий, что одно и то же тело в одной ситуации можно считать материальной точкой, а в другой — нет.

6. При каком движении тела его можно рассматривать как материальную точку даже в том случае, если проходимые им расстояния сравнимы с его размерами?

7. Что называется материальной точкой?

8. В каком случае положение движущегося тела можно задать с помощью одной координатной оси?

9. Что такое система отсчета?

Упражнение 1

1. Можно ли считать автомобиль материальной точкой при определении пути, который он прошел за 2 ч, двигаясь со средней скоростью, равной 80 км/ч? при обгоне им другого автомобиля?

2. Самолет совершает перелет из Москвы во Владивосток. Может ли рассматривать самолет как материальную точку диспетчер, наблюдающий за его движением? пассажир этого самолета?

3. Когда говорят о скорости машины, поезда и других транспортных средств, тело отсчета обычно не указывают. Что подразумевают в этом случае под телом отсчета?

4. Мальчик стоял на земле и наблюдал, как его младшая сестра каталась на карусели. После катания девочка сказала брату, что и он сам, и дома, и деревья быстро проносились мимо нее. Мальчик же стал утверждать, что он вместе с домами и деревьями был неподвижен, а двигалась сестра. Относительно каких тел отсчета рассматривали движение девочка и мальчик? Объясните, кто прав в споре.

5. Относительно какого тела отсчета рассматривают движение, когда говорят: а) скорость ветра равна 5 м/с; б) бревно плывет по течению реки, поэтому его скорость равна нулю; в) скорость плывущего по реке дерева равна скорости течения воды в реке; г) любая точка колеса движущегося велосипеда описывает окружность; д) Солнце утром восходит на востоке, в течение дня движется по небу, а вечером заходит на западе?

§ 2. Перемещение

До сих пор при решении многих задач, связанных с движением различных тел, мы пользовались физической величиной, называемой «путь».

Под длиной пути мы подразумевали сумму длин всех участков траектории, пройденных телом за рассматриваемый промежуток времени.

Путь — *скалярная величина* (т. е. величина, не имеющая направления).

Для решения различных практических задач в разных сферах деятельности (например, в диспетчерской службе наземного и воздушного транспорта, в космонавтике, астрономии и др.) необходимо уметь рассчитывать, где будет находиться движущееся тело в заданный момент времени.

Покажем, что во многих случаях мы не сможем решить такую задачу, даже если будем знать, какой путь прошло тело за данный промежуток времени. Для этого обратимся к рисунку 3, а.

Допустим, нам известно, что некоторое тело (которое можно принять за материальную точку) начинает двигаться из точки O и за 1 ч проходит путь, равный 20 км.

Для ответа на вопрос, где будет находиться это тело спустя 1 ч после его выхода из точки O , у нас не хватает информации о его движении. Тело могло, например, двигаясь прямолинейно в северном направлении, попасть в точку A , находящуюся на расстоянии 20 км

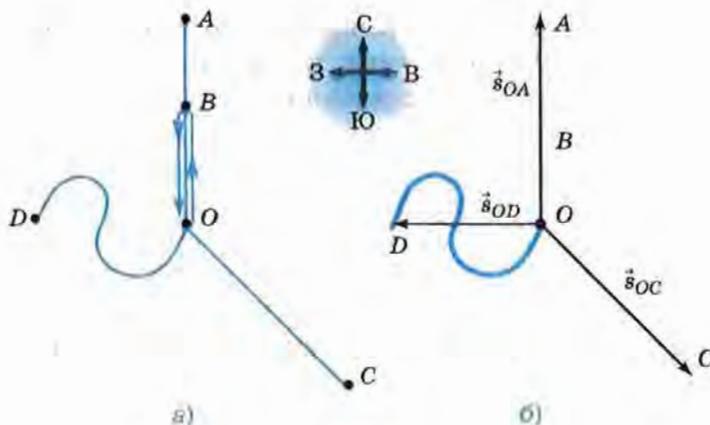


Рис. 3

от точки O (расстояние между точками измеряется по прямой, соединяющей эти точки). Но оно могло также, дойдя до точки B , находящейся на расстоянии 10 км от точки O , повернуть на юг и вернуться в точку O , при этом пройденный им путь тоже будет равен 20 км. При заданном значении пути тело также могло оказаться и в точке C , если бы оно двигалось прямолинейно на юго-восток, и в точке D , если бы его движение происходило по изображенной криволинейной траектории.

Чтобы избежать такой неопределенности, для нахождения положения тела в пространстве в заданный момент времени была введена физическая величина, называемая *перемещением*.

Перемещением тела (материальной точки) называется вектор, соединяющий начальное положение тела с его последующим положением.

Согласно определению перемещение — *векторная величина* (т. е. величина, имеющая направление). Оно обозначается \vec{s} , т. е. той же буквой, что и путь, только со стрелкой над ней. Как и путь, в СИ¹ перемещение измеряется в *метрах*. Для измерения перемещения используются и другие единицы длины, например километры, мили и т. д.

На рисунке 3, б показаны векторы перемещений, которые совершило бы тело, если бы прошло 20 км следующим образом: по прямолинейной траектории OA в северном направлении (вектор \vec{s}_{OA}), по прямолинейной траектории OC в юго-восточном направлении (вектор \vec{s}_{OC}) и по криволинейной траектории OD (вектор \vec{s}_{OD}). А если бы тело прошло 20 км, дойдя до точки B и вернувшись обратно в точку O , то в этом случае вектор его перемещения был бы равен нулю.

Знать вектор перемещения — это значит знать его направление и модуль.

Зная начальное положение и вектор перемещения тела, можно однозначно определить, где это тело находится. Например, если из-

¹ Напомним, что в СИ (Международная система единиц) единицей массы является килограмм (кг), длины — метр (м), времени — секунда (с). Они называются основными, так как выбраны независимо от единиц других величин. Единицы, определяемые через основные, называются производными. Примерами производных единиц СИ могут служить 1 м/с, 1 кг/м³ и многие другие.

вестно, что вектор перемещения тела, вышедшего из точки O , направлен на север, а его модуль равен 20 км, то мы с уверенностью можем утверждать, что тело находится в точке A (см. рис. 3, б).

Таким образом, на чертеже, где перемещение изображается стрелочкой определенной длины и направления, можно найти конечное положение тела, отложив от его начального положения вектор перемещения.

? Вопросы

1. Всегда ли можно определить положение тела в заданный момент времени t , зная начальное положение этого тела (при $t_0 = 0$) и путь, пройденный им за промежуток времени t ? Ответ подтвердите примерами.

2. Что называют перемещением тела (материальной точки)?

3. Можно ли однозначно определить положение тела в заданный момент времени t , зная начальное положение этого тела (при $t_0 = 0$) и вектор перемещения, совершенного телом за промежуток времени t ? Ответ подтвердите примерами.

🔗 Упражнение 2

1. Какую физическую величину определяет водитель автомобиля по счетчику спидометра — пройденный путь или перемещение?

2. Как должен двигаться автомобиль в течение некоторого промежутка времени, чтобы по счетчику его спидометра можно было определить модуль перемещения, совершенного автомобилем за этот промежуток времени?

§ 3. Определение координаты движущегося тела

В предыдущем параграфе говорилось о том, что положение тела, совершившего некоторое перемещение, можно найти графически, приставив вектор перемещения к начальному положению этого тела. Но в большинстве случаев необходимо *вычислить* положение тела, т. е. определить его координаты.

Известно, что вычисления производят не с векторами, а с соответствующими им скалярными величинами: с *проекциями векторов*

на координатные оси и с *модулями векторов* или их проекций (т. е. с величинами, представляющими собой положительные или отрицательные числа, но не имеющими направления).

Рассмотрим, как определить координату движущегося тела, зная координату его начального положения и вектор перемещения. Для этого решим такую задачу.

Два катера идут по реке в противоположных направлениях и встречаются в 100 км к востоку от пристани П (рис. 4). Продолжая движение, за некоторый промежуток времени t первый катер переместился от места встречи на 60 км к востоку, а второй — на 50 км к западу. Определите координаты каждого катера по отношению к пристани и расстояние между катерами через промежуток времени t после их встречи.

Проведем координатную ось X параллельно прямой, вдоль которой движутся катера. Направим эту ось на восток, а ее начало ($x = 0$) совместим с пристанью, приняв ее за тело отсчета (поскольку в задаче требуется определить положение катеров по отношению к пристани).

Спроецировав начала и концы векторов перемещения (\vec{s}_1 и \vec{s}_2) на ось X , получим отрезки s_{1x} и s_{2x} , которые являются *проекциями указанных векторов*.

Проекция вектора на ось считается положительной, если вектор сонаправлен с этой осью, и отрицательной, если вектор направлен противоположно оси.

Значит, в данном случае $s_{1x} > 0$, а $s_{2x} < 0$.

Проекция равна разности координат конца и начала вектора.

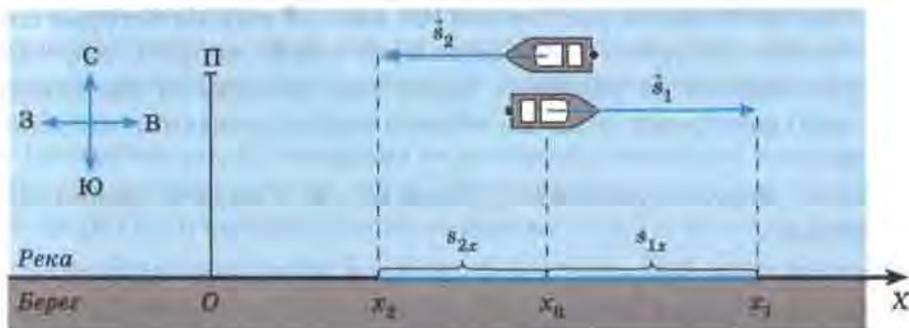


Рис. 4

В данном случае точки x_1 и x_2 — это координаты концов векторов \vec{s}_1 и \vec{s}_2 соответственно, а точка x_0 — координата начала каждого из этих векторов. Поэтому

$$s_{1x} = x_1 - x_0, \quad (1)$$

$$s_{2x} = x_2 - x_0. \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) выразим координаты x_1 и x_2 :

$$x_1 = x_0 + s_{1x}, \quad (3)$$

$$x_2 = x_0 + s_{2x}. \quad (4)$$

Расстояние l между двумя телами, как известно, равно модулю разности их координат:

$$l = |x_1 - x_2|. \quad (5)$$

Мы получили уравнения, по которым можно рассчитать искомые координаты x_1 и x_2 . Но какие числа следует подставить в уравнения (3) и (4) вместо символов x_0 , s_{1x} и s_{2x} ?

Согласно условию задачи катера встретились на расстоянии 100 км от пристани, значит, длина отрезка Ox_0 равна 100 км. Из рисунка 4 мы видим, что координата x_0 находится на положительной полуоси X , т. е. $x_0 > 0$. Значит, $x_0 = 100$ км.

Теперь рассмотрим, чему равны s_{1x} и s_{2x} . Благодаря тому что ось X мы провели параллельно векторам перемещений катеров, длины отрезков s_{1x} и s_{2x} равны длинам векторов \vec{s}_1 и \vec{s}_2 (как противоположные стороны построенных на них прямоугольников). А это означает, что *модуль* каждой проекции равен *модулю* соответствующего ей вектора.

Указанные в задаче расстояния (60 км и 50 км), на которые сместились катера за время t , представляют собой *модули векторов их перемещений* (в условиях задач под числовыми значениями каких-либо векторных величин обычно подразумеваются именно их модули).

Значит, модуль проекции s_{1x} равен 60 км, а модуль проекции s_{2x} равен 50 км.

Поскольку проекция s_{1x} положительна, то можно записать: $s_{1x} = 60$ км. Но под символом s_{2x} подразумевается отрицательное число. Поэтому $s_{2x} = -50$ км.

Теперь мы можем записать условие задачи и решить ее.

Дано: $x_0 = 100 \text{ км}$ $s_{1x} = 60 \text{ км}$ $s_{2x} = -50 \text{ км}$	Решение: $x_1 = x_0 + s_{1x};$ $x_2 = x_0 + s_{2x};$ $l = x_1 - x_2 ;$ $x_1 = 100 \text{ км} + 60 \text{ км} = 160 \text{ км};$ $x_2 = 100 \text{ км} - 50 \text{ км} = 50 \text{ км};$ $l = 160 \text{ км} - 50 \text{ км} = 110 \text{ км}.$
$x_1 = ?$ $x_2 = ?$ $l = ?$	

Ответ: $x_1 = 160 \text{ км}$, $x_2 = 50 \text{ км}$, $l = 110 \text{ км}$.

Вопросы

1. С какими величинами производят вычисления — с векторными или скалярными?
2. При каком условии проекция вектора на ось будет положительной, а при каком — отрицательной?
3. Запишите уравнение, с помощью которого можно определить координату тела, зная координату его начального положения и вектор перемещения.

Упражнение 3

1. Мотоциклист, переехав через маленький мост, движется по прямолинейному участку дороги. У светофора, находящегося на расстоянии 10 км от моста, мотоциклист встречает велосипедиста. За 0,1 ч с момента встречи мотоциклист перемещается на 6 км, а велосипедист — на 2 км от светофора (при этом оба они продолжают двигаться прямолинейно в противоположных направлениях).

Начертите ось X , направив ее в сторону движения мотоциклиста и приняв за тело отсчета мост. Обозначьте на этой оси координату светофора (x_c) и координаты велосипедиста (x_v) и мотоциклиста (x_m), которые они имели через 0,1 ч после встречи. Над осью начертите и обозначьте векторы перемещений велосипедиста (\vec{s}_v) и мотоциклиста (\vec{s}_m), а на оси — проекции этих векторов (s_{vx} и s_{mx}).

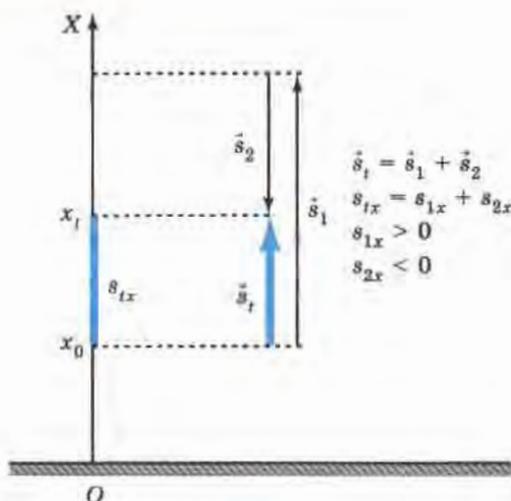


Рис. 5

Определите координаты мотоциклиста и велосипедиста и расстояние между ними спустя 0,1 ч после их встречи.

2. Мальчик держит в руках мяч на высоте 1 м от поверхности земли. Затем он подбрасывает мяч вертикально вверх. За некоторый промежуток времени t мяч успевает подняться на 2,4 м от своего первоначального положения, достигнув при этом точки наибольшего подъема, и опуститься от этой точки на 1,25 м (рис. 5).

Пользуясь этим рисунком, определите: а) координату x_0 начального положения мяча; б) проекцию s_{tx} вектора перемещения \vec{s}_t , совершенного мячом за время t ; в) координату x_t , которую имел мяч через промежуток времени t после броска.

§ 4. Перемещение при прямолинейном равномерном движении

Во всех рассмотренных нами примерах и задачах по определению координат тела вектор перемещения был известен (т. е. были известны его модуль и направление).

А как найти вектор перемещения, если он не задан?

Проще всего получить формулу для определения вектора перемещения для тела, движущегося прямолинейно и равномерно (т. е.

движущегося по прямолинейной траектории и проходящего за любые равные промежутки времени одинаковые пути).

Согласно определению

скорость равномерного прямолинейного движения — это постоянная векторная величина, равная отношению перемещения тела за любой промежуток времени к значению этого промежутка:

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}. \quad (1)$$

Из формулы (1) можно найти перемещение для прямолинейного равномерного движения:

$$\vec{s} = \vec{v}t. \quad (2)$$

При решении большинства задач на нахождение векторных величин (перемещения, скорости, силы и др.) необходимо знать, как эти величины направлены по отношению друг к другу. Об этом можно судить, в частности, по уравнениям, записанным в векторной форме. Например, формулы (1) и (2) свидетельствуют о том, что при прямолинейном равномерном движении векторы скорости и перемещения направлены в одну и ту же сторону.

Но для *расчета* перемещения применяют формулу, в которую входят проекции векторов на ось:

$$s_x = v_x t. \quad (3)$$

Мы знаем, что по знаку проекции можно судить о том, как направлен соответствующий ей вектор по отношению к выбранной оси. Но если при решении задачи на прямолинейное движение нас не интересует направление векторов перемещения и скорости, то можно воспользоваться формулой, в которую входят их модули:

$$s = vt. \quad (4)$$

Формула (4) вам давно знакома — вы часто использовали ее при решении задач по физике и математике. Только под буквой s вы подразумевали пройденный телом путь. Почему же теперь мы говорим, что s — это модуль вектора перемещения?

Дело в том, что при движении в одном и том же направлении модуль вектора перемещения, совершенного телом за некоторый промежуток времени, равен пути, пройденному этим телом за тот же промежуток времени.

Справедливость этого утверждения наглядно иллюстрируется рисунком 3. Из этого рисунка видно, что в тех случаях, когда тело не меняет направления своего движения (т. е. при движении из точки O в точку A и из точки O в точку C), модуль вектора перемещения равен пройденному пути. Если же направление движения тела меняется (т. е. при переходе из точки O в точку B и обратно и при движении из точки O в точку D по криволинейной траектории), то пройденный путь окажется больше модуля вектора перемещения.

На рисунке 6 представлен график зависимости модуля вектора скорости v от времени t при равномерном движении тела (жирная линия). С такими графиками вы уже встречались при изучении физики в 7 классе (тогда их называли графиками зависимости скорости от времени).

Модуль вектора перемещения s , совершенного телом за промежуток времени t_1 , в данном случае определяется по формуле:

$$s = v_1 t_1.$$

Но произведение $v_1 t_1$ численно равно также и площади S закрашенного прямоугольника, так как отрезки v_1 и t_1 (или, что то же самое, Ov_1 и Ot_1) являются смежными сторонами этого прямоугольника.

Таким образом, при прямолинейном равномерном движении тела модуль вектора его перемещения численно равен площади прямоугольника, заключенного между графиком скорости, осью Ot и перпендикулярами к этой оси, восставленными из точек, соответствующих моментам начала и конца наблюдения (в данном случае из точек O и t_1). Часто эту площадь называют площадью под графиком скорости.

Поскольку при решении большинства задач нам придется иметь дело не только с модулями, но и с проекциями векторов, посмотрим, как выглядят графики проекций векторов скоростей.

Для этого обратимся еще раз к задаче с двумя катерами, идущими прямолинейно и равномерно в противоположных направлениях (см. § 3, рис. 4). Допустим, что промежуток времени t , за который катера совершили указанные перемещения, равен 2 ч. За 2 ч первый катер переместился на 60 км, а второй — на 50 км. Значит,

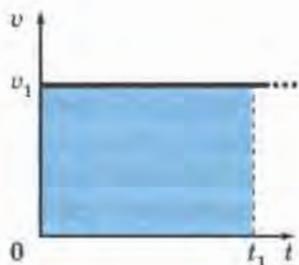


Рис. 6

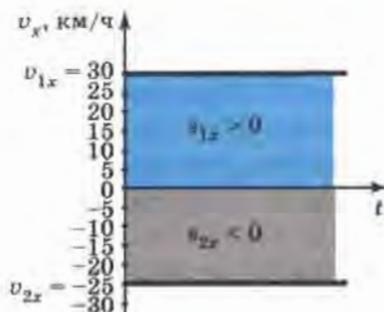


Рис. 7

модуль вектора скорости первого катера равен 30 км/ч, а второго — 25 км/ч.

Так как проекции векторов скорости и перемещения первого катера положительны, а второго — отрицательны, то $v_{1x} = 30$ км/ч, $s_{1x} = 60$ км, а $v_{2x} = -25$ км/ч, $s_{2x} = -50$ км.

Мы видим, что на графиках проекций (рис. 7) отражены не только их модули, но и знаки. График проекции вектора скорости первого катера проходит в области положительных значений оси скорости, а второго — в области отрицательных. То же самое можно сказать и про прямоугольники, площади которых численно равны проекциям векторов перемещений.

? Вопросы

1. Что называется скоростью прямолинейного равномерного движения?
2. Как найти проекцию вектора перемещения тела, движущегося прямолинейно и равномерно, если известна проекция вектора скорости движения?
3. При каком условии модуль вектора перемещения, совершенного телом за некоторый промежуток времени, равен пути, пройденному телом за тот же промежуток времени?
4. Докажите, что при равномерном движении модуль вектора перемещения численно равен площади под графиком скорости.
5. Какую информацию о движении двух тел можно получить по графикам, изображенным на рисунке 7?

Упражнение 4

1. Может ли находиться под осью Ot (т. е. в области отрицательных значений оси скорости) график модуля вектора скорости? график проекции вектора скорости?

2. Постройте графики зависимости проекций векторов скорости от времени для трех автомобилей, движущихся прямолинейно и равномерно, если два из них едут в одном направлении, а третий — навстречу им. Скорость первого автомобиля равна 60 км/ч, второго — 80 км/ч, а третьего — 90 км/ч.

§ 5. Прямолинейное равноускоренное движение. Ускорение

В 7 классе вы изучали механическое движение тел, происходящее с постоянной скоростью. Такое движение является *равномерным*.

Теперь мы переходим к рассмотрению *неравномерного* движения. Из всех видов неравномерного движения мы будем изучать самое простое — *прямолинейное равноускоренное*, при котором тело движется вдоль прямой линии, а проекция вектора скорости тела за любые равные промежутки времени меняется одинаково (при этом модуль вектора скорости может как увеличиваться, так и уменьшаться).

Например, если скорость движущегося по взлетной полосе самолета за любые 10 с увеличивается на 15 м/с, за любые 5 с — на 7,5 м/с, в каждую секунду — на 1,5 м/с и т. д., то самолет движется равноускоренно.

В данном случае под скоростью движения самолета подразумевается его так называемая *мгновенная* скорость, т. е. *скорость в каждой конкретной точке траектории в соответствующий момент времени* (более строгое определение мгновенной скорости будет дано в курсе физики старших классов).

Мгновенная скорость тел, движущихся равноускоренно, может меняться по-разному: в одних случаях быстрее, в других — медленнее. Например, скорость обычного пассажирского лифта средней мощности за каждую секунду разгона увеличивается на 0,4 м/с, а скоростного — на 1,2 м/с. В таких случаях говорят, что тела движутся с разным *ускорением*.

Рассмотрим, какая физическая величина называется ускорением.

Пусть скорость некоторого тела, движущегося равноускоренно, за промежуток времени t изменилась от v_0 до v . Под v_0 подразумевается начальная скорость тела, т. е. скорость в момент $t_0 = 0$, принятый за начало отсчета времени. А v — это скорость, которую тело имело к концу промежутка времени t , отсчитываемого от $t_0 = 0$. Тогда за каждую единицу времени скорость менялась на величину, равную $\frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$. Это отношение обозначается символом \vec{a} и называется **ускорением**:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}. \quad (1)$$

Ускорением тела при его равноускоренном движении называется величина, равная отношению изменения скорости к промежутку времени, за которое это изменение произошло.

Равноускоренное движение — это движение с постоянным ускорением.

Ускорение — векторная величина, которая характеризуется не только модулем, но и направлением.

Модуль вектора ускорения показывает, на сколько меняется модуль вектора скорости в каждую единицу времени. Чем больше ускорение, тем быстрее меняется скорость тела.

За единицу ускорения в СИ принимается ускорение такого равноускоренного движения, при котором за 1 с скорость тела изменяется на 1 м/с: $\frac{1 \text{ м/с}}{1 \text{ с}} = 1 \text{ м/с}^2$.

Таким образом, в СИ единицей ускорения является *метр на секунду в квадрате* (м/с²).

Применяются и другие единицы ускорения, например 1 см/с².

Вычислить ускорение тела, движущегося прямолинейно и равноускоренно, можно с помощью следующего уравнения, в которое входят проекции векторов ускорения и скорости:

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

Покажем на конкретных примерах, как находится ускорение.

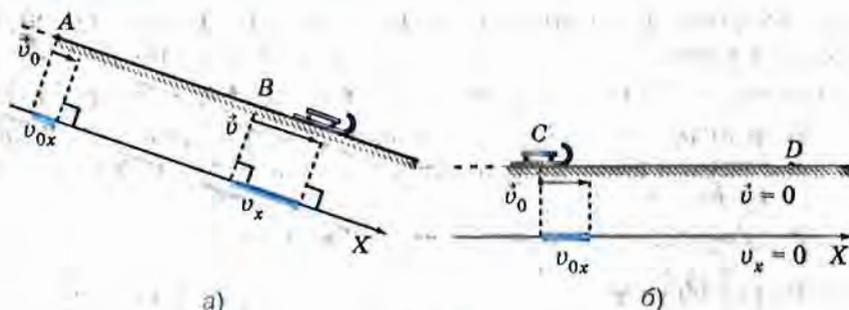


Рис. 8

На рисунке 8, а изображены санки, которые равноускоренно скатываются с горы.

Известно, что участок пути AB санки прошли за 4 с. При этом в точке A они имели скорость, равную 0,4 м/с, а в точке B — скорость, равную 2 м/с (санки приняты за материальную точку).

Определим, с каким ускорением двигались санки на участке AB .

В данном случае за начало отсчета времени следует принять момент прохождения санками точки A , поскольку согласно условию именно от этого момента отсчитывается промежуток времени, за который модуль вектора скорости изменился от 0,4 м/с до 2 м/с.

Теперь проведем ось X , параллельную вектору скорости движения санок и направленную в ту же сторону. Спроецируем на нее начала и концы векторов \vec{v}_0 и \vec{v} . Образовавшиеся при этом отрезки v_{0x} и v_x являются проекциями векторов \vec{v}_0 и \vec{v} на ось X . Обе эти проекции положительны. Поэтому можно записать, что они равны модулям соответствующих векторов: $v_{0x} = 0,4$ м/с, $v_x = 2$ м/с.

Запишем условие задачи и решим ее.

Дано:

$$v_{0x} = 0,4 \text{ м/с}$$

$$v_x = 2 \text{ м/с}$$

$$t = 4 \text{ с}$$

$$a_x = ?$$

Решение:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}; a_x = \frac{2 \text{ м/с} - 0,4 \text{ м/с}}{4 \text{ с}} = 0,4 \frac{\text{м/с}}{\text{с}} = 0,4 \text{ м/с}^2.$$

Ответ: $a_x = 0,4 \text{ м/с}^2$.

Проекция вектора ускорения на ось X получилась положительной, значит, вектор ускорения сонаправлен с осью X и со скоростью движения санок.

Если векторы скорости и ускорения направлены в одну сторону, то скорость растет.

Теперь рассмотрим другой пример, в котором санки, скатившись с горы, движутся по горизонтальному участку CD (рис. 8, б).

В результате действия на санки силы трения их скорость непрерывно уменьшается, и в точке D санки останавливаются, т. е. их скорость равна нулю. Известно, что в точке C санки имели скорость $1,2$ м/с, а участок CD был пройден ими за 6 с.

Рассчитаем ускорение санок в этом случае, т. е. определим, на сколько менялась скорость санок за каждую единицу времени.

Началом отсчета времени будем считать момент, когда санки проходят точку C . Тогда модуль вектора начальной скорости равен $1,2$ м/с, а конечной — нулю.

Проведем ось X параллельно отрезку CD и сонаправим ее со скоростью движения санок, как показано на рисунке. При этом проекция вектора скорости санок на ось X в любой момент их движения будет положительна и равна модулю вектора скорости. В частности, при $t_0 = 0$ $v_{0x} = 1,2$ м/с, а при $t = 6$ с $v_x = 0$.

Запишем данные и вычислим ускорение.

Дано:

$$v_{0x} = 1,2 \text{ м/с}$$

$$v_x = 0$$

$$t = 6 \text{ с}$$

$$a_x = ?$$

Решение:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}; a_x = \frac{0 - 1,2 \text{ м/с}}{6 \text{ с}} = -0,2 \text{ м/с}^2.$$

Ответ: $a_x = -0,2 \text{ м/с}^2$.

Мы видим, что проекция ускорения на ось X отрицательна. Это значит, что вектор ускорения \vec{a} направлен противоположно оси X и, соответственно, противоположно скорости движения. При этом скорость санок уменьшалась.

Таким образом, если векторы скорости и ускорения движущегося тела направлены в одну и ту же сторону, то модуль вектора скорости тела увеличивается, а если в противоположные — уменьшается.

? Вопросы

1. К какому виду движения — равномерному или неравномерному — относится прямолинейное равноускоренное движение?

2. Что понимают под мгновенной скоростью неравномерного движения?

3. Что называется ускорением равноускоренного движения?
4. Что такое равноускоренное движение?
5. Что показывает модуль вектора ускорения?
6. Что является единицей ускорения?
7. При каком условии модуль вектора скорости движущегося тела увеличивается? уменьшается?

Упражнение 5

1. За один и тот же промежуток времени модуль вектора скорости первого автомобиля изменился от v_1 до v' , а второго — от v_2 до v' (скорости изображены в одинаковом масштабе на рисунке 9). Какой из автомобилей двигался в указанный промежуток с большим ускорением? Скорость какого из них возростала быстрее?

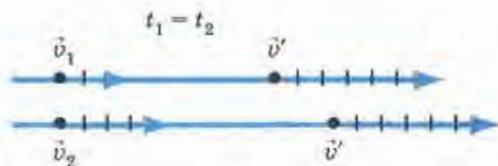


Рис. 9

2. Самолет, разгоняясь перед взлетом, в течение некоторого промежутка времени двигался равноускоренно. Каково было при этом ускорение самолета, если за 30 с его скорость возросла от 10 до 55 м/с?

3. С каким ускорением двигался поезд на некотором участке пути, если за 12 с его скорость возросла на 6 м/с?

§ 6. Скорость прямолинейного равноускоренного движения. График скорости

Нам известно, что при прямолинейном равноускоренном движении проекцию вектора ускорения на ось X можно найти по формуле:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}. \quad (1)$$

Выразим из формулы (1) проекцию v_x скорости \vec{v} , которую имело движущееся тело к концу промежутка времени t , отсчитываемого от $t_0 = 0$:

$$\begin{aligned} a_x t &= v_x - v_{0x}, \\ v_x &= v_{0x} + a_x t. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, зная проекцию v_{0x} вектора начальной скорости и проекцию a_x вектора ускорения, по формуле (2) можно вычислить проекцию v_x вектора мгновенной скорости, которую будет иметь тело к концу любого заданного промежутка времени t , отсчитываемого от момента начала наблюдения, т. е. от $t_0 = 0$.

Если в начальный момент тело покоилось, т. е. $\vec{v}_0 = 0$, то для этого случая формула (2) принимает вид:

$$v_x = a_x t. \quad (3)$$

Представим зависимость проекции вектора скорости от времени при равноускоренном движении в виде графика.

Из курса математики вам известна линейная функция $y = kx + b$, где x — аргумент, k — постоянный коэффициент, b — свободный член. Графиком этой функции является прямая линия.

Функция $v_x = v_{0x} + a_x t$ (или, что то же самое, $v_x = a_x t + v_{0x}$) тоже линейная с аргументом t , постоянным коэффициентом a_x и свободным членом v_{0x} . Значит, графиком этой функции тоже должна быть прямая линия. Расположение этой линии по отношению к осям координат определяется значениями a_x и v_{0x} .

Построим, например, график проекции вектора скорости разгоняющегося перед взлетом самолета, который движется из состояния покоя прямолинейно с ускорением $1,5 \text{ м/с}^2$ в течение 40 с (рис. 10).

Сонаправим ось X со скоростью движения самолета. Тогда проекции векторов скорости и ускорения будут положительны.

Для построения заданной прямой линии достаточно знать координаты

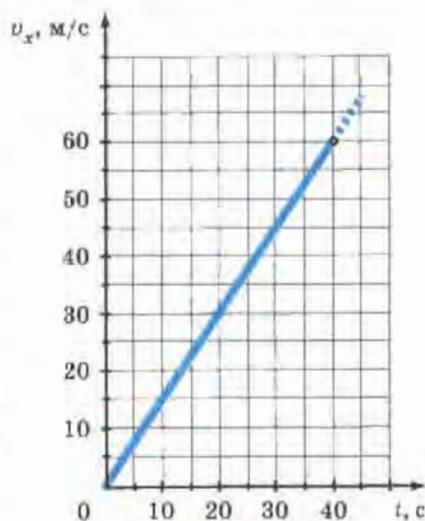


Рис. 10

(т. е. t и v_x) двух любых ее точек. Задав два произвольных значения t , по формуле $v_x = a_x t$ можно определить соответствующие значения v_x .

Например, при $t_0 = 0$ $v_{0x} = 0$; при $t = 40$ с $v_x = 1,5 \text{ м/с}^2 \cdot 40 \text{ с} = 60 \text{ м/с}$. По координатам первой из найденных точек видно, что график пройдет через начало координат.

Теперь построим аналогичный график для случая, когда начальная скорость не равна нулю (при том, что модуль скорости, как и в предыдущем примере, возрастает). Для этого воспользуемся таким примером.

По дороге едет автомобиль со скоростью 10 м/с (36 км/ч). Водитель автомобиля, увидев дорожный знак, снимающий ограничение скорости, нажал на педаль газа, в результате чего автомобиль стал двигаться с постоянным ускорением $1,4 \text{ м/с}^2$. Построим график проекции вектора мгновенной скорости (на ось X , сонаправленную со скоростью прямолинейно движущегося автомобиля) для первых четырех секунд разгона.

В этом случае зависимость проекции вектора скорости от времени описывается формулой $v_x = v_{0x} + a_x t$. Воспользуемся этой формулой для нахождения координат двух произвольных точек графика. Например, при $t_0 = 0$ $v_{0x} = 10 \text{ м/с}$; при $t = 3$ с $v_x = 10 \text{ м/с} + 1,4 \text{ м/с}^2 \cdot 3 \text{ с} = 14,2 \text{ м/с}$.

График, построенный по этим точкам, представлен на рисунке 11. Мы видим, что он отсекает на оси X отрезок, равный проекции вектора начальной скорости.

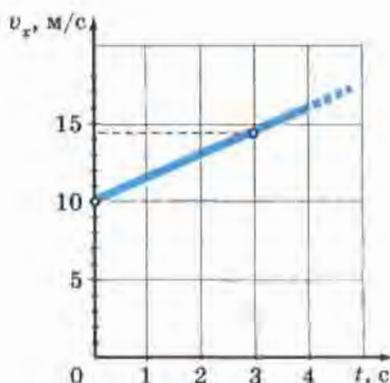


Рис. 11

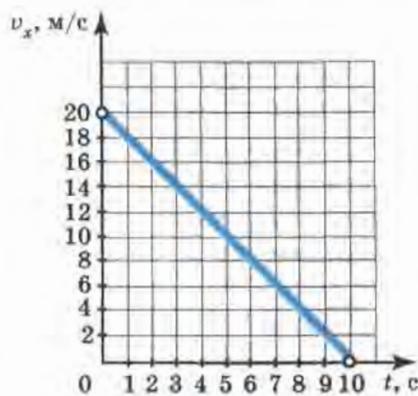


Рис. 12

Построим теперь график проекции вектора скорости, если начальная скорость не равна нулю, а модуль вектора скорости уменьшается с течением времени.

Допустим, водитель автомобиля, движущегося со скоростью 20 м/с (72 км/ч), нажимает на педаль тормоза. В результате автомобиль движется с ускорением 2 м/с^2 и через 10 с останавливается.

За начало отсчета времени примем момент начала торможения, когда скорость автомобиля еще была равна 20 м/с.

В этом случае нет необходимости рассчитывать значение проекции вектора скорости, поскольку координаты двух точек графика очевидны: при $t_0 = 0$ $v_{0x} = 20 \text{ м/с}$; при $t = 10 \text{ с}$ $v_x = 0$. Соответствующий график представлен на рисунке 12.

Мы видим, что если скорость уменьшается по модулю, то график образует с положительным направлением оси t тупой угол.

? Вопросы

1. Запишите формулу, по которой можно рассчитать проекцию вектора мгновенной скорости прямолинейного равноускоренного движения, если известны: а) проекция вектора начальной скорости и проекция вектора ускорения; б) проекция вектора ускорения при том, что начальная скорость равна нулю.

2. Что представляет собой график проекции вектора скорости равноускоренного движения при начальной скорости: а) равной нулю; б) не равной нулю?

3. Чем сходны и чем отличаются друг от друга движения, графики которых представлены на рисунках 11 и 12?

🔗 Упражнение 6

1. Хоккеист слегка ударил клюшкой по шайбе, придав ей скорость 2 м/с. Чему будет равна скорость шайбы через 4 с после удара, если в результате трения о лед она движется с ускорением $0,25 \text{ м/с}^2$?

2. Лыжник съезжает с горы из состояния покоя с ускорением, равным $0,2 \text{ м/с}^2$. Через какой промежуток времени его скорость возрастет до 2 м/с?

3. В одних и тех же координатных осях постройте графики проекции вектора скорости (на ось X , сонаправленную с вектором начальной скорости) при прямолинейном равноускоренном движении

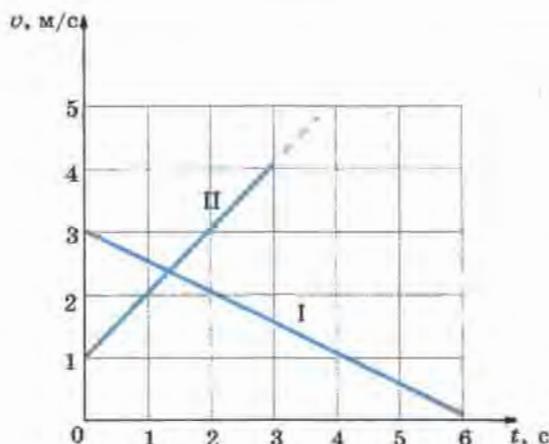


Рис. 13

для случаев: а) $v_{0x} = 1$ м/с, $a_x = 0,5$ м/с²; б) $v_{0x} = 1$ м/с, $a_x = 1$ м/с²; в) $v_{0x} = 2$ м/с, $a_x = 1$ м/с².

Масштаб во всех случаях одинаков: 1 см — 1 м/с; 1 см — 1 с.

4. В одних и тех же координатных осях постройте графики проекции вектора скорости (на ось X , сонаправленную с вектором начальной скорости) при прямолинейном равноускоренном движении для случаев: а) $v_{0x} = 4,5$ м/с, $a_x = -1,5$ м/с²; б) $v_{0x} = 3$ м/с, $a_x = -1$ м/с².

Масштаб выберите сами.

5. На рисунке 13 представлены графики зависимости модуля вектора скорости от времени при прямолинейном движении двух тел. С каким по модулю ускорением движется тело I? тело II?

§ 7. Перемещение при прямолинейном равноускоренном движении

Нам необходимо вывести формулу, с помощью которой мы могли бы рассчитывать проекцию вектора перемещения тела, движущегося прямолинейно и равноускоренно, за любой промежуток времени. Для этого обратимся к рисунку 14. Как на рисунке 14, а, так и на рисунке 14, б отрезок AC представляет собой график проекции вектора скорости тела, движущегося с постоянным ускорением a (при начальной скорости v_0).

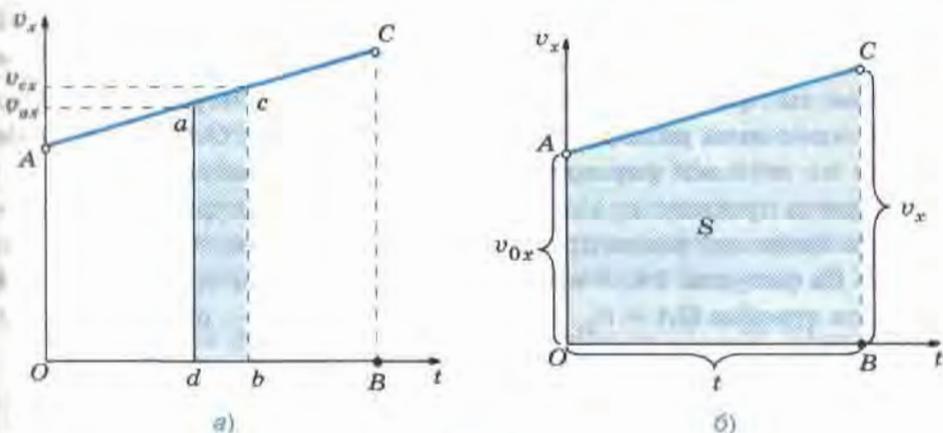


Рис. 14

Мы знаем, что при прямолинейном *равномерном* движении тела (см. § 4, рис. 6) проекция вектора перемещения, совершенного этим телом, определяется по той же формуле, что и площадь прямоугольника, заключенного под графиком проекции вектора скорости. Поэтому проекция вектора перемещения численно равна площади этого прямоугольника.

Докажем, что и в случае прямолинейного *равноускоренного* движения проекцию s_x вектора перемещения можно определять по той же формуле, что и площадь фигуры, заключенной между графиком AC , осью Ot и отрезками OA и BC , т. е. что и в этом случае проекция вектора перемещения численно равна площади фигуры под графиком скорости. Для этого на оси Ot (рис. 14, а) выделим маленький промежуток времени db . Из точек d и b проведем перпендикуляры к оси Ot до их пересечения с графиком проекции вектора скорости в точках a и c .

Таким образом, за промежуток времени, соответствующий отрезку db , скорость тела меняется от v_{ax} до v_{cx} .

За достаточно малый промежуток времени проекция вектора скорости меняется очень незначительно. Поэтому движение тела в течение этого промежутка времени мало отличается от равномерного, т. е. от движения с постоянной скоростью.

В этом случае участок ac графика можно считать горизонтальным, а полоску $acbd$ — прямоугольником. Значит, площадь этой полоски численно равна проекции вектора перемещения за промежуток времени, соответствующий отрезку db .

На такие полоски можно разбить всю площадь фигуры $OACB$, являющейся трапецией. Следовательно, проекция s_x вектора перемещения за промежуток времени, соответствующий отрезку OB , численно равна площади S трапеции $OACB$ и определяется по той же формуле, что и эта площадь.

Согласно правилу, приведенному в школьных курсах геометрии, площадь трапеции равна произведению полусуммы ее оснований на высоту. Из рисунка 14, б видно, что основаниями трапеции $OACB$ являются отрезки $OA = v_{0x}$ и $BC = v_x$, а высотой — отрезок $OB = t$. Следовательно,

$$S = \frac{v_{0x} + v_x}{2} \cdot t. \quad (1)$$

Поскольку $v_x = v_{0x} + a_x t$ (см. § 6), а $S = s_x$, то формула (1) может быть записана и преобразована следующим образом:

$$s_x = \frac{v_{0x} + v_{0x} + a_x t}{2} \cdot t = \frac{2v_{0x}t + a_x t^2}{2} = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2},$$

или

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

Таким образом, мы получили формулу для расчета проекции вектора перемещения при равноускоренном движении.

По этой же формуле рассчитывают проекцию вектора перемещения и при движении тела с уменьшающейся по модулю скоростью, только в этом случае векторы скорости и ускорения будут направлены в противоположные стороны, поэтому их проекции будут иметь разные знаки.

? Вопросы

1. Пользуясь рисунком 14, а, докажите, что проекция вектора перемещения при равноускоренном движении численно равна площади фигуры $OACB$.

2. Запишите уравнение для определения проекции вектора перемещения тела при его прямолинейном равноускоренном движении.

Упражнение 7

1. Велосипедист съехал с горки за 5 с, двигаясь с постоянным ускорением $0,5 \text{ м/с}^2$. Определите длину горки, если известно, что в начале спуска скорость велосипедиста была равна 18 км/ч .

2. Поезд, идущий со скоростью 15 м/с , остановился через 20 с после начала торможения. Считая, что торможение происходило с постоянным ускорением, определите перемещение поезда за 20 с.

3. Приведите формулу (1) из § 7 к виду $s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$. При необходимости воспользуйтесь указаниями в ответах.

§ 8. Перемещение тела при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости

Рассмотрим, как рассчитывается проекция вектора перемещения тела, движущегося равноускоренно, если его начальная скорость v_0 равна нулю. В этом случае уравнение

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

будет выглядеть так:

$$s_x = \frac{a_x t^2}{2}. \quad (1)$$

Перепишем уравнение (1), подставив в него вместо проекций s_x и a_x модули s и a векторов перемещения и ускорения. Поскольку в данном случае векторы \vec{s} и \vec{a} направлены в одну и ту же сторону, их проекции имеют одинаковые знаки. Поэтому уравнение для модулей векторов можно записать:

$$s = \frac{at^2}{2}. \quad (2)$$

Из формулы (2) мы видим, что при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости модуль вектора перемещения прямо пропорционален квадрату промежутка времени, в течение которого это перемещение было совершено. Это означает, что при увеличении в n раз времени движения (отсчитываемого от момента начала движения) перемещение увеличивается в n^2 раз.

Например, если за произвольный промежуток времени t_1 от начала движения тело совершило перемещение $s_1 = \frac{a}{2} t_1^2$, то за промежуток времени $t_2 = 2t_1$ (отсчитываемый от того же момента, что и t_1) оно совершит перемещение $s_2 = \frac{a}{2} \cdot 4t_1^2 = 4s_1$; за промежуток времени $t_3 = 3t_1$ — перемещение $s_3 = \frac{a}{2} \cdot 9t_1^2 = 9s_1$, за промежуток времени $t_n = nt_1$ — перемещение $s_n = n^2s_1$ (где n — натуральное число).

Эта зависимость модуля вектора перемещения от времени при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости наглядно отражена на рисунке 15, где отрезки OA , OB , OC , OD и OE представляют собой модули векторов перемещений (s_1 , s_2 , s_3 , s_4 и s_5), совершенных телом соответственно за промежутки времени t_1 , $t_2 = 2t_1$, $t_3 = 3t_1$, $t_4 = 4t_1$ и $t_5 = 5t_1$.

Из этого рисунка видно, что

$$OA : OB : OC : OD : OE = 1 : 4 : 9 : 16 : 25, \quad (3)$$

т. е. при увеличении промежутков времени, отсчитываемых от начала движения, в целое число раз по сравнению с t_1 , модули соответствующих векторов перемещений возрастают как ряд квадратов последовательных натуральных чисел.

Из рисунка 15 видна еще одна закономерность:

$$OA : AB : BC : CD : DE = 1 : 3 : 5 : 7 : 9, \quad (4)$$

т. е. модули векторов перемещений, совершаемых телом за последовательные равные промежутки времени (каждый из которых равен t_1), относятся как ряд последовательных нечетных чисел.

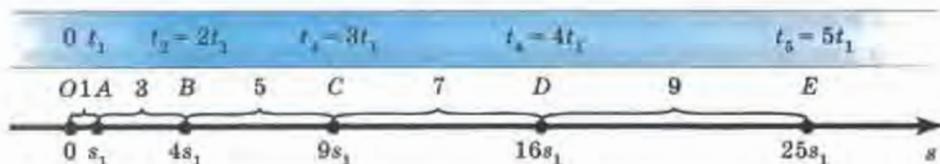


Рис 15

Закономерности (3) и (4) присущи только равноускоренному движению. Поэтому ими можно пользоваться, если необходимо определить, является движение равноускоренным или нет.

Определим, например, было ли равноускоренным движение тела, которое за первые 0,03 с движения прошло 2 мм, за вторые 0,03 с — 6 мм, а за третьи 0,03 с — 10 мм.

Для этого найдем, во сколько раз перемещения, совершенные за второй и третий промежутки времени, больше, чем за первый:

$\frac{6 \text{ мм}}{2 \text{ мм}} = 3$, $\frac{10 \text{ мм}}{2 \text{ мм}} = 5$. Значит, 2 мм : 6 мм : 10 мм = 1 : 3 : 5. Поскольку эти отношения представляют собой ряд последовательных нечетных чисел, то движение тела было равноускоренным.

В данном случае равноускоренный характер движения был выявлен на основании закономерности (4).

Покажем, что это можно было сделать и с помощью закономерности (3).

Из условия следует, что за промежуток времени $t_1 = 0,03$ с тело переместилось на расстояние $s_1 = 2$ мм, за промежуток времени $t_2 = 2t_1 = 0,06$ с — на расстояние $s_2 = 2 \text{ мм} + 6 \text{ мм} = 8$ мм, за промежуток времени $t_3 = 3t_1 = 0,09$ с — на расстояние $s_3 = 2 \text{ мм} + 6 \text{ мм} + 10 \text{ мм} = 18$ мм (t_1 , t_2 и t_3 отсчитываются от начала движения).

$$\text{Значит, } \frac{s_2}{s_1} = \frac{8 \text{ мм}}{2 \text{ мм}} = 4, \quad \frac{s_3}{s_1} = \frac{18 \text{ мм}}{2 \text{ мм}} = 9.$$

Таким образом, $s_1 : s_2 : s_3 = 1 : 4 : 9$, что свидетельствует о равноускоренном характере движения.

Закономерности (3) и (4) применяют также при решении некоторых задач.

? Вопросы

1. По каким формулам рассчитываются проекция и модуль вектора перемещения тела при его равноускоренном движении из состояния покоя?

2. Во сколько раз увеличится модуль вектора перемещения тела при увеличении времени его движения из состояния покоя в n раз?

3. Запишите, как относятся друг к другу модули векторов перемещений тела, движущегося равноускоренно из со-

стояния покоя, при увеличении времени его движения в целое число раз по сравнению с t_1 .

4. Запишите, как относятся друг к другу модули векторов перемещений, совершаемых телом за последовательные равные промежутки времени, если это тело движется равноускоренно из состояния покоя.

5. С какой целью можно использовать закономерности (3) и (4)?

Упражнение 8

1. Отходящий от станции поезд в течение первых 20 с движется прямолинейно и равноускоренно. Известно, что за третью секунду от начала движения поезд прошел 2 м. Определите модуль вектора перемещения, совершенного поездом за первую секунду, и модуль вектора ускорения, с которым он двигался.

2. Автомобиль, двигаясь равноускоренно из состояния покоя, за пятую секунду разгона проходит 6,3 м. Какую скорость развил автомобиль к концу пятой секунды от начала движения?

§ 9. Относительность движения

В курсе физики 7 класса упоминалось об относительности механического движения. Рассмотрим этот вопрос более подробно и сформулируем, в чем конкретно заключается относительность движения. Для этого решим такую задачу.

Человек идет по вагону против движения поезда (рис. 16). Скорость поезда относительно поверхности земли равна 20 м/с, а ско-

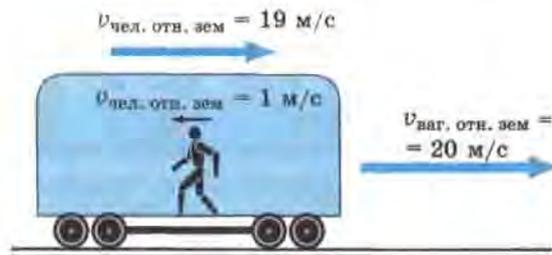


Рис. 16

рость человека относительно вагона равна 1 м/с. Определите, с какой скоростью и в каком направлении движется человек относительно поверхности земли.

Будем рассуждать так. Если бы человек не шел по вагону, то за 1 с он переместился бы вместе с поездом на расстояние, равное 20 м. Но за это же время он прошел расстояние, равное 1 м, против хода поезда. Поэтому за время, равное 1 с, он сместился относительно поверхности земли только на 19 м в направлении движения поезда. Значит, скорость человека относительно поверхности земли равна 19 м/с и направлена в ту же сторону, что и скорость поезда. Таким образом, в системе отсчета, связанной с поездом, человек движется со скоростью 1 м/с, а в системе отсчета, связанной с каким-либо телом на поверхности земли, — со скоростью 19 м/с, причем направлены эти скорости в противоположные стороны. Мы видим, что *скорость относительна, т. е. скорость одного и того же тела в разных системах отсчета может быть различной как по числовому значению, так и по направлению.*

Теперь обратимся к другому примеру. Представьте вертолет, вертикально опускающийся на землю. Относительно вертолета любая точка винта, например точка А (рис. 17), будет все время двигаться по окружности, которая на рисунке изображена сплошной линией. Для наблюдателя, находящегося на земле, та же самая точка будет двигаться по винтовой траектории (штриховая линия). Из этого примера ясно, что *траектория движения тоже относительна, т. е. траектория движения одного и того же тела может быть различной в разных системах отсчета.*

Отсюда следует, что и *путь является величиной относительной*, ведь путь — это сумма длин всех участков траектории, пройденных телом за рассматриваемый промежуток времени. Это особенно наглядно проявляется в тех случаях, когда физическое тело движется в одной системе отсчета и покоится в другой. Например, человек, сидящий в движущемся поезде, проходит опреде-



Рис. 17

ленный путь s в системе, связанной с Землей, а в системе отсчета, связанной с поездом, его путь равен нулю.

Таким образом, *относительность движения проявляется в том, что скорость, траектория, путь и некоторые другие характеристики движения относительны, т. е. они могут быть различны в разных системах отсчета.*

Понимание того, что движение одного и того же тела можно рассматривать в разных системах отсчета, сыграло огромную роль в развитии взглядов на строение Вселенной.

С давних пор люди замечали, что звезды в течение ночи, так же как и Солнце днем, перемещаются по небу с востока на запад, двигаясь по дугам и делая за сутки полный оборот вокруг Земли. Поэтому в течение многих столетий считалось, что в центре мира находится неподвижная Земля, а вокруг нее обращаются все небесные тела. Такая система мира была названа *геоцентрической* (греческое слово «гео» означает «земля»).

Во II в. александрийский ученый *Клавдий Птолемей* обобщил имеющиеся сведения о движении светил и планет в геоцентрической системе и сумел составить довольно точные таблицы, позволяющие определять положение небесных тел в прошлом и будущем, предсказывать наступление затмений и т. д.

Однако со временем, когда точность астрономических наблюдений возросла, стали обнаруживаться расхождения между вычисленными и наблюдаемыми положениями планет. Вносимые при этом исправления делали теорию Птолемея очень сложной и запутанной. Назрела необходимость замены геоцентрической системы мира.

Новые взгляды на строение Вселенной были подробно изложены в XVI в. польским ученым *Николаем Коперником*. Он считал, что Земля и другие планеты движутся вокруг Солнца, одновременно вращаясь вокруг своих осей. Такая система называется *гелиоцентрической*, поскольку в ней за центр Вселенной принимается Солнце (по-гречески «гелиос»).

Таким образом, в гелиоцентрической системе отсчета движение небесных тел рассматривается относительно Солнца, а в геоцентрической — относительно Земли.

Как же с помощью системы Коперника можно объяснить видимое нами суточное обращение Солнца вокруг Земли? На рисунке 18 схематично изображен земной шар, освещаемый с одной стороны солнечными лучами, и человек (наблюдатель), который в течение су-

ток находится в одном и том же месте Земли. Вращаясь вместе с Землей, он наблюдает за перемещением светил.

Воображаемая ось, вокруг которой вращается Земля, как бы пронзает земной шар, проходя через Северный (N) и Южный (S) географические полюсы. Стрелочка указывает направление вращения Земли — с запада на восток.

На рисунке 18, а земной шар изображен в тот момент времени, когда он как бы выводит наблюдателя с темной ночной стороны на освещенную Солнцем, дневную. Но наблюдатель, вращаясь вместе с Землей относительно ее оси с запада на восток со скоростью, приблизительно равной 200 м/с^1 , тем не менее не ощущает этого движения, как не ощущаем его мы с вами. Поэтому ему кажется, что само Солнце поднимается из-за горизонта и перемещается в течение дня (рис. 18, б) с востока на запад, т. е. противоположно вращению Земли. Вечером, когда вращающаяся Земля постепенно перемещает наблюдателя в область тени (рис. 18, в), у него создается впечатление, что Солнце уходит за горизонт. Затем он видит перемещение звезд с востока на запад в течение ночи (рис. 18, г).

Итак, по системе Коперника видимое вращение Солнца и звезд, т. е. смена дня и ночи, объясняется вращением Земли вокруг своей оси. Время, за которое земной шар делает полный оборот, называется *сутками*.

Гелиоцентрическая система оказалась гораздо более удачной, чем геоцентрическая, при решении многих научных и практических задач.



Рис. 18

¹ Скорость вращения точек поверхности Земли относительно оси зависит от широты местности: она возрастает от нуля (на полюсах) до 465 м/с (на экваторе).

Таким образом, применение знаний об относительности движения позволило по-новому взглянуть на строение Вселенной. А это, в свою очередь, помогло впоследствии открыть физические законы, описывающие движение тел в Солнечной системе и объясняющие причины такого движения.

? Вопросы

1. Что означают следующие утверждения: скорость относительна, траектория движения относительна, путь относителен?

2. Покажите на примерах, что скорость, траектория движения и пройденный путь являются относительными величинами.

3. Сформулируйте коротко, в чем заключается относительность движения.

4. В чем основное отличие гелиоцентрической системы от геоцентрической?

5. Объясните смену дня и ночи на Земле в гелиоцентрической системе (см. рис. 18).

🔗 Упражнение 9

1. Вода в реке движется со скоростью 2 м/с относительно берега. По реке плывет плот. Какова скорость плота относительно берега? относительно воды в реке?

2. В некоторых случаях скорость тела может быть одинаковой в разных системах отсчета. Например, поезд движется с одной и той же скоростью в системе отсчета, связанной со зданием вокзала, и в системе отсчета, связанной с растущим у дороги деревом. Не противоречит ли это утверждению о том, что скорость относительна? Ответ поясните.

3. При каком условии скорость движущегося тела будет одинакова относительно двух систем отсчета?

4. Благодаря суточному вращению Земли человек, сидящий на стуле в своем доме в Москве, движется относительно земной оси со скоростью примерно 900 км/ч. Сравните эту скорость с начальной скоростью пули относительно пистолета, которая равна 250 м/с.

5*¹. Торпедный катер идет вдоль шестидесятой параллели южной широты со скоростью 90 км/ч по отношению к суше. Скорость

¹ Звездочкой обозначены задачи повышенной трудности.

суточного вращения Земли на этой широте равна 223 м/с. Чему равна (в СИ) и куда направлена скорость катера относительно земной оси, если он движется на восток? на запад?

§ 10. Инерциальные системы отсчета. Первый закон Ньютона

Вам уже известен закон инерции. Согласно этому закону тела (материальные точки) находятся в покое или движутся прямолинейно и равномерно (т. е. сохраняют свою скорость неизменной), если на них не действуют другие тела.

Суть закона инерции впервые была изложена в одной из книг итальянского ученого **Галилео Галилея**, опубликованной в начале XVII в.

До этого на протяжении многих веков в науке господствовала точка зрения древнегреческого ученого **Аристотеля** и его последователей. Согласно взглядам Аристотеля, при отсутствии внешнего воздействия тело может только покоиться, а для того, чтобы тело двигалось с постоянной скоростью, нужно, чтобы на него непрерывно действовало другое тело.

Галилей пришел к выводу о том, что при отсутствии внешних воздействий тело может не только покоиться, но и двигаться прямолинейно и равномерно. А сила, которую приходится прикладывать к телу для поддержания его движения, необходима только для того, чтобы уравновесить другие приложенные к телу силы, например силу трения.

Подобные взгляды на причины движения высказывались некоторыми учеными и до Галилея. Галилей, критически проанализировав идеи своих предшественников, пришел к правильным выводам и применил их для объяснения конкретных явлений. Огромная заслуга Галилея состоит в том, что он покончил с многовековым заблуждением, тем самым дав толчок развитию науки.

В конце XVII в. английский ученый **Исаак Ньютон** обобщил выводы Галилея, сформулировал закон инерции и включил его в качестве первого из трех законов



Исаак Ньютон
(1643—1727)

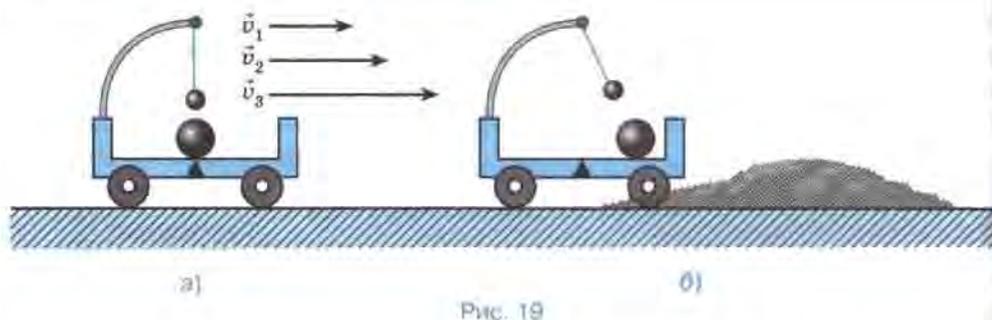


Рис. 19

в основу механики (науки о движении и взаимодействии тел). Поэтому этот закон называют **первым законом Ньютона**.

В изложении Ньютона закон инерции читается так: «Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние».

Однако со временем выяснилось, что первый закон Ньютона выполняется не во всех системах отсчета.

В этом можно убедиться с помощью опыта, изображенного на рисунке 19. Сначала тележка движется прямолинейно и равномерно относительно земли (рис. 19, а). На ней находятся два шарика, один из которых лежит на горизонтальной поверхности, а другой подвешен на нити. Силы, действующие на каждый из шариков по вертикали, уравновешены, по горизонтали никакие силы на них не действуют (силу сопротивления воздуха в данном случае можно не учитывать).

Шарики будут находиться в покое относительно тележки при любой скорости ее движения (v_1 , v_2 , v_3 и т. д.) относительно земли — главное, чтобы эта скорость была постоянна.

Но когда тележка попадает на песочную насыпь (рис. 19, б), ее скорость быстро уменьшается, в результате чего тележка останавливается. Во время торможения тележки оба шарика приходят в движение, т. е. изменяют свою скорость относительно тележки, хотя нет никаких сил, которые толкали бы их.

Значит, в системе отсчета, связанной с тележкой, тормозящей относительно земли, закон инерции не выполняется.

Таким образом, к формулировке закона инерции, данной Ньютоном, следует добавить, что этот закон справедлив не для всех систем отсчета. Без такого указания эта формулировка является незавершенной и даже не совсем точной (так как может привести к неверно-

му представлению о том, что закон инерции выполняется в любых системах отсчета). Поэтому с точки зрения современных представлений **первый закон Ньютона** формулируется так:

существуют такие системы отсчета, относительно которых тела сохраняют свою скорость неизменной, если на них не действуют другие тела.

Следует помнить, что в первом законе Ньютона речь идет о телах, которые могут быть приняты за материальные точки.

Те системы отсчета, в которых закон инерции выполняется, называются **инерциальными**, а те, в которых не выполняется, — **неинерциальными**.

Законы движения и взаимодействия тел, которые вам предстоит изучить в 9 классе, сформулированы для инерциальных систем отсчета, в которых эти законы имеют наиболее простой вид. Поэтому, прежде чем применять тот или иной закон для решения задачи, нужно знать, является ли инерциальной система отсчета, в которой рассматривается движение или взаимодействие тел.

Следует отметить, однако, что невозможно найти такую систему отсчета, которая для любых рассматриваемых в ней явлений была бы строго инерциальна.

С очень высокой степенью точности инерциальной можно считать гелиоцентрическую систему. Эта система используется в задачах небесной механики и космонавтики.

В задачах, рассматриваемых в 9 классе, инерциальными можно считать также системы отсчета, связанные с любым телом, которое покоится или движется равномерно и прямолинейно относительно поверхности земли.

А системы, движущиеся относительно инерциальных с ускорением, являются **неинерциальными**.

Существует бесчисленное множество как инерциальных, так и **неинерциальных систем отсчета**.

? Вопросы

1. Как движется тело, если на него не действуют другие тела?
2. Тело движется прямолинейно и равномерно. Меняется ли при этом его скорость?

3. Какие взгляды относительно состояния покоя и движения тел существовали до начала XVII в.?

4. Чем точка зрения Галилея, касающаяся движения тел, отличается от точки зрения Аристотеля?

5. Как проводился опыт, изображенный на рисунке 19, и какие выводы из него следуют?

6. Как читается первый закон Ньютона (в современной формулировке)?

7. Какие системы отсчета называются инерциальными, а какие — неинерциальными?

8. Можно ли в ряде случаев считать инерциальными системы отсчета, связанные с телами, которые покоятся или движутся прямолинейно и равномерно относительно земли?

9. Инерциальна ли система отсчета, движущаяся с ускорением, относительно какой-либо инерциальной системы?

Упражнение 10

На столе в равномерно и прямолинейно движущемся поезде стоит легкоподвижный игрушечный автомобиль. При торможении поезда автомобиль без всякого внешнего воздействия покатился вперед, сохраняя свою скорость относительно земли.

Выполняется ли закон инерции: а) в системе отсчета, связанной с землей; б) в системе отсчета, связанной с поездом, во время его прямолинейного и равномерного движения? во время торможения?

Можно ли в описанном случае считать инерциальной систему отсчета, связанную с землей? с поездом?

§ 11. Второй закон Ньютона

Изучая равноускоренное движение тел, мы не задавались вопросом о том, почему тела движутся с ускорением, т. е. что является причиной возникновения ускорения.

Из курса физики 7 класса вам известно, что причиной изменения скорости тела, а значит, и *причиной возникновения ускорения является действие на это тело других тел с некоторой силой.*

Когда на тело действует сразу несколько сил, то оно движется с ускорением в том случае, если равнодействующая этих сил не равна нулю. Напомним, что равнодействующей нескольких сил, одновре-

менно приложенных к телу, называется сила, производящая на тело такое же действие, как все эти силы вместе.

Поскольку ускорение возникает в результате действия силы, то естественно предположить, что существует количественная взаимосвязь между этими величинами.

Жизненный опыт убеждает нас в том, что чем больше будет равнодействующая приложенных к телу сил, тем большее ускорение получит при этом тело. Например, чем сильнее футболист бьет ногой по лежащему на поле мячу, тем большее ускорение приобретает при этом мяч и тем большую скорость он успевает набрать за те доли секунды, пока взаимодействует с ногой футболиста (о приобретенной мячом скорости мы судим по тому, насколько далеко он отлетает после удара).

Многочисленные наблюдения и опыты свидетельствуют также о том, что ускорения, получаемые телами, зависят от массы этих тел.

Представьте, что на твердой гладкой горизонтальной поверхности стола лежат два цилиндра одинаковых размеров: алюминиевый и латунный (масса которого приблизительно в три раза больше массы алюминиевого).

Если мы попытаемся привести цилиндры в движение, действуя на них одинаковыми силами, то цилиндр меньшей массы (т. е. алюминиевый) получит при ударе большее ускорение и соответственно большую скорость, в результате чего откатится дальше латунного.

Конечно, результат опыта с цилиндрами не может служить неопровержимым доказательством того, что при действии одинаковых сил тело большей массы получает меньшее ускорение. Ведь латунный цилиндр мог получить меньшее ускорение в результате того, например, что на него действовали большие силы трения покоя и качения, чем на алюминиевый (значит, при одной и той же силе удара равнодействующая сил, приложенных к латунному цилиндру, меньше равнодействующей, приложенной к алюминиевому, а именно от равнодействующей и зависит ускорение).

Поэтому для подтверждения того, что при данной силе получаемое телом ускорение зависит от массы этого тела, мы рассмотрим еще один опыт, в котором силы трения будут по возможности скомпенсированы.

На рисунке 20, а изображена легкоподвижная тележка с укрепленными на ней маленькой капельницей и двумя одинаковыми легкими вентиляторами (работающими от находящейся внутри каждо-

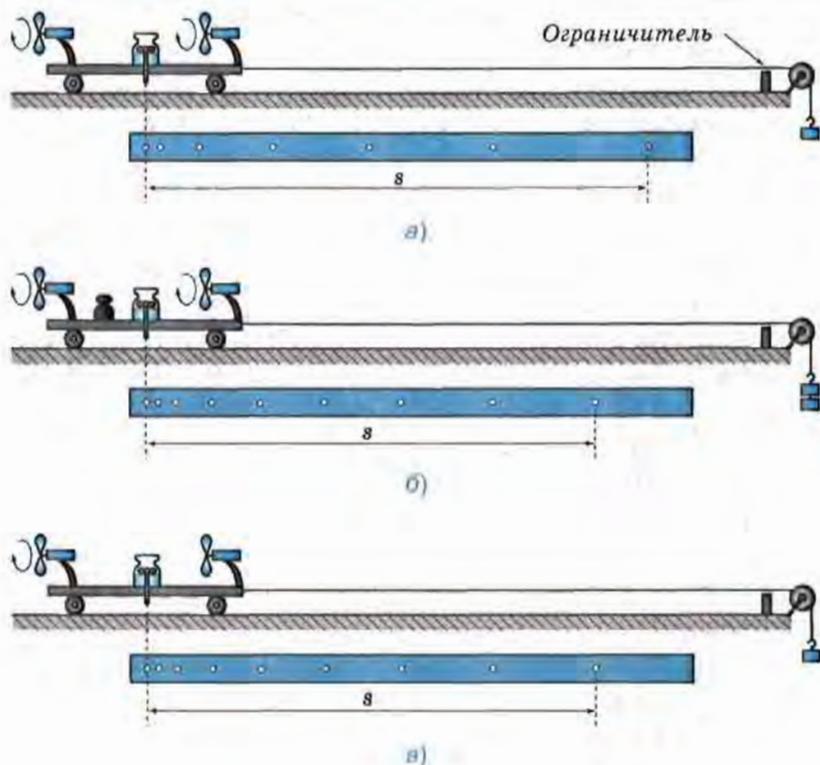


Рис. 20

го из них батарейки одной и той же мощности). Допустим, масса тележки вместе с капельницей и вентиляторами нам известна.

К тележке привязан один из концов нити, перекинутой через блок. К другому концу нити прикреплен небольшой груз. Этот груз нужен для того, чтобы скомпенсировать силу трения, действующую на движущуюся тележку.

Установим тележку так, как показано на рисунке 20, а. Вдоль траектории движения тележки расположим бумажную ленту. Откроем кран и включим вентиляторы. В результате взаимодействия их винтов с воздухом вентиляторы будут толкать тележку с некоторой постоянной силой по направлению к ограничителю на краю стола. При этом на бумажной ленте будут оставаться следы капель, падающих через равные промежутки времени T .

После того как тележка остановится, выключим вентиляторы и измерим расстояния между соседними метками на ленте. Мы убе-

димся в том, что эти расстояния относятся как ряд нечетных последовательных чисел (1 : 3 : 5 : 7 : 9...). Значит, под действием постоянной силы тележка двигалась равноускоренно (§ 8).

Чтобы определить ускорение движения тележки, измерим модуль (s) вектора ее перемещения (т. е. расстояние между крайними метками на ленте). Затем посчитаем число (n) промежутков между соседними метками на ленте, или, что то же самое, число промежутков времени T за время движения тележки. По формуле $t = Tn$ вычислим промежуток времени t , за который тележка переместилась на расстояние s . Из формулы $s = \frac{at^2}{2}$ выразим модуль ускорения ($a = \frac{2s}{t^2}$) и рассчитаем его.

Теперь удвоим массу всей движущейся системы (состоящей из тележки с вентиляторами и капельницей и груза на нити) с помощью гирь, как показано на рисунке 20, б (при этом одна гирька добавляется к уже имеющемуся грузу на конце нити для компенсации возросшей силы трения).

Повторим вышеописанный опыт. Определив ускорение и сравнив его с ускорением в предыдущем опыте, мы убедимся в том, что при действии одной и той же силы система тел, масса которой стала вдвое больше, чем прежде, приобрела в два раза меньшее ускорение, т. е. $\frac{a}{2}$.

Из рассмотренного нами опыта и ряда подобных следует, что

ускорения, сообщаемые телам одной и той же постоянной силой, обратно пропорциональны массам этих тел.

С помощью этой же экспериментальной установки можно поставить опыт, позволяющий установить количественную взаимосвязь между ускорением и силой, сообщающей телу это ускорение.

Для этого снимем добавленные в предыдущем опыте гири, чтобы масса системы опять стала такой, как в первом опыте (рис. 20, в). Но теперь приведем тележку в движение, включив только один вентилятор, в результате чего на тележку будет действовать в два раза меньшая сила, чем при двух включенных вентиляторах (придававших тележке ускорение a).

Как показывают измерения и вычисления, при уменьшении силы в два раза ускорение тоже уменьшается в два раза, т. е. становится равным $\frac{a}{2}$ (при неизменной массе тележки).

Значит, *ускорение, с которым движется тело постоянной массы, прямо пропорционально приложенной к этому телу силе, в результате которой возникает ускорение.*

Количественная взаимосвязь между массой тела, ускорением, с которым оно движется, и равнодействующей приложенных к телу сил, вызывающих это ускорение, называется **вторым законом Ньютона**. Второй закон Ньютона формулируется так:

ускорение тела прямо пропорционально равнодействующей сил, приложенных к телу, и обратно пропорционально его массе.

Следует помнить, что во втором законе Ньютона, так же как и в первом, под телом подразумевается материальная точка, движение которой рассматривается в инерциальной системе отсчета.

Математически второй закон Ньютона выражается формулой:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (1)$$

Мы видим, что вектор ускорения совпадает по направлению с вектором равнодействующей приложенных к телу сил.

В скалярном виде второй закон можно записать:

$$a_x = \frac{F_x}{m}, \quad (2)$$

или

$$a = \frac{F}{m}, \quad (3)$$

где a_x и F_x — проекции векторов ускорения и силы на ось X , а a и F — модули этих векторов.

Вам уже известно, что сила измеряется в **ньютонaх (Н)**.

Покажем, как с помощью второго закона Ньютона дается определение единицы силы — 1 Н. Для этого выразим из формулы (3) модуль силы:

$$F = ma. \quad (4)$$

В соответствии с формулой (4) сила равна единице (1 Н), если масса равна единице (1 кг) и ускорение равно единице (1 м/с²).

В СИ за единицу силы принимается сила, сообщающая телу массой 1 кг ускорение 1 м/с² в направлении действия силы.

Подставив эти значения величин в формулу (4), получим соотношение между их единицами:

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

? Вопросы

1. Что является причиной ускоренного движения тел?
2. Приведите примеры из жизни, свидетельствующие о том, что чем больше приложенная к телу сила, тем больше сообщаемое этой силой ускорение.
3. Пользуясь рисунком 20, расскажите, как ставились опыты и какие выводы следуют из этих опытов.
4. Как читается второй закон Ньютона? Какой математической формулой он выражается?
5. Что можно сказать о направлении вектора ускорения и вектора равнодействующей приложенных к телу сил?
6. Выразите единицу силы через единицы массы и ускорения.

🔗 Упражнение 11

1. Определите силу, под действием которой велосипедист скатывается с горки с ускорением, равным $0,8 \text{ м/с}^2$, если масса велосипедиста вместе с велосипедом равна 50 кг .
2. Через 20 с после начала движения электровоз развил скорость 4 м/с . Найдите силу, сообщающую ускорение, если масса электровоза равна 184 т .
3. Два тела равной массы движутся с ускорениями $0,08 \text{ м/с}^2$ и $0,64 \text{ м/с}^2$ соответственно. Равны ли модули действующих на тела сил? Чему равна сила, действующая на второе тело, если на первое действует сила $1,2 \text{ Н}$?
4. С каким ускорением будет всплывать находящийся под водой мяч массой $0,5 \text{ кг}$, если действующая на него сила тяжести равна 5 Н , архимедова сила — 10 Н , а средняя сила сопротивления движению — 2 Н ?
5. Баскетбольный мяч, пройдя сквозь кольцо и сетку, под действием силы тяжести сначала движется вниз с возрастающей скоростью, а после удара о пол — вверх с уменьшающейся скоростью. Как направлены векторы ускорения, скорости и перемещения мяча по отношению к силе тяжести при его движении вниз? вверх?
6. Тело движется прямолинейно с постоянным ускорением. Какая величина, характеризующая движение этого тела, всегда сонаправлена с равнодействующей приложенных к телу сил, а какие величины могут быть направлены противоположно равнодействующей?

§ 12. Третий закон Ньютона

Мы знаем, что не бывает одностороннего действия одного тела на другое, тела всегда *взаимодействуют* друг с другом. Например, во время забивания гвоздя не только молоток действует на гвоздь, но и гвоздь, в свою очередь, действует на молоток, в результате чего молоток останавливается.

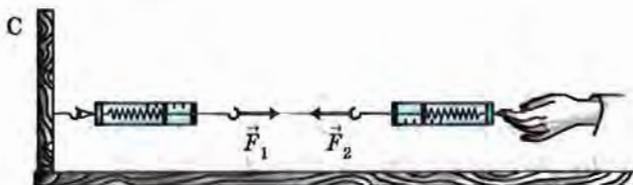


Рис. 21

Что можно сказать о силах, с которыми два тела действуют друг на друга?

Для ответа на этот вопрос рассмотрим такие опыты.

На рисунке 21 изображены два сцепленных друг с другом динамометра, один из которых прикреплен к вертикальной стойке С. Если потянуть за другой динамометр, то пружины обоих приборов растянутся и будут действовать друг на друга силами упругости \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , направленными в противоположные стороны. При этом показания динамометров будут одинаковы — значит, модули сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 равны.

Если за правый динамометр потянуть сильнее, то показания обоих динамометров возрастут на одну и ту же величину, т. е. опять будут равны друг другу. Значит, и в этом случае динамометры взаимодействуют с одинаковыми по модулю силами.

Тела действуют друг на друга с равными по модулю силами и в том случае, если взаимодействие происходит на расстоянии. Опыт, доказывающий это, изображен на рисунке 22. На нем мы видим два демонстрационных динамометра на штативе. На стержни динамометров надеты круглые столи-

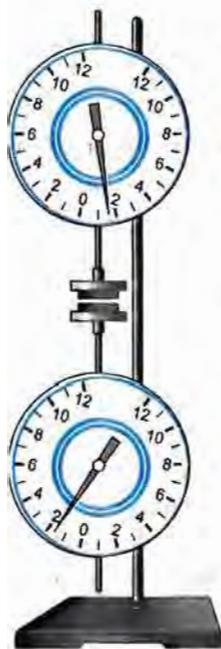


Рис. 22

ки, к которым клейкой лентой прикреплены плоские керамические магниты. Магниты отталкиваются, поскольку обращены друг к другу одноименными полюсами.

До начала опыта динамометры были разведены на такое расстояние, при котором силы взаимодействия магнитов были практически равны нулю и не регистрировались динамометрами.

Когда один из динамометров стали приближать к другому, их стрелки начали отклоняться от нуля в разные стороны. Это означает, что силы, с которыми магниты действуют друг на друга, противоположны по направлению.

При сближении магнитов показания динамометров возрастают, но в каждый момент они равны друг другу — значит, магниты отталкиваются с равными по модулю силами.

Теперь рассмотрим опыт, в котором силы взаимодействия измеряются в процессе движения взаимодействующих тел. На рисунке 23 изображен самодвижущийся игрушечный трактор, который тянет на буксире металлическую коробку с грузом. В качестве буксирного троса использованы сцепленные друг с другом трубчатые динамометры, один из которых прикреплен к трактору, а второй — к коробке. Показания динамометров одинаковы, значит, движущиеся трактор и коробка действуют друг на друга с равными по модулю силами.

Эти и многие другие опыты свидетельствуют о том, что

силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по модулю и противоположны по направлению.

Этот закон был открыт Ньютоном и называется *третьим законом Ньютона*.



Рис. 23

Математически он записывается в следующем виде:

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

Знак «минус» показывает, что векторы сил направлены в разные стороны.

Любое из наблюдаемых нами движений различных тел можно объяснить с помощью законов Ньютона.

Например, идущий человек движется вперед благодаря тому, что он отталкивается ногами от земли, т. е. взаимодействует с ней. Человек и земля действуют друг на друга с одинаковыми по модулю и противоположно направленными силами и получают ускорения, обратно пропорциональные их массам. Поскольку масса Земли огромна по сравнению с массой человека, то ускорение Земли практически равно нулю, т. е. она не меняет свою скорость. Человек же приходит в движение относительно Земли.

Следует отметить, что силы, возникающие в результате взаимодействия тел, являются силами одной и той же природы. Например, Земля и Луна взаимодействуют друг с другом посредством сил всемирного тяготения, стальной гвоздь и магнит притягиваются благодаря действию магнитных сил.

Вы уже знаете, что под действием притяжения к Земле предметы, лежащие на опоре, немного сжимаются сами и сжимают находящуюся под ними опору (обычно эти деформации так малы, что мы не замечаем их). В результате и в самих телах, и в опоре возникают силы упругости, посредством которых тело и опора взаимодействуют друг с другом.

Силу, приложенную к опоре и направленную вертикально вниз, называют *весом тела* \vec{P} , а силу, приложенную к телу и направленную вертикально вверх, — *силой реакции опоры* \vec{N} . Как уже отмечалось, обе эти силы являются силами упругости.

Следует помнить, что *силы, о которых говорится в третьем законе Ньютона, никогда не уравновешивают друг друга, поскольку они приложены к разным телам.* (Две равные по модулю и противоположно направленные силы уравновешивают друг друга в том случае, если они приложены к одному телу. Тогда их равнодействующая равна нулю, и тело при этом находится в равновесии, т. е. либо покоится, либо движется равномерно и прямолинейно.)

? Вопросы

1. Пользуясь рисунками 21, 22 и 23, расскажите, как проводились изображенные на них опыты и какие выводы были сделаны на основании полученных результатов.

2. Как читается третий закон Ньютона? Как он записывается математически?

3. Что можно сказать об ускорении, которое получает Земля при взаимодействии с идущим по ней человеком? Ответ обоснуйте.

4. Приведите примеры, показывающие, что силы, возникающие в результате взаимодействия двух тел, одинаковы по своей природе.

5. Почему неверно говорить о равновесии сил, возникающих при взаимодействии тел?

🔗 Упражнение 12

1. На рисунке 24 изображен лежащий на доске камень. Сделайте в тетради такой же рисунок и изобразите стрелочками две силы, которые по третьему закону Ньютона равны друг другу. Что это за силы? Обозначьте их.

2. Будет ли превышен предел измерений динамометра Д, изображенного на рисунке 25, если он рассчитан на измерение сил до 100 Н включительно?

3. На рисунке 26, а изображены две тележки, соединенные между собой нитью. Под действием некоторой силы F тележки пришли в движение с ускорением $a = 0,2 \text{ м/с}^2$.



Рис. 24

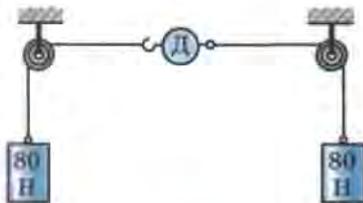


Рис. 25

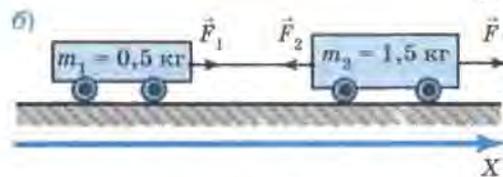
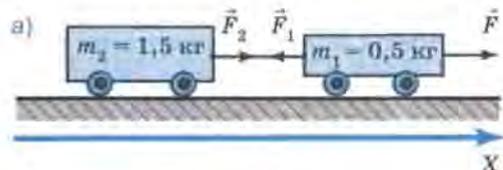


Рис. 26

а) Определите проекции на ось X сил \vec{F}_2 и \vec{F}_1 , с которыми нить действует соответственно на вторую и первую тележки. (Трение не учитывайте.)

б) Чему будут равны проекции сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , если тележки поменять местами, как показано на рисунке 26, б?

в) В каком из двух случаев, показанных на рисунке 26, нить между тележками натянута сильнее?

г) Определите проекцию силы \vec{F} , под действием которой тележки пришли в движение.

§ 13. Свободное падение тел

Свободным падением называется движение тел под действием силы тяжести.

Падение тел, наблюдаемое нами в повседневной жизни, строго говоря, не является свободным, поскольку помимо силы тяжести на тела действует сила сопротивления воздуха. Но если сила сопротивления пренебрежимо мала по сравнению с силой тяжести, то движение тела очень близко к свободному (как, например, при падении маленького тяжелого гладкого шарика).

Тела падают свободно в безвоздушном пространстве, например внутри сосуда, из которого откачан воздух.

Поскольку сила тяжести, действующая на каждое тело вблизи поверхности земли, постоянна, то *свободно падающее тело должно двигаться с постоянным ускорением, т. е. равноускоренно* (это вытекает из второго закона Ньютона).

Опыты подтверждают этот вывод. На рисунке 27 показаны положения свободно падающего шарика, который фотографировали через каждые 0,1 с с момента начала движения¹.

Мы знаем, что модули векторов перемещений, совершаемых телом при прямолинейном равноускоренном движении за последовательные

¹ Такие фотографии делают стробоскопическим методом. Свободно падающий в темноте шарик освещают кратковременными вспышками света через равные промежутки времени. Положения шарика в моменты вспышек фиксируются на пленке фотоаппарата, затвор которого открыт в течение всего времени падения шарика.

равные промежутки времени, относятся как ряд последовательных нечетных чисел (§ 8). Именно такой ряд и образуют соответствующие перемещения шарика, показанные на рисунке 27:

$$\begin{aligned} s_I : s_{II} : s_{III} : s_{IV} : s_V &\approx \\ &\approx 4,9 \text{ см} : 14,1 \text{ см} : 24 \text{ см} : 35 \text{ см} : 45 \text{ см} \approx \\ &\approx 1 : 3 : 5 : 7 : 9. \end{aligned}$$

Таким образом, отношение модулей векторов перемещений, совершенных шариком за последовательные равные промежутки времени, свидетельствует о том, что шарик в свободном падении двигался равноускоренно.

Из рисунка 27 видно, что с момента начала движения шарик прошел 1,23 м за 0,5 с, причем его начальная скорость была равна нулю. По этим данным можно вычислить модуль вектора ускорения движения шарика, выразив его из формулы $s = \frac{at^2}{2}$:

$$\begin{aligned} a = \frac{2s}{t^2} &= 2 \frac{1,23 \text{ м}}{(0,5 \text{ с})^2} = \frac{2,46 \text{ м}}{0,25 \text{ с}^2} = 9,84 \text{ м/с}^2 = \\ &\approx 9,8 \text{ м/с}^2. \end{aligned}$$

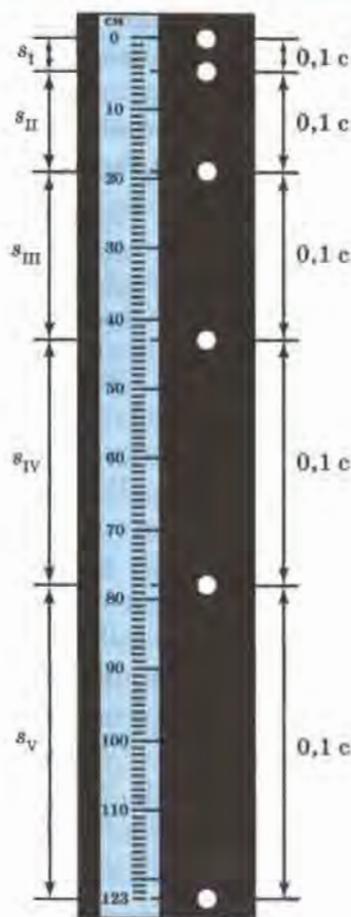


Рис. 27

Свободное падение шарика происходит с ускорением $9,8 \text{ м/с}^2$.

А с каким ускорением будут свободно падать другие тела, например кусочек ваты, картонная коробка из-под обуви, деревянная бусинка? Другими словами: *зависит ли ускорение при свободном падении тел от их массы, объема, формы и т. д.?*

Ответ на этот вопрос дает опыт, изображенный на рисунке 28. В стеклянной трубке длиной, приблизительно равной 0,8 м, находятся: кусочек пробки, дробинка, птичье перышко и монетка. Концы трубки герметично закупорены резиновыми пробками, в одной из которых имеется кран. Откачаем воздух из трубки и закроем



Рис. 28

кран. При перевертывании трубки мы видим, что все находящиеся в ней тела падают совершенно одинаково и одновременно достигают дна. В любой момент времени все эти предметы имеют одинаковые мгновенные скорости, а значит, движутся с одинаковым ускорением.

Таким образом, в данном месте Земли все тела независимо от их масс и других физических характеристик совершают свободное падение с одинаковым ускорением.

Это ускорение называется **ускорением свободного падения** и обозначается буквой g (первой буквой латинского слова *gravitas* — тяжесть).

По стробоскопической фотографии свободно падающего шарика мы нашли, что ускорение свободного падения равно $9,8 \text{ м/с}^2$. Существуют способы определения числового значения g с большей точностью (например, до $0,00001 \text{ м/с}^2$). Но при решении задач школьного курса физики, где не требуется высокой точности результата, обычно используют значение $9,8 \text{ м/с}^2$ или даже 10 м/с^2 .

Свободное падение описывается теми же формулами, что и любое равноускоренное движение. Например, при падении из состояния покоя проекции векторов скорости и перемещения рассчитываются по формулам

$$v_x = a_x t, \quad s_x = \frac{a_x t^2}{2},$$

если начальная скорость не равна

$$\text{нулю, то } s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x} \text{ и т. д. Только вместо } a_x, \text{ обозначающего проекцию произвольного ускорения, ставят } g_x, \text{ подчеркивая тем самым, что любое свободно падающее тело движется с ускорением свободного падения. Поэтому формулы выглядят так:}$$

$$v_x = g_x t, \quad s_x = \frac{g_x t^2}{2}, \quad s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2g_x}.$$

При движении тела вниз векторы ускорения свободного падения, скорости и перемещения направлены в одну и ту же сторону, поэтому их проекции имеют одинаковые знаки.

Вывод о том, что все тела, независимо от их масс, форм и размеров, совершают свободное падение совершенно одинаково, на первый взгляд может показаться противоречащим нашему повседневному опыту. Мы привыкли к тому, что тяжелые тела достигают земли быстрее, чем легкие, падающие с той же высоты.

На самом деле никакого противоречия здесь нет. Просто обычно мы наблюдаем падение тел в воздухе, который действует на падающее тело с некоторой силой, оказывая сопротивление движению.

Если мы рассматриваем, например, падение в воздухе маленького тяжелого шарика (рис. 29, а), то силой сопротивления воздуха можно пренебречь по сравнению с действующей на шарик силой тяжести и с некоторым приближением считать, что шарик свободно падает. Из рисунка видно, что равнодействующая сил тяжести и сопротивления воздуха ($\vec{F}_{\text{ш}}$), придающая шарика ускорение, мало отличается от силы тяжести ($\vec{F}_{\text{тяж. ш}}$), поэтому шарик движется с ускорением, близким к \vec{g} .

Но падение в воздухе кусочка ваты (рис. 29, б) никак нельзя считать свободным, так как в этом случае сила сопротивления составляет значительную часть от силы тяжести и равнодействующая сила ($\vec{F}_{\text{в}}$) значительно меньше силы тяжести ($\vec{F}_{\text{тяж. в}}$). Поэтому кусочек ваты падает в воздухе с гораздо меньшим ускорением, чем при свободном падении.

К выводу о том, что ускорение свободного падения не зависит от массы тела, первым пришел Галилей в конце XVI в. Одновременно роняя с башни тяжелые шары одинакового размера (чугунный и деревянный) и наблюдая за их падением, он обнаружил, что шары, имея разные массы, достигали земли почти одновременно.

Зная, с каким ускорением движется любое тело под действием силы тяжести, согласно второму закону Ньютона можно записать формулу для нахождения модуля вектора силы тяжести, действующей на тело произвольной массы m :

$$F_{\text{тяж}} = 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot m. \quad (1)$$

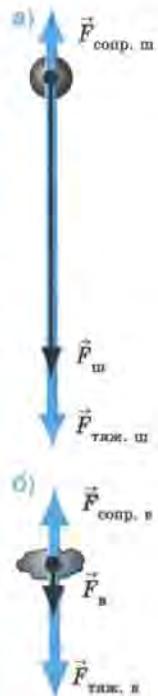


Рис. 29

Сравните формулу (1) с той, которая была дана в курсе физики 7 класса:

$$F_{\text{тяж}} = 9,8 \text{ Н/кг} \cdot m. \quad (2)$$

Мы видим, что эти две формулы отличаются только тем, что единицы при коэффициенте 9,8 различны. Покажем, что Н/кг можно преобразовать в м/с².

В § 11 было показано, что $1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2$.

Значит, $1 \text{ Н/кг} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м/с}^2}{\text{кг}} = 1 \text{ м/с}^2$, т. е. $9,8 \text{ Н/кг} = 9,8 \text{ м/с}^2$,

следовательно, формулы (1) и (2) эквивалентны друг другу.

❓ Вопросы

1. Что называется свободным падением тел?
2. Как доказать, что свободное падение шарика, изображенного на рисунке 27, было равноускоренным?
3. С какой целью ставился опыт, изображенный на рисунке 28, и какой вывод из него следует?
4. Что такое ускорение свободного падения?
5. Почему в воздухе кусочек ваты падает с меньшим ускорением, чем железный шарик?
6. Кто первым пришел к выводу о том, что свободное падение является равноускоренным движением?

🔗 Упражнение 13

1. С какой высоты свободно падала сосулька, если расстояние до земли она преодолела за 4 с?
2. Определите время падения монетки, если ее выронили из рук на высоте 80 см над землей ($g = 10 \text{ м/с}^2$).
3. Маленький стальной шарик упал с высоты 45 м. Сколько времени длилось его падение? Какое перемещение совершил шарик за первую и последнюю секунды своего движения? ($g \approx 10 \text{ м/с}^2$.)

§ 14. Движение тела, брошенного вертикально вверх. Невесомость

Сила тяжести действует на все тела на Земле: покоящиеся и движущиеся, находящиеся на поверхности Земли и вблизи нее.

Тело, свободно падающее на землю, движется равноускоренно с возрастающей скоростью, поскольку его скорость сонаправлена с силой тяжести и ускорением свободного падения.

Тело, подброшенное вверх, при отсутствии сопротивления воздуха тоже движется с постоянным ускорением, вызванным действием силы тяжести. Но в этом случае начальная скорость \vec{v}_0 , которую телу придали при броске, направлена вверх, т. е. противоположно силе тяжести и ускорению свободного падения. Поэтому скорость тела уменьшается (за каждую секунду — на величину, численно равную модулю ускорения свободного падения, т. е. на 9,8 м/с).

Через определенное время тело достигает наибольшей высоты и на какой-то момент останавливается, т. е. его скорость становится равной нулю. Понятно, что чем большую начальную скорость получило тело при броске, тем больше будет время подъема и тем на большую высоту оно поднимется к моменту остановки.

Затем под действием силы тяжести тело начинает равноускоренно падать вниз.

При решении задач на движение тела вверх при действии на него только силы тяжести используют те же формулы, что и при прямолинейном равноускоренном движении с начальной скоростью \vec{v}_0 , только a_x заменяют на g_x :

$$v_x = v_{0x} + g_x t \quad \text{и} \quad s_x = v_{0x} t + \frac{g_x t^2}{2}.$$

При этом учитывают, что при движении вверх вектор скорости тела и вектор ускорения свободного падения направлены в противоположные стороны, поэтому их проекции всегда имеют разные знаки.

Если, к примеру, ось X направлена вертикально вверх, т. е. сонаправлена с вектором скорости, то $v_x > 0$, значит, $v_x = v$, а $g_x < 0$, значит, $g_x = -g = -9,8 \text{ м/с}^2$ (где v — модуль вектора мгновенной скорости, а g — модуль вектора ускорения).

Если же ось X направлена вертикально вниз, то $v_x < 0$, т. е. $v_x = -v$, а $g_x > 0$, т. е. $g_x = g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Замечательно, что вес тела, движущегося под действием только силы тяжести, равен нулю. В этом можно убедиться с помощью опытов, изображенных на рисунке 30.

К самодельному динамометру подвешен металлический шарик. Согласно показаниям покоящегося динамометра вес шарика (рис. 30, а) равен $0,5 \text{ Н}$. Если же нить, удерживающую динамометр, перерезать, то он будет свободно падать (сопротивлением воздуха в данном

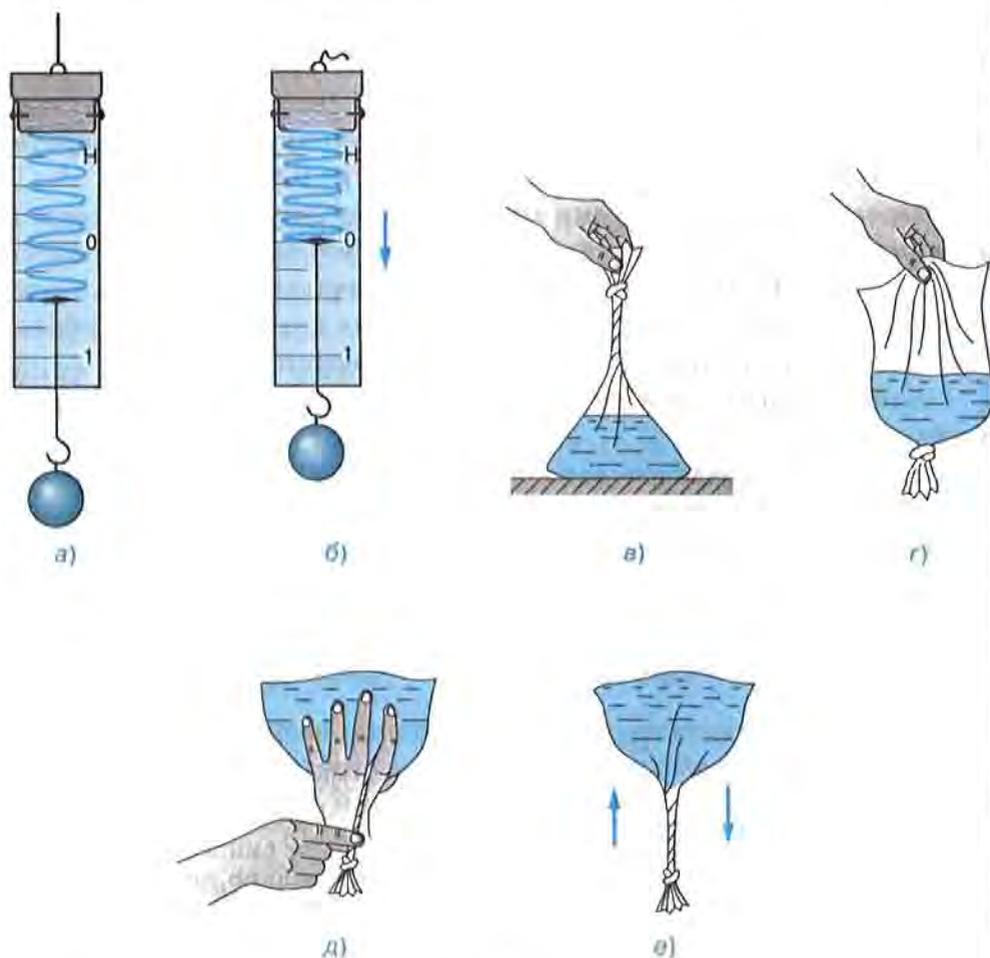


Рис. 30

случае можно пренебречь). При этом его указатель переместится на нулевую отметку, свидетельствуя о том, что вес шарика равен нулю (рис. 30, б). Вес свободно падающего динамометра тоже равен нулю. В данном случае и шарик, и сам динамометр движутся с одинаковым ускорением, не оказывая друг на друга никакого влияния. Другими словами, и динамометр, и шарик находятся в состоянии **невесомости**.

В рассмотренном опыте динамометр и шарик свободно падали из состояния покоя.

Теперь убедимся в том, что тело будет невесомым и в том случае, если его начальная скорость не равна нулю. Для этого возьмем полиэтиленовый пакет и примерно на $1/3$ заполним его водой; затем удалим из пакета воздух, скрутив его верхнюю часть в жгут и завязав на узел (рис. 30, в). Если взять пакет за нижнюю, заполненную водой часть и перевернуть, то свитая в жгут часть пакета под действием веса воды раскрутится и заполнится водой (рис. 30, г). Если же, перевернув пакет, удерживать жгут, не позволяя ему раскрутиться (рис. 30, д), а затем подкинуть пакет вверх, то и во время подъема, и во время падения жгут не будет раскручиваться (рис. 30, е). Это свидетельствует о том, что во время полета вода не действует своим весом на пакет, так как становится невесомой.

Можно перекидывать этот пакет друг другу, — тогда он будет лететь по параболической траектории. Но и в этом случае он сохранит в полете свою форму, которую ему придали при броске.

? Вопросы

1. Действует ли сила тяжести на подброшенное вверх тело во время его подъема?

2. С каким ускорением движется подброшенное вверх тело при отсутствии трения? Как меняется при этом скорость движения тела?

3. От чего зависит наибольшая высота подъема брошенного вверх тела в том случае, когда сопротивлением воздуха можно пренебречь?

4. Что можно сказать о знаках проекций векторов мгновенной скорости тела и ускорения свободного падения при свободном движении этого тела вверх?

5. Как ставились опыты, изображенные на рисунке 30, и какой вывод из них следует?

Упражнение 14

Теннисный мяч бросили вертикально вверх с начальной скоростью 9,8 м/с. Через какой промежуток времени скорость поднимающегося мяча уменьшится до нуля? Какое перемещение от места броска совершит при этом мяч?

§ 15. Закон всемирного тяготения

В курсе физики 7 класса вы изучали явление всемирного тяготения. Оно заключается в том, что *между всеми телами во Вселенной действуют силы притяжения*.

К выводу о существовании сил всемирного тяготения (их называют также *гравитационными*) пришел Ньютон в результате изучения движения Луны вокруг Земли и планет вокруг Солнца.

Заслуга Ньютона заключается не только в его гениальной догадке о взаимном притяжении тел, но и в том, что он сумел найти закон их взаимодействия, т. е. формулу для расчета гравитационной силы между двумя телами.

Закон всемирного тяготения гласит:

два любых тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной массе каждого из них и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:

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

где F — модуль вектора силы гравитационного притяжения между телами с массами m_1 и m_2 , а r — расстояние между телами (или их центрами); G — это коэффициент, который называется *гравитационной постоянной*.

Если $m_1 = m_2 = 1$ кг и $r = 1$ м, то, как видно из формулы, гравитационная постоянная G численно равна силе F . Другими словами, гравитационная постоянная численно равна силе F притяжения двух тел массой по 1 кг, находящихся на расстоянии 1 м друг от друга. Измерения показывают, что

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

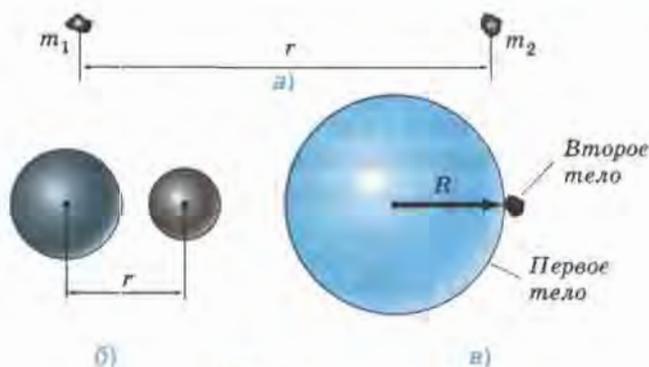


Рис. 31

Формула дает точный результат при расчете силы всемирного тяготения в трех случаях: 1) если размеры тел пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием между ними (рис. 31, а); 2) если оба тела однородны и имеют шарообразную форму (рис. 31, б); 3) если одно из взаимодействующих тел — шар, размеры и масса которого значительно больше, чем у второго тела (любой формы), находящегося на поверхности этого шара или вблизи нее (рис. 31, в).

Третий из рассмотренных случаев является основанием для того, чтобы рассчитывать по приведенной формуле силу притяжения к Земле любого из находящихся на ней тел. При этом в качестве расстояния между телами следует брать радиус Земли, поскольку размеры всех тел, находящихся на ее поверхности или вблизи нее, пренебрежимо малы по сравнению с земным радиусом.

По третьему закону Ньютона яблоко, висящее на ветке или падающее с нее с ускорением свободного падения, притягивает к себе Землю с такой же по модулю силой, с какой его притягивает Земля. Но ускорение Земли, вызванное силой ее притяжения к яблоку, близко к нулю, поскольку масса Земли несоизмеримо больше массы яблока.

? Вопросы

1. Что было названо всемирным тяготением?
2. Как иначе называются силы всемирного тяготения?
3. Кто и в каком веке открыл закон всемирного тяготения?
4. Как читается закон всемирного тяготения?

5. Запишите формулу, выражающую закон всемирного тяготения.

6. В каких случаях следует применять эту формулу для расчета гравитационных сил?

7. Притягивается ли Земля к висящему на ветке яблоку?

Упражнение 15

1. Приведите примеры проявления силы тяготения.

2. Космическая станция летит от Земли к Луне. Как меняется при этом модуль вектора силы ее притяжения к Земле? к Луне? С одинаковыми или различными по модулю силами притягивается станция к Земле и Луне, когда она находится посередине между ними? Все три ответа обоснуйте. (Известно, что масса Земли примерно в 81 раз больше массы Луны.)

3. Известно, что масса Солнца в 330 000 раз больше массы Земли. Верно ли, что Солнце притягивает Землю в 330 000 раз сильнее, чем Земля притягивает Солнце? Ответ поясните.

4. Мяч, подброшенный мальчиком, в течение некоторого времени двигался вверх. При этом его скорость все время уменьшалась, пока не стала равной нулю. Затем мяч стал падать вниз с возрастающей скоростью. Объясните: а) действовала ли на мяч сила притяжения к Земле во время его движения вверх; вниз; б) что послужило причиной уменьшения скорости мяча при его движении вверх; увеличения его скорости при движении вниз; в) почему при движении мяча вверх его скорость уменьшалась, а при движении вниз — увеличивалась.

5. Притягивается ли к Луне человек, стоящий на Земле? Если да, то к чему он притягивается сильнее: к Луне или к Земле? Притягивается ли Луна к этому человеку? Ответы обоснуйте.

§ 16. Ускорение свободного падения на Земле и других небесных телах

Притяжение тел к Земле — один из случаев всемирного тяготения. Для нас, жителей Земли, эта сила имеет большое значение.

Сила $F = G \frac{M_3 m}{R_3^2}$, с которой тело массой m притягивается к Земле,

несколько отличается от действующей на это тело силы тяжести, определяемой по формуле $F_{\text{тяж}} = gm$ (это связано с тем, что Земля,

вследствие ее суточного вращения, не является строго инерциальной системой отсчета). Но поскольку различие между указанными силами существенно меньше каждой из них, эти силы можно считать приблизительно равными.

Значит, для любого тела массой m , находящегося на поверхности Земли или вблизи нее, можно записать:

$$mg \approx G \frac{M_3 m}{R_3^2},$$

или

$$g \approx G \frac{M_3}{R_3^2}. \quad (1)$$

Из формулы (1) мы видим, что ускорение свободного падения тел, находящихся на поверхности Земли или вблизи нее, зависит от радиуса Земли (т. е. расстояния между центром Земли и данным телом) и ее массы.

Если тело поднять на высоту h над Землей, как показано на рисунке 32, а, то расстояние между этим телом и центром Земли будет

$R_3 + h$. Тогда $g \approx G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2}$. Чем больше высота h , тем меньше g и

тем меньше сила тяжести тела. Значит, с увеличением высоты тела над поверхностью Земли действующая на него сила тяжести уменьшается за счет уменьшения ускорения свободного падения. Но уменьшение это обычно очень невелико, поскольку высота тела над Землей чаще всего пренебрежимо мала по сравнению с радиусом Земли. Например, если альпинист массой 80 кг поднялся на гору высотой 3 км, то действующая на него сила тяжести уменьшится всего на 0,7 Н (или на 0,09%). Поэтому во многих случаях при расчете силы тяжести тела, находящегося на небольшой высоте над Землей, ускорение

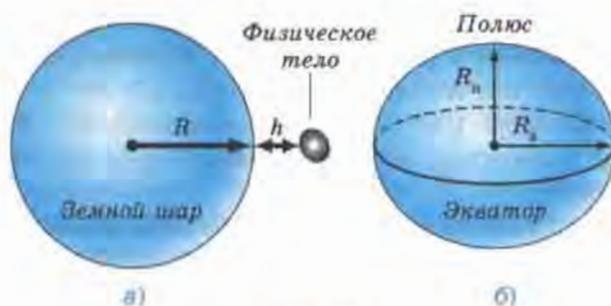


Рис. 32

свободного падения считают равным $9,8 \text{ м/с}^2$, пренебрегая его небольшим уменьшением. Соответственно силу тяжести рассчитывают по формуле:

$$F_{\text{тяж}} = 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot m.$$

Значения коэффициента g (а значит, и значения силы тяжести) зависят также от географической широты места на земном шаре. Оно меняется от $9,78 \text{ м/с}^2$ на экваторе до $9,83 \text{ м/с}^2$ на полюсах, т. е. на полюсах оно чуть больше, чем на экваторе. Это и понятно: ведь Земля имеет не строго шарообразную форму. Она немного сплюснута у полюсов (рис. 32, б), поэтому расстояние от центра Земли до полюсов $R_{\text{п}}$ меньше, чем до экватора $R_{\text{э}}$. А согласно закону всемирного тяготения, чем меньше расстояние между телами, тем больше сила притяжения между ними.

Подставив в формулу (1) вместо массы и радиуса Земли соответственно массу и радиус какой-либо другой планеты или ее спутника, можно определить приблизительное значение ускорения свободного падения на поверхности любого из этих небесных тел. Например, ускорение свободного падения на Луне рассчитывается по формуле:

$$g_{\text{л}} = G \frac{M_{\text{л}}}{R_{\text{л}}^2}.$$

Оказывается, что отношение $M_{\text{л}}/R_{\text{л}}^2$ в шесть раз меньше, чем $M_{\text{з}}/R_{\text{з}}^2$. Поэтому и ускорение свободного падения, и сила притяжения тел к Луне в шесть раз меньше, чем на Земле. Например, человек, масса которого 60 кг, к Земле притягивается с силой 588 Н, а к Луне — с силой 98 Н.

? Вопросы

1. Верно ли, что притяжение тел к Земле является одним из примеров всемирного тяготения?
2. Как меняется сила тяжести, действующая на тело, при его удалении от поверхности Земли?
3. По какой формуле можно рассчитывать действующую на тело силу тяжести, если оно находится на небольшой высоте над Землей?
4. В каком случае сила тяжести, действующая на одно и то же тело, будет больше: если это тело находится в экваториальной области земного шара или на одном из полюсов? Почему?
5. Что вы знаете об ускорении свободного падения на Луне?

Упражнение 16

1. Чему равна сила тяжести, действующая на тело массой 2,5 кг; 600 г; 1,2 т; 50 т? ($g = 10 \text{ м/с}^2$.)

2. Определите приблизительно силу тяжести, действующую на человека массой 64 кг. ($g = 10 \text{ м/с}^2$.) Притягивается ли земной шар к этому человеку? Если да, то чему приблизительно равна эта сила?

3. Первый советский искусственный спутник Земли был запущен 4 октября 1957 г. Определите массу этого спутника, если известно, что на Земле на него действовала сила тяжести, равная 819,3 Н.

4. Можно ли рассчитывать действующую на космическую ракету силу тяжести по формуле $F_{\text{тяж}} = 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot m$, где m — масса ракеты, если эта ракета пролетает на расстоянии 5000 км от поверхности Земли? (Известно, что радиус Земли приблизительно равен 6400 км.) Ответ поясните. Если эта формула не годится, то какой формулой вы предложили бы воспользоваться в этом случае?

5. Ястреб в течение некоторого времени может парить на одной и той же высоте над Землей. Значит ли это, что на него не действует сила тяжести? Что произойдет с ястребом, если он сложит крылья?

6*. С Земли стартует космическая ракета. На каком расстоянии от поверхности Земли сила тяжести ракеты будет в 4 раза меньше, чем перед стартом? в 9 раз меньше, чем перед стартом?

§ 17. Открытие планет Нептун и Плутон

(для дополнительного чтения)

С помощью закона всемирного тяготения и законов Ньютона были определены траектории движения планет Солнечной системы, а также рассчитаны их координаты в любой момент времени на много лет вперед. Для этого сначала по закону всемирного тяготения вычислялась сила гравитационного взаимодействия между Солнцем и данной планетой. Затем с помощью второго закона Ньютона рассчитывалось ускорение, с которым планета движется вокруг Солнца. А по ускорению определялись и другие величины, характеризующие движение, в том числе и координаты.

При этом учитывалось также влияние других планет Солнечной системы на движение данной планеты.

Правильность рассчитанных таким образом орбит планет и их положения в любой момент времени подтверждалась результатами астрономических наблюдений.

В 1781 г. английский астроном *Уильям Гершель* путем наблюдений открыл седьмую планету Солнечной системы, которую назвали Уран.

Вскоре после этого было рассчитано, как будут меняться со временем координаты Урана и по какой орбите он будет двигаться.

В результате многолетних наблюдений за движением Урана в первой половине XIX в. ученые окончательно убедились в том, что реальная орбита Урана не совпадает с вычисленной. Создавалось впечатление, что за Ураном находится еще одна планета, которая притягивает к себе Уран и тем самым влияет на его движение.

По отклонениям в движении Урана сначала английский ученый *Джон Адамс*, а несколько позже и французский ученый *Урбен Леверье* на основании закона всемирного тяготения сумели вычислить местоположение этой предполагаемой планеты.

Адамс первым закончил работу и обратился к директору одной из обсерваторий с просьбой организовать поиски планеты, координаты которой он нашел с помощью теоретических расчетов. В эту же обсерваторию с подобной просьбой обратился и Леверье.

Но по какой-то причине поиск планеты был отложен на неопределенный срок.

Тогда Леверье послал письмо с указанием точных координат планеты, которая, по его мнению, должна была находиться за Ураном, молодому сотруднику Берлинской обсерватории *Йоганну Галле*.

23 сентября 1846 г. Галле, получив это письмо, без промедления приступил к наблюдениям и в ту же ночь обнаружил научно предсказанную планету, координаты которой всего лишь на полградуса отличались от указанных в письме.

Пять дней спустя Леверье получил от директора Берлинской обсерватории поздравительное письмо, в котором, в частности, говорилось: «Ваше имя отныне будет связано с наиболее выдающимся из мыслимых доказательств справедливости закона всемирного тяготения».

По предложению Леверье планету назвали Нептун.

И только несколько лет спустя в научном мире была признана и заслуга Джона Адамса в открытии Нептуна.

С помощью расчетов, основанных, в частности, на применении закона всемирного тяготения, и целенаправленных астрономических наблюдений 18 февраля 1930 г. была открыта еще одна планета Солнечной системы — Плутон, которая находится почти в три раза дальше от Солнца, чем Нептун.

Желая подчеркнуть, что открытие этих планет сделано теоретическим путем, т. е. исключительно с помощью расчетов, основанных на законах физики, говорят, что планеты Нептун и Плутон были открыты «на кончике пера».

В настоящее время Плутон причислен к карликовым планетам, так как, имея массу в 500 раз меньше земной и диаметр, составляющий $\frac{2}{3}$ лунного, он не соответствует определению понятия «планета», которое было дано в августе 2006 г. Международным астрономическим союзом.

§ 18. Прямолинейное и криволинейное движение

Действие на тело силы в одних случаях может привести к изменению только *модуля вектора* скорости этого тела, а в других — к изменению *направления* скорости. Покажем это на примерах.

На рисунке 33, а изображен шарик, лежащий на столе в точке А. Шарик привязан к одному из концов резинового шнура. Второй конец шнура прикреплен к столу в точке О. Если шарик переместить в точку В, то шнур растянется. При этом в нем возникнет сила упругости \vec{F} , действующая на шарик и стремящаяся вернуть его в первоначальное положение. Если теперь отпустить шарик, то под действием силы \vec{F} он будет ускоренно двигаться к точке А. В данном случае *скорость шарика в любой точке траектории* (например, в точке С) *сонаправлена с силой упругости и ускорением*, возникшим в результате действия этой силы. При этом меняется только модуль вектора скорости шарика, а *направление вектора скорости остается неизменным*, и шарик движется прямолинейно.

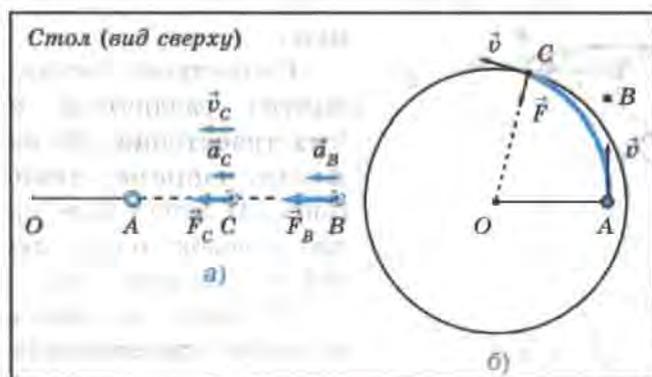


Рис. 33

Теперь рассмотрим пример, в котором под действием силы упругости шарик движется *криволинейно* (т. е. траектория его движения представляет собой кривую линию). На рисунке 33, б изображен тот же шарик на резиновом шнуре, лежащий в точке *A*. Толкнем шарик к точке *B*, т. е. *придадим ему начальную скорость, направленную перпендикулярно отрезку OA*. Если бы на шарик не действовали никакие силы, то он сохранял бы величину и направление полученной скорости (вспомните явление инерции). Но, двигаясь к точке *B*, шарик удаляется от точки *O* и чуть-чуть растягивает шнур. Поэтому в шнуре возникает сила упругости \vec{F} , стремящаяся сократить его до первоначальной длины и одновременно приблизить шарик к точке *O*. В результате действия этой силы направление скорости шарика в каждый момент его движения немного меняется, поэтому он движется *по криволинейной траектории AC*. В любой точке траектории (например, в точке *C*) скорость шарика \vec{v} и сила \vec{F} направлены вдоль пересекающихся прямых: скорость — по касательной к траектории, а сила — к точке *O*.

Рассмотренные примеры показывают, что действие на тело силы может привести к разным результатам в зависимости от направления векторов скорости и силы.

Если скорость тела и действующая на него сила направлены вдоль одной прямой, то тело движется прямолинейно, а если они направлены вдоль пересекающихся прямых, то тело движется криволинейно.

Верно и обратное утверждение: если тело движется криволинейно, то это значит, что на него действует какая-то сила, меняющая направление скорости, причем в каждой точке сила и скорость направлены вдоль пересекающихся прямых.

Существует бесчисленное множество различных криволинейных траекторий. Но часто кривые линии, например линия *ABCDEF* (рис. 34), могут быть представлены в виде совокупности дуг окружностей разных радиусов.

Поэтому во многих случаях изучение криволинейного движения тела сводится к изучению его движения по окружности.

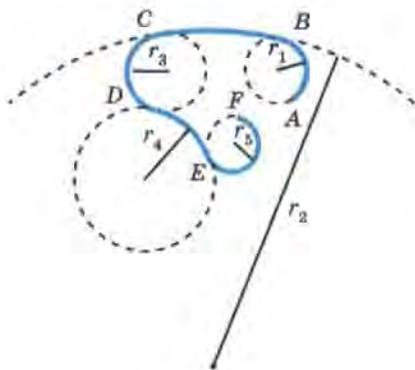


Рис. 34

? Вопросы

1. Рассмотрите рисунок 33, а и ответьте на вопросы: под действием какой силы шарик приобретает скорость и движется от точки В к точке А? В результате чего эта сила возникла? Как направлены ускорение, скорость шарика и действующая на него сила? По какой траектории движется шарик?

2. Рассмотрите рисунок 33, б и ответьте на вопросы: почему в шнуре возникла сила упругости и как она направлена по отношению к самому шнуру? Что можно сказать о направлении скорости шарика и действующей на него силы упругости шнура? Как движется шарик: прямолинейно или криволинейно?

3. При каком условии тело под действием силы движется прямолинейно, а при каком — криволинейно?

Упражнение 17

1. Шарик катился по горизонтальной поверхности стола от точки А к точке В (рис. 35). В точке В на шарик подействовали силой \vec{F} . В результате он стал двигаться к точке С. В каком из направлений, обозначенных стрелками 1, 2, 3 и 4, могла действовать сила \vec{F} ?

2. На рисунке 36 изображена траектория движения шарика. На ней кружочками отмечены положения шарика через каждую секунду после начала движения. Действовала ли на шарик сила на участке 0—3; 4—6; 7—9; 10—12; 13—15;

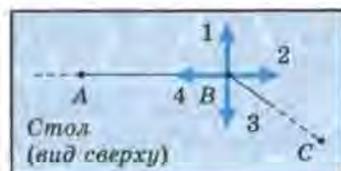


Рис. 35

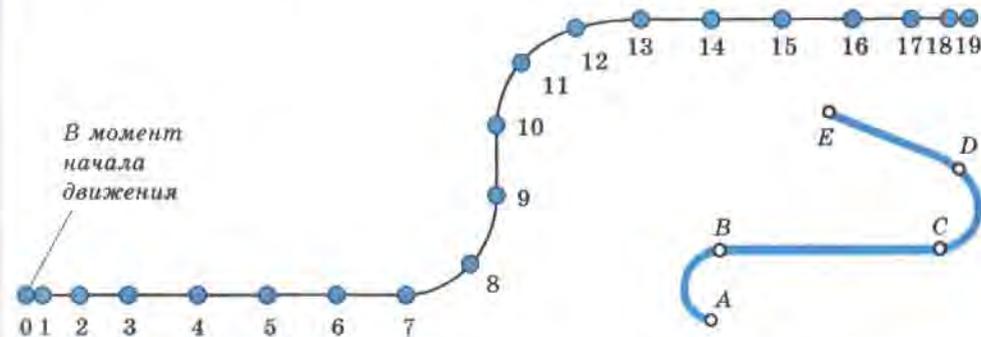


Рис. 36

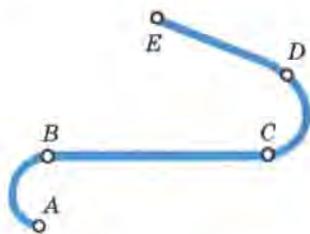


Рис. 37

16—19? Если сила действовала, то как она была направлена по отношению к вектору скорости? Почему на участке 7—9 шарик повернул налево, а на участке 10—12 — направо по отношению к направлению движения перед поворотом? Сопротивление движению не учитывайте.

3*. На рисунке 37 линией *ABCDE* изображена траектория движения некоторого тела. На каких участках на тело наверняка действовала сила? Могла ли на тело действовать какая-нибудь сила при его движении на других участках этой траектории? Все ответы обоснуйте.

§ 19. Движение тела по окружности с постоянной по модулю скоростью

В том, что мгновенная скорость тела в любой точке криволинейной траектории направлена по касательной в этой точке, можно убедиться на опыте (рис. 38).

Если к быстро вращающемуся точильному камню электроточила приложить металлический прут, то из-под него будут вырывать искры. Это раскаленные частицы камня, отрывающиеся при трении о прут. Они летят с той скоростью, которой обладали в момент отрыва.

Мы видим, что направление движения частиц, а значит, и вектор их скорости совпадает с касательной к окружности, по которой они двигались.



Рис. 38

Известно, что векторные величины характеризуются модулем и направлением. При изменении хотя бы одной из этих двух характеристик вектор меняется.

При движении тела по окружности *модуль вектора скорости* может меняться или оставаться постоянным, но *направление вектора скорости* обязательно меняется.

Благодаря непрерывному изменению его направления, вектор скорости тела, движущегося по окружности, является величиной переменной (независимо от того, меняется скорость по модулю или нет).

Значит, движение по окружности всегда происходит с ускорением.

В курсе физики 10 класса приводится строгое доказательство того, что ускорение, с которым тело движется по окружности с постоянной по модулю скоростью, в любой точке направлено по радиусу окружности к ее центру. Поэтому оно называется *центростремительным*.

Модуль вектора центростремительного ускорения определяется по формуле:

$$a_{ц.с} = \frac{v^2}{r}, \quad (1)$$

где $a_{ц.с}$ — модуль вектора центростремительного ускорения тела, движущегося с постоянной по модулю скоростью по окружности радиусом r .

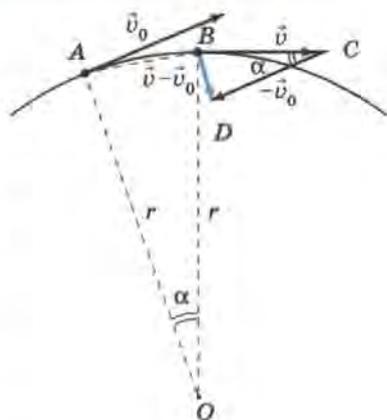


Рис. 39

Получить представление о направлении центростремительного ускорения и вывести формулу (1) можно по рисунку 39. На нем изображено тело (материальная точка), движущееся по окружности радиусом r . За очень малый промежуток времени t это тело переходит из точки A в точку B , которая расположена очень близко к точке A . В этом случае разницей в длине дуги $\overset{\frown}{AB}$ и хорды \overrightarrow{AB} можно пренебречь и считать, что тело движется по хорде. Но направления скоростей \vec{v}_0 и \vec{v} , которые имело тело соответственно в точках A и B , все-таки различны.

Среднее ускорение¹ движения тела определяется по формуле:

$$\vec{a}_{ср} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}. \quad (2)$$

¹ По формуле (2) можно определять мгновенное ускорение (т. е. ускорение в данный момент времени) только в том случае, если оно постоянно; если же модуль или направление ускорения меняются, то эта формула пригодна только для определения *среднего ускорения* за данный промежуток времени t .

Вектор среднего ускорения сонаправлен с вектором, равным *геометрической разности* скоростей ($\vec{v} - \vec{v}_0$). Чтобы построить этот вектор, сначала преобразуем геометрическую разность в *геометрическую сумму* $\vec{v} + (-\vec{v}_0)$, где $(-\vec{v}_0)$ — вектор, направленный противоположно вектору \vec{v}_0 и равный ему по модулю. Затем *построим сумму векторов* \vec{v} и $(-\vec{v}_0)$ по существующему в геометрии *правилу треугольника*: от конца вектора \vec{v} отложим вектор $(-\vec{v}_0)$ и проведем направленный отрезок прямой (BD) от начала вектора \vec{v} к концу вектора $(-\vec{v}_0)$. Это и будет вектор $\vec{v} + (-\vec{v}_0)$, или, что то же самое, $(\vec{v} - \vec{v}_0)$.

При стремлении к нулю промежутка времени t точка B стремится к точке A , угол α — к нулю, а угол DBC — к 90° , т. е. в пределе вектор ускорения направлен вдоль радиуса к центру окружности.

Для вывода формулы (1) воспользуемся тем, что треугольник, образованный векторами \vec{v} , $(-\vec{v}_0)$ и $(\vec{v} - \vec{v}_0)$, подобен треугольнику AOB (как равнобедренные с равными углами α при вершинах).

Из подобия указанных треугольников следует пропорциональность соответствующих сторон:

$$\frac{|\vec{v} - \vec{v}_0|}{AB} = \frac{|\vec{v}|}{r}, \quad (3)$$

где $|\vec{v} - \vec{v}_0|$ — модуль вектора изменения скорости тела за малый промежуток времени t , а $|\vec{v}|$ — модуль вектора скорости, с которой тело движется по окружности.

AB — это модуль вектора перемещения, совершенного телом за время t при скорости движения $|\vec{v}|$. Значит,

$$AB = |\vec{v}| \cdot t. \quad (4)$$

Заменив в формуле (3) AB на $|\vec{v}| \cdot t$, получим: $\frac{|\vec{v} - \vec{v}_0|}{|\vec{v}| \cdot t} = \frac{|\vec{v}|}{r}$,

или
$$\frac{|\vec{v} - \vec{v}_0|}{t} = \frac{|\vec{v}|^2}{r}. \quad (5)$$

Преобразуем формулу (5), учитывая, что $\frac{|\vec{v} - \vec{v}_0|}{t} = |\vec{a}|$:

*
$$|\vec{a}| = \frac{|\vec{v}|^2}{r}, \text{ или, что то же самое, } a_{ц.с} = \frac{v^2}{r}.$$

Пусть все участки траектории тела, движущегося с постоянной по модулю скоростью, представляют собой дуги окружностей (см. рис. 34). Тогда ускорение тела в любой точке этой траектории будет



Рис. 40

направлено к центру соответствующей окружности и может быть определено по формуле (1).

По второму закону Ньютона ($\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$)

ускорение всегда сонаправлено с силой, в результате действия которой оно возникает. Это справедливо и для центростремительного ускорения.

Значит, и сила, под действием которой тело движется по окружности с постоянной по модулю скоростью, в каждой точке направлена по радиусу окружности к ее центру.

В соответствии со вторым законом Ньютона и с формулой (1) модуль вектора этой силы определяется по формуле:

$$F = \frac{mv^2}{r}. \quad (6)$$

Тела могут двигаться по окружности под действием сил разных видов. Например, шар легкоатлетического молота движется по окружности под действием силы упругости троса (рис. 40); планеты обращаются вокруг Солнца, а спутники — вокруг планет под действием силы всемирного тяготения; автомобиль совершает поворот за счет силы трения колес о дорогу; движение электронов вокруг ядра в атоме обусловлено действием сил электрического притяжения.

Под действием этих сил возникает ускорение, меняющее направление скорости тела, благодаря чему оно движется по окружности или ее дуге.

? Вопросы

1. С помощью какого опыта можно убедиться в том, что мгновенная скорость тела, движущегося по окружности, в любой точке этой окружности направлена по касательной к ней?

2. Куда направлено ускорение тела при его движении по окружности с постоянной по модулю скоростью? Как называется это ускорение?

3. По какой формуле можно вычислить модуль вектора центростремительного ускорения?

4. Как направлена сила, под действием которой тело движется по окружности с постоянной по модулю скоростью?

Упражнение 18

1. При работе стиральной машины в режиме сушки поверхность ее барабана, находящаяся на расстоянии 21 см от оси вращения, движется вокруг этой оси со скоростью 20 м/с. Определите ускорение, с которым движутся точки поверхности барабана.

2. Определите ускорение конца секундной стрелки часов, если он находится на расстоянии $R = 2$ см от центра вращения. (Длина l окружности радиуса R определяется по формуле: $l = 6,28R$.)

3. Докажите, что ускорение движения крайней точки стрелки часов в два раза больше ускорения средней точки этой стрелки (т. е. точки, находящейся посередине между центром вращения стрелки и ее концом).

4. Минутная и секундная стрелки часов вращаются вокруг общего центра. Расстояния от центра вращения до концов стрелок одинаковы. Чему равно отношение ускорений, с которыми движутся концы стрелок? Какая стрелка движется с большим ускорением?

5. Масса Земли равна $6 \cdot 10^{24}$ кг, а масса Луны — $7 \cdot 10^{22}$ кг. Считая, что Луна движется вокруг Земли по окружности радиусом 384 000 км, определите: а) силу притяжения между Землей и Луной; б) центростремительное ускорение, с которым Луна движется вокруг Земли; в) модуль скорости движения Луны относительно Земли. ($G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг².)

§ 20. Искусственные спутники Земли

Обратимся еще раз к рисунку 33, б. Если шарик толкнуть, а затем предоставить самому себе, то он опишет некоторую дугу и остановится. Причиной остановки шарика является действие на него силы трения и силы сопротивления воздуха, препятствующих движению и уменьшающих его скорость.

Если уменьшить действие тормозящих сил, то шарик может описать вокруг точки O одну или несколько окружностей, прежде чем остановится (при этом крепление шнура в точке O должно быть таким, чтобы оно не препятствовало движению шарика).

Если бы нам удалось устранить все силы сопротивления движению, то шарик бесконечно двигался бы вокруг точки O по замкнутой кривой, например по окружности. При этом направление скорости шарика непрерывно менялось бы под действием силы, направленной к центру окружности.

Примером подобного движения служит обращение планет вокруг Солнца и спутников вокруг планет.

Рассмотрим более детально вопрос о запуске и движении искусственных спутников Земли (сокращенно ИСЗ).

Чтобы понять, при каких условиях тело может стать искусственным спутником Земли, рассмотрим рисунок 41. Он представляет собой копию рисунка, сделанного Ньютоном. На этом рисунке изображен земной шар, а на нем показана высокая гора, с вершины которой бросают камни, придавая им различные по модулю горизонтально направленные скорости.

В подписи к рисунку говорится: «Брошенный камень отклонится под действием силы тяжести от прямолинейного пути и, описав кривую траекторию, упадет, наконец, на Землю. Если его бросить с большой скоростью, то он упадет дальше». Продолжая эти рассуждения, Ньютон приходит к выводу, что при отсутствии сопротивления воздуха и при достаточно большой скорости тело вообще может не упасть на Землю, а будет описывать круговые траектории, оставаясь на одной и той же высоте над Землей. Такое тело становится искусственным спутником Земли.

Движение спутника является примером свободного падения, так как происходит только под действием силы тяжести. Но спутник не падает на Землю благодаря тому, что обладает достаточно большой скоростью, направленной по касательной к окружности, по которой он движется.

Значит, для того чтобы некоторое тело стало искусственным спутником Земли, его нужно вывести за пределы земной атмосферы и придать ему определенную скорость, направленную по касательной к окружности, по которой он будет двигаться.

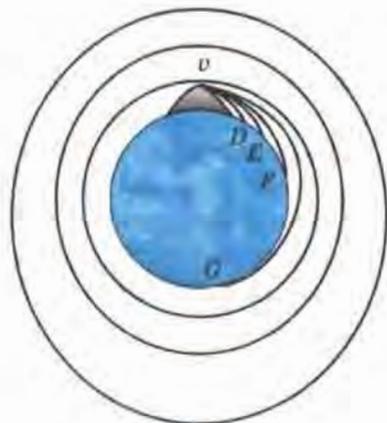


Рис. 41

Наименьшая высота над поверхностью Земли, на которой сопротивление воздуха практически отсутствует, составляет примерно 300 км. Поэтому обычно спутники запускают на высоте 300—400 км от земной поверхности.

Выведем формулу для расчета скорости, которую надо сообщить телу, чтобы оно стало искусственным спутником Земли, двигаясь вокруг нее по окружности.

Движение спутника происходит под действием одной только силы тяжести. Эта сила сообщает ему ускорение свободного падения g , которое в данном случае выполняет роль центростремительного ускорения.

Мы знаем, что центростремительное ускорение определяется по формуле:

$$a_{ц. с} = \frac{v^2}{r},$$

где v — модуль скорости, с которой тело движется по окружности радиуса r .

Значит, для спутника

$$\begin{aligned} g &= \frac{v^2}{r}, \quad v^2 = gr, \\ v &= \sqrt{gr}. \end{aligned} \quad (1)$$

По формуле (1) определяется скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно обращалось по окружности вокруг Земли на расстоянии r от ее центра.

Эта скорость называется *первой космической скоростью (круговой)*.

Если высота h спутника над поверхностью Земли мала по сравнению с земным радиусом, то ею можно пренебречь и считать, что $r \approx R_3$. Обозначим ускорение свободного падения вблизи поверхности Земли g_0 .

Тогда формула для расчета первой космической скорости спутника, движущегося вблизи поверхности Земли, будет выглядеть так:

$$v = \sqrt{g_0 R_3}. \quad (2)$$

Рассчитаем эту скорость, принимая радиус Земли равным 6400 км (или $6,4 \cdot 10^6$ м), а $g_0 = 9,8$ м/с².

$$v = \sqrt{9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}} \approx 7,9 \cdot 10^3 \text{ м/с} = 7,9 \text{ км/с}.$$

Если же высотой h спутника над Землей пренебречь нельзя, то, как указывалось в § 16, расстояние r от центра Земли до спутника и ускорение свободного падения g на высоте h определяются по следующим формулам:

$$r = R_3 + h, \quad g \approx G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2}.$$

В этом случае формула (1) для расчета первой космической скорости примет вид:

$$v \approx \sqrt{G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2} (R_3 + h)},$$

или

$$v \approx \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 + h}}. \quad (3)$$

По формуле (3) можно рассчитать первую космическую скорость спутника любой планеты, если вместо массы и радиуса Земли подставить соответственно массу и радиус данной планеты.

Из формулы (3) мы видим, что чем больше высота h , на которой запускается спутник, тем меньшую скорость v ему нужно сообщить для его движения по круговой орбите (так как h стоит в знаменателе дроби).

Например, на высоте 300 км над поверхностью Земли первая космическая скорость приблизительно равна 7,8 км/с, а на высоте 500 км — 7,6 км/с.

Если скорость тела, запускаемого на высоте h над Землей, превышает соответствующую этой высоте первую космическую, то его орбита представляет собой эллипс (см. рис. 41, внешнюю траекторию). Чем больше скорость, тем более вытянутой будет эллиптическая орбита. При скорости, равной 11,2 км/с, которая называется **второй космической**, тело преодолевает притяжение к Земле и уходит в космическое пространство.

Для запуска спутников применяют ракеты (§ 23). Двигатели ракеты должны совершить работу против сил тяжести и сил сопротивления воздуха, а также сообщить спутнику соответствующую скорость.

4 октября 1957 г. в Советском Союзе был запущен первый в истории человечества искусственный спутник Земли. Спутник в виде ша-

ра диаметром 58 см и массой 83,6 кг и ракета-носитель долгое время двигались над Землей на высоте в несколько сотен километров.

12 апреля 1961 г. первый в мире летчик-космонавт, наш соотечественник **Юрий Алексеевич Гагарин** совершил космический полет на корабле-спутнике «Восток».

В настоящее время сотни спутников запускаются каждый год в научно-исследовательских и практических целях: для осуществления теле- и радиосвязи, исследования атмосферы, прогнозирования погоды и т. д.

? Вопросы

1. Приведите примеры (из области астрономии), доказывающие, что при отсутствии сил сопротивления тело может неограниченно долго двигаться по замкнутой траектории под действием силы, меняющей направление скорости движения этого тела.

2. Почему спутники, обращаясь вокруг Земли под действием силы тяжести, не падают на Землю?

3. Можно ли считать обращение спутника вокруг Земли свободным падением?

4. Что необходимо сделать с физическим телом, чтобы оно стало искусственным спутником Земли?

5. Выведите формулу для расчета первой космической скорости спутника, движущегося по круговой орбите вблизи поверхности Земли.

6. Как движется спутник, обладающий первой космической скоростью? второй космической скоростью?

🔗 Упражнение 19

1. Определите скорость искусственного спутника Земли, если он движется по круговой орбите на высоте 2600 км над поверхностью Земли. ($M_3 = 6 \cdot 10^{24}$ кг; $R_3 = 6,4 \cdot 10^6$ м; $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ Н · м²/кг².)

2. Если бы на круговую орбиту вблизи поверхности Луны был выведен искусственный спутник, то он двигался бы со скоростью 1,67 км/с. Определите радиус Луны, если известно, что ускорение свободного падения на ее поверхности равно 1,6 м/с².

§ 21. Импульс тела. Закон сохранения импульса

Законы Ньютона позволяют решать различные практически важные задачи, касающиеся взаимодействия и движения тел. Большое число таких задач связано, например, с нахождением ускорения движущегося тела, если известны все действующие на это тело силы. А затем по ускорению определяют и другие величины (мгновенную скорость, перемещение и др.).

Но часто бывает очень сложно определить действующие на тело силы. Поэтому для решения многих задач используют еще одну важнейшую физическую величину — *импульс тела*.

Импульсом тела \vec{p} называется величина, равная произведению массы тела на его скорость:

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

Импульс — векторная величина. Направление вектора импульса тела всегда совпадает с направлением вектора скорости движения.

Поскольку $\vec{p} = m\vec{v}$, то за единицу импульса в СИ принимают импульс тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с. Значит, единицей импульса тела в СИ является 1 кг · м/с.

При расчетах пользуются уравнением для проекций векторов:

$$p_x = mv_x.$$

В зависимости от направления вектора скорости по отношению к выбранной оси X и, соответственно, от знака его проекции проекция вектора импульса может быть как положительной, так и отрицательной.

Слово «импульс» (impulsus) в переводе с латинского означает «толчок». В некоторых книгах вместо термина «импульс» используется термин «количество движения».

Эта величина была введена в науку примерно в тот же период времени, когда Ньютоном были открыты законы, названные впоследствии его именем (т. е. в конце XVII в.).

При взаимодействии тел их импульсы могут изменяться. В этом можно убедиться с помощью простого опыта.

Два шарика одинаковой массы подвешивают на нитяных петлях к укрепленной на кольце штатива деревянной линейке, как показано на рисунке 42, а.

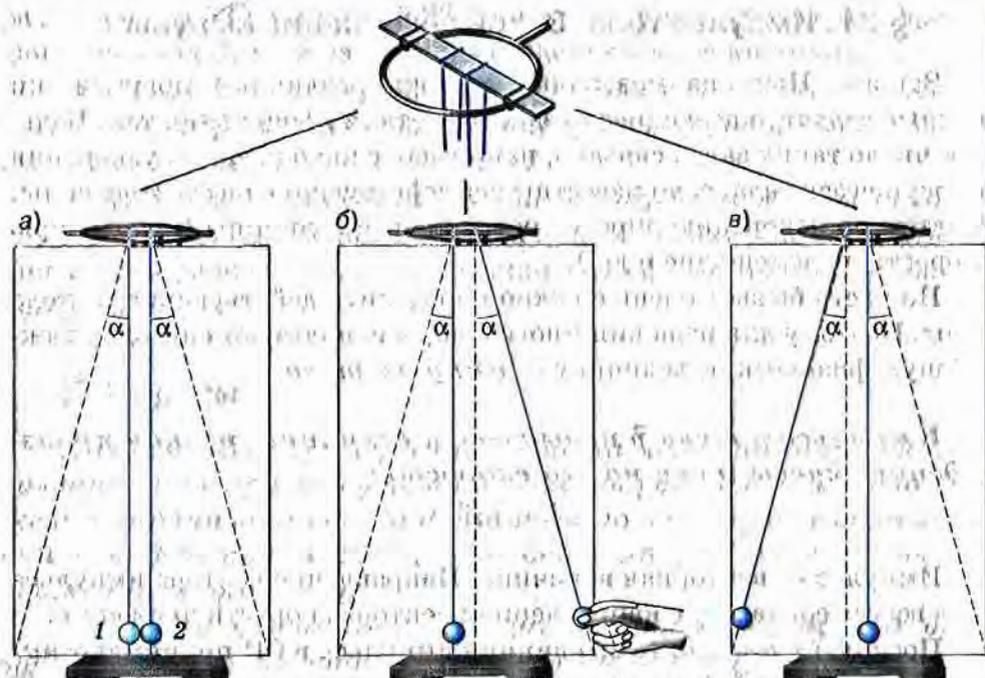


Рис. 42

Шарик 2 отклоняют от вертикали на угол α (рис. 42, б) и отпускают. Вернувшись в прежнее положение, он ударяет по шару 1 и останавливается. При этом шарик 1 приходит в движение и отклоняется на тот же угол α (рис. 42, в).

В данном случае очевидно, что в результате взаимодействия шаров импульс каждого из них изменился: на сколько уменьшился импульс правого шара, на столько же увеличился импульс левого.

Если два или несколько тел взаимодействуют только между собой (т. е. не подвергаются воздействию внешних сил), то эти тела образуют *замкнутую систему*.

Импульс каждого из тел, входящих в замкнутую систему, может меняться в результате их взаимодействия друг с другом.

Но векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, не меняется с течением времени при любых движениях и взаимодействиях этих тел.

В этом заключается *закон сохранения импульса*.

Закон сохранения импульса выполняется и в том случае, если на тела системы действуют внешние силы, *векторная сумма которых равна нулю*. Покажем это, воспользовавшись для вывода закона сохранения импульса вторым и третьим законами Ньютона. Для простоты рассмотрим систему, состоящую только из двух тел — шаров с массами m_1 и m_2 , которые движутся прямолинейно навстречу друг другу со скоростями \vec{v}_1 и \vec{v}_2 (рис. 43).

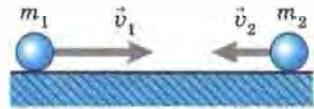


Рис. 43

Силы тяжести, действующие на каждый из шаров, уравновешиваются силами упругости поверхности, по которой они катятся. Значит, действие этих сил можно не учитывать. Силы сопротивления движению в данном случае малы, поэтому их влияние мы тоже не будем учитывать. Таким образом, можно считать, что шары взаимодействуют только друг с другом.

Из рисунка 43 видно, что через некоторое время шары столкнутся. Во время столкновения, длящегося в течение очень короткого промежутка времени t , возникнут силы взаимодействия \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , приложенные соответственно к первому и второму шару. В результате действия сил скорости шаров изменятся. Обозначим скорости шаров после соударения буквами \vec{v}'_1 и \vec{v}'_2 .

В соответствии с третьим законом Ньютона силы взаимодействия шаров равны по модулю и направлены в противоположные стороны:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2. \quad (1)$$

По второму закону Ньютона каждую из этих сил можно заменить произведением массы на ускорение, полученное каждым из шаров при взаимодействии:

$$m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2. \quad (2)$$

Ускорения, как мы знаем, определяются из равенств:

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{v}'_1 - \vec{v}_1}{t}, \quad (3)$$

$$\vec{a}_2 = \frac{\vec{v}'_2 - \vec{v}_2}{t}. \quad (4)$$

Заменив в уравнении (2) ускорения соответствующими выражениями из уравнений (3) и (4), получим:

$$m_1 \frac{\vec{v}'_1 - \vec{v}_1}{t} = -m_2 \frac{\vec{v}'_2 - \vec{v}_2}{t}. \quad (5)$$

В результате сокращения обеих частей уравнения (5) на t получим:

$$m_1(\vec{v}'_1 - \vec{v}_1) = -m_2(\vec{v}'_2 - \vec{v}_2),$$

или

$$m_1\vec{v}'_1 - m_1\vec{v}_1 = -m_2\vec{v}'_2 + m_2\vec{v}_2. \quad (6)$$

Сгруппируем члены уравнения (6) следующим образом:

$$m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2 = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2. \quad (7)$$

Учитывая, что $m\vec{v} = \vec{p}$, запишем уравнение (7) в таком виде:

$$\vec{p}'_1 + \vec{p}'_2 = \vec{p}_1 + \vec{p}_2. \quad (8)$$

Левые части уравнений (7) и (8) представляют собой суммарный импульс шаров после их взаимодействия, а правые — суммарный импульс до взаимодействия.

Значит, *несмотря на то, что импульс каждого из шаров при взаимодействии изменился, векторная сумма их импульсов после взаимодействия осталась такой же, как и до взаимодействия.*

Уравнения (7) и (8) являются математической записью закона сохранения импульса.

Поскольку в данном курсе рассматриваются только взаимодействия тел, движущихся вдоль одной прямой, то для записи закона сохранения импульса в скалярной форме достаточно одного уравнения, в которое входят проекции векторных величин на ось X :

$$m_1v'_{1x} + m_2v'_{2x} = m_1v_{1x} + m_2v_{2x}. \quad (9)$$

? Вопросы

1. Что называют импульсом тела?
2. Что можно сказать о направлениях векторов импульса и скорости движущегося тела?
3. Что принимают за единицу импульса?
4. Как ставился опыт, изображенный на рисунке 42, и о чем он свидетельствует?
5. Что означает утверждение о том, что несколько тел образуют замкнутую систему?
6. Сформулируйте закон сохранения импульса.
7. Для замкнутой системы, состоящей из двух тел, запишите закон сохранения импульса в виде уравнения, в ко-

торое входили бы массы и скорости этих тел. Поясните, что означает каждый символ в этом уравнении.

Упражнение 20

1. Две игрушечные заводные машины, массой по 0,2 кг каждая, движутся прямолинейно навстречу друг другу. Скорость каждой машины относительно Земли равна 0,1 м/с. Равны ли векторы импульсов машин? модули векторов импульсов? Определите проекцию импульса каждой из машин на ось X , параллельную их траектории.

2. На сколько изменится (по модулю) импульс автомобиля массой 1 т при изменении его скорости от 54 км/ч до 72 км/ч?

3. Человек сидит в лодке, покоящейся на поверхности озера. В какой-то момент он встает и идет с кормы на нос. Что произойдет при этом с лодкой? Объясните явление на основе закона сохранения импульса.

4. Железнодорожный вагон массой 35 т подъезжает к стоящему на том же пути неподвижному вагону массой 28 т и автоматически сцепляется с ним. После сцепки вагоны движутся прямолинейно со скоростью 0,5 м/с. Какова была скорость вагона массой 35 т перед сцепкой?

§ 22. Реактивное движение. Ракеты

Рассмотрим несколько примеров, подтверждающих справедливость закона сохранения импульса.

Наверняка многие из вас наблюдали, как приходит в движение надутый воздухом воздушный шарик, если развязать нить, стягивающую его отверстие.

Объяснить это явление можно с помощью закона сохранения импульса.

Пока отверстие шарика завязано, шарик с находящимся внутри него сжатым воздухом покоится, и его импульс равен нулю.

При открытом отверстии из него с довольно большой скоростью вырывается струя сжатого воздуха. Движущийся воздух обладает некоторым импульсом, направленным в сторону его движения.

Согласно действующему в природе закону сохранения импульса суммарный импульс системы, состоящей из двух тел — шарика и воздуха в нем, — должен остаться таким же, каким был до начала истече-

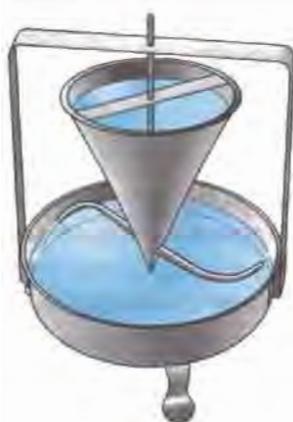


Рис. 44

ния воздуха, т. е. равным нулю. Поэтому шарик начинает двигаться в противоположную струе сторону с такой скоростью, что его импульс равен по модулю импульсу воздушной струи. Векторы импульсов шарика и воздуха направлены в противоположные стороны. В результате суммарный импульс взаимодействующих тел остается равным нулю.

Движение шарика является примером **реактивного движения**. Реактивное движение происходит за счет того, что от тела отделяется и движется какая-то его часть, в результате чего само тело приобретает противоположно направленный импульс.

На том же принципе реактивного движения основано вращение устройства, называемого **сегнеровым колесом** (рис. 44). Вода, вытекающая из сосуда конической формы через сообщающуюся с ним изогнутую трубку, вращает сосуд в направлении, противоположном скорости воды в струях. Мы видим, что реактивное действие оказывает не только струя газа, но и струя жидкости.

Реактивное движение используют для своего перемещения и некоторые живые существа, например осьминоги, кальмары, каракатицы и другие головоногие моллюски. Двигаются они благодаря тому, что всасывают, а затем с силой выталкивают из себя воду. Существует даже разновидность кальмаров, которые с помощью своих «реактивных двигателей» могут не только плавать в воде, но и на короткое время вылетать из нее, чтобы поскорее настичь добычу или спастись от врагов.

Вы знаете, что принцип реактивного движения находит широкое практическое применение в авиации и космонавтике. В космическом пространстве нет среды, с которой тело могло бы взаимодействовать и тем самым изменять направление и модуль своей скорости. Поэтому для космических полетов могут быть использованы только реактивные летательные аппараты, т. е. ракеты.

Рассмотрим вопрос об устройстве и запуске так называемых **ракет-носителей**, т. е. ракет, предназначенных для вывода в космос искусственных спутников Земли, космических кораблей, автоматических межпланетных станций и других полезных грузов.

В любой ракете, независимо от ее конструкции, всегда имеется оболочка и топливо с окислителем. На рисунке 45 изображена ракета в разрезе. Мы видим, что оболочка ракеты включает в себя полезный груз (в данном случае это космический корабль), приборный отсек и двигатель (камера сгорания, насосы и пр.).

Основную массу ракеты составляет топливо с окислителем (окислитель нужен для поддержания горения топлива, поскольку в космосе нет кислорода).

Топливо и окислитель с помощью насосов подаются в камеру сгорания. Топливо, сгорая, превращается в газ высокой температуры и высокого давления, который мощной струей устремляется наружу через раструб специальной формы, называемый **соплом**. Назначение сопла состоит в том, чтобы повысить скорость струи.

С какой целью увеличивают скорость выхода струи газа? Дело в том, что от этой скорости зависит скорость ракеты. Это можно показать с помощью закона сохранения импульса.

Для простоты рассуждений будем пока считать, что ракета представляет собой замкнутую систему (т. е. не будем учитывать действие на нее силы земного притяжения).

Поскольку до старта импульс ракеты был равен нулю, то по закону сохранения суммарный импульс движущейся оболочки и выбрасываемого из нее газа тоже должен быть равен нулю. Отсюда следует, что импульс оболочки и направленный противоположно ему импульс струи газа должны быть равны друг другу по модулю. Значит, чем с большей скоростью вырывается газ из сопла, тем больше будет скорость оболочки ракеты.

Помимо скорости истечения газа существуют и другие факторы, от которых зависит скорость движения ракеты.

Мы рассмотрели устройство и принцип действия одноступенчатой ракеты, где под ступенью подразумевается та часть, которая содержит баки с горючим и окислителем и двигатель.



Рис. 45



Рис. 46

В практике космических полетов обычно используют многоступенчатые ракеты, развивающие гораздо большие скорости и предназначенные для более дальних полетов, чем одноступенчатые.

На рисунке 46 показана схема трехступенчатой ракеты. После того как топливо и окислитель первой ступени будут полностью израсходованы, эта ступень автоматически отбрасывается и в действие вступает двигатель второй ступени.

Уменьшение общей массы ракеты путем отбрасывания уже ненужной ступени позволяет сэкономить топливо и окислитель и увеличить скорость ракеты. Затем таким же образом отбрасывается вторая ступень.

Если возвращение космического корабля на Землю или его посадка на какую-либо другую планету не планируется, то третья ступень, как и две первых, используется для увеличения скорости ракеты. Если же корабль должен совершить посадку, то она используется для торможения корабля перед посадкой. При этом ракету разворачивают на 180° , чтобы сопло оказалось впереди. Тогда вырывающийся из ракеты газ сообщает ей импульс, направленный против скорости ее движения, что приводит к уменьшению скорости и дает возможность осуществить посадку.

Идея использования ракет для космических полетов была выдвинута в начале XX в. русским ученым, изобретателем и учителем **Константином Эдуардовичем Циолковским**. Циолковский разработал теорию движения ракет, вывел формулу для расчета их скорости, был первым, кто предложил использовать многоступенчатые ракеты.

Полвека спустя идея Циолковского была развита и реализована советскими учеными под руководством **Сергея Павловича Королева**.

? Вопросы

1. Основываясь на законе сохранения импульса, объясните, почему воздушный шарик движется противоположно струе выходящего из него сжатого воздуха.

2. Приведите примеры реактивного движения тел.
3. Каково назначение ракет?
4. Пользуясь рисунком 45, перечислите основные части любой космической ракеты.
5. Опишите принцип действия ракеты.
6. От чего зависит скорость ракеты?
7. В чем заключается преимущество многоступенчатых ракет перед одноступенчатыми?
8. Как осуществляется посадка космического корабля?

Упражнение 21

1. С лодки, движущейся со скоростью 2 м/с , человек бросает весло массой 5 кг с горизонтальной скоростью 8 м/с противоположно движению лодки. С какой скоростью стала двигаться лодка после броска, если ее масса вместе с массой человека равна 200 кг ?

2. Какую скорость получит модель ракеты, если масса ее оболочки равна 300 г , масса пороха в ней 100 г , а газы вырываются из сопла со скоростью 100 м/с ? (Считайте истечение газа из сопла мгновенным.)

3. На каком оборудовании и как проводится опыт, изображенный на рисунке 47? Какое физическое явление в данном случае демонстрируется, в чем оно заключается и какой физический закон лежит в основе этого явления?

Примечание: резиновая трубка была расположена вертикально до тех пор, пока через нее не начали пропускать воду.

4. Прделайте опыт, изображенный на рисунке 47. Когда резиновая трубка максимально отклонится от вертикали, перестаньте лить воду в воронку. Пока оставшаяся в трубке вода вытекает, наблюдайте, как будет меняться: а) дальность полета воды в струе (относительно отверстия в стеклянной трубке); б) положение резиновой трубки. Объясните оба изменения.



Рис. 47

§ 23. Вывод закона сохранения механической энергии

Из курса физики 8 класса вы знаете, что *сумма потенциальной (mgh) и кинетической ($\frac{mv^2}{2}$) энергии тела или системы тел называется полной механической (или механической) энергией.*

Вам известен также закон сохранения механической энергии:

механическая энергия замкнутой системы тел остается постоянной, если между телами системы действуют только силы тяготения и силы упругости (а силы трения отсутствуют).

Потенциальная и кинетическая энергия системы могут меняться, преобразуясь друг в друга. При уменьшении энергии одного вида на столько же увеличивается энергия другого вида, благодаря чему их сумма остается неизменной.

Подтвердим справедливость закона сохранения энергии теоретическим выводом. Для этого рассмотрим такой пример. Маленький стальной шарик массой m свободно падает на Землю с некоторой высоты h_1 (отсчитываемой от поверхности Земли). Пусть на высоте h_1 шарик имеет скорость v_1 , а при снижении до высоты h_2 его скорость возрастает до значения v_2 .

Работа действующей на шарик силы тяжести может быть выражена и через уменьшение потенциальной энергии гравитационного взаимодействия шарика с Землей (E_p), и через увеличение кинетической энергии шарика (E_k):

$$A = Fs = mg(h_1 - h_2),$$

$$A = Fs = \frac{mg(v_2^2 - v_1^2)}{2g} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} \quad \text{или}$$

$$A = mgh_1 - mgh_2, \quad (1)$$

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \quad (2)$$

Поскольку левые части уравнений (1) и (2) равны, то равны и их правые части:

$$mgh_1 - mgh_2 = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}, \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что при движении шарика его потенциальная и кинетическая энергия менялись. При этом кинетическая энергия возросла на столько же, на сколько уменьшилась потенциальная.

После перестановки членов в уравнении (3) получим:

$$mgh_1 + \frac{mv_1^2}{2} = mgh_2 + \frac{mv_2^2}{2}. \quad (4)$$

Уравнение, записанное в таком виде, свидетельствует о том, что полная механическая энергия шарика при его движении остается постоянной.

Уравнение (4) может быть записано и так:

$$E_{п1} + E_{к1} = E_{п2} + E_{к2}. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) представляют собой *математическую запись закона сохранения механической энергии*.

Таким образом, мы теоретически доказали, что полная механическая энергия тела (точнее, замкнутой системы тел: шарик—Земля) сохраняется, т. е. не меняется с течением времени.

Рассмотрим применение закона сохранения механической энергии для решения задач.

Задача 1. Яблоко массой 200 г падает с дерева с высоты 3 м. Какой кинетической энергией оно будет обладать на высоте 1 м от земли? ($g = 10 \text{ м/с}^2$)

<p>Дано: $m = 200 \text{ г} = 0,2 \text{ кг}$ $h_1 = 3 \text{ м}$ $h_2 = 1 \text{ м}$ $v_1 = 0$ $g = 10 \text{ м/с}^2$ $E_{к2} = ?$</p>	<p>Решение: Согласно закону сохранения механической энергии: $E_{п1} + E_{к1} = E_{п2} + E_{к2}$; поскольку $E_{к1} = \frac{mv_1^2}{2} = \frac{m \cdot 0}{2} = 0$, то $E_{п1} = E_{п2} + E_{к2} \Rightarrow E_{к2} = E_{п1} - E_{п2} =$ $= mgh_1 - mgh_2 = mg(h_1 - h_2)$;</p>
--	---

$$E_{к2} = 0,2 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot (3 \text{ м} - 1 \text{ м}) =$$

$$= 0,2 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 2 \text{ м} = 4 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м} = 4 \text{ Н} \cdot \text{м} = 4 \text{ Дж}.$$

Ответ: $E_{к2} = 4 \text{ Дж}$.

Задача 2. Мяч бросают вниз с высоты $h_1 = 1,8 \text{ м}$ со скоростью $v_1 = 8 \text{ м/с}$. На какую высоту h_2 отскочит мяч после удара о землю? (Потери энергии при движении мяча и его ударе о землю не учитывайте.)

Дано:

$$h_1 = 1,8 \text{ м}$$

$$v_1 = 8 \text{ м/с}$$

$$h_2 = ?$$

Решение:

поскольку скорость отскочившего от земли мяча при его подъеме на максимальную высоту равна нулю, то закон сохранения механической энергии для данного случая будет выглядеть так:

$$mgh_1 + \frac{mv_1^2}{2} = mgh_2.$$

Преобразуем уравнение и выразим h_2 :

$$m\left(gh_1 + \frac{v_1^2}{2}\right) = mgh_2, \text{ откуда } h_2 = \frac{2gh_1 + v_1^2}{2g},$$

$$h_2 = \frac{(2 \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 1,8 \text{ м} + 64 \text{ м}^2/\text{с}^2)}{20 \text{ м/с}^2} = \frac{(36 \text{ м}^2/\text{с}^2 + 64 \text{ м}^2/\text{с}^2)}{20 \text{ м/с}^2} = \frac{100 \text{ м}^2/\text{с}^2}{20 \text{ м/с}^2} = 5 \text{ м}.$$

Ответ: $h_2 = 5 \text{ м}$.

Данную задачу можно решить и без использования закона сохранения механической энергии. Но в этом случае решение будет более громоздким и трудоемким. Покажем это, сопроводив решение комментариями.

Решение:

сначала определим, какую скорость будет иметь мяч непосредственно перед его ударом о землю. Для этого воспользуемся формулой

$$s_x = \frac{(v_{2x}^2 - v_{1x}^2)}{2g_x},$$

где $s_x (= h_1)$ — перемещение мяча при его движении от места броска к земле.

Направим ось X вниз. Тогда все входящие в формулу проекции векторов будут положительны. При замене их модулями соответствующих величин формула примет вид:

$$s = \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g}.$$

Заменим s на h_1 и выразим квадрат скорости v_2^2 :

$$h_1 = \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g},$$

$$v_2^2 = 2gh_1 + v_1^2.$$

Поскольку потери энергии при ударе мы не учитываем, то будем считать, что мяч отскакивает от земли с такой же по модулю скоростью v_2 , какую имел перед ударом (но направленную вверх).

Поднявшись на максимальную высоту, мяч будет иметь нулевую скорость. Перемещение $s'_x (= h_2)$ при движении мяча вверх можно определить по формуле:

$$s'_x = \frac{(0 - v_{2x}^2)}{2g_x}.$$

Если ось X направлена вверх, то $v_{2x} > 0$, $g_x < 0$. Заменяя проекции величин их модулями (s' , v_2^2 и g), поставив h_2 вместо s' и убрав 0, получим:

$$h_2 = -\frac{v_2^2}{-2g} = \frac{v_2^2}{2g}.$$

Поскольку $v_2^2 = 2gh_1 + v_1^2$, то

$$h_2 = \frac{(2gh_1 + v_1^2)}{2g}.$$

Таким образом, мы получили ту же окончательную формулу, что и при использовании в решении закона сохранения механической энергии, но гораздо более длинным путем.

? Вопросы

1. Что называется механической (полной механической) энергией?
2. Как формулируется закон сохранения механической энергии?
3. Может ли меняться с течением времени потенциальная или кинетическая энергия замкнутой системы?

🔗 Упражнение 22

1. Дайте математическую формулировку закона сохранения механической энергии (т. е. запишите его в виде уравнений).
2. Оторвавшаяся от крыши сосулька падает с высоты $h_0 = 36$ м от земли. Какую скорость v она будет иметь на высоте $h = 31$ м? (Представьте два способа решения: с применением закона сохранения механической энергии и без него; $g = 10$ м/с².)
3. Шарик вылетает из детского пружинного пистолета вертикально вверх с начальной скоростью $v_0 = 5$ м/с. На какую высоту от места вылета он поднимется? (Представьте два способа решения: с применением закона сохранения механической энергии и без него; $g = 10$ м/с².)

§ 24. Колебательное движение

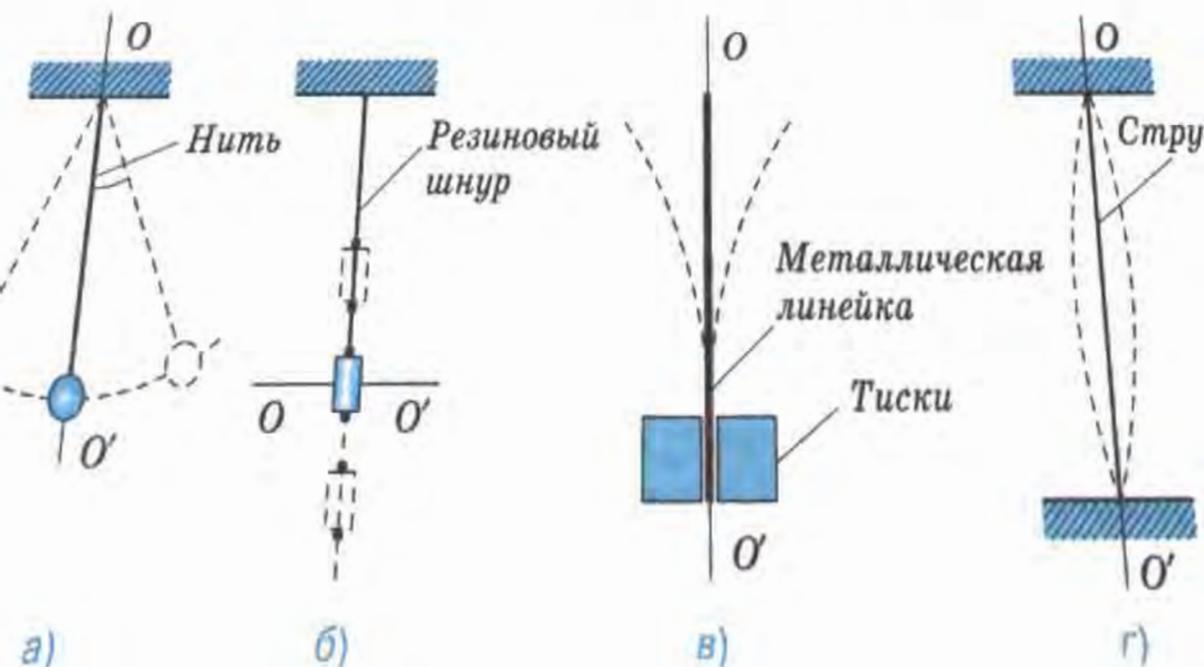
С одним из видов неравномерного движения — равноускоренным — вы уже знакомы.

Рассмотрим еще один вид неравномерного движения — *колебательное*.

Колебательные движения широко распространены в окружающей нас жизни. Примерами колебаний могут служить: движение иглы швейной машины, качелей, маятника часов, вагона на рессорах и многих других тел.

На рисунке 48 изображены тела, которые могут совершать колебательные движения, если их вывести из положения равновесия, т. е. отклонить или сместить от линии OO' .

В движении этих тел можно найти много различий. Например маятник на нити (рис. 48, а) движется криволинейно, а цилиндр на рессорах



зиновом шнуре (рис. 48, б) — прямолинейно; верхний конец линейки (рис. 48, в) колеблется с большим размахом, чем средняя точка струны (рис. 48, г). За одно и то же время одни тела могут совершать большее число колебаний, чем другие.

Но при всем разнообразии этих движений у них есть важная общая черта: *через определенный промежуток времени движение любого тела повторяется.*

Действительно, если шарик отвести от положения равновесия и отпустить, то он, пройдя через положение равновесия, отклонится в противоположную сторону, остановится, а затем вернется к месту начала движения. За этим колебанием последует второе, третье и т. д., похожие на первое.

Повторяющимися будут и движения остальных тел, изображенных на рисунке 48.

Промежуток времени, через который движение повторяется, называется *периодом колебаний*¹. Поэтому говорят, что *колебательное движение периодически.*

Таким образом, *основным признаком, по которому можно отличить колебательное движение от других видов движения, является периодичность.*

В движении тел, изображенных на рисунке 48, кроме периодичности есть еще одна общая черта: за промежуток времени, равный периоду колебаний, любое тело дважды проходит через положение равновесия (двигаясь в противоположных направлениях). Именно такие колебания и будут предметом нашего изучения.

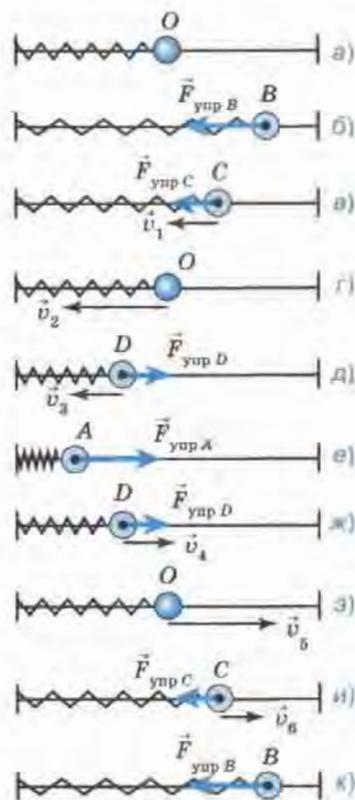


Рис. 49

¹ Значение термина «период колебаний» уточняется в § 26.

? Вопросы

1. Приведите примеры колебательных движений.
2. Как вы понимаете утверждение о том, что колебательное движение периодично?
3. Что такое период колебаний?
4. Какой общей чертой (кроме периодичности) обладают движения тел, изображенных на рисунке 48?

§ 25. Свободные колебания. Колебательные системы. Маятник

На рисунке 49 изображен шарик с отверстием, надетый на гладкую стальную струну и прикрепленный к пружине (другой конец которой прикреплен к вертикальной стойке). Шарик может свободно скользить по струне, т. е. силы трения настолько малы, что не оказывают существенного влияния на его движение. Когда шарик находится в точке O (рис. 49, а), пружина не деформирована (не растянута и не сжата), поэтому никакие силы в горизонтальном направлении на него не действуют. Точка O — *положение равновесия шарика*.

Переместим шарик в точку B (рис. 49, б). Пружина при этом растянется, и в ней возникнет сила упругости $F_{\text{упр } B}$. Эта сила пропорциональна *смещению* (т. е. отклонению шарика от положения равновесия) и направлена противоположно ему. Значит, при смещении шарика вправо действующая на него сила направлена влево, *к положению равновесия*.

Если отпустить шарик, то под действием силы упругости он начнет ускоренно перемещаться влево, к точке O . Направление силы упругости и вызванного ею ускорения будет совпадать с направлением скорости шарика, поэтому по мере приближения шарика к точке O его скорость будет все время возрастать. При этом сила упругости с уменьшением деформации пружины будет уменьшаться (рис. 49, в).

Известно, что любое тело обладает свойством сохранять свою скорость, если на него не действуют силы или если равнодействующая сил равна нулю. Поэтому, дойдя до положения равновесия (рис. 49, г), где сила упругости станет равна нулю, шарик не остановится, а будет продолжать двигаться влево.

При его движении от точки O к точке A пружина будет сжиматься. В ней снова возникнет сила упругости, которая и *в этом случае будет направлена к положению равновесия* (рис. 49, д, е). По-

скольку сила упругости направлена против скорости движения шарика, то она тормозит его движение. В результате в точке A шарик остановится. Сила упругости, направленная к точке O , будет продолжать действовать, поэтому шарик вновь придет в движение и на участке AO его скорость будет возрастать (рис. 49, $e, ж, з$).

Движение шарика от точки O к точке B снова приведет к растяжению пружины, вследствие чего опять возникнет сила упругости, направленная к положению равновесия и замедляющая движение шарика до полной его остановки (рис. 49, $з, и, к$). Таким образом, шарик совершит одно полное колебание. При этом в каждой точке его траектории (кроме точки O) на него будет действовать сила упругости пружины, направленная к положению равновесия.

Под действием силы, возвращающей тело в положение равновесия, тело может совершать колебания как бы само по себе. Первоначально эта сила возникла благодаря тому, что мы совершили работу по растяжению пружины, сообщив ей некоторый запас энергии. За счет этой энергии и происходили колебания.

Колебания, происходящие только благодаря начальному запасу энергии, называются свободными колебаниями.

Свободно колеблющиеся тела всегда взаимодействуют с другими телами и вместе с ними образуют систему тел, которая получила название *колебательной системы*. Поясним, что это такое.

В рассмотренном нами примере в колебательную систему входят шарик, пружина и вертикальная стойка, к которой прикреплен левый конец пружины. В результате взаимодействия этих тел и возникает сила, возвращающая шарик к положению равновесия.

На рисунке 50 изображена колебательная система, состоящая из шарика, нити, штатива и Земли (Земля на рисунке не показана). В данном случае шарик совершает свободные колебания под действием двух сил: силы тяжести и силы упругости нити. Их равнодействующая направлена к положению равновесия.

Системы тел, которые способны совершать свободные колебания, называются колебательными системами.

Одно из основных общих свойств всех колебательных систем заключается в возникновении в них силы, возвращающей систему в положение устойчивого равновесия.

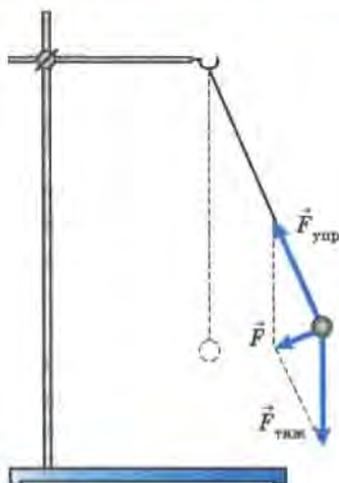


Рис. 50

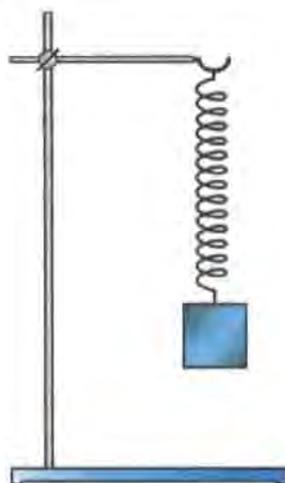


Рис. 51

Колебательные системы — довольно широкое понятие, применимое к разнообразным явлениям.

Рассмотренные нами колебательные системы называются *маятниками*. Существует несколько типов маятников: *нитяные* (рис. 50), *пружинные* (рис. 49, 51) и т. д.

В общем случае под словом «маятник» понимают твердое тело, совершающее под действием приложенных сил колебания около неподвижной точки или вокруг оси.

Колебательное движение мы будем изучать на примере пружинного и нитяного маятников.

? Вопросы

1. Рассмотрите рисунок 49 и скажите, действует ли на шарик сила упругости пружины, когда он находится в точках В; С; О; D; А. Все ответы обоснуйте.

2. Пользуясь рисунком 49, объясните, почему по мере приближения шарика к точке О с любой стороны его скорость увеличивается, а по мере удаления от точки О в любую сторону скорость шарика уменьшается.

3. Почему шарик не останавливается, дойдя до положения равновесия?

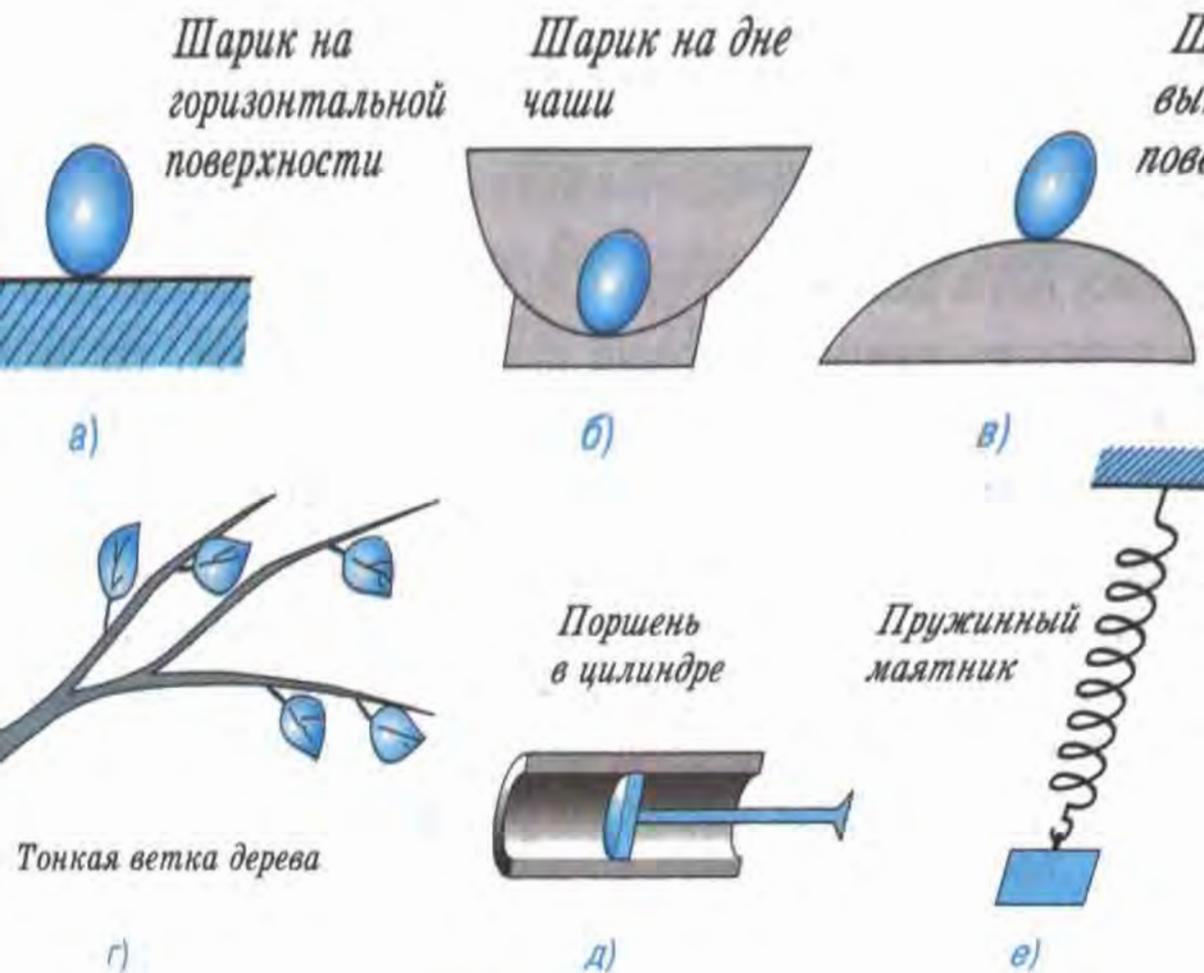
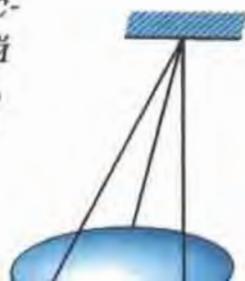


Рис. 52

На рисунке 53 изображен металлический диск, подвешенный на трех резиновых шнурах. Если диск немного повернуть вокруг вертикальной оси и отпустить, то он будет в течение некоторого времени поворачиваться вокруг этой оси то по ходу часовой стрелки, то против. Объясните: а) под действием какой силы происходят колебания диска; б) была бы эта сила или нет, если бы диск



§ 26. Величины, характеризующие колебательное движение

Сравним колебания двух одинаковых маятников, изображенных на рисунке 54. Первый маятник колеблется с большим размахом, т. е. его крайние положения находятся дальше от положения равновесия, чем у второго маятника.

Наибольшее (по модулю) отклонение колеблющегося тела от положения равновесия называется амплитудой колебаний.

Мы будем рассматривать колебания, происходящие с малыми амплитудами (рис. 55), при которых длину дуги $\overset{\curvearrowright}{AB}$ можно считать равной отрезку AB и даже полухорде $\overset{\curvearrowright}{CB}$. Поэтому под амплитудой колебаний нитяного маятника можно понимать как дугу, так и любой из этих отрезков. Так, амплитуда колебаний первого маятника (см. рис. 54) равна O_1A_1 или O_1B_1 , а второго — O_2A_2 или O_2B_2 . Обычно амплитуду обозначают буквой A и измеряют в единицах длины — метрах (м), сантиметрах (см) и др. Амплитуду можно измерять также в единицах плоского угла, например в градусах, поскольку дуге окружности соответствует определенный центральный угол, т. е. угол с вершиной в центре окружности (в данном случае в точке O).

Амплитуда колебаний пружинного маятника (см. рис. 49) равна длине отрезка OB или OA .

Колеблющееся тело совершает одно полное колебание, если от начала колебаний проходит путь, равный четырем амплитудам. Например, переместившись из O_1 в B_1 , затем в A_1 и вновь в O_1 (см. рис. 54), шарик совершает одно полное колебание.

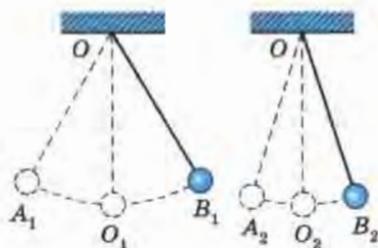


Рис. 54



Рис. 55

Промежуток времени, в течение которого тело совершает одно полное колебание, называется периодом колебаний.

Период колебаний обычно обозначается буквой T и в СИ измеряется в *секундах* (с).

Подвесим два одинаковых шарика на нитях разной длины и приведем их в колебательное движение. Мы увидим, что за один и тот же промежуток времени короткий маятник совершит больше колебаний, чем длинный.

Число колебаний в единицу времени называется частотой колебаний.

Обозначается частота буквой ν («ню»). За единицу частоты принято одно колебание в секунду. Эта единица в честь немецкого ученого **Генриха Герца** названа *герцем* (Гц).

Допустим, в одну секунду маятник совершает два колебания, т. е. частота его колебаний равна 2 Гц (или $2 \frac{1}{\text{с}}$). Тогда период колебаний (т. е. время одного полного колебания) равен 0,5 с. Чтобы найти период колебания, необходимо одну секунду разделить на число колебаний в эту секунду, т. е. на частоту:

$$T = \frac{1}{2 \text{ Гц}} = \frac{1}{2 \frac{1}{\text{с}}} = 0,5 \text{ с.}$$

Таким образом, период колебания T и частота колебаний ν связаны следующей зависимостью:

$$T = \frac{1}{\nu}, \text{ или } \nu = \frac{1}{T}.$$

На примере колебаний маятников разной длины приходим к выводу: *частота и период свободных колебаний нитяного маятника зависят от длины его нити. Чем больше длина нити маятника, тем больше период колебаний и меньше частота.* (Эту зависимость вы будете исследовать при выполнении лабораторной работы № 3.)

Частота свободных колебаний называется собственной частотой колебательной системы.

Не только нитяной маятник, но и любая другая колебательная система имеет определенную частоту свободных колебаний, зависящую от

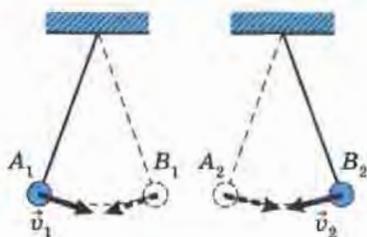


Рис. 56

параметров этой системы. Например, частота свободных колебаний пружинного маятника зависит от массы груза и жесткости пружины.

Теперь рассмотрим колебания двух одинаковых маятников (рис. 56), движущихся следующим образом. В один и тот же момент времени левый маятник из крайнего левого положения начинает движение вправо, а правый маятник из крайнего правого положения движется влево. Оба маятника колеблются с одной и той же частотой (поскольку длины их нитей равны) и с одинаковыми амплитудами. Однако эти колебания отличаются друг от друга: *в любой момент времени скорости маятников направлены в противоположные стороны*. В таком случае говорят, что колебания маятников происходят в *противоположных фазах*.

Маятники, изображенные на рисунке 54, тоже колеблются с одинаковыми частотами. Скорости этих маятников в любой момент времени направлены одинаково. В этом случае говорят, что маятники колеблются *в одинаковых фазах*.

Рассмотрим еще один случай. В момент, изображенный на рисунке 57, а, скорости обоих маятников направлены вправо. Но через некоторое время (рис. 57, б) они будут направлены в разные стороны. В таком случае говорят, что колебания происходят с определенной *разностью фаз*.

Рассмотрим еще один случай. В момент, изображенный на рисунке 57, а, скорости обоих маятников направлены вправо. Но через некоторое время (рис. 57, б) они будут направлены в разные стороны. В таком случае говорят, что колебания происходят с определенной *разностью фаз*.

Физическая величина, называемая *фазой*, используется не только при сравнении колебаний двух или нескольких тел, но и для описания колебаний одного тела.

Существует формула для определения фазы в любой момент времени, но этот вопрос рассматривается в старших классах.

Таким образом, *колебательное движение характеризуется амплитудой, частотой (или периодом) и фазой*.



Рис. 57

? Вопросы

1. Что называется амплитудой колебания; периодом колебания; частотой колебания? Какой буквой обозначается и в каких единицах измеряется каждая из этих величин?

2. Что такое одно полное колебание?

3. Какая математическая зависимость существует между периодом и частотой колебания?

4. Как зависят: а) частота; б) период свободных колебаний маятника от длины его нити?

5. Что называется собственной частотой колебательной системы?

6. Как направлены по отношению друг к другу скорости двух маятников в любой момент времени, если эти маятники колеблются в противоположных фазах? в одинаковых фазах?

🔗 Упражнение 24

1. На рисунке 58 изображены пары колеблющихся маятников. В каких случаях два маятника колеблются: в одинаковых фазах по отношению друг к другу? в противоположных фазах?

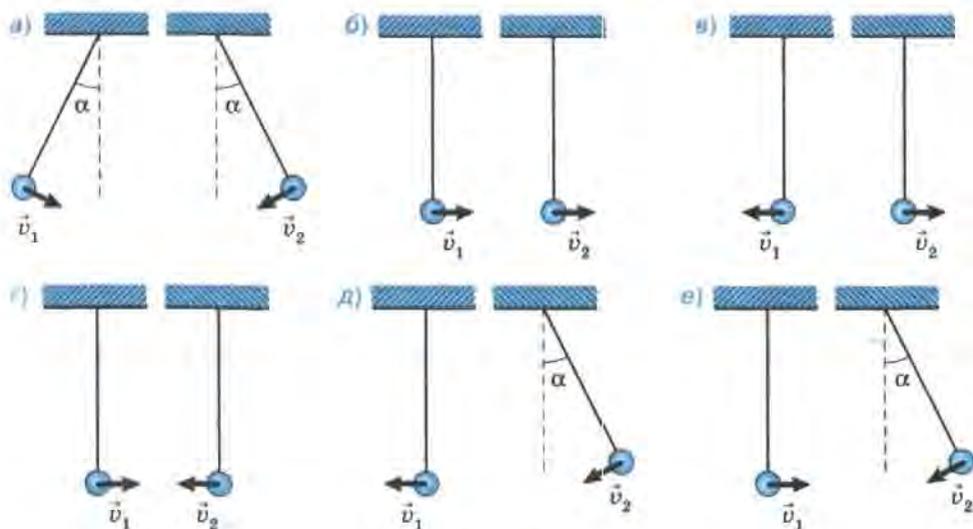


Рис. 58

2. Частота колебаний стометрового железнодорожного моста равна 2 Гц. Определите период этих колебаний.

3. Период вертикальных колебаний железнодорожного вагона равен 0,5 с. Определите частоту колебаний вагона.

4. Игла швейной машины делает 600 полных колебаний в одну минуту. Какова частота колебаний иглы, выраженная в герцах?

5. Амплитуда колебаний груза на пружине равна 3 см. Какой путь от положения равновесия пройдет груз за $\frac{1}{4}T$; $\frac{1}{2}T$; $\frac{3}{4}T$; T ?

6. Амплитуда колебаний груза на пружине равна 10 см, частота 0,5 Гц. Какой путь пройдет груз за 2 с?

7. Горизонтальный пружинный маятник, изображенный на рисунке 49, совершает свободные колебания. Какие величины, характеризующие это движение (амплитуда, частота, период, скорость, сила, под действием которой совершаются колебания), являются постоянными, а какие — переменными? (Трение не учитывайте.)



§ 27. Гармонические колебания

В природе и технике широко распространены колебания, называемые *гармоническими*.

Гармоническими являются колебания, которые происходят под действием силы, пропорциональной смещению колеблющейся точки и направленной противоположно этому смещению.

Мы знаем, что под действием такой силы происходят колебания пружинного маятника (§ 25), поэтому при определенных условиях они могут служить примером гармонических колебаний (в частности, при условии, что на них не оказывает заметного влияния сила трения).

С помощью опыта, изображенного на рисунке 59, можно выяснить, по какому закону меняется с течением времени координата колеблющегося пружинного маятника и как выглядит график этой зависимости.

В данном опыте в качестве груза берут какой-нибудь небольшой массивный сосуд

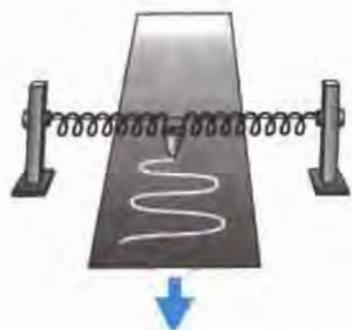


Рис. 59

с маленьким отверстием снизу (например, воронку), а под него кладут длинную бумажную ленту. Сосуд с предварительно насыпанным в него песком (или налитой красящей жидкостью) приводят в колебательное движение. Если ленту перемещать с постоянной скоростью в направлении, перпендикулярном плоскости колебаний, то на ней останется волнообразная дорожка из песка, каждая точка которой соответствует положению колеблющегося груза в тот момент, когда он проходил над ней.

На рисунке 60 показан вид полученной кривой. Она называется *синусоидой* (из курса математики старших классов вы узнаете о том, что аналогичные графики имеют функции типа $y = \sin x$ и $y = \cos x$ при переменной x). Через точки, соответствующие положению равновесия маятника, проведена ось времени t , а перпендикулярно ей — ось смещения x .

Мы видим, что наибольшие отклонения груза от положения равновесия в обе стороны одинаковы по модулю и равны A . Это *амплитуда колебаний*.

Маятник начал движение из крайней точки с координатой $x = A$. За время, равное периоду T , маятник совершил полное колебание, т. е., миновав положение равновесия, дошел до противоположной крайней точки с координатой $x = -A$, на мгновение задержался в ней, изменив направление скорости на противоположное, затем пошел в обратном направлении и, вторично пройдя через положение равновесия, вернулся в то же самое место, откуда начал движение. Затем начинается следующее колебание и т. д.

Если в ходе опыта был измерен промежуток времени t , за который маятник совершил показанные на графике колебания, то можно определить их период T , разделив это время на число колебаний: $T = \frac{t}{N}$.

Зная период, можно найти частоту колебаний: $\nu = \frac{1}{T}$.

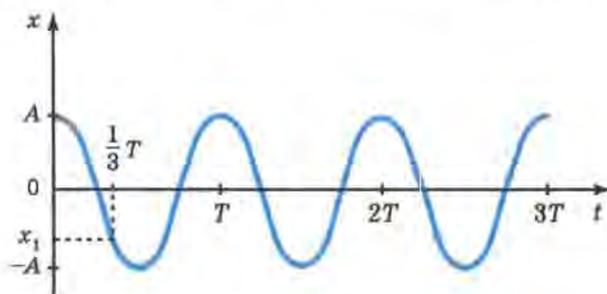


Рис. 60

График дает возможность приблизительно определить координату груза в любой момент времени. Например, через $\frac{1}{3}T$ от момента начала первого колебания груз находился в точке с координатой x_1 .

Если график зависимости координаты от времени какого-нибудь тела представляет собой синусоиду (косинусоиду), т. е. если координата меняется со временем по закону синуса (косинуса), то в этом случае говорят, что *и координата, и само тело совершают гармонические колебания.*

Периодические изменения во времени физической величины, происходящие по закону синуса или косинуса, называются гармоническими колебаниями.

На рисунке 61 изображен опыт, аналогичный рассмотренному выше, только для нитяного маятника. С помощью этого опыта можно показать, что и для нитяного маятника график зависимости координаты от времени тоже представляет собой синусоиду, т. е. что его колебания являются гармоническими.



Рис. 61

Теоретически колебания нитяного маятника были бы строго гармоническими в том случае, если бы он представлял собой материальную точку, колеблющуюся без трения с малой амплитудой¹ при не меняющемся со временем расстоянии от нее до точки подвеса. (Можно доказать, что только при этих условиях сила, возвращающая точку в положение равновесия, будет прямо пропорциональна смещению, вследствие чего колебания будут происходить по гармоническому закону, т. е. по закону изменения синуса или косинуса.)

¹ Напомним, что под малой подразумевается такая амплитуда, при которой траекторию движения маятника можно считать прямолинейной (см. § 26). Числовое значение амплитуды, удовлетворяющее этому условию, зависит от точности результата, требуемой в решаемой задаче. В большинстве практических задач малой можно считать амплитуду, если угол отклонения не превышает 8° .

Материальная точка, колеблющаяся на не меняющемся со временем расстоянии от точки подвеса, называется математическим маятником.

Математический маятник — это абстрактная модель, реально таких маятников не бывает.

Практически колебания, близкие к гармоническим, совершает тяжелый шарик (например, стальной), подвешенный на легкой и малорастяжимой нити, длина которой значительно больше диаметра этого шарика, при малой амплитуде и малом трении.

При совершении телом гармонических колебаний не только его координата, но и такие величины, как сила, ускорение, скорость, тоже изменяются по закону синуса или косинуса. Это следует из известных вам законов и формул, в которых указанные величины попарно связаны прямо пропорциональной зависимостью, например $F_x = -kx$ (закон

Гука), $a_x = \frac{F_x}{m}$ (второй закон Ньютона). Из этих формул видно, что сила и ускорение достигают наибольших значений, когда колеблющееся тело находится в крайних положениях, где смещение наиболее велико, и равны нулю, когда тело проходит через положение равновесия. Значит, колебательное движение вблизи среднего положения тела наиболее близко к равномерному, а вблизи крайних положений сильно отличается от равномерного движения.

Что же касается скорости, то она, наоборот, в крайних положениях равна нулю, а при прохождении телом положения равновесия достигает наибольшего значения.

? Вопросы

1. По рисунку 59 расскажите о цели, порядке выполнения и результатах изображенного опыта.

2. Как называется кривая линия, изображенная на рисунке 60? Чему соответствуют отрезки OA и OT ?

3. Какие колебания называются гармоническими?

4. Что можно показать с помощью опыта, изображенного на рисунке 61?

5. Что называется математическим маятником?

6. При каких условиях реальный нитяной маятник будет совершать колебания, близкие к гармоническим?

7. Как меняются действующая на тело сила, его ускорение и скорость при совершении им гармонических колебаний?

§ 28. Затухающие колебания

Обратимся еще раз к рисунку 49. Перемещая шарик из точки O (положения равновесия) в точку B , мы растягиваем пружину. При этом мы совершаем некоторую работу по преодолению силы ее упругости, благодаря чему пружина приобретает потенциальную энергию. Если теперь отпустить шарик, то по мере его приближения к точке O деформация пружины и потенциальная энергия маятника будут уменьшаться, а скорость и кинетическая энергия — увеличиваться.

Допустим, что потери энергии на преодоление сил трения при движении маятника пренебрежимо малы. Тогда, согласно закону сохранения энергии, полную механическую энергию маятника (т. е. $E_{\text{п}} + E_{\text{к}}$) в любой момент времени можно считать одинаковой и равной той потенциальной энергии, которую мы изначально сообщили пружине, растянув ее на длину отрезка OB . При этом маятник мог бы совершать колебания сколь угодно долго с постоянной амплитудой, равной OB .

Так было бы, если бы при движении не было никаких потерь энергии.

Но реально потери энергии всегда есть. *Механическая энергия расходуется*, например, на совершение работы по преодолению сил сопротивления воздуха, *переходя при этом во внутреннюю энергию*. Амплитуда колебаний постепенно уменьшается, и через некоторое время колебания прекращаются. Такие колебания называются *затухающими* (рис. 62).

Чем больше силы сопротивления движению, тем быстрее прекращаются колебания. Например, в воде колебания затухают быстрее, чем в воздухе (см. рис. 62, а, б).

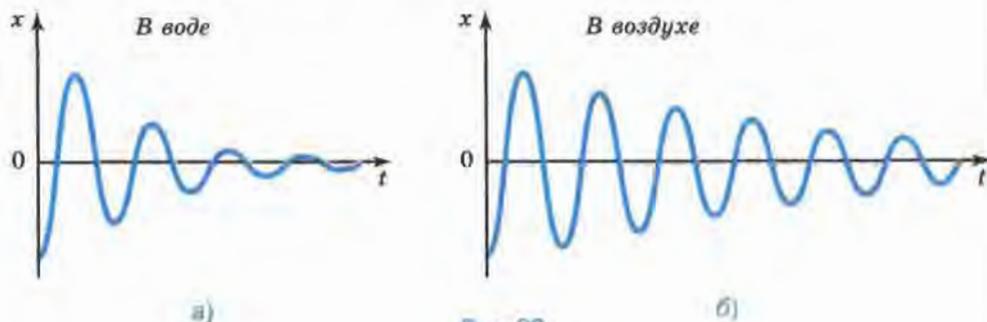


Рис. 62

? Вопросы

1. Как меняются скорость и кинетическая энергия маятника (см. рис. 49) при приближении шарика к положению равновесия? Почему?

2. Что можно сказать о полной механической энергии колеблющегося маятника в любой момент времени, если допустить, что потеря энергии нет? Согласно какому закону это можно утверждать?

3. Может ли тело, находясь в реальных условиях, совершать колебательное движение без потерь энергии?

4. Как меняется с течением времени амплитуда затухающих колебаний?

5. Где быстрее прекратятся колебания маятника: в воздухе или в воде? (Начальный запас энергии в обоих случаях одинаков.)

🔗 Упражнение 25

1. Горизонтальный пружинный маятник, изображенный на рисунке 49, отвели в сторону и отпустили. Как меняются перечисленные в таблице величины, характеризующие колебательное движение этого маятника, на указанных участках его пути? Перечертите таблицу 1 в тетрадь и заполните ее.

Таблица 1

Направление движения маятника	Сила упругости, $F_{\text{упр}}$	Скорость, v	Потенциальная энергия, $E_{\text{п}}$	Кинетическая энергия, $E_{\text{к}}$	Полная механическая энергия, $E_{\text{пол}}$	
					в реальных условиях (т. е. с трением)	в идеальных условиях (т. е. без трения)
От В к О						
От О к А						
От А к О						
От О к В						

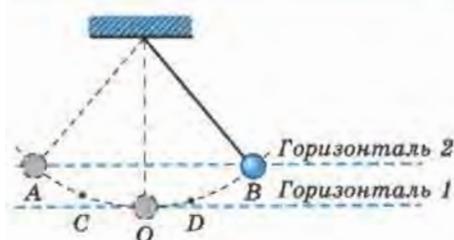


Рис. 63

энергия шарика в точках A и O ; б) кинетическая энергия шарика в точках B , O и A ; в) полная механическая энергия шарика в точках B , D , O , C и A ?

2. На рисунке 63 изображен шарик на нити, колеблющийся без трения между точками A и B . Находясь в точке B , этот маятник обладает потенциальной энергией, равной $0,01$ Дж относительно горизонтали 1 , принятой за нулевой уровень отсчета потенциальной энергии. Чему равна: а) потенциальная энергия шарика в точках A и O ; б) кинетическая энергия шарика в точках B , O и A ; в) полная механическая энергия шарика в точках B , D , O , C и A ?

§ 29. Вынужденные колебания

До сих пор мы рассматривали свободные колебания, т. е. колебания, происходящие за счет начального запаса энергии.

Свободные колебания всегда затухающие, так как весь запас энергии, первоначально сообщенный колебательной системе, в конце концов уходит на совершение работы по преодолению сил трения и сопротивления среды (т. е. механическая энергия переходит во внутреннюю). Поэтому свободные колебания почти не имеют практического применения.

Чтобы колебания были незатухающими, необходимо восполнять потери энергии за каждый период колебаний. Это можно осуществить, воздействуя на колеблющееся тело периодически изменяющейся силой. Например, каждый раз подталкивая качели в такт их колебаниям, мы можем добиться того, чтобы колебания не затухали.

Колебания, совершаемые телом под действием внешней периодически изменяющейся силы, называются вынужденными колебаниями.

Внешняя периодически изменяющаяся сила, вызывающая эти колебания, называется *вынуждающей силой*.

Если на покоящиеся качели начать действовать периодически меняющейся вынуждающей силой, то в течение некоторого времени амплитуда вынужденных колебаний качелей будет возрастать, т. е. амплитуда каждого последующего колебания будет больше, чем предыдущего. Увеличение амплитуды прекратится тогда, когда энергия, теряемая качелями на преодоление силы трения, станет равна энергии, получаемой ими извне (за счет работы вынуждающей силы).

В большинстве случаев постоянная частота вынужденных колебаний тоже устанавливается не сразу, а спустя некоторое время после их начала.

Когда амплитуда и частота вынужденных колебаний перестают меняться, говорят, что *колебания установились*.

Частота установившихся вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы.

Вынужденные колебания могут совершать даже такие тела, которые не являются колебательными системами, например игла швейной машины, поршни в двигателе внутреннего сгорания и многие другие. Колебания таких тел тоже происходят с частотой вынуждающей силы.

Вынужденные колебания — *незатухающие*. Они происходят до тех пор, пока действует вынуждающая сила.

? Вопросы

1. Могут ли свободные колебания быть незатухающими? Почему?
2. Что необходимо делать для того, чтобы колебания были незатухающими?
3. Какие колебания называются вынужденными?
4. Что такое вынуждающая сила?
5. В каком случае говорят, что колебания установились?
6. Что можно сказать о частоте установившихся вынужденных колебаний и частоте вынуждающей силы?
7. Могут ли тела, не являющиеся колебательными системами, совершать вынужденные колебания? Приведите примеры.
8. До каких пор происходят вынужденные колебания?

🔗 Упражнение 26

1. Рассмотрите рисунок 52 и скажите, какие из тел способны совершать: свободные колебания; вынужденные колебания. Ответ обоснуйте.
2. Могут ли происходить: а) вынужденные колебания в колебательной системе; б) свободные колебания в системе, не являющейся колебательной? Приведите примеры.



§ 30. Резонанс

Приведем исторический факт, имеющий непосредственное отношение к теме данного параграфа.

В 1908 г. в Петербурге сильно раскачался и в результате этого обрушился так называемый Египетский мост через реку Фонтанку, когда по нему проходил маршевым шагом (т. е. «в ногу») кавалерийский эскадрон.

Почему именно в описанном случае вынужденные колебания моста достигли такой большой амплитуды? Можно ли было предотвратить аварию?

Для ответа на эти вопросы рассмотрим, как зависит *амплитуда вынужденных колебаний от частоты изменения вынуждающей силы*.

На рисунке 64, а изображены два маятника, висящие на общем шнуре. Длина маятника 2 неизменна, этой длине соответствует определенная частота свободных колебаний (т. е. собственная частота маятника). Длину маятника 1 можно менять, подтягивая свободные концы нитей. При изменении длины маятника 1 соответственно меняется его собственная частота.

Если отклонить маятник 1 от положения равновесия и предоставить его самому себе, то он будет совершать свободные колебания. Это вызовет колебания шнура, в результате чего на маятник 2 через его точки подвеса будет действовать вынуждающая сила, периодически меняющаяся по модулю и направлению с такой же частотой, с какой колеблется маятник 1. Под действием этой силы маятник 2 начнет совершать вынужденные колебания.

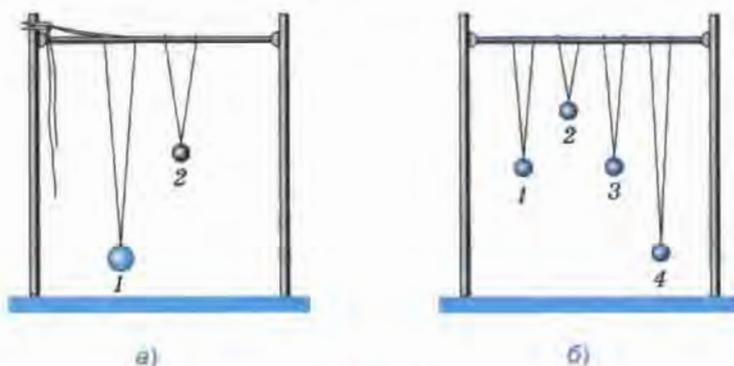


Рис. 64

Если постепенно уменьшать длину маятника 1, то частота его колебаний, а значит, и частота изменения вынуждающей силы, действующей на маятник 2, будет увеличиваться, приближаясь к собственной частоте маятника 2. При этом амплитуда *установившихся вынужденных колебаний* маятника 2 будет возрастать. Она достигнет наибольшего значения, когда длины маятников сравняются, т. е. когда частота ν вынуждающей силы совпадет с собственной частотой ν_0 маятника 2. Маятники будут колебаться в одинаковых фазах.

Дальнейшее уменьшение длины маятника 1 приведет к тому, что частота вынуждающей силы станет больше собственной частоты маятника 2. При этом амплитуда его колебаний начнет уменьшаться.

На основании этого опыта можно сделать следующий вывод:

амплитуда установившихся вынужденных колебаний достигает своего наибольшего значения при условии, что частота ν вынуждающей силы равна собственной частоте ν_0 колебательной системы. В этом заключается явление, называемое резонансом.

Резонанс можно пронаблюдать также на опыте, показанном на рисунке 64, б. На нем изображены четыре маятника, подвешенные к общему шнуру. Маятники 1 и 3 имеют одинаковую длину. Под действием свободных колебаний маятника 3 остальные маятники совершают вынужденные колебания. При этом амплитуда колебаний маятника 1 значительно больше амплитуд маятников 2 и 4. В данном случае *маятник 1 колеблется в резонанс с маятником 3.*

Почему амплитуда установившихся колебаний, вызванных вынуждающей силой, достигает наибольшего значения именно при совпадении частоты изменения этой силы с собственной частотой колебательной системы? Дело в том, что в этом случае направление вынуждающей силы в любой момент времени совпадает с направлением движения колеблющегося тела. Таким образом создаются наиболее благоприятные условия для пополнения энергии колебательной системы за счет работы вынуждающей силы. Например, чтобы сильнее раскатать качели, мы подталкиваем их таким образом, чтобы направление действующей силы совпадало с направлением движения качелей.

Следует помнить, что понятие резонанса применимо только к вынужденным колебаниям.

Вернемся теперь к случаю с обрушенным мостом. Очевидно, мост раскачался до большой амплитуды потому, что частота периодически действующей на него вынуждающей силы (ударов копыт иду-

щих «в ногу» лошадей) случайно совпала с собственной частотой этого моста. Аварию можно было бы предотвратить, если бы перед входом на мост была отдана команда идти не «в ногу».

Резонанс играет большую роль в самых разнообразных явлениях, причем в одних — полезную, в других — вредную. Его необходимо учитывать, в частности, в тех случаях, когда с помощью наименьшей периодической силы нужно получить определенный размах вынужденных колебаний. Например, тяжелый язык большого колокола можно раскачать, действуя сравнительно небольшой силой с частотой, равной собственной частоте языка. Но мы не достигнем желаемого результата, действуя не в резонанс, даже прикладывая большую силу.

Примерами вредного проявления резонанса могут служить слишком сильное раскачивание железнодорожного вагона при случайном совпадении его собственной частоты колебаний на рессорах с частотой ударов колес на стыках рельсов, сильное раскачивание пароходов на волнах и многие другие явления.

В тех случаях, когда резонанс может нанести ущерб, принимают меры к тому, чтобы не допустить его возникновения. Например, многие заводские станки, отдельные части которых совершают периодические движения, устанавливаются на массивном фундаменте, препятствующем возникновению колебаний всего станка.

? Вопросы

1. С какой целью и как проводился опыт с двумя маятниками, изображенными на рисунке 64, а?
2. В чем заключается явление, называемое резонансом?
3. Какой из маятников, изображенных на рисунке 64, б, колеблется в резонанс с маятником 3? По каким признакам вы это определили?
4. К каким колебаниям — свободным или вынужденным — применимо понятие резонанса?
5. Приведите примеры, показывающие, что в одних случаях резонанс может быть полезным явлением, а в других — вредным.

⚡ Упражнение 27

1. Маятник 3 (см. рис. 64, б) совершает свободные колебания.
 - а) Какие колебания — свободные или вынужденные — будут совершать при этом маятники 1, 2 и 4?

б) Благодаря чему возникает вынуждающая сила, действующая на маятники 1, 2 и 4?

в) Каковы собственные частоты маятников 1, 2 и 4 по сравнению с частотой колебаний маятника 3?

г) Почему маятник 1 колеблется в резонанс с маятником 3, а маятники 2 и 4 — нет?

2. Вода, которую мальчик несет в ведре, начинает сильно расплескиваться. Мальчик меняет темп ходьбы (или просто «сбивает ногу»), и расплескивание прекращается. Почему так происходит?

3. Собственная частота качелей равна 0,5 Гц. Через какие промежутки времени нужно подталкивать их, чтобы раскатать как можно сильнее, действуя относительно небольшой силой?

§ 31. Распространение колебаний в среде. Волны

Рассмотрим опыт, показанный на рисунке 65. Длинную пружину подвешивают на нитях. Ударяют рукой по ее левому концу (рис. 65, а). От удара несколько витков пружины сближаются, возникает сила упругости, под действием которой эти витки начинают расходиться. Как маятник проходит в своем движении положение равновесия, так и витки, минуя положение равновесия, будут продолжать расходиться. В результате в этом же месте пружины образуется уже некоторое разрежение (рис. 65, б). При ритмичном воздействии витки на конце пружины будут периодически то сближаться, то отходить друг от друга. Таким образом, витки пружины будут колебаться возле своего положения равновесия. Эти колебания постепенно передадутся от витка

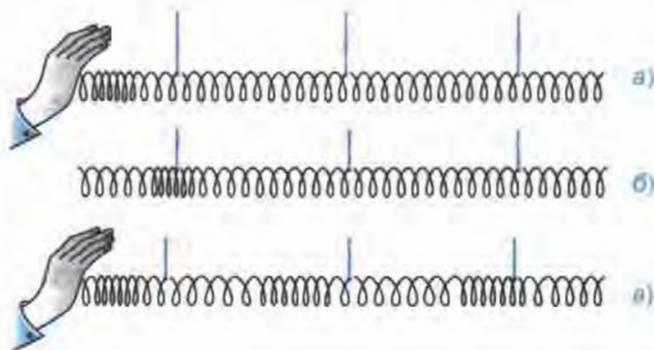


Рис. 65

к витку вдоль всей пружины. По пружине распространятся сгущения и разрежения витков, как показано на рисунке 65, в.

Другими словами, вдоль пружины от ее левого конца к правому распространяется *возмущение*, т. е. изменение некоторых физических величин, характеризующих состояние среды.

В данном случае это возмущение представляет собой изменение с течением времени силы упругости в пружине, ускорения и скорости движения колеблющихся витков, их смещения от положения равновесия.

Возмущения, распространяющиеся в пространстве, удаляясь от места их возникновения, называются волнами.

В данном определении речь идет о так называемых *бегущих волнах*. Именно такие волны и будут предметом нашего изучения. Основное общее свойство бегущих волн любой природы заключается в том, что они, распространяясь в пространстве, переносят энергию.

Так, например, колеблющиеся витки пружины обладают энергией. Взаимодействуя с соседними витками, они передают им часть своей энергии, благодаря чему вдоль пружины распространяется механическое возмущение (деформация), т. е. образуется бегущая волна.

Но при этом каждый виток пружины колеблется около своего положения равновесия, и вся пружина остается на первоначальном месте.

Таким образом, *в бегущей волне происходит перенос энергии без переноса вещества.*

В данной теме мы будем рассматривать только *упругие* бегущие волны, частным случаем которых является звук.

Упругие волны — это механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде.

Иначе говоря, образование упругих волн в среде обусловлено возникновением в ней упругих сил, вызванных деформацией. Например, если по какому-нибудь металлическому телу ударить молотком, то в нем возникнет упругая волна.

Помимо упругих существуют и другие виды волн, например волны на поверхности жидкости, электромагнитные волны (последние описаны в § 52).

Волновые процессы встречаются почти во всех областях физических явлений, поэтому их изучение имеет большое значение.

? Вопросы

1. Что называется волнами?
2. В чем заключается основное общее свойство бегущих волн любой природы?
3. Происходит ли в бегущей волне перенос вещества?
4. Что такое упругие волны?
5. Приведите примеры видов волн, не относящихся к упругим.

§ 32. Продольные и поперечные волны

При возникновении волн в пружине колебания ее витков происходили вдоль направления распространения волны в ней (§ 31, рис. 65).

Волны, в которых колебания происходят вдоль направления их распространения, называются продольными волнами.

Кроме продольных волн существуют и *поперечные волны*. Рассмотрим такой опыт. На рисунке 66, а показан длинный резиновый шнур, один конец которого закреплен. Другой конец приводят в колебательное движение в вертикальной плоскости (перпендикулярно горизонтально расположенному шнуру). Благодаря силам упругости, возникающим в шнуре, колебания будут распространяться вдоль шнура. В нем возникают волны (рис. 66, б), причем колебания частиц шнура происходят перпендикулярно направлению распространения волн.

Волны, в которых колебания происходят перпендикулярно направлению их распространения, называются поперечными волнами.

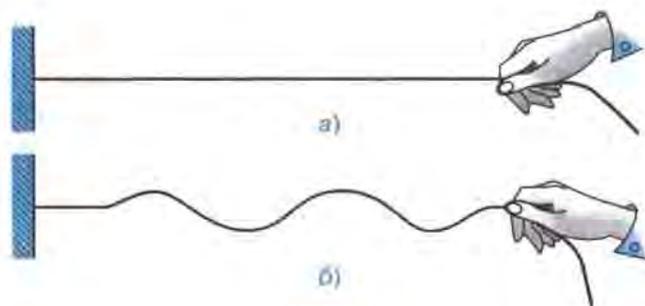


Рис. 66

Движение частиц среды, в которой образуются как поперечные, так и продольные волны, можно наглядно продемонстрировать с помощью волновой машины (рис. 67). На рисунке 67, а показана поперечная волна, а на рисунке 67, б — продольная. Обе волны распространяются в горизонтальном направлении.

На волновой машине представлен только один ряд шариков. Но, наблюдая за их движением, можно понять, как распространяются волны в сплошных средах, протяженных во всех трех направлениях (например, в некотором объеме твердого, жидкого или газообразного вещества).

Для этого представьте себе, что каждый шарик является частью вертикального слоя вещества, расположенного перпендикулярно к плоскости рисунка. Из рисунка 67, а видно, что при распространении поперечной волны эти слои, подобно шарикам, будут *сдвигаться* друг относительно друга, совершая колебания в вертикальном направлении. Поэтому *поперечные механические волны являются волнами сдвига*.

А *продольные волны*, как видно из рисунка 67, б, — это *волны сжатия и разрежения*. В этом случае деформация слоев среды состоит в изменении их плотности, так что продольные волны представляют собой чередующиеся уплотнения и разрежения.

Известно, что упругие силы при сдвиге слоев возникают только в твердых телах. В жидкостях и газах смежные слои свободно скользят друг по другу без появления противодействующих упругих сил. Раз нет упругих сил, то и образование упругих волн в жидкостях и газах невозможно. Поэтому *упругие поперечные волны могут распространяться только в твердых телах*.

При сжатии и разрежении (т. е. при изменении объема участков тела) упругие силы возникают как в твердых телах, так и в жидкостях и газах. Поэтому *упругие продольные волны могут распространяться в любой среде — твердой, жидкой и газообразной*.

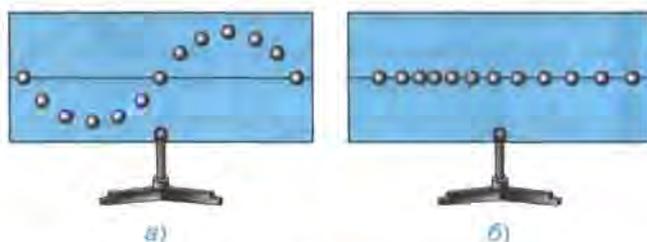


Рис 67

? Вопросы

1. Какие волны называются продольными? поперечными? Приведите примеры.

2. Какие волны — поперечные или продольные — являются волнами сдвига? волнами сжатия и разрежения?

3. В какой среде могут распространяться упругие поперечные волны? упругие продольные волны?

4. Почему упругие поперечные волны не распространяются в жидких и газообразных средах?

§ 33. Длина волны.

Скорость распространения волн

Рассмотрим более подробно процесс передачи колебаний от точки к точке при распространении поперечной волны. Для этого обратимся к рисунку 68, на котором показаны различные стадии процесса распространения поперечной волны через каждые $1/4 T$.

На рисунке 68, а изображена цепочка пронумерованных шариков. Это модель: шарики символизируют частицы среды. Будем считать, что между шариками, как и между частицами среды, существ-

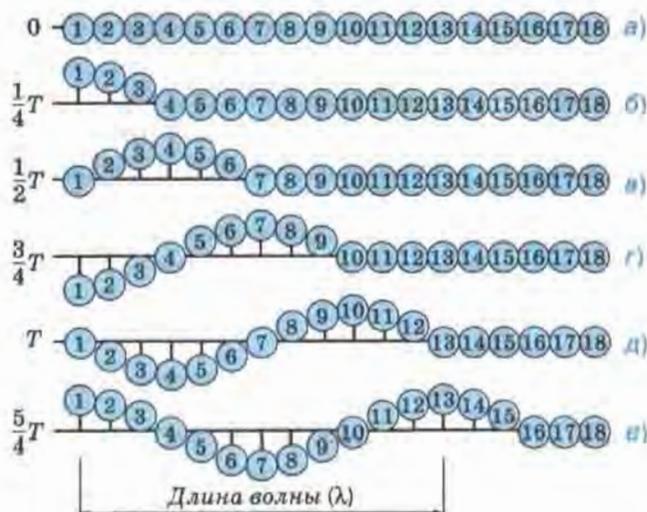


Рис. 68

вуют силы взаимодействия, в частности при небольшом удалении шариков друг от друга возникает сила притяжения.

Если привести первый шарик в колебательное движение, т. е. заставить его двигаться вверх и вниз от положения равновесия, то благодаря силам взаимодействия каждый шарик в цепочке будет повторять движение первого, но с некоторым запаздыванием (сдвигом фаз). Это запаздывание будет тем больше, чем дальше от первого шарика находится данный шарик. Так, например, видно, что четвертый шарик отстает от первого на $1/4$ колебания (рис. 68, б). Ведь когда первый шарик прошел $1/4$ часть пути полного колебания, максимально отклонившись вверх, четвертый шарик только начинает движение из положения равновесия. Движение седьмого шарика отстает от движения первого на $1/2$ колебания (рис. 68, в), десятого — на $3/4$ колебания (рис. 68, г). Тринадцатый шарик отстает от первого на одно полное колебание (рис. 68, д), т. е. находится с ним в одинаковых фазах. Движения этих двух шариков совершенно одинаковы (рис. 68, е).

Расстояние между ближайшими друг к другу точками, колеблющимися в одинаковых фазах, называется длиной волны.

Длина волны обозначается греческой буквой λ («ламбда»). Расстояние между первым и тринадцатым шариками (см. рис. 68, е) вторым и четырнадцатым, третьим и пятнадцатым и так далее, т. е. между всеми ближайшими друг к другу шариками, колеблющимися в одинаковых фазах, будет равно длине волны λ .

Из рисунка 68 видно, что колебательный процесс распространился от первого шарика до тринадцатого, т. е. на расстояние, равное длине волны λ , за то же самое время, за которое первый шарик совершил одно полное колебание, т. е. за период колебаний T .

Значит,

$$\lambda = vT,$$

где v — скорость волны.

Поскольку период колебаний связан с их частотой зависимостью $T = \frac{1}{\nu}$ (см. § 26), то длина волны может быть выражена через скорость волны и частоту:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}.$$



Рис. 69

Таким образом, длина волны зависит от частоты (или периода) колебаний источника, порождающего эту волну, и от скорости распространения волны.

Из формул для определения длины волны можно выразить скорость волны:

$$v = \frac{\lambda}{T} \text{ и } v = \lambda\nu.$$

Формулы для нахождения скорости волны справедливы как для поперечных, так и для продольных волн. Длину волны λ при распространении продольных волн можно представить с помощью рисунка 69. На нем изображена (в разрезе) труба с поршнем. Поршень совершает колебания с небольшой амплитудой вдоль трубы. Его движение передается прилегающим к нему слоям воздуха, заполняющего трубу. Колебательный процесс постепенно распространяется вправо, образуя в воздухе разрежения и сгущения. На рисунке даны примеры двух отрезков, соответствующих длине волны λ . Очевидно, что точки 1 и 2 являются ближайшими друг к другу точками, колеблющимися в одинаковых фазах. То же самое можно сказать про точки 3 и 4.

? Вопросы

1. Что называется длиной волны?
2. Какой буквой обозначается длина волны?
3. За какое время колебательный процесс распространяется на расстояние, равное длине волны?

4. По каким формулам можно рассчитать длину волны и скорость распространения поперечных и продольных волн?

5. Расстояние между какими точками равно длине продольной волны, изображенной на рисунке 69?

Упражнение 28

1. С какой скоростью распространяется волна в океане, если длина волны равна 270 м, а период колебаний равен 13,5 с?

2. Определите длину волны при частоте 200 Гц, если скорость распространения волны равна 340 м/с.

3. Лодка качается на волнах, распространяющихся со скоростью 1,5 м/с. Расстояние между двумя ближайшими гребнями волн равно 6 м. Определите период колебаний лодки.

§ 34. Источники звука. Звуковые колебания

Полученные знания о колебаниях и волнах позволяют нам перейти к рассмотрению звуковых явлений.

Мы знаем, как разнообразен мир окружающих нас звуков — голоса людей и музыка, пение птиц и жужжание пчел, гром во время грозы и шум леса на ветру, звук проезжающих автомобилей, самолетов и т. д.

Общим для всех звуков является то, что порождающие их тела, т. е. *источники звука*, колеблются. В этом можно убедиться на простых опытах. Рассмотрим их.



Рис. 70

На рисунке 70 изображена укрепленная в тисках упругая металлическая линейка. Мы знаем, что линейка будет издавать звук, если ее свободную часть, длина которой подобрана определенным образом, привести в колебательное движение (крайние положения колеблющейся линейки показаны штриховыми линиями). В данном случае колебания источника звука очевидны.

Теперь обратимся к рисунку 71. На нем мы видим изображение звучащей струны, концы которой закреплены. Размытые очертания этой струны и кажущееся утолщение в середине свидетельствуют о том, что струна колеблется. Если



Рис. 71

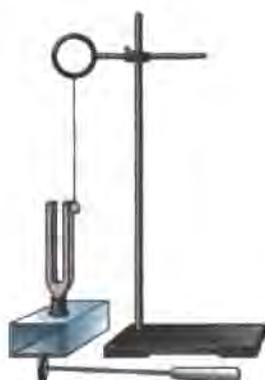


Рис. 72

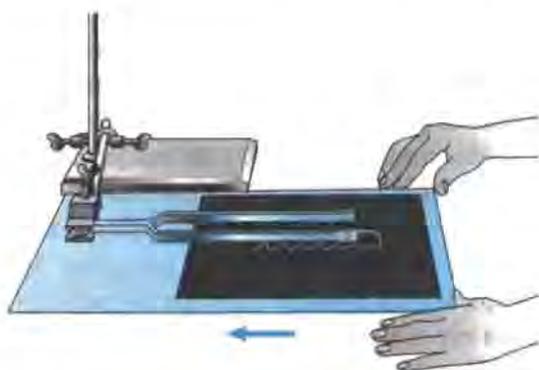


Рис. 73

к звучащей струне приблизить конец бумажной полоски, то полоска будет подпрыгивать от толчков струны. Пока струна колеблется, мы слышим звук; остановим струну, и звук прекращается.

Прибор, изображенный на рисунке 72, называется *камертоном*. Он представляет собой изогнутый металлический стержень на ножке. В данном случае камертон укреплен на резонаторном ящике (о назначении которого вы узнаете из § 40).

Если по камертону ударить мягким молоточком или провести по нему смычком, то камертон зазвучит. Поднесем к звучащему камертону легкий шарик (стеклянную бусинку), подвешенный на нитке, — шарик будет отскакивать от камертона, свидетельствуя о колебаниях его ветвей.

На рисунке 73 показано, как можно «записать» колебания камертона с малой (порядка 16 Гц) собственной частотой и большой амплитудой колебаний. К концу одной ветви камертона привинчена тонкая и узкая металлическая полоска, оканчивающаяся острием. Острие загнуто вниз и слегка касается лежащей на столе закопченной стеклянной пластинки. При быстром перемещении пластинки под колеблющимися ветвями острие оставляет на ней след в виде волнообразной линии.

* Волнообразная линия, прочерченная на пластинке острием, очень близка к синусоиде. Таким образом, можно считать, что каждая ветвь звучащего камертона совершает гармонические колебания.

* Различные опыты свидетельствуют о том, что любой источник звука обязательно колеблется (хотя чаще всего эти колебания неза-

метны для глаза). Например, звуки голосов людей и многих животных возникают в результате колебаний их голосовых связок, звучание духовых музыкальных инструментов, звук сирены, свист ветра, шелест листьев, раскаты грома обусловлены колебаниями масс воздуха.

Но далеко не всякое колеблющееся тело является источником звука. Например, не издает звука колеблющийся грузик, подвешенный на нити или пружине. Перестанет звучать и металлическая линейка, изображенная на рисунке 70, если переместить ее в тисках вверх и тем самым удлинить свободный конец настолько, чтобы частота его колебаний стала меньше 16 Гц.

Исследования показали, что человеческое ухо способно воспринимать как звук механические колебания в пределах от 16 Гц до 20 000 Гц (передающиеся обычно через воздух). Поэтому колебания этого диапазона частот называются *звуковыми*.

Следует отметить, что указанные границы звукового диапазона условны, так как зависят от возраста людей и индивидуальных особенностей их слухового аппарата. Обычно с возрастом верхняя частотная граница воспринимаемых звуков значительно понижается — некоторые пожилые люди могут слышать звуки с частотами, не превышающими 6000 Гц. Дети же, наоборот, могут воспринимать звуки,

частота которых несколько больше 20 000 Гц.

Механические колебания, частота которых превышает 20 000 Гц, называются *ультразвуковыми*, а колебания с частотами менее 16 Гц — *инфразвуковыми*.

Ультразвук и инфразвук распространены в природе так же широко, как и волны звукового диапазона. Их излучают и используют для своих «переговоров» дельфины, летучие мыши и некоторые другие живые существа.

Ультразвук находит широкое применение в технике. Например, направленные узкие пучки ультразвука применяются для измерения глубины моря (рис. 74). Для этой цели на дне судна по-



Рис. 74

мещают излучатель и приемник ультразвука. Излучатель дает короткие сигналы, которые доходят до дна и, отражаясь от него, достигают приемника. Моменты излучения и приема сигнала регистрируются. Таким образом, за время t , которое проходит с момента отправления сигнала до момента его приема, сигнал, распространяющийся со скоростью v , проходит путь, равный удвоенной глубине моря, т. е. $2h$:

$$2h = vt.$$

Отсюда легко вычислить глубину моря:

$$h = \frac{vt}{2}.$$

Описанный метод определения расстояния до объекта называется **эхолокацией**.

Вопросы

1. Расскажите об опытах, изображенных на рисунках 70—73. Какой вывод из них следует?
2. Каким общим свойством обладают все источники звука?
3. Механические колебания каких частот называются звуковыми и почему?
4. Какие колебания называются ультразвуковыми? инфразвуковыми?
5. Расскажите об измерении глубины моря методом эхолокации.

Упражнение 29

Звук от взмахов крыльев летящего комара мы слышим, а летящей птицы — нет. Почему?

§ 35. Высота и тембр звука

Обратимся еще раз к опыту, изображенному на рисунке 70. Мы знаем, что свободная часть линейки создает звук только в том случае, если она колеблется с частотой, не меньшей чем 20 Гц. Переместим линейку в тисках вниз (укоротив тем самым верхнюю часть) и приведем ее в колебательное движение. Мы заметим, что частота колебаний линейки увеличилась, а издаваемый ею звук стал выше.



Рис. 75

Продолжая периодически укорачивать колеблющуюся часть линейки, мы убедимся в том, что с увеличением частоты колебаний звук повышается.

Проверим этот вывод на другом опыте. Возьмем зубчатый диск (рис. 75, а), с помощью специального устройства приведем его во вращение и прикоснемся к зубчатому краю тонкой картонной пластинкой (рис. 75, б). Под воздействием зубьев вращающегося диска пластинка начнет совершать вынужденные колебания, в результате чего мы услышим звук. Увеличим

скорость вращения диска, и пластинка станет колебаться чаще, а издаваемый ею звук будет выше.

К такому же выводу мы придем, сравнивая звучание двух камертонов с разной собственной частотой. Если частоты на камертонах не указаны, их можно сравнить, получив следы колебаний на закопченных пластинках (см. рис. 73). Такие пластинки представлены на рисунке 76. Из рисунка следует, что камертон, колеблющийся с большей частотой (рис. 76, а), издает более высокий звук, а с меньшей (рис. 76, б) — более низкий. На основании описанных опытов можно заключить, что

высота звука зависит от частоты колебаний: чем больше частота колебаний источника звука, тем выше издаваемый им звук.

* Мы знаем, что ветви камертона совершают гармонические (синусоидальные) колебания. Таким колебаниям присуща только одна строго определенная частота. Гармонические колебания являются самым простым видом колебаний. Звук камертона является *чистым тоном*.

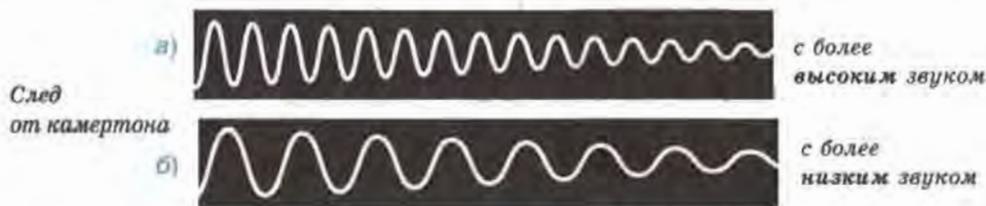


Рис. 76

Чистым тоном называется звук источника, совершающего гармонические колебания одной частоты.

Звуки от других источников (например, звуки различных музыкальных инструментов, голоса людей, звук сирены и многие другие) представляют собой совокупность гармонических колебаний разных частот, т. е. совокупность чистых тонов.

Самая низкая (т. е. самая малая) частота такого сложного звука называется **основной частотой**, а соответствующий ей звук определенной высоты — **основным тоном** (иногда его называют просто **тоном**). **Высота сложного звука определяется именно высотой его основного тона.**

Все остальные тоны сложного звука называются **обертонами**. Частоты всех обертонов данного звука в целое число раз больше частоты его основного тона (поэтому их называют также **высшими гармоническими тонами**).

Обертоны определяют **тембр** звука, т. е. такое его качество, которое позволяет нам отличать звуки одних источников от звуков других. Например, мы легко отличаем звук рояля от звука скрипки даже в том случае, если эти звуки имеют одинаковую высоту, т. е. одну и ту же частоту основного тона. Отличие же этих звуков обусловлено разным набором обертонов (совокупность обертонов различных источников может отличаться количеством обертонов, их амплитудами, сдвигом фаз между ними, спектром частот).

Таким образом, **высота звука определяется частотой его основного тона: чем больше частота основного тона, тем выше звук.**

Тембр звука определяется совокупностью его обертонов.

? Вопросы

1. По рисунку 70 расскажите, как исследовалась зависимость высоты звука от частоты колебаний его источника. Какой вывод был сделан?

2. С какой целью ставился опыт, изображенный на рисунке 75? Опишите, как этот опыт проводился и какой был сделан вывод.

3. Как на опыте удостовериться в том, что из двух камертонов более высокий звук издает тот, у которого больше собственная частота? (Частоты на камертонах не указаны.)

4. От чего зависит высота звука?

* 5. Что называется чистым тоном?

6. Что такое основной тон и обертоны звука?

7. Чем определяется высота звука?

* 8. Что такое тембр звука и чем он определяется?

Упражнение 30

1. Какое насекомое чаще машет крыльями в полете — шмель, комар или муха? Почему вы так думаете?

2. Зубья вращающейся циркулярной пилы создают в воздухе звуковую волну. Как изменится высота звука, издаваемого пилой при ее холостом ходе, если на ней начать распиливать толстую доску из плотной древесины? Почему?

3. Известно, что чем туже натянута струна на гитаре, тем более высокий звук она издает. Как изменится высота звучания гитарных струн при значительном повышении температуры окружающего воздуха? Ответ поясните.

§ 36. Громкость звука

Чтобы выяснить, от чего зависит громкость звука, вернемся к опыту, изображенному на рисунке 72. К одной ветви камертона подводят плотную маленький висящий на нити шарик, а по другой слегка ударяют молоточком. Обе ветви камертона приходят в колебательное движение. Слышен негромкий звук. Шарик отскакивает от колеблющейся ветви на небольшое расстояние. Затем камертон глушат и снова ударяют по нему, но гораздо сильнее, чем в первый раз. Теперь камертон звучит громче, а шарик отскакивает на большее расстояние, что свидетельствует о большей амплитуде колебаний ветвей.

Этот и многие другие опыты позволяют сделать вывод о том, что

громкость звука зависит от амплитуды колебаний: чем больше амплитуда колебаний, тем громче звук.

В рассмотренном опыте частоты колебаний обоих звуков — тихого и громкого — одинаковы, так как их источником является один и тот же камертон. Но если бы мы сравнивали звуки *разных частот*, то кроме амплитуды колебаний нам пришлось бы учитывать еще один фактор, влияющий на громкость. Дело в том, что чувствительность человеческого уха к звукам разной частоты различна. *При одинаковых амплитудах как более громкие мы воспринимаем звуки, частоты которых лежат в пределах от 1000 Гц до 5000 Гц.* Поэтому, например, высокий женский голос с частотой 1000 Гц будет для нашего уха громче низкого мужского с частотой 200 Гц, даже если амплитуды колебаний голосовых связок в обоих случаях одинаковы. *Громкость звука зависит также от его длительности и от индивидуальных особенностей слушателя.*

Громкость звука — это субъективное качество слухового ощущения, позволяющее располагать все звуки по шкале от тихих до громких.

Единица громкости звука называется *сон*.

В практических задачах громкость звука принято характеризовать *уровнем громкости*, измеряемым в *фонах*, или *уровнем звукового давления*, измеряемым в *белах* (Б) или *децибелах* (дБ), составляющих десятую часть бела.

Например, звуку, возникающему при листании газеты, соответствует уровень звукового давления порядка 20 дБ, звуку звонка будильника — примерно 80 дБ, двигателя самолета — порядка 130 дБ (такой громкий звук вызывает у человека болевое ощущение).

Систематическое воздействие на человека громких звуков, особенно шумов (неупорядоченной суммы звуков разной громкости, высоты тона, тембра), неблагоприятно отражается на его здоровье.

В шумных районах у многих людей появляются симптомы шумовой болезни: повышенная нервная возбудимость, быстрая утомляемость, повышенное артериальное давление. Поэтому в больших городах приходится принимать специальные меры для уменьшения шумов, например запрещать звуковые сигналы автомобилей.

? Вопросы

1. С какой целью ставят опыт, изображенный на рисунке 72, и как он проводится?
2. Как изменится громкость звука, если уменьшить амплитуду колебаний его источника?

3. Звук какой частоты — 500 Гц или 3000 Гц — человеческое ухо воспримет как более громкий при одинаковых амплитудах колебаний источников этих звуков?

4. От чего зависит громкость звука?

5. Назовите единицы громкости и уровня громкости звука.

6. Как отражается на здоровье человека систематическое действие громких звуков?

§ 37. Распространение звука

Мы воспринимаем звуки, находясь на расстоянии от их источников. Обычно звук доходит до нас по воздуху. Сжатие и разрежение воздуха (вызванные колебаниями источника и распространяющиеся благодаря возникновению упругих сил) достигают нашего уха и приводят барабанную перепонку в колебательное движение. В результате у нас возникают определенные слуховые ощущения.

Таким образом, воздух служит *передающей средой*, т. е. веществом, в котором звук распространяется от источника к приемнику, в частности к нашему уху.

Если между источником и приемником удалить упругую звукопередающую среду, то звук распространяться не будет и, следовательно, приемник не воспримет его. Продемонстрируем это на опыте.

Поместим под колокол воздушного насоса часы-будильник (рис. 77). Пока в колоколе находится воздух, звук звонка мы слышим ясно. При откачивании воздуха из-под колокола звук постепенно слабеет и, наконец, становится неслышимым. Без передающей среды колебания тарелки звонка не могут распространяться, и звук не доходит до нашего уха. Впустим под колокол воздух и снова услышим звон.

Хорошо проводят звуки упругие вещества, например металлы, древесина, жидкости, газы.

Положим на один конец деревянной доски карманные часы, а сами отойдем к другому концу. Приложив ухо к доске, мы ясно услышим ход часов.

Привяжем к металлической ложке бечевку. Конец бечевки приложим к уху. Ударяя по ложке, услышим



Рис. 77

сильный звук. Еще более сильный звук услышим, если бечевку заменим проволокой.

Мягкие и пористые тела — плохие проводники звука. Чтобы защитить какое-нибудь помещение от проникновения посторонних звуков, стены, пол и потолок прокладывают прослойками из звукопоглощающих материалов. В качестве прослоек используют войлок, прессованную пробку, пористые камни, различные синтетические материалы (например, пенопласт), изготовленные на основе вспененных полимеров. Звук в таких прослойках быстро затухает.

Жидкости хорошо проводят звук. Рыбы, например, хорошо слышат шаги и голоса на берегу, это известно опытным рыбакам.

Итак, звук распространяется в любой упругой среде — твердой, жидкой и газообразной, но не может распространяться в пространстве, где нет вещества.

? Вопросы

1. С какой целью ставят опыт, изображенный на рисунке 77? Опишите, как этот опыт проводится и какой вывод из него следует.

2. Может ли звук распространяться в газах, жидкостях, твердых телах? Ответы подтвердите примерами.

3. Какие тела лучше проводят звук — упругие или пористые? Приведите примеры упругих и пористых тел.

4. Каким образом обеспечивают звукоизоляцию помещений, т. е. защищают помещения от посторонних звуков?

🔗 Упражнение 31

1. Может ли звук сильного взрыва на Луне быть слышен на Земле? Ответ обоснуйте.

2. Если к каждому из концов нити привязать по одной половинке мыльницы, то с помощью такого телефона можно переговариваться даже шепотом, находясь в разных комнатах. Объясните явление.

§ 38. Звуковые волны. Скорость звука

Известно, что звук распространяется в пространстве только при наличии какой-либо упругой среды. Среда необходима для передачи колебаний от источника звука к приемнику, например к уху челове-

ка. Другими словами, колебания источника создают в окружающей его среде упругую волну звуковой частоты. Волна, достигая уха, воздействует на барабанную перепонку, заставляя ее колебаться с частотой, соответствующей частоте источника звука. Дрожания барабанной перепонки передаются посредством системы косточек окончанием слухового нерва, раздражают их и тем вызывают ощущение звука.

В § 32 было отмечено, что в газах и жидкостях могут существовать только продольные упругие волны. Звук в воздухе, например, передается продольными волнами, т. е. чередующимися сгущениями и разрежениями воздуха, идущими от источника звука.

Звуковая волна, как и любые другие механические волны, распространяется в пространстве не мгновенно, а с определенной скоростью. Простейшие наблюдения позволяют убедиться в этом. Например, когда мы издали наблюдаем за стрельбой из ружья, то сначала видим огонь и дым, а потом через некоторое время слышим звук выстрела. Дым появляется в то же время, когда происходит первое звуковое колебание. Измерив промежуток времени t между моментом возникновения звука (момент появления дыма) и моментом, когда он доходит до уха, можно определить скорость распространения звука:

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

Измерения показывают, что скорость звука в воздухе при 0°C и нормальном атмосферном давлении равна 332 м/с .

Скорость звука в газах тем больше, чем выше их температура. Например, при 20°C скорость звука в воздухе равна 343 м/с , при 60°C — 366 м/с , при 100°C — 387 м/с . Объясняется это тем, что с повышением температуры возрастает упругость газов, а чем больше упругие силы, возникающие в среде при ее деформации, тем быстрее передаются колебания от одной точки к другой.

Скорость звука зависит также от свойств среды, в которой распространяется звук. Например, при 0°C скорость звука в водороде равна 1284 м/с , а в углекислом газе — 259 м/с .

Таблица 2

Скорость звука в различных средах, м/с (при $t = 20^\circ\text{C}$)

Вода	1483	Дерево (ель)	5000
Гранит	3850	Сталь	5000—6100
Медь	4700	Стекло	5500

В настоящее время скорость звука может быть измерена в любой среде. В таблице 2 приведены скорости звука в некоторых средах.

Поскольку звук — это волна, то для определения скорости звука, помимо формулы $v = \frac{s}{t}$, можно пользоваться известными вам формулами: $v = \frac{\lambda}{T}$ и $v = \nu\lambda$ (см. § 33). При решении школьных задач скорость звука в воздухе обычно считают равной 340 м/с.

? Вопросы

1. С какой частотой колеблется барабанная перепонка уха человека, когда до нее доходит звук?
2. Какую волну — продольную или поперечную — представляет собой звук, распространяющийся в воздухе? в воде?
3. Приведите пример, показывающий, что звуковая волна распространяется не мгновенно, а с определенной скоростью.
4. Чему равна скорость распространения звука в воздухе при 20 °С?
5. Зависит ли скорость звука от того, в какой среде он распространяется?

🎵 Упражнение 32

1. Определите скорость звука в воде, если источник, колеблющийся с периодом 0,002 с, возбуждает в воде волны длиной 2,9 м.
2. Определите длину звуковой волны частотой 725 Гц в воздухе, в воде и в стекле.
3. По одному концу длинной металлической трубы один раз ударили молотком. Будет ли звук от удара распространяться ко второму концу трубы по металлу? по воздуху внутри трубы? Сколько ударов услышит человек, стоящий у другого конца трубы?
4. Наблюдатель, стоящий около прямолинейного участка железной дороги, увидел пар над свистком идущего вдали паровоза. Через 2 с после появления пара он услышал звук свистка, а через 34 с паровоз прошел мимо наблюдателя. Определите скорость движения паровоза.
- 5*. Наблюдатель удаляется от колокола, в который бьют каждую секунду. Сначала видимые и слышимые удары совпадают. Потом

они перестают совпадать. Затем на некотором расстоянии наблюдателя от колокола видимые и слышимые удары снова совпадают. Объясните это явление.

§ 39. Отражение звука. Эхо

Каждый из вас знаком с таким звуковым явлением, как эхо. Эхо образуется в результате отражения звука от различных преград — стен большого пустого помещения, леса, сводов высокой арки в здании (рис. 78).

Но почему мы не слышим эха в небольшой квартире? Ведь и в ней звук должен отражаться от стен, потолка, пола.

Оказывается, мы слышим эхо лишь в том случае, когда отраженный звук воспринимается отдельно от произнесенного. Для этого нужно, чтобы промежуток времени между воздействием этих двух звуков на ушную барабанную перепонку составлял не менее 0,06 с.

Давайте определим, через какое время после произнесенного вами короткого возгласа отраженный от стены звук достигнет вашего уха, если вы стоите на расстоянии 3 м от этой стены.

Звук должен пройти двойное расстояние — до стены и обратно, т. е. 6 м, распространяясь со скоростью 340 м/с. На это потребуется время $t = s : v$, т. е.

$$t = 6 \text{ м} : 340 \text{ м/с} \approx 0,02 \text{ с.}$$

В данном случае интервал между двумя воспринимаемыми вами звуками — произнесенным и отраженным — значительно меньше того, который необходим, чтобы услышать эхо. Кроме того, образованию эха в комнате препятствует находящаяся в ней мебель, шторы и другие предметы, частично поглощающие отраженный звук. Поэтому в таком помещении речь людей и другие звуки не искажаются эхом и звучат четко и разборливо.

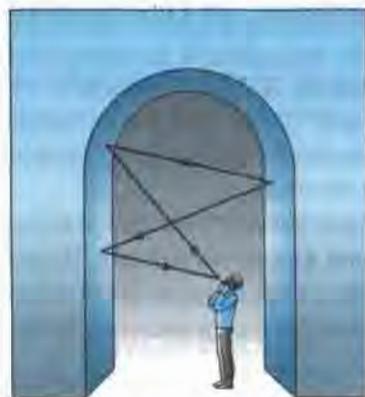


Рис. 78

Большие полупустые помещения с гладкими стенами, полом и потолком обладают свойством очень хорошо отражать звуковые волны. В таком помещении благодаря набеганию предшествующих звуковых волн на последующие получается

наложение звуков, и образуется гул. Для улучшения звуковых свойств больших залов и аудиторий их стены часто облицовывают звукопоглощающими материалами (см. § 37).

На свойстве звука отражаться от гладких поверхностей основано действие рупора — расширяющейся трубы обычно круглого или прямоугольного сечения (рис. 79). При использовании рупора звуковые волны не рассеиваются во все стороны, а образуют узконаправленный пучок, за счет чего мощность звука увеличивается и он распространяется на большее расстояние.



Рис. 79

? Вопросы

1. В результате чего образуется эхо?
2. Почему эхо не возникает в маленькой, заполненной мебелью комнате, но возникает в большом полупустом помещении?
3. Как можно улучшить звуковые свойства большого зала?
4. Почему при использовании рупора звук распространяется на большее расстояние?

§ 40. Звуковой резонанс

Мы знаем, что амплитуда установившихся вынужденных механических колебаний достигает наибольшего значения в том случае, если частота вынуждающей силы совпадает с собственной частотой колебательной системы. Это явление называется *резонансом* (см. § 30).

Например, довольно тяжелый нитяной маятник (рис. 80) можно сильно раскачать, если периодически дуть на него (даже очень слабой струей) в направлении его движения с частотой, равной его собственной частоте.

Резонанс может быть вызван и действием звуковых волн. Чтобы пронаблюдать это, сделаем следующий опыт. Поставим рядом два одинаковых камертона *A* и *B*, обратив отверстия ящиков, на которых они укреплены, навстречу друг другу (рис. 81).



Рис. 80

Ударяя резиновым молотком по камертону *A*, приведем его в колебание, а затем приглушим пальцами. Мы услышим звук, издаваемый камертоном *B*, который отзывается на колебания камертона *A* подобно тому, как в опытах с маятниками (см. рис. 64, б) маятник *I* отзывался на колебания маятника *Э*.

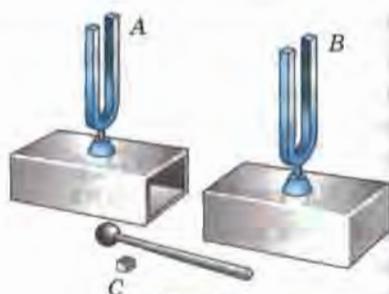


Рис. 81

Изменим период колебания камертона *B*, надев на его ножку небольшую муфточку *C*. Повторив опыт, обнаружим, что теперь камертон *B* уже не отзывается на колебания камертона *A*.

Звуковые волны, образованные камертоном *A*, дойдя до камертона *B*, возбуждают вынужденные колебания его с частотой, равной частоте колебаний камертона *A*. Если частота колебаний камертона *B* такая же, как и камертона *A*, то имеет место резонанс: камертон *B* колеблется сильно. Если же частота колебаний камертона *B* иная, то вынужденные колебания его будут настолько слабыми, что звука мы не услышим.

Ящики, на которых установлены камертоны, способствуют усилению звука и наиболее полной передаче энергии от одного камертона к другому. Усиление звука происходит за счет колебаний самого ящика и особенно столба воздуха в нем. Размеры ящика подбирают таким образом, чтобы собственная частота воздушного столба в нем совпадала с частотой колебаний камертона. При этом столб воздуха колеблется в резонанс с камертоном, т. е. амплитуда его колебаний и, соответственно, громкость звука достигают наибольших значений.

Камертон, снабженный таким ящиком (*резонатором*), издает более громкий, но менее длительный звук (по закону сохранения энергии).

В музыкальных инструментах роль резонаторов выполняют части их корпусов. Например, в гитаре, скрипке и других подобных им струнных инструментах резонаторами служат деки, которые усиливают издаваемые струнами звуки и придают звучанию инструмента характерную для него окраску — тембр (см. § 35). Тембр звука зависит не только от формы и размера резонатора, но и от того, из какого дерева он изготовлен, и даже от состава лака, покрывающего его.

Тембр определяется также материалом, из которого сделана струна, и тем, гладкая она или витая.

Резонаторы имеются и в нашем голосовом аппарате. Источники звука в голосовом аппарате — голосовые связки. Они приходят в колебание благодаря продуванию воздуха из легких и возбуждают звук, основной тон которого зависит от их натяжения. Этот звук богат обертонами. Гортань усиливает те из обертонов, частота колебаний которых близка к ее собственной частоте. Дальше звуковые волны попадают в полость рта. Для произнесения каждой гласной необходимо особое положение губ, языка и определенная форма резонаторной полости во рту.

? Вопросы

1. Приведите примеры проявления звукового резонанса, не упомянутые в тексте параграфа.
2. Для чего камертоны устанавливают на резонаторных ящиках?
3. Каково назначение резонаторов, применяемых в музыкальных инструментах?
4. От чего зависит тембр звука?
5. Что является источником голоса человека?

§ 41. Интерференция звука

Рассмотрим опыт по сложению звуковых волн от двух источников (рис. 82).

Источниками звука служат громкоговорители $Гр_1$ и $Гр_2$, подключенные к звуковому генератору ЗГ. Звук, излучаемый громкоговорителями, попадая в микрофон М, преобразуется в электрические



Рис. 82

колебания. Эти колебания усиливаются усилителем низкой частоты УНЧ и регистрируются гальванометром Г.

Установим громкоговорители на расстоянии 1—1,5 м от микрофона (на рис. 82 это расстояние не соблюдено). Между громкоговорителями и микрофоном разместим демонстрационный метр. Подключим к звуковому генератору сначала громкоговоритель $Гр_1$. Включим генератор и настроим его на частоту 1000 Гц, т. е. на длину волны, приблизительно равную 34 см.

Пользуясь регулятором усилителя низкой частоты, добьемся того, чтобы стрелка гальванометра, отклонившаяся при включении звукового генератора, была расположена не дальше середины шкалы.

Отключим от звукового генератора громкоговоритель $Гр_1$ и подключим $Гр_2$. Мы увидим, что стрелка гальванометра отклонилась примерно до того же деления, что и в первом случае. Значит, звуковые волны одинаковых частот, излучаемые громкоговорителями, будут иметь также и равные амплитуды колебаний.

Теперь подключим оба громкоговорителя одновременно. При этом стрелка гальванометра отклонится почти до конца шкалы, т. е. показания гальванометра увеличатся по сравнению с тем случаем, когда звук излучался каждым громкоговорителем в отдельности.

Увеличение показаний гальванометра говорит о том, что звуковые волны, складываясь в точке М, усиливают друг друга, т. е. амплитуда колебаний в суммарной звуковой волне больше, чем в одной.

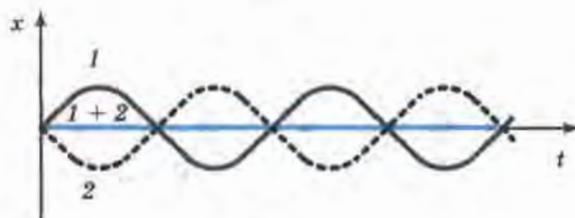
Теперь будем медленно приближать второй громкоговоритель ($Гр_2$) к микрофону, перемещая его вдоль демонстрационного метра (рис. 83, а). При этом стрелка гальванометра начнет перемещаться к нулю. Когда расстояние между громкоговорителем и микрофоном станет примерно на 17 см (т. е. на половину длины звуковой волны) меньше, чем прежде, показания гальванометра уменьшатся до нуля.

Это означает, что при таком расположении громкоговорителей и микрофона звуковые волны, приходя в точку М, в любой момент времени гасят друг друга, т. е. амплитуда суммарной волны в точке М равна нулю.

На рисунке 83, а показано, что расстояние, пройденное волной 1 до точки М, больше расстояния, пройденного до той же точки волной 2, на величину d . Разность расстояний d называется *разностью хода двух волн*. Из рисунка 83, а понятно, что при разности хода, равной половине длины волны, волны 1 и 2, излучаемые в оди-



а)



б)

Рис. 83

наковых фазах, в любой момент времени будут приходить в точку М в противоположных фазах.

На графике (рис. 83, б) мы видим, что при сложении в точке М волн 1 и 2, колебания в которых происходят с одинаковыми амплитудами и в противоположных фазах, амплитуда суммарной волны в любой момент времени равна нулю, т. е. минимальна.

При дальнейшем приближении к микрофону второго громкоговорителя (Гр₂) показания гальванометра начнут возрастать и достигнут наибольшего значения, когда разность хода d станет равна 34 см, т. е. одной длине волны (рис. 84, а). Как видно из рисунка, волны в этом случае приходят в точку М в одинаковых фазах, и, судя по показаниям гальванометра, в любой момент времени они усиливают друг друга.

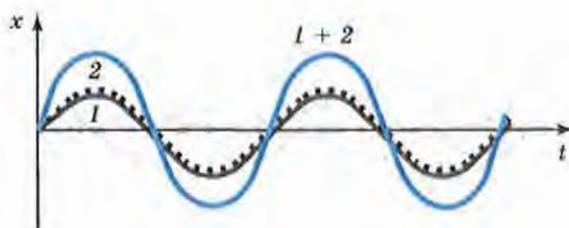
На графике (рис. 84, б) показано, что в этом случае амплитуда суммарной звуковой волны в два раза больше амплитуды любой из двух проходящих в точку М волн.

Продолжая приближать громкоговоритель Гр₂ к микрофону, мы заметим такую закономерность:

— если разность хода равна нечетному числу полуволин ($1 \cdot \frac{\lambda}{2}$, $3 \cdot \frac{\lambda}{2}$, $5 \cdot \frac{\lambda}{2}$ и т. д.), то в любой момент времени волны будут прихо-



а)



б)

Рис. 84

дить в точку М в противоположных фазах и гасить друг друга (*амплитуда суммарной волны равна нулю*);

— если же разность хода равна целому числу длин волн (λ , 2λ , 3λ , 4λ и т. д.), то в любой момент времени волны будут приходить в точку М в одинаковых фазах и усиливать друг друга (*амплитуда суммарной волны равна удвоенной амплитуде одной из волн*).

Следует помнить, что эта закономерность выполняется только при условии, что источники волн колеблются с одной и той же частотой и разность фаз их колебаний не меняется со временем. Такие источники и излучаемые ими волны называются *когерентными*.

Мы рассмотрели результат сложения звуковых волн только в одной точке М, где находился микрофон. Если бы мы, оставив оба громкоговорителя на их первоначальных местах, стали перемещать микрофон в разных направлениях, то обнаружили бы, что в пространстве перед источниками звуковых волн образуется не меняющаяся со временем картина *чередования* минимумов и максимумов амплитуд колебаний. Это значит, что в одних точках (куда волны приходят в одинаковых фазах) звуковые колебания всегда происходят с наибольшей амплитудой. Благодаря этому звук в этих точках самый громкий. В других точках (куда волны приходят в противоположных фазах) амплитуда колебаний равна нулю, поэтому в этих

местах звука нет. В остальных точках пространства колебания происходят с амплитудами, которые меньше суммы амплитуд волн 1 и 2. Причем каждой точке соответствует своя, не меняющаяся со временем амплитуда.

Такая не меняющаяся со временем картина распределения в пространстве максимумов и минимумов амплитуд колебаний называется *интерференционной картиной*. Интерференционная картина может получиться только при сложении волн от когерентных источников.

Явление сложения в пространстве волн, при котором образуется постоянное во времени распределение амплитуд результирующих колебаний, называется интерференцией.

В том, что при сложении двух когерентных звуковых волн в пространстве образуется интерференционная картина, можно убедиться и на слух. Для этого поворачивают оба излучающих звук громкоговорителя в сторону аудитории. Каждый учащийся, прикрыв одно ухо рукой и медленно наклоняясь то влево, то вправо, будет слышать либо усиление, либо ослабление громкости звука в зависимости от того, в какую зону попадает его открытое ухо — в область интерференционного максимума или минимума.

Явление интерференции характерно для волн любых видов: упругих, электромагнитных, волн на поверхности воды.

? Вопросы

1. Пользуясь рисунками 82—84, расскажите кратко, как проводился опыт по сложению звуковых волн.
2. Что называют разностью хода двух волн?
3. Какая закономерность была выявлена в результате опыта, изображенного на рисунках 82—84?
4. Какие волны называются когерентными?
5. Что такое интерференционная картина и от каких источников она может получиться?
6. Какое явление называется интерференцией?
7. Как на слух можно убедиться в образовании интерференционной картины?
8. Для волн каких видов характерно явление интерференции?

§ 42. Магнитное поле и его графическое изображение

Из курса физики 8 класса вы узнали, что магнитное поле порождается электрическим током. Оно существует, например, вокруг металлического проводника с током. При этом ток создается электронами, направленно движущимися вдоль проводника. Магнитное поле возникает и в том случае, когда ток проходит через раствор электролита, где носителями зарядов являются положительно и отрицательно заряженные ионы, движущиеся навстречу друг другу.

Поскольку электрический ток — это направленное движение заряженных частиц, то можно сказать, что *магнитное поле создается движущимися заряженными частицами, как положительными, так и отрицательными.*

Напомним, что согласно гипотезе Ампера в атомах и молекулах вещества в результате движения электронов возникают кольцевые токи.

На рисунке 85 показано, что в магнитах эти элементарные кольцевые токи ориентированы одинаково. Поэтому магнитные поля, образующиеся вокруг каждого такого тока, имеют одинаковые направления. Эти поля усиливают друг друга, создавая поле внутри и вокруг магнита.



Рис. 85



Рис. 86

Для наглядного представления магнитного поля мы пользовались магнитными линиями (их называют также линиями магнитного поля)¹. Напомним, что *магнитные линии* — это воображаемые линии, вдоль которых расположились бы маленькие магнитные стрелки, помещенные в магнитное поле.

Магнитную линию можно провести через любую точку пространства, в котором существует магнитное поле.

На рисунке 86, а, б показано, что магнитная линия (как прямая, так и криволинейная) проводится так, чтобы в любой точке этой линии касательная к ней совпадала с осью магнитной стрелки, помещенной в эту точку.

Магнитные линии являются замкнутыми. Например, картина магнитных линий прямого проводника с током представляет собой концентрические окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной проводнику.

Из этих же рисунков видно, что за направление магнитной линии в какой-либо ее точке условно принимают направление, которое

¹ В § 46 будет дано более точное название и определение этих линий.



Рис. 87

указывает северный полюс магнитной стрелки, помещенной в эту точку.

В тех областях пространства, где магнитное поле более сильное, магнитные линии изображают ближе друг к другу, т. е. гуще, чем в тех местах, где поле слабее. Например, поле, изображенное на рисунке 87, слева сильнее, чем справа.

Таким образом, по картине магнитных линий можно судить не только о направлении, но и о величине магнитного поля (т. е. о том, в каких точках пространства поле действует на магнитную стрелку с большей силой, а в каких — с меньшей).

? Вопросы

1. Чем порождается магнитное поле?
2. Чем создается магнитное поле постоянного магнита?
3. Что такое магнитные линии?
4. Как располагаются магнитные стрелки в магнитном поле, линии которого прямолинейны? криволинейны?
5. Что принимают за направление магнитной линии в какой-либо ее точке?
6. Как с помощью магнитных линий можно показать, что в одной области пространства поле сильнее, чем в другой?
7. О чем можно судить по картине линий магнитного поля?

♣ Упражнение 33

1. На рисунке 88 изображен участок BC проводника с током. Вокруг него в одной из плоскостей показаны линии магнитного поля, созданного этим током. Существует ли магнитное поле в точке A ?

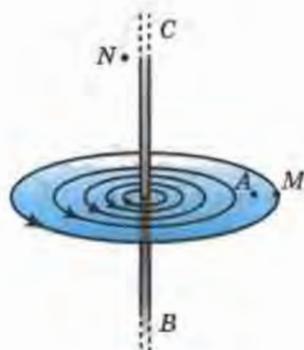


Рис. 88

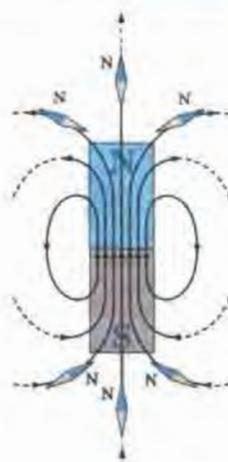


Рис. 89

2. На рисунке 88 изображены три точки: A , M , N . В какой из них магнитное поле тока, протекающего по проводнику BC , будет действовать на магнитную стрелку с наибольшей силой? с наименьшей силой?

§ 43. Неоднородное и однородное магнитное поле

Рассмотрим картину линий магнитного поля постоянного полосового магнита, изображенную на рисунке 89. Из курса физики 8 класса мы знаем, что магнитные линии выходят из северного полюса магнита и входят в южный. Внутри магнита они направлены от южного полюса к северному. Магнитные линии не имеют ни начала, ни конца: они либо замкнуты, либо, как средняя линия на рисунке, идут из бесконечности в бесконечность.

Вне магнита магнитные линии расположены наиболее густо у его полюсов. Значит, возле полюсов поле самое сильное, а по мере удаления от полюсов оно ослабевает. Чем ближе к полюсу магнита расположена магнитная стрелка, тем с большей по модулю силой действует на нее поле магнита. Поскольку магнитные линии искривлены, то направление силы, с которой поле действует на стрелку, тоже меняется от точки к точке.

Таким образом, сила, с которой поле полосового магнита действует на помещенную в это поле магнитную стрелку,

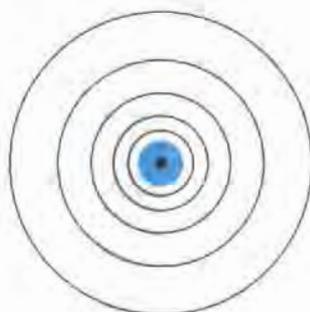


Рис. 90

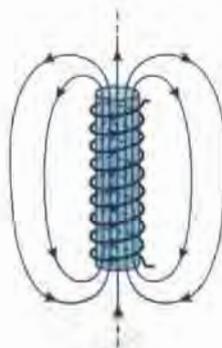


Рис. 91

ку, в разных точках поля может быть различной как по модулю, так и по направлению.

Такое поле называется *неоднородным*¹. Линии неоднородного магнитного поля искривлены, их густота меняется от точки к точке.

Еще одним примером неоднородного магнитного поля может служить поле вокруг прямолинейного проводника с током. На рисунке 90 изображен участок такого проводника, расположенный перпендикулярно к плоскости чертежа. Кружочком обозначено сечение проводника. Точка означает, что ток направлен из-за чертежа к нам, как будто мы видим острие стрелы, указывающей направление тока (ток, направленный от нас за чертеж, обозначают крестиком, как будто мы видим хвостовое оперение стрелы, направленной по току).

Из этого рисунка видно, что магнитные линии поля, созданного прямолинейным проводником с током, представляют собой концентрические окружности, расстояние между которыми увеличивается по мере удаления от проводника.

В некоторой ограниченной области пространства можно создать *однородное* магнитное поле, т. е. поле, в любой точке которого сила действия на магнитную стрелку одинакова по модулю и направлению.

На рисунке 91 показано однородное поле, возникающее внутри так называемого соленоида, т. е. проволочной цилиндрической катушки с током. Поле внутри соленоида можно считать однородным,

¹ Более строгое определение неоднородного и однородного магнитных полей приводится в § 47.



Рис. 92



Рис. 93

если длина соленоида значительно больше его диаметра (вне соленоида поле неоднородно, его магнитные линии расположены примерно так же, как у полосового магнита). Из этого рисунка мы видим, что *магнитные линии однородного магнитного поля параллельны друг другу и расположены с одинаковой густотой.*

Однородным является также поле внутри постоянного полосового магнита в центральной его части (см. рис. 89).

Для изображения магнитного поля пользуются следующим приемом. Если линии однородного магнитного поля расположены перпендикулярно к плоскости чертежа и направлены от нас за чертеж, то их изображают крестиками (рис. 92), а если из-за чертежа к нам — то точками (рис. 93). Как и в случае с током, каждый крестик — это как бы видимое нами хвостовое оперение летящей от нас стрелы, а точка — острое стрелы, летящей к нам (на обоих рисунках направление стрел совпадает с направлением магнитных линий).

? Вопросы

1. Что вы знаете о направлении и форме линий поля полосового магнита?
2. Какое магнитное поле — однородное или неоднородное — образуется вокруг полосового магнита? вокруг прямолинейного проводника с током? внутри соленоида, длина которого значительно больше его диаметра?
3. Что можно сказать о модуле и направлении силы, действующей на магнитную стрелку в разных точках неоднородного магнитного поля? однородного магнитного поля?
4. Сравните картины расположения линий в неоднородном и однородном магнитных полях.
5. Как изображают линии магнитного поля, направленные перпендикулярно к плоскости чертежа?

Упражнение 34

1. На рисунке 94 изображен проволочный виток с током и линии создаваемого этим током магнитного поля.

а) Есть ли среди указанных на рисунке точек A , B , C и D такие, в которых поле действовало бы на магнитную стрелку с одинаковой по модулю силой? ($AC = AD$, $AE = BE$.) Если такие точки есть, укажите их.

б) В какой из точек — A , B , C или D — поле действует на магнитную стрелку с наибольшей силой?

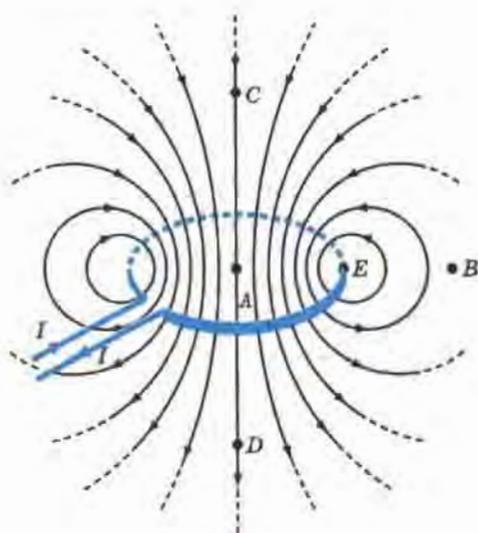


Рис. 94

2. Рассмотрите рисунок 94 и определите, можно ли в неоднородном магнитном поле, созданном витком с током, найти такие точки, в которых сила действия поля на магнитную стрелку была бы одинакова как по модулю, так и по направлению. Если да, то сделайте в тетради рисунок, аналогичный рисунку 94, и укажите на нем хотя бы две пары таких точек.

§ 44. Направление тока и направление линий его магнитного поля

На рисунке 95 показано расположение магнитных стрелок вокруг проводника с током, перпендикулярного к плоскости чертежа.

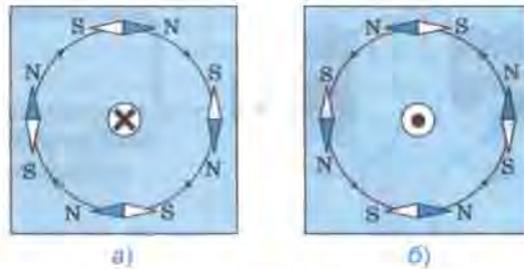


Рис. 95

Из рисунка видно, что изменение направления тока приводит к повороту всех магнитных стрелок на 180° . Причем в обоих случаях оси стрелок располагаются по касательным к магнитным линиям.

Из этого опыта следует, что направление линий магнитного поля тока зависит от направления тока в проводнике.

Эта связь может быть выражена простым правилом, которое называют *правилом буравчика* (или *правилом правого винта*).

Правило буравчика заключается в следующем:

если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением линий магнитного поля тока (рис. 96, 97).

С помощью правила буравчика по направлению тока можно определить направление линий магнитного поля, создаваемого этим током



Рис. 96



Рис. 97

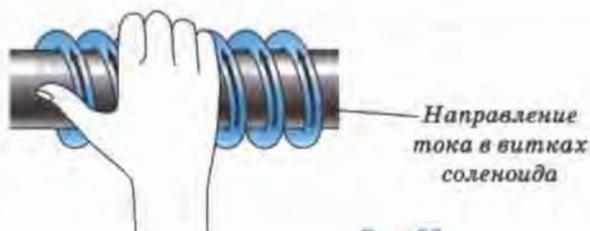


Рис. 98

ком, а по направлению линий магнитного поля — направление тока, создающего это поле.

Для определения направления линий магнитного поля соленоида удобнее пользоваться другим правилом, которое иногда называют *правилом правой руки*.

Это правило читается так:

если обхватить соленоид ладонью правой руки, направив четыре пальца по направлению тока в витках, то отставленный большой палец покажет направление линий магнитного поля внутри соленоида (рис. 98).

Вы знаете, что магнитное поле соленоида подобно полю постоянного полосового магнита (см. рис. 89 и 91). Соленоид, как и магнит, имеет полюсы: тот конец соленоида, из которого магнитные линии выходят, называется северным полюсом, а тот, в который входят, — южным.

Зная направление тока в соленоиде, по правилу правой руки можно определить направление магнитных линий внутри него, а значит, и его магнитные полюсы.

И наоборот, зная направление магнитных линий внутри соленоида или расположение его полюсов, можно определить направление тока в витках соленоида.

Правило правой руки можно применять и для определения направления линий магнитного поля в центре одиночного витка с током.

? Вопросы

1. Как на опыте можно показать связь между направлением тока в проводнике и направлением линий его магнитного поля?

2. Сформулируйте правило буравчика.

3. Что можно определить, используя правило буравчика?

4. Сформулируйте правило правой руки для соленоида.

5. Что можно определить с помощью правила правой руки?

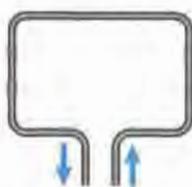


Рис. 99



Рис. 100

Упражнение 35

1. На рисунке 99 изображен проволочный прямоугольник, направление тока в нем показано стрелками. Перечертите рисунок в тетрадь и, пользуясь правилом буравчика, начертите вокруг каждой из его четырех сторон по одной магнитной линии, указав стрелкой ее направление.

2. На рисунке 100 показаны линии магнитного поля вокруг проводников с током. Проводники изображены кружочками. Перечертите рисунок в тетрадь и условными знаками обозначьте направления токов в проводниках, используя для этого правило буравчика.

3. Через катушку, внутри которой находится стальной стержень (рис. 101), пропускают ток указанного направления. Определите полюсы у полученного электромагнита. Как можно изменить положение полюсов у этого электромагнита?

4. Определите направление тока в катушке и полюсы у источника тока (рис. 102), если при прохождении тока в катушке возникают указанные на рисунке магнитные полюсы.

5. Направление тока в витках обмотки подковообразного электромагнита показано стрелками (рис. 103). Определите полюсы электромагнита.

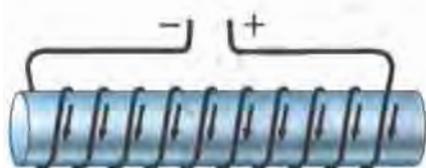


Рис. 101

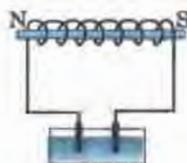


Рис. 102



Рис. 103

- * 6. Параллельные провода, по которым текут токи одного направления, притягиваются, а параллельные пучки электронов, движущихся в одном направлении, отталкиваются. В каком из этих случаев взаимодействие обусловлено электрическими силами, а в каком — магнитными? Почему вы так считаете?



§ 45. Обнаружение магнитного поля по его действию на электрический ток. Правило левой руки

Из курса физики 8 класса вы знаете, что *на всякий проводник с током, помещенный в магнитное поле и не совпадающий с его магнитными линиями, это поле действует с некоторой силой.*

Наличие такой силы можно показать с помощью установки, изображенной на рисунке 104. Проволочная трехсторонняя рамка $ABCD$ подвешена на крюках так, что может свободно отклоняться от вертикали. Сторона BC находится в области наиболее сильного поля дугообразного магнита, располагаясь между его полюсами (рис. 104, *а*). Рамка присоединена к источнику тока последовательно с реостатом и ключом.

При замыкании ключа в цепи возникает электрический ток, и сторона BC втягивается в пространство между полюсами (рис. 104, *б*).

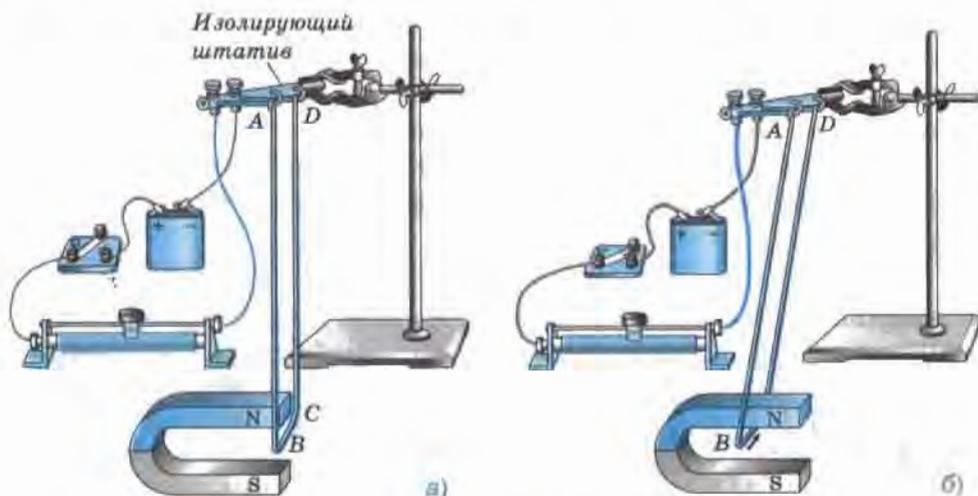


Рис. 104

Если убрать магнит, то при замыкании цепи проводник BC двигаться не будет. Значит, со стороны магнитного поля на проводник с током действует некоторая сила, отклоняющая его от первоначального положения.

Действие магнитного поля на проводник с током может быть использовано для обнаружения магнитного поля в данной области пространства.

Конечно, обнаружить магнитное поле проще с помощью компаса. Но действие магнитного поля на находящуюся в нем магнитную стрелку компаса, по существу, тоже сводится к действию поля на элементарные электрические токи, циркулирующие в молекулах и атомах магнитного вещества, из которого изготовлена стрелка.

Таким образом, магнитное поле создается электрическим током и обнаруживается по его действию на электрический ток.

Изменим направление тока в цепи, поменяв местами провода в гнездах изолирующего штатива (рис. 105). При этом изменится и направление движения проводника BC , а значит, и направление действующей на него силы.

Направление силы изменится и в том случае, если, не меняя направления тока, поменять местами полюсы магнита (т. е. изменить направление линий магнитного поля).

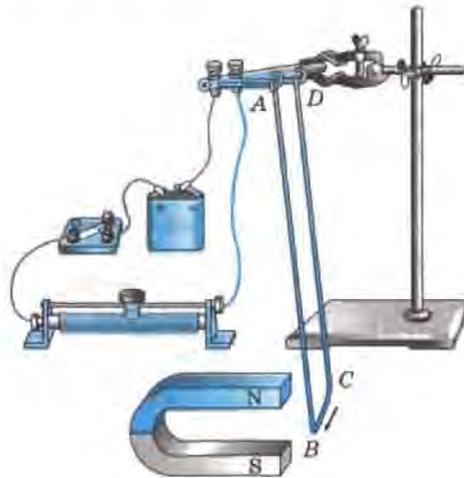


Рис. 105

Следовательно, *направление тока в проводнике, направление линий магнитного поля и направление силы, действующей на проводник, связаны между собой.*

Направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле, можно определить, пользуясь *правилом левой руки*. В наиболее простом случае, когда проводник расположен в плоскости, перпендикулярной линиям магнитного поля, это правило заключается в следующем:

если левую руку расположить так, чтобы линии магнитного поля входили в ладонь перпендикулярно к ней, а четыре пальца были направлены по току, то отставленный на 90° большой палец покажет направление действующей на проводник силы (рис. 106).

Пользуясь правилом левой руки, следует помнить, что за направление тока во внешней части электрической цепи (т. е. вне источника тока) принимается направление от положительного полюса источника тока к отрицательному (рис. 107). Другими словами, четыре пальца левой руки должны быть направлены против движения электронов в электрической цепи. В таких проводящих средах, как растворы электролитов, где электрический ток создается движением зарядов обоих знаков, направление тока, а значит, и направление че-

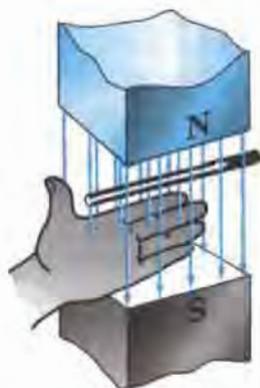


Рис. 106

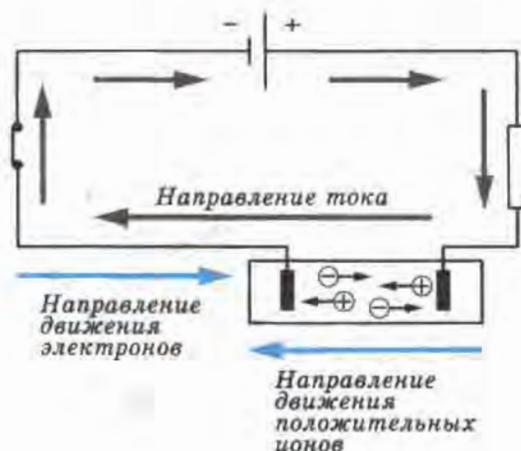


Рис. 107

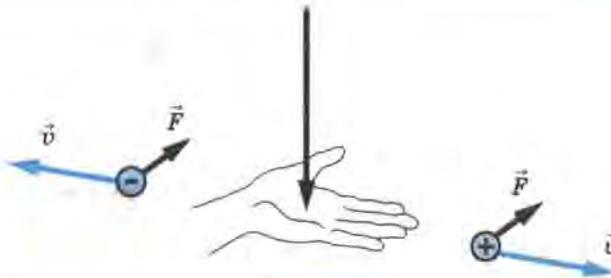


Рис. 108

тырех пальцев левой руки совпадает с направлением движения положительно заряженных частиц.

Легко понять, что с помощью правила левой руки можно определить направление силы, с которой магнитное поле действует на отдельно взятые движущиеся в нем частицы, как положительно, так и отрицательно заряженные. Для наиболее простого случая, когда частица движется в плоскости, перпендикулярной магнитным линиям, это правило формулируется следующим образом:

если левую руку расположить так, чтобы линии магнитного поля входили в ладонь перпендикулярно к ней, а четыре пальца были направлены по движению положительно заряженной частицы (или против движения отрицательно заряженной), то отставленный на 90° большой палец покажет направление действующей на частицу силы (рис. 108—110).

Пользуясь правилом левой руки, можно определить не только направление силы, действующей в магнитном поле на проводник с током или движущуюся заряженную частицу. По этому правилу

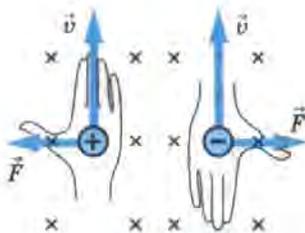


Рис. 109

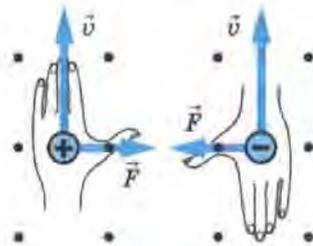


Рис. 110

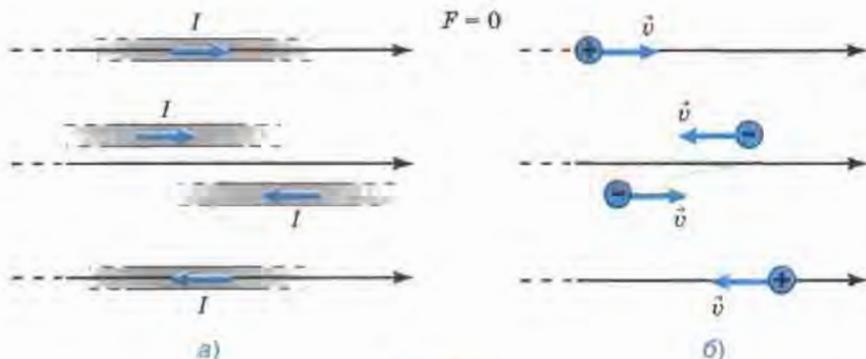


Рис. 111

мы можем определить направление тока (если знаем, как направлены линии магнитного поля и действующая на проводник сила), направление магнитных линий (если известны направления тока и силы), знак заряда движущейся частицы (по направлению магнитных линий, силы и скорости движения частицы) и т. д.

Следует отметить, что сила действия магнитного поля на проводник с током или движущуюся заряженную частицу равна нулю, если направление тока в проводнике или скорость частицы совпадают с линией магнитной индукции или параллельны ей (рис. 111, а, б).

? Вопросы

1. Как на опыте обнаружить наличие силы, действующей на проводник с током в магнитном поле?
2. Как обнаруживается магнитное поле?
3. От чего зависит направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле?
4. Как читается правило левой руки для находящегося в магнитном поле проводника с током? для движущейся в этом поле заряженной частицы?
5. Что принимается за направление тока во внешней части электрической цепи?
6. Что можно определить, пользуясь правилом левой руки?

7. В каком случае сила действия магнитного поля на проводник с током или движущуюся заряженную частицу равна нулю?

Упражнение 36

1. В какую сторону покатится легкая алюминиевая трубочка при замыкании цепи (рис. 112)?

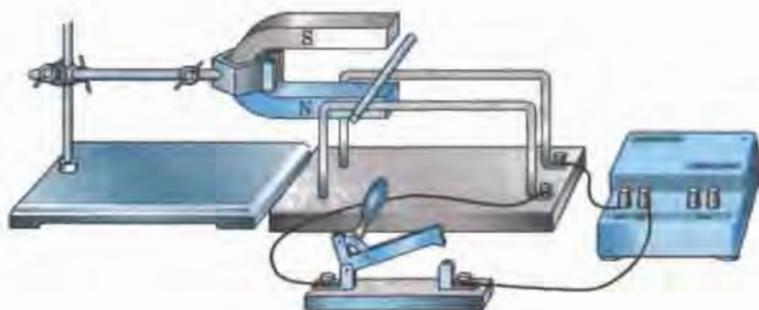


Рис. 112

2. На рисунке 113 изображены два оголенных проводника, соединенных с источником тока, и легкая алюминиевая трубочка AB . Вся установка находится в магнитном поле. Определите направление тока в трубочке AB , если в результате взаимодействия этого тока с магнитным полем трубочка катится по проводникам в направлении, указанном на рисунке. Какой полюс источника тока является положительным, а какой — отрицательным?

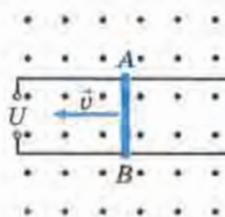


Рис. 113

3. Между полюсами магнитов (рис. 114) расположены четыре проводника с током. Определите, в какую сторону движется каждый из них.



Рис. 114

4. На рисунке 115 изображена отрицательно заряженная частица, движущаяся со скоростью \vec{v} в магнитном поле. Сделайте такой

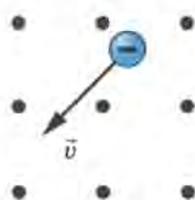


Рис. 115

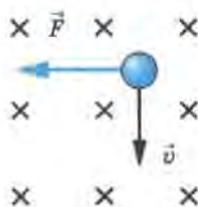


Рис. 116

же рисунок в тетради и укажите стрелочкой направление силы, с которой поле действует на частицу.

5. Магнитное поле действует с силой \vec{F} на частицу, движущуюся со скоростью \vec{v} (рис. 116). Определите знак заряда частицы.

§ 46. Индукция магнитного поля

Многие из вас наверняка замечали, что одни магниты создают в пространстве более сильные поля, чем другие. Например, поле первого магнита, изображенного на рисунке 117, сильнее, чем второго. Действительно, при одном и том же расстоянии до гвоздей, рассыпанных на столе, сила притяжения к первому магниту оказалась достаточной для преодоления силы тяжести гвоздей, а сила притяжения ко второму — нет.

Какой же величиной можно охарактеризовать магнитное поле?

Магнитное поле характеризуется векторной физической величиной, которая обозначается символом \vec{B} и называется индукцией магнитного поля (или магнитной индукцией).

Поясним, что это за величина.

Мы знаем, что магнитное поле может действовать с определенной силой на помещенный в него проводник с током.

Поместим прямолинейный участок проводника AB с током в магнитное поле перпендикулярно его магнитным линиям (рис. 118). При показанном на рисунке направлении силы тока I в проводнике и расположении полюсов магнита действующая на проводник сила \vec{F} , согласно правилу левой руки, будет направлена вниз. Определить эту силу можно, вычислив вес гирьки, которую приходится добавлять на правую чашку весов для уравновешивания силы \vec{F} .

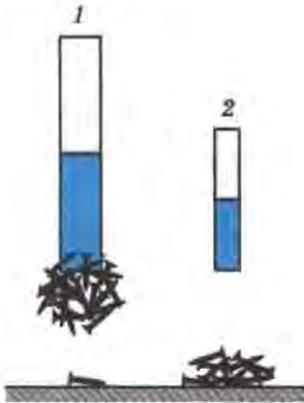


Рис. 117

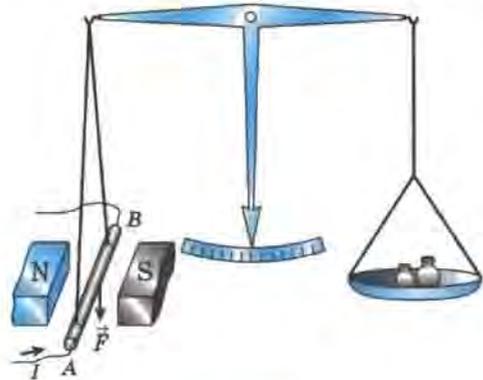


Рис. 118

Опыты показывают, что модуль этой силы зависит от самого магнитного поля — более мощный магнит действует на данный проводник с большей силой. Кроме того, сила действия магнитного поля на проводник пропорциональна длине l этого проводника и силе тока I в нем.

Отношение же модуля силы F к длине проводника l и силе тока I (т. е. $\frac{F}{Il}$) есть *величина постоянная*. Она не зависит ни от длины проводника, ни от силы тока в нем. Отношение $\frac{F}{Il}$ зависит только от поля и может служить его количественной характеристикой.

Эта величина и принимается за модуль вектора магнитной индукции:

$$B = \frac{F}{Il}. \quad (1)$$

Модуль вектора магнитной индукции B равен отношению модуля силы F , с которой магнитное поле действует на расположенный перпендикулярно магнитным линиям проводник с током, к силе тока I в проводнике и его длине l .

По формуле (1) можно определить индукцию *однородного* магнитного поля.

В СИ единица магнитной индукции называется *тесла* (Тл) в честь югославского электротехника *Николы Тесла*.

С помощью формулы (1) можно установить взаимосвязь между единицей магнитной индукции и единицами других величин СИ:

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

До сих пор для графического изображения магнитных полей мы пользовались линиями, которые условно называли магнитными линиями или линиями магнитного поля (§ 43). Теперь мы можем уточнить название и дать определение этих линий.

Более точное название магнитных линий — *линии магнитной индукции* (или *линии индукции магнитного поля*).

Линиями магнитной индукции называются линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают с направлением вектора магнитной индукции.

Данное определение линий магнитной индукции можно пояснить с помощью рисунка 119. На нем кружочком с точкой изображен проводник с током, расположенный перпендикулярно к плоскости чертежа. Окружность вокруг проводника представляет собой одну из линий индукции магнитного поля, созданного протекающим по проводнику током.

Мы видим, что проведенные к этой окружности касательные в любой точке совпадают с вектором магнитной индукции.

Теперь, пользуясь термином «магнитная индукция», дадим более строгое, чем в § 43, определение однородного и неоднородного магнитных полей. Для этого обратимся к рисункам 120—122.

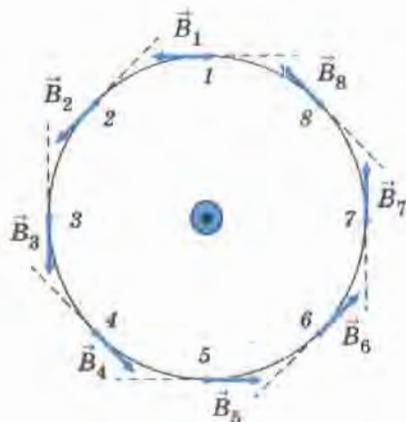


Рис. 119

В изображенном на рисунке 120 однородном магнитном поле (линии магнитной индукции которого расположены параллельно друг другу и с одинаковой густотой) вектор магнитной индукции \vec{B} во всех произвольно выбранных точках поля одинаков как по модулю, так и по направлению.

Сравним это поле с двумя неоднородными полями: полем постоянного

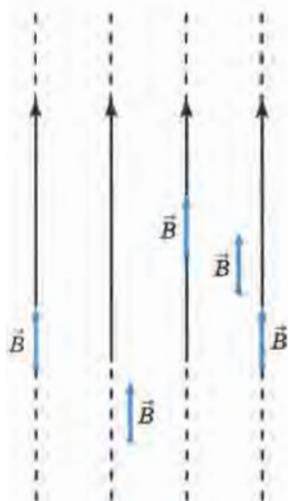


Рис. 120

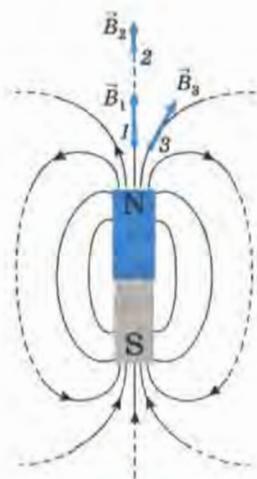


Рис. 121

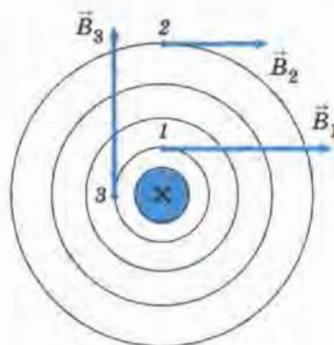


Рис. 122

полосового магнита (рис. 121) и полем тока, протекающего по прямолинейному участку проводника (рис. 122).

Легко заметить, что в неоднородных полях, в отличие от однородного, вектор магнитной индукции меняется от точки к точке. Например, в каждом из рассматриваемых неоднородных полей при переходе из точки 1 в точку 2 вектор магнитной индукции меняется по модулю, при переходе из точки 1 в точку 3 — по направлению, при переходе из точки 2 в точку 3 вектор магнитной индукции меняется как по модулю, так и по направлению.

Магнитное поле называется однородным, если во всех его точках магнитная индукция \vec{B} одинакова. В противном случае поле называется неоднородным.

Чем больше магнитная индукция в данной точке поля, тем с большей силой будет действовать поле в этой точке на магнитную стрелку или движущийся электрический заряд.

? Вопросы

1. Как называется и каким символом обозначается векторная величина, которая служит количественной характеристикой магнитного поля?

2. По какой формуле определяется модуль вектора магнитной индукции однородного магнитного поля?

3. Что принимается за единицу магнитной индукции? Как называется эта единица?

4. Что называется линиями магнитной индукции?

5. В каком случае магнитное поле называется однородным, а в каком — неоднородным?

6. Как зависит сила, действующая в данной точке магнитного поля на магнитную стрелку или движущийся заряд, от магнитной индукции в этой точке?



Упражнение 37

1. В однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции поместили прямолинейный проводник, по которому протекает ток силой 4 А. Определите индукцию этого поля, если оно действует с силой 0,2 Н на каждые 10 см длины проводника.

2. В магнитное поле с индукцией B поместили проводник с током. Через некоторое время силу тока в проводнике уменьшили в 2 раза. Изменилась ли при этом индукция B магнитного поля, в которое был помещен проводник? Сопровождалось ли уменьшение силы тока изменением какой-либо другой физической величины? Если да, то что это за величина и как она изменилась?

§ 47. Магнитный поток

На рисунке 123, а изображен проволочный контур, помещенный в однородное магнитное поле. Принято говорить, что контур в магнитном поле пронизывается определенным **магнитным потоком** Φ , или **потоком вектора магнитной индукции**.

Согласно определению (которое дается в курсе физики старших классов) магнитный поток, пронизывающий контур, пропорционален модулю вектора индукции однородного магнитного поля и площади, ограниченной этим контуром. Кроме того, магнитный поток зависит от того, как расположена плоскость контура по отношению к линиям магнитной индукции.

Допустим, что индукция магнитного поля, пронизывающего ограниченную контуром площадь, стала больше. Это могло произойти, например, в результате увеличения силы тока, создающего это

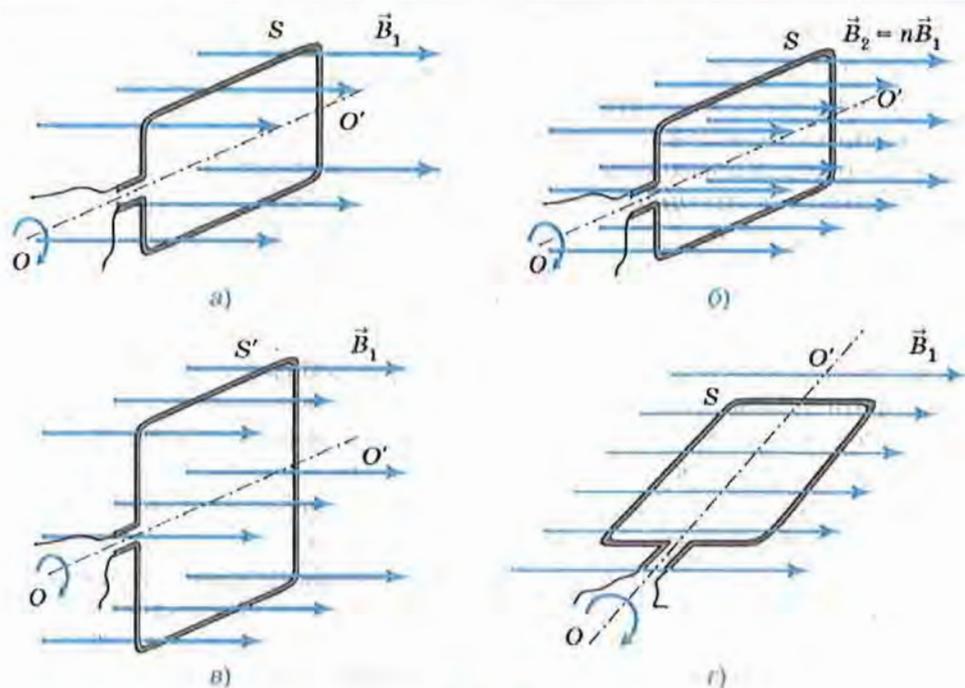


Рис. 123

магнитное поле, или при перемещении контура в другое, более сильное поле.

Поскольку поток пропорционален индукции, то при ее увеличении в n раз (от значения B_1 до значения $B_2 = nB_1$, как показано на рисунке 123, а, б) во столько же раз возрастет и магнитный поток, пронизывающий площадь S данного контура.

При том же самом магнитном поле с индукцией B_1 магнитный поток, пронизывающий большую площадь S' (рис. 123, в), будет во столько же раз больше потока через площадь S (см. рис. 123, а), во сколько раз S' больше, чем S .

Если плоскость контура перпендикулярна к линиям магнитной индукции (см. рис. 123, а), то при данной индукции B_1 поток Φ , пронизывающий ограниченную этим контуром площадь S , максимален.

При вращении контура вокруг оси OO' проходящей сквозь него поток уменьшается (по закону косинуса) и становится равным нулю, когда плоскость контура располагается параллельно линиям магнитной индукции (рис. 123, г). В этом случае линии магнитной индукции как бы скользят по плоскости рамки, не пронизывая ее.

Таким образом, магнитный поток, пронизывающий площадь контура, меняется при изменении модуля вектора магнитной индукции \vec{B} , площади контура S и при вращении контура, т. е. при изменении его ориентации по отношению к линиям индукции магнитного поля.

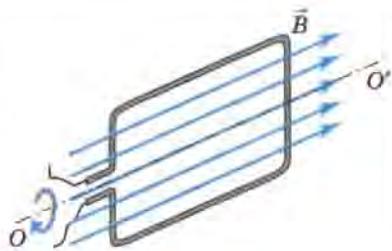


Рис. 124

Если же контур вращается так, что при любом его положении линии магнитной индукции лежат в плоскости контура, не пересекая ограниченную им площадь (рис. 124), то поток не меняется: в любой момент времени он равен нулю.

? Вопросы

1. От чего зависит магнитный поток, пронизывающий площадь плоского контура, помещенного в однородное магнитное поле?

2. Как меняется магнитный поток при увеличении в n раз магнитной индукции, если ни площадь, ни ориентация контура не меняются?

3. При какой ориентации контура по отношению к линиям магнитной индукции магнитный поток, пронизывающий площадь этого контура, максимален? равен нулю?

4. Меняется ли магнитный поток при таком вращении контура, когда линии магнитной индукции то пронизывают его, то скользят по его плоскости?

⚡ Упражнение 38

Проволочная катушка K_1 со стальным сердечником включена в цепь источника постоянного тока последовательно с реостатом R и ключом K (рис. 125). Электрический ток, протекающий по виткам катушки K_1 , создает в пространстве вокруг нее магнитное поле. В поле катушки K_1 находится такая же катушка K_2 .

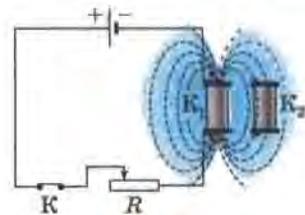


Рис. 125

Каким образом можно менять магнитный поток, пронизывающий катушку K_2 ? Рассмотрите все возможные варианты.

§ 48. Явление электромагнитной индукции

Известно, что вокруг электрического тока всегда существует магнитное поле. Электрический ток и магнитное поле неотделимы друг от друга.

Но если электрический ток, как говорят, «создает» магнитное поле, то не существует ли обратного явления? Нельзя ли с помощью магнитного поля «создать» электрический ток? Такую задачу в начале XIX в. пытались решить многие ученые. Поставил ее перед собой и английский ученый **Майкл Фарадей**. «Превратить магнетизм в электричество» — так записал в своем дневнике эту задачу Фарадей в 1822 г. Почти 10 лет упорной работы потребовалось Фарадею для ее решения.

Чтобы понять, как Фарадею удалось «превратить магнетизм в электричество», выполним некоторые опыты Фарадея, используя современные приборы.

На рисунке 126, *а* показано, что если в катушку, замкнутую на гальванометр, вдвигается магнит, то стрелка гальванометра при этом отклоняется, указывая на появление *индукционного* (наведенного) тока в цепи катушки. Индукционный ток в проводнике представляет



Майкл Фарадей
(1791—1867)

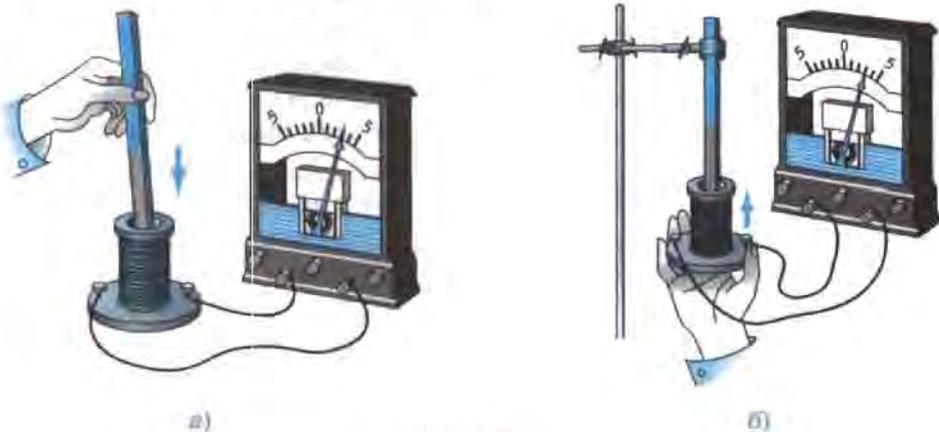


Рис. 126



Рис. 127

собой такое же упорядоченное движение электронов, как и ток, полученный от гальванического элемента или аккумулятора. Название «индукционный» указывает только на причину его возникновения.

При извлечении магнита из катушки снова наблюдается отклонение стрелки гальванометра, но в противоположную сторону, что указывает на возникновение в катушке тока противоположного направления.

Как только движение магнита относительно катушки прекращается, прекращается и ток. Следовательно, ток в цепи катушки существует только во время движения магнита относительно катушки.

Опыт можно видоизменить. На неподвижный магнит будем надевать катушку и снимать ее (рис. 126, б). И опять можно обнаружить, что во время движения катушки относительно магнита в цепи снова появляется ток.

На рисунке 127 изображена катушка А, включенная в цепь источника тока. Эта катушка вставлена в другую катушку С, подключенную к гальванометру. При замыкании и размыкании цепи катушки А в катушке С возникает индукционный ток.

Можно вызвать появление индукционного тока в катушке С и путем изменения силы тока в катушке А или движением этих катушек относительно друг друга.

Прделаем еще один опыт. Поместим в магнитное поле плоский контур из проводника, концы которого соединим с гальванометром (рис. 128, а). При повороте контура гальванометр отмечает появление в нем индукционного тока. Ток будет появляться и в том случае, если рядом с контуром или внутри него вращать магнит (рис. 128, б).

Во всех рассмотренных нами опытах *индукционный ток возникал при изменении магнитного потока, пронизывающего охваченную проводником площадь.*

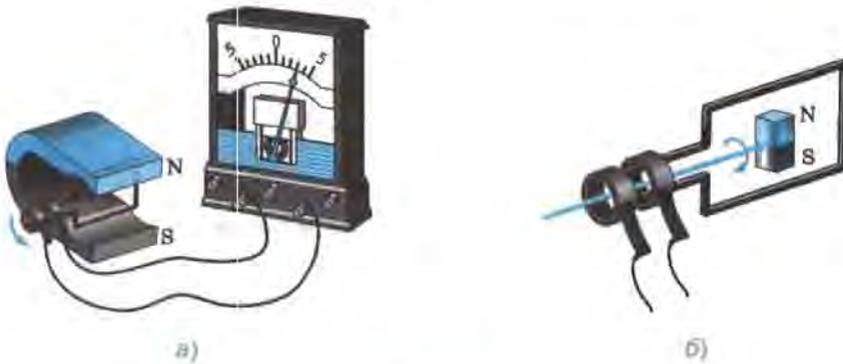


Рис. 126

В случаях, изображенных на рисунках 126, а, б и 127, поток менялся за счет изменения индукции магнитного поля. Действительно, при движении магнита и катушки относительно друг друга (см. рис. 126, а, б) катушка попадала в области поля с большей или меньшей магнитной индукцией (так как поле магнита неоднородно). При замыкании и размыкании цепи катушки А индукция создаваемого этой катушкой магнитного поля менялась за счет изменения силы тока в ней.

При вращении проволочного контура в магнитном поле (см. рис. 128, а) или магнита относительно контура (см. рис. 128, б) магнитный поток менялся за счет изменения ориентации этого контура по отношению к линиям магнитной индукции.

Итак, при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего контур замкнутого проводника, в этом проводнике возникает электрический ток, существующий в течение всего процесса изменения магнитного потока.

В этом и заключается явление *электромагнитной индукции*.

Открытие электромагнитной индукции принадлежит к числу самых замечательных научных достижений первой половины XIX в. Оно вызвало появление и бурное развитие электротехники и радиотехники.

На основании явления электромагнитной индукции были созданы мощные генераторы электрической энергии, в разработке которых принимали участие ученые и техники разных стран. Среди них были и наши соотечественники: **Эмилий Христианович Ленц**, **Борис Семенович Якоби**, **Михаил Иосифович Доливо-Добровольский** и другие, внесшие большой вклад в развитие электротехники.

? Вопросы

1. С какой целью ставились опыты, изображенные на рисунках 126—128? Как они проводились?

2. При каком условии во всех опытах в катушке, замкнутой на гальванометр, возникал индукционный ток?

3. В чем заключается явление электромагнитной индукции?

4. В чем важность открытия явления электромагнитной индукции?

⚡ Упражнение 39

1. Как создать кратковременный индукционный ток в катушке K_2 , изображенной на рисунке 125?

2. Проволочное кольцо помещено в однородное магнитное поле (рис. 129). Стрелочки, изображенные рядом с кольцом, показывают,

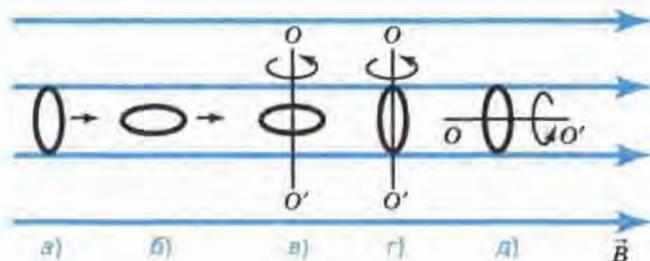


Рис. 129

что в случаях *a* и *б* кольцо движется прямолинейно вдоль линий индукции магнитного поля, а в случаях *в*, *г* и *д* — вращается вокруг оси OO' . В каких из этих случаев в кольце может возникнуть индукционный ток?

§ 49. Направление индукционного тока. Правило Ленца

В предыдущем параграфе были рассмотрены опыты по получению индукционного тока и установлена причина его возникновения.

Как же направлен индукционный ток? Для ответа на этот вопрос воспользуемся прибором, изображенным на рисунке 130. Он пред-

ставляет собой узкую алюминиевую пластинку с алюминиевыми кольцами на концах. Одно кольцо сплошное, другое имеет разрез. Пластинка с кольцами помещена на стойку и может свободно вращаться вокруг вертикальной оси.

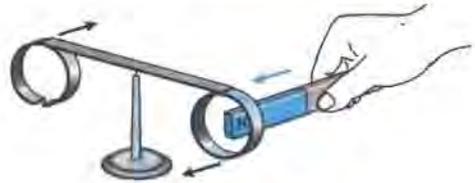


Рис. 130

Возьмем полосовой магнит и внесем его в кольцо с разрезом — кольцо останется на месте. Если же мы попытаемся внести магнит в сплошное кольцо, то оно будет отталкиваться, уходить от магнита, поворачивая при этом всю пластинку. Результат будет точно таким же, если магнит будет повернут к кольцам не северным полюсом (как показано на рисунке), а южным. Как объяснить наблюдаемые явления?

При приближении к кольцу любого полюса магнита, поле которого является неоднородным, проходящий сквозь кольцо магнитный поток увеличивается (рис. 131). При этом в сплошном кольце возникает индукционный ток, а в кольце с разрезом ток циркулировать не может.

Ток в сплошном кольце создает в пространстве магнитное поле, благодаря чему кольцо приобретает свойства магнита. Мы видели, что, взаимодействуя с приближающимся полосовым магнитом, кольцо отталкивается от него. Из этого следует, что кольцо и магнит обращены друг к другу одноименными полюсами, а векторы магнитной индукции (\vec{B}_k и \vec{B}_m) их полей направлены в противоположные стороны (рис. 132). При противоположном направлении \vec{B}_k и \vec{B}_m магнитное поле индукционного тока будет противодействовать уве-

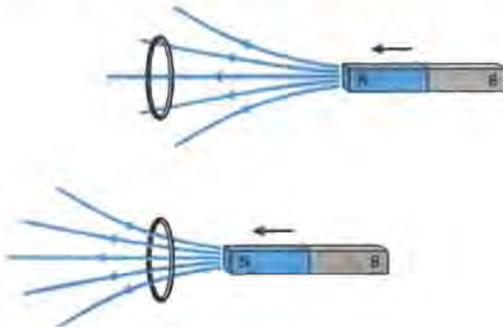


Рис. 131

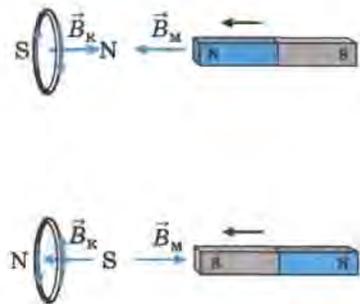


Рис. 132

личению внешнего магнитного потока, проходящего сквозь кольцо. Таким образом,

при увеличении внешнего магнитного потока в кольце возникает индукционный ток такого направления, что созданное им магнитное поле противодействует увеличению внешнего магнитного потока, стремится скомпенсировать это увеличение. При этом векторы магнитной индукции поля кольца (в его центре) и поля магнита (на его оси симметрии) направлены в противоположные стороны.

Зная направление индукции магнитного поля кольца, можно по правилу правой руки (см. § 44, рис. 98) определить направление индукционного тока в кольце (см. рис. 132).

Теперь посмотрим, что произойдет при уменьшении внешнего магнитного потока сквозь кольцо. Для этого, удерживая кольцо рукой, внесем в него магнит. Затем, отпустив кольцо, начнем удалять магнит. Мы увидим, что в этом случае кольцо будет следовать за магнитом, притягиваться к нему (рис. 133). Значит, в этом случае кольцо и магнит обращены друг к другу разноименными полюсами, а векторы магнитной индукции их полей направлены в одну сторону (рис. 134). При *одинаковом* направлении \vec{B}_K и \vec{B}_M магнитное поле тока будет *противодействовать уменьшению* внешнего магнитного потока, проходящего сквозь кольцо. Отсюда следует, что

при уменьшении внешнего магнитного потока в кольце возникает индукционный ток такого направления, что созданное им магнитное поле противодействует уменьшению внешнего магнитного потока, стремится скомпенсировать это уменьшение. При этом векторы магнитной индукции поля кольца (в его центре) и поля магнита (на его оси симметрии) направлены в одну и ту же сторону.



Рис. 133

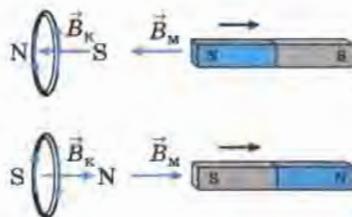


Рис. 134

На рисунке 134 показано направление индукционного тока в кольце, найденное по правилу правой руки.

Мы видим, что для определения направления индукционного тока прежде всего необходимо узнать, как направлен вектор магнитной индукции созданного этим током магнитного поля (в центре кольца). Узнать это можно с помощью правил, которые мы с вами установили в результате проведенного эксперимента для двух случаев: когда внешний магнитный поток увеличивается и когда он уменьшается.

Эти правила можно объединить в одно. В современной формулировке оно звучит так:

возникающий в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем противодействует тому изменению магнитного потока, которое вызвало этот ток.

Данное правило было установлено в 1834 г. российским ученым Эмилием Христиановичем Ленцем.

? Вопросы

1. Для чего проводился опыт, изображенный на рисунках 130 и 133?
2. Почему кольцо с разрезом не реагирует на приближение магнита?
3. Объясните явления, происходящие при приближении магнита к сплошному кольцу (см. рис. 132); при удалении магнита (см. рис. 134).
4. Как мы определяли направление индукционного тока в кольце?
5. Сформулируйте правило Ленца.

⚡ Упражнение 40

1. Как вы думаете, почему прибор, изображенный на рисунке 130, изготовлен из алюминия? Как проходил бы опыт, если бы прибор был железным? медным?
2. В данном ниже перечне логических операций, которые мы выполняли для определения направления индукционного тока, *нарушена последовательность их проведения*. Запишите в тетради буквы, обозначающие эти операции, расположив их в правильной последовательности.

а) Определили направление индукционного тока в кольце (пользуясь правилом правой руки — см. § 44).

б) Определили направление индукции \vec{B}_k магнитного поля тока в кольце по отношению к направлению магнитной индукции \vec{B}_m поля магнита, исходя из того, что кольцо отталкивается от магнита при его приближении (значит, они обращены друг к другу одноименными полюсами, и $\vec{B}_k \uparrow \downarrow \vec{B}_m$) и притягивается при удалении (значит, кольцо и магнит обращены друг к другу разноименными полюсами, и $\vec{B}_k \uparrow \uparrow \vec{B}_m$)

в) Определили направление магнитной индукции \vec{B}_m поля магнита (по расположению его полюсов).

§ 50. Явление самоиндукции

Рассмотрим частный случай электромагнитной индукции: возникновение индукционного тока в катушке при изменении силы тока в ней.

Для этого поставим опыт, изображенный на рисунке 135, а и схеме 135, б. При выполнении первой части опыта неоновая лампа L_n нам не понадобится, поэтому мы вынем ее из патрона, оставив только две параллельные ветви: с реостатом Р и катушкой К. (Обратите внимание на условное обозначение катушки с сердечником на схеме 135, б и запомните его.)

Замкнем цепь ключом Кл. Лампа L_1 загорится сразу, а L_2 — с опозданием приблизительно в 1 с. Причина запаздывания заключается в следующем. При замыкании цепи силы токов I , I_1 и I_2 (см. рис. 135, б) начинают расти. Благодаря этому увеличиваются индукции B_1 и B_2 магнитных полей (создаваемых этими же токами I_1 и I_2) и магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , пронизывающие соответственно витки реостата и катушки. Получается, что проходящие сквозь реостат и катушку переменные потоки Φ_1 и Φ_2 создаются не внешними причинами (как было в опытах, рассмотренных в § 48), а благодаря изменению токов в самих этих устройствах.

Согласно явлению электромагнитной индукции, в реостате и в катушке возникают индукционные токи, препятствующие увеличению силы тока I_1 и I_2 (это следует из правила Ленца). Но в катушке К индукционный ток будет значительно больше, чем в реостате Р,

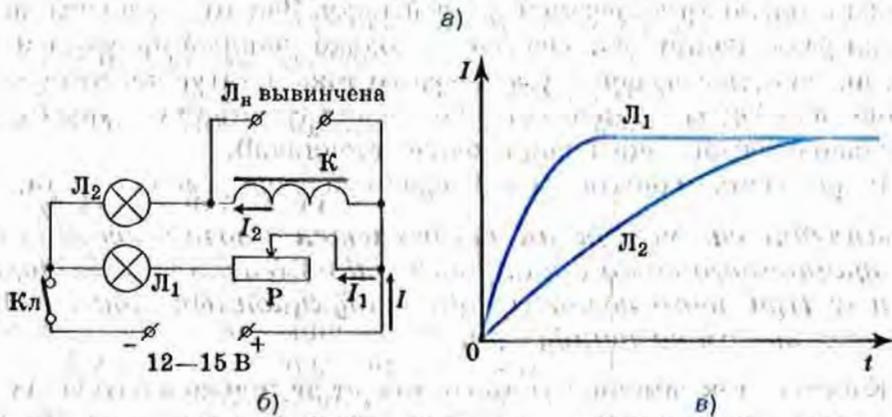
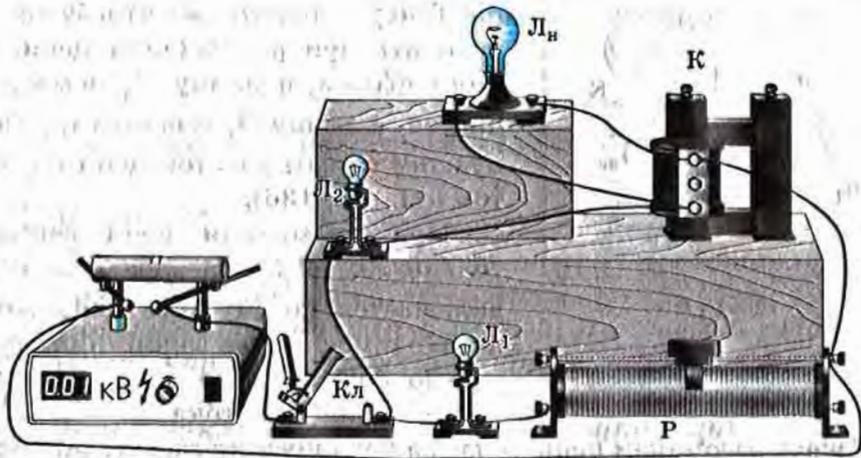


Рис. 135

так как катушка имеет гораздо большее число витков и сердечник, т. е. обладает большей *индуктивностью*, чем реостат.

Индуктивность (коэффициент самоиндукции) — это физическая величина, введенная для оценивания способности катушки противодействовать изменению силы тока в ней. Индуктивность L катушки зависит от ее формы, размеров, числа витков и наличия или отсутствия сердечника (например, железного). Единица индуктивности — генри (Гн).

Чем больше сила индукционного тока, тем большее противодействие он оказывает изменению силы тока, созданного источником. Поэтому ток в ветви с катушкой возрастает медленнее, чем в ветви с реостатом, и лампа L_2 загорается с опозданием (рис. 135, в).

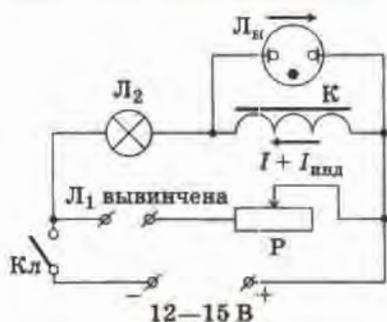


Рис. 136

Теперь посмотрим, что будет происходить при размыкании цепи. Для этого неоновую лампу L_n поместим в патрон, а лампу L_1 вывинтим, разомкнув тем самым участок цепи с реостатом (см. рис. 136).

При замыкании цепи загорится только лампа L_2 . Неоновая лампа не включается потому, что напряжение, необходимое для ее зажигания, значительно больше напряжения, подаваемого от источника тока.

Теперь разомкнем цепь — лампа накаливания гаснет, зато неоновая дает яркую кратковременную вспышку. Значит, уменьшение тока при размыкании цепи создает настолько мощный индукционный ток, противодействующий уменьшению тока в катушке, что напряжение на ней оказывается достаточным для зажигания лампы (и значительно превышающим напряжение источника!).

В проделанном опыте мы наблюдали явление самоиндукции.

Явление самоиндукции заключается в возникновении индукционного тока в катушке при изменении силы тока в ней. При этом возникающий индукционный ток называется током самоиндукции.

Конечно, ток самоиндукции возникает не только в катушках, но и в любых других проводниках, если сила тока изменяется. Но, как уже отмечалось, в катушках с относительно небольшим числом витков, не имеющих сердечника, и тем более в прямых проводниках (т. е. в элементах цепи, обладающих малой индуктивностью) ток самоиндукции обычно невелик и не оказывает существенного влияния на процессы в электрической цепи.

Отметим еще одну важную деталь. Появление мощного индукционного тока при размыкании цепи свидетельствует о том, что магнитное поле тока в катушке обладает энергией. Именно за счет уменьшения энергии магнитного поля совершается работа по созданию индукционного тока. А накопилась эта энергия раньше, при замыкании цепи, когда за счет энергии источника тока совершалась работа по преодолению тока самоиндукции, препятствующего увеличению тока в цепи, и его магнитного поля.

Энергия магнитного поля тока определяется по формуле

$$E_{\text{маг}} = \frac{Li^2}{2},$$

где L — индуктивность проводника, а i — сила тока в этом проводнике.

? Вопросы

1. Какое явление изучалось на опыте, представленном на рисунках 135 и 136?

2. Расскажите сначала о первой, а затем о второй части опыта: что делали, что увидели, как объясняются наблюдаемые явления.

3. В чем заключается явление самоиндукции?

4. Может ли возникнуть ток самоиндукции в прямом проводнике с током? Если нет, то объясните почему; если да, то при каком условии.

5. За счет уменьшения какой энергии совершалась работа по созданию индукционного тока при размыкании цепи?

🔧 Упражнение 41

В электрической цепи (рис. 137) напряжение, получаемое от источника тока, меньше напряжения зажигания неоновой лампы. Что будет происходить с каждым элементом цепи (исключая источник тока и ключ) при замкнутом ключе? при замыкании ключа? при размыкании?

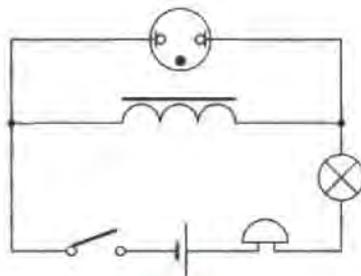


Рис. 137

§ 51. Получение и передача переменного электрического тока. Трансформатор

Рассмотрим еще раз получение индукционного тока в катушке с помощью перемещения относительно нее постоянного магнита (см. рис. 126, а). Но теперь будем периодически двигать магнит вверх и вниз в течение нескольких секунд. Мы увидим, что при этом стрелка гальванометра отклоняется от нулевого деления то в одну, то в другую сторону. Это говорит о том, что модуль силы индукционного тока в катушке и направление этого тока периодически меняются.

Электрический ток, периодически меняющийся со временем по модулю и направлению, называется переменным током.

В осветительной сети наших домов и во многих отраслях промышленности используется именно переменный ток.

В настоящее время для получения переменного тока используют в основном *электромеханические индукционные генераторы*, т. е. устройства, в которых механическая энергия преобразуется в электрическую. Индукционными они называются потому, что их действие основано на явлении электромагнитной индукции.

В § 48 рассматривался пример получения индукционного тока в плоском контуре при вращении внутри него магнита (см. рис. 128, б). На этом принципе и работает электромеханический генератор переменного тока. Неподвижная часть генератора, аналогичная контуру, называется *статором*, а вращающаяся, т. е. магнит, — *ротором*. В мощных промышленных генераторах вместо постоянного магнита используется электромагнит.

Статор промышленного генератора представляет собой стальную станину цилиндрической формы (станина — это основная несущая часть машины, на которой монтируются различные рабочие узлы, механизмы и пр.). Во внутренней его части прорезаются пазы, в которые витками укладывается толстый медный провод. В витках и индуцируется переменный электрический ток при изменении пронизывающего их магнитного потока.

Магнитное поле создается ротором (рис. 138, а). Он представляет собой электромагнит: на стальной сердечник сложной формы надета обмотка, по которой протекает постоянный электрический ток. Ток к этой обмотке подводится через щетки и кольца от постороннего источника постоянного тока.

На рисунке 138, б вы видите полную схему генератора переменного тока. Штрихами показано примерное расположение линий индукции магнитного поля ротора. При вращении ротора какой-либо внешней механической силой создаваемое им магнитное поле тоже вращается. При этом магнитный поток, пронизывающий витки обмотки статора, периодически меняется, в результате чего в них индуцируется переменный ток.

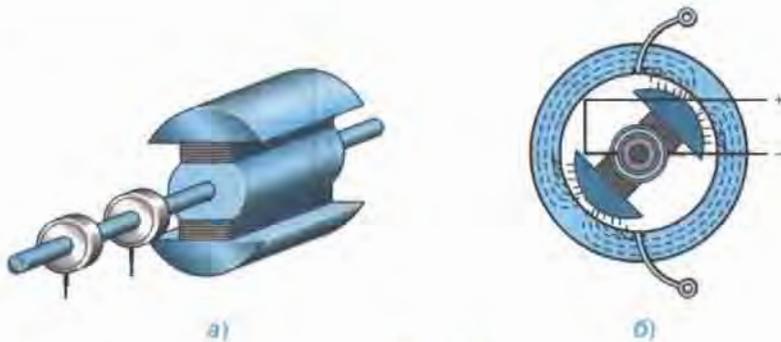


Рис. 138

На тепловых электростанциях ротор генератора вращается с помощью паровой турбины, на гидроэлектростанциях — с помощью водяной турбины.

На рисунке 139, *а* изображен внешний вид мощного гидрогенератора, а на рисунке 139, *б* схематично показано его устройство, где цифрой 1 обозначен *статор*, цифрой 2 — *ротор*, а цифрой 3 — *водяная турбина*.

Мы видим, что ротор гидрогенератора имеет не одну, а несколько пар магнитных полюсов. Чем больше пар полюсов, тем больше частота переменного электрического тока, вырабатываемого генератором при данной скорости вращения ротора. Поскольку скорость вращения водяных турбин обычно невелика, то для создания тока стандартной частоты используют многополюсные роторы.

Стандартная частота переменного тока, применяемого в промышленности и осветительной сети в России и многих других стра-

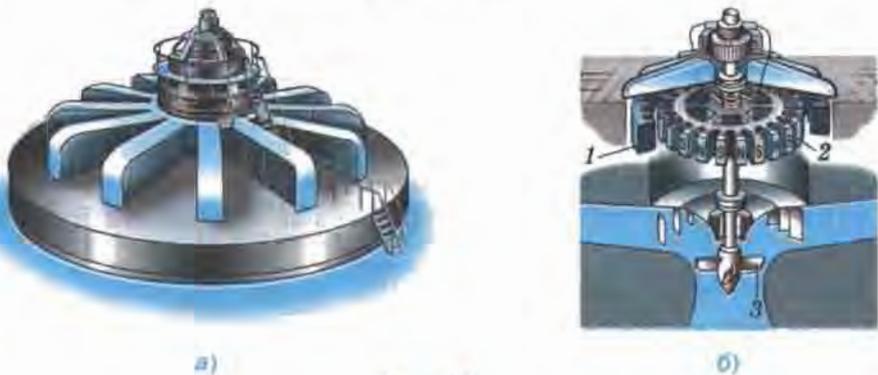


Рис. 139

нах, равна 50 Гц. Это означает, что на протяжении 1 с ток 50 раз течет в одну сторону и 50 раз в другую. В некоторых странах (например, США) стандартная частота переменного тока равна 60 Гц.

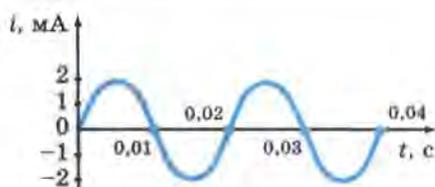


Рис. 140

* Сила тока, вырабатываемого генераторами переменного тока, меняется со временем по гармоническому закону (т. е. по закону синуса или косинуса). На рисунке 140 показан график изменения силы тока i со временем t .

* Для передачи электроэнергии от электростанций в места ее потребления служат линии электропередачи (ЛЭП). Чем дальше от электростанции находится потребитель тока, тем больше энергии Q тратится на нагревание проводов и тем меньше доходит до потребителя:

$$E_{\text{потребляемая}} = E_{\text{генерируемая}} - Q.$$

Уменьшение потерь электроэнергии при ее передаче от электростанций к потребителям является важной задачей экономики.

Из закона Джоуля—Ленца ($Q = I^2 R t$) следует, что уменьшить потери можно за счет уменьшения сопротивления R проводов и силы тока I в них (что более эффективно, поскольку при уменьшении I в n раз Q уменьшается в n^2 раз).

Сопротивление проводов будет тем меньше, чем больше площадь S их поперечного сечения и чем меньше удельное сопротивление ρ металла, из которого они изготовлены (так как $R = \frac{\rho l}{S}$). Провода делают из меди или алюминия, так как среди относительно недорогих металлов они обладают наименьшим удельным сопротивлением. Увеличивать толщину проводов экономически невыгодно (ввиду увеличения расхода металла) и неудобно (из-за трудностей при их подвеске).

Поэтому существенного снижения потерь Q можно добиться только за счет уменьшения силы тока I . Но при этом необходимо во столько же раз увеличить получаемое от генератора напряжение U ,

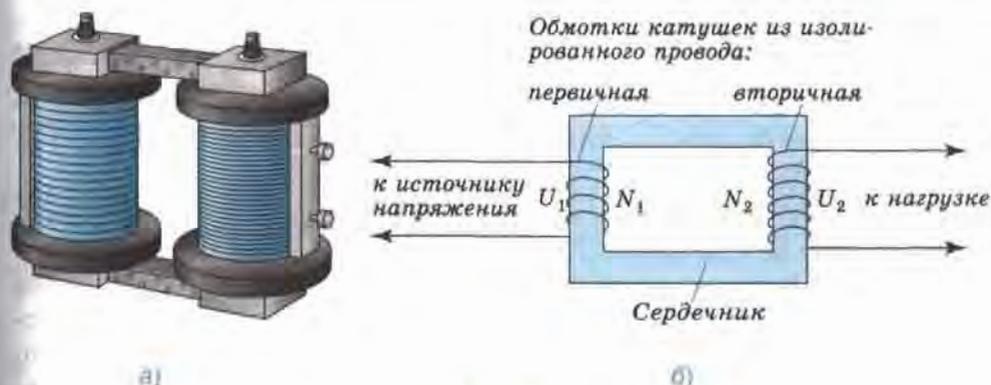


Рис. 141

чтобы не снижать мощность тока P (так как $P = UI^1$). Без такого преобразования силы тока и напряжения передача электроэнергии на большие расстояния становится невыгодной из-за существенных потерь.

Решение этой важнейшей технической задачи стало возможным только после изобретения **трансформатора** — устройства, предназначенного для увеличения или уменьшения переменного напряжения и силы тока.

Трансформатор был изобретен в 1876 г. русским ученым **П. Н. Яблочковым**. В основе его работы лежит явление электромагнитной индукции. На рисунке 141, а показан внешний вид трансформатора, а на рисунке 141, б схематично изображены его основные части. Обратите внимание на то, что число витков в обмотках различно: в данном случае $N_2 > N_1$.

Протекающий в первичной обмотке переменный ток создает (главным образом в сердечнике) переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, порождает переменное электрическое поле. В результате действия этого поля на концах вторичной обмотки возникает переменное напряжение U_2 .

¹ U, I — так называемые *действующие* значения напряжения и силы переменного тока. Они равны соответственно напряжению и силе *постоянного* тока, выделяющего в проводнике каждую секунду столько же тепла, что и переменный ток. Действующие значения переменного тока в $\sqrt{2}$ раз меньше

амплитудных: $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$.

Величина U_2 определяется из соотношения: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$ или $U_2 = \frac{N_2}{N_1} U_1$.

Значит, при $N_2 > N_1$ трансформатор будет *повышающим* (так как $U_2 > U_1$), а при $N_2 < N_1$ — *понижающим* (в данном случае $U_2 < U_1$).

Теперь вернемся к вопросу о передаче электроэнергии от электростанции к месту ее потребления. Напряжение, вырабатываемое генератором, обычно не превышает 25 кВ. А для оптимальной передачи электроэнергии на большие расстояния требуется напряжение порядка сотен киловольт. Поэтому ток с электростанции сначала подается на расположенную неподалеку повышающую трансформаторную подстанцию, где напряжение повышается до нескольких сотен киловольт (в большинстве случаев оно не превышает 750 кВ), и под таким напряжением подается в ЛЭП. Поскольку такое высокое напряжение не может быть предложено потребителю, то в конце линии его поочередно на несколько трансформаторных подстанций, понижающих напряжение до 380 В или 220 В, а затем — на предприятия или в жилые дома.

Следует добавить, что трансформаторы нашли широкое применение в быту. Например, при подзарядке сотового телефона имеющийся в зарядном устройстве трансформатор понижает напряжение, полученное из осветительной сети и равное 220 В, до 5,5 В, пригодного для телефона. В телевизоре имеется несколько трансформаторов (как понижающих, так и повышающих), поскольку для питания различных его узлов требуется напряжение от 1,5 В до 25 кВ.

? Вопросы

1. Какой электрический ток называется переменным? С помощью какого простого опыта его можно получить?
2. Где используют переменный электрический ток?
3. На каком явлении основано действие наиболее распространенных в настоящее время генераторов переменного тока?
4. Расскажите об устройстве и принципе действия промышленного генератора.
5. Чем приводится во вращение ротор генератора на тепловой электростанции? на гидроэлектростанции?
6. Почему в гидрогенераторах используют многополюсные роторы?
7. Какова стандартная частота промышленного тока, применяемого в России и многих других странах?

8. По какому физическому закону можно определить потери электроэнергии в ЛЭП?

9. Что следует сделать для уменьшения потерь электроэнергии при ее передаче?

10. Для чего при уменьшении силы тока во столько же раз повышают его напряжение перед подачей в ЛЭП?

11. Расскажите об устройстве, принципе действия и применении трансформаторов.

🎵 Упражнение 42

1. Электростанции России вырабатывают переменный ток частотой 50 Гц. Определите период этого тока.

2. По графику (см. рис. 140) определите период, частоту и амплитуду колебаний силы тока i .

§ 52. Электромагнитное поле

Явление электромагнитной индукции было открыто *Майклом Фарадеем* в 1831 г.

В том же году в Англии родился *Джеймс Клерк Максвелл*, ставший впоследствии ученым и сделавший важнейшее научное открытие, которое позволило глубже понять сущность электромагнитной индукции.

Согласно явлению электромагнитной индукции при изменении магнитного потока, пронизывающего контур замкнутого проводника, в этом проводнике возникает индукционный ток. Но ток может возникнуть только при наличии электрического поля.

Предположение о возникновении электрического поля в результате изменения магнитного сразу вызвало у ученых ряд вопросов. Например, отличается ли оно от поля, созданного неподвижными электрическими зарядами? Возникает ли это поле только в проводнике или существует и в пространстве вокруг него? Играет какую-либо роль в возникновении электрического поля замкнутый проводник, по которому



Джеймс Максвелл
(1831—1879)

протекает индукционный ток, или оно существует в пространстве независимо от наличия проводника?

Ответы на эти и другие вопросы были получены в 1865 г., когда Максвелл создал теорию электромагнитного поля. Он теоретически доказал, что *всякое изменение со временем магнитного поля приводит к возникновению переменного электрического поля, а всякое изменение со временем электрического поля порождает переменное магнитное поле.*

Эти порождающие друг друга переменные электрическое и магнитное поля образуют единое *электромагнитное поле.*

Источником электромагнитного поля служат ускоренно движущиеся электрические заряды.

Если электрические заряды движутся с ускорением, например колеблются, то создаваемое ими электрическое поле периодически меняется. Переменное электрическое поле создает в пространстве переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, порождает переменное электрическое и т. д.

Переменное электрическое поле называется *вихревым*, поскольку его силовые линии замкнуты подобно линиям индукции магнитного поля. Это отличает его от поля *электростатического* (т. е. постоянного, не меняющегося во времени), которое существует вокруг неподвижных заряженных тел. Силовые линии электростатического поля начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных.

Открытие электромагнитного поля позволило более детально описать механизм возникновения индукционного тока. Во всех опытах по получению индукционного тока (см. § 48) тем или иным образом изменялся магнитный поток, пронизывающий контур замкнутого проводника. При этом, согласно теории Максвелла, возникало вихревое электрическое поле, под действием которого свободные заряды, всегда имеющиеся в проводнике, приходили в направленное движение. В данном случае проводник, замкнутый на гальванометр, играл лишь роль индикатора, обнаруживающего возникшее в данной области пространства электрическое поле. *Электрическое поле существует независимо от наличия проводника.*

Созданная Максвеллом теория, позволившая предсказать существование электромагнитного поля за 22 года до того, как оно было обнаружено экспериментально, считается величайшим из научных открытий, роль которого в развитии науки и техники трудно переоценить.

❓ Вопросы

1. Кем и когда была создана теория электромагнитного поля и в чем заключалась ее суть?
2. Что служит источником электромагнитного поля?
3. Чем отличаются силовые линии вихревого электрического поля от силовых линий электростатического?
4. Опишите механизм возникновения индукционного тока, опираясь на знание о существовании электромагнитного поля.

🔗 Упражнение 43

В опыте, изображенном на рисунке 127, при замыкании ключа сила тока, протекающего через катушку *A*, в течение некоторого промежутка времени увеличивалась. При этом в цепи катушки *C* возникал кратковременный ток. Отличаются ли чем-нибудь электрические поля, под действием которых возникали токи в катушках *A* и *C*? Существовали бы эти поля в момент замыкания ключа, если бы не было катушки *C* с гальванометром?

§ 53. Электромагнитные волны

Из созданной Максвеллом теории вытекал вывод о том, что быстропеременное электромагнитное поле должно распространяться в пространстве в виде поперечных волн. Причем эти волны могут существовать не только в веществе, но и в вакууме. Опираясь исключительно на теоретические выводы, Максвелл определил также, что электромагнитные волны должны распространяться в вакууме со скоростью 300 000 км/с, т. е. со скоростью света (скорость света, как известно, была измерена задолго до этого).

Вы знаете, что в механических волнах, например в звуковых, энергия передается от одних частиц среды к другим. При этом частицы приходят в колебательное движение, т. е. их смещение от положения равновесия периодически меняется. Для передачи звука обязательно нужна вещественная среда.

В связи с тем, что электромагнитные волны распространяются не только в веществе, но и в вакууме, возникает вопрос: что совершает колебания в электромагнитной волне, т. е. какие физические величины периодически меняются в ней?

Электromагнитная волна представляет собой систему порождающих друг друга и распространяющихся в пространстве переменных электрического и магнитного полей.

Количественной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции \vec{B} .

Основной количественной характеристикой электрического поля служит векторная величина, называемая **напряженностью электрического поля**, которая обозначается \vec{E} . Напряженность \vec{E} электрического поля в какой-либо его точке равна отношению силы \vec{F} , с которой поле действует на точечный положительный заряд, помещенный в эту точку, к значению этого заряда q .

Когда мы говорим, что магнитное и электрическое поля меняются, то это означает, что меняются соответственно вектор индукции магнитного поля \vec{B} и вектор напряженности электрического поля \vec{E} .

В электromагнитной волне именно векторы \vec{B} и \vec{E} периодически меняются по модулю и по направлению, т. е. колеблются.

На рисунке 142 изображены вектор напряженности электрического поля \vec{E} и вектор индукции магнитного поля \vec{B} электromагнитной волны в один и тот же момент времени. Это как бы «моментальный снимок» волны, распространяющейся в направлении оси Z . Плоскость, проведенная через векторы \vec{B} и \vec{E} в любой точке, перпендикулярна направлению распространения волны, что говорит о поперечности волны.

За время, равное периоду колебаний, волна переместится вдоль оси Z на расстояние, равное длине волны. Для электromагнитных волн справедливы те же соотношения между длиной волны λ , ее скоростью c , периодом T и частотой ν колебаний, что и для механических волн:

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}.$$

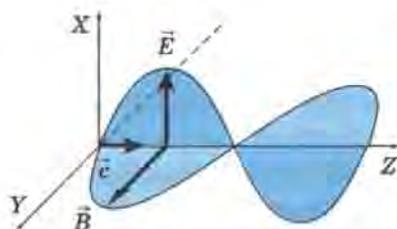


Рис. 142

Максвелл не только научно обосновал возможность существования электromагнитных волн, но и указал, что для создания интенсивной электromагнитной волны, которую можно было бы зарегистрировать прибора-

ми на некотором расстоянии от источника, необходимо, чтобы колебания векторов \vec{E} и \vec{B} происходили с достаточно высокой частотой (порядка 100 000 колебаний в секунду и больше).

В 1888 г. немецкому ученому *Генриху Герцу* удалось получить и зарегистрировать электромагнитные волны. В результате опытов Герца были также обнаружены все свойства электромагнитных волн, теоретически предсказанные Максвеллом.

Сейчас мы знаем, что все пространство вокруг нас буквально пронизано электромагнитными волнами различных частот.

В настоящее время все электромагнитные волны разделены по длинам волн (и, соответственно, по частотам) на шесть основных диапазонов, которые представлены на рисунке 143.

Границы диапазонов весьма условны, поэтому, как видно из рисунка, в большинстве случаев соседние диапазоны несколько перекрывают друг друга.

Электромагнитные волны разных частот отличаются друг от друга проникающей способностью, скоростью распространения в веществе, видимостью, цветностью и некоторыми другими свойствами.

Они могут оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на живые организмы. Например, инфракрасное, т. е. тепловое излучение играет определяющую роль в поддержании жизни на Земле, поскольку люди, животные и растения могут существовать и нормально функционировать только при определенных температурах.

Видимый свет дает нам информацию об окружающем мире и возможность ориентироваться в пространстве. Он необходим также для

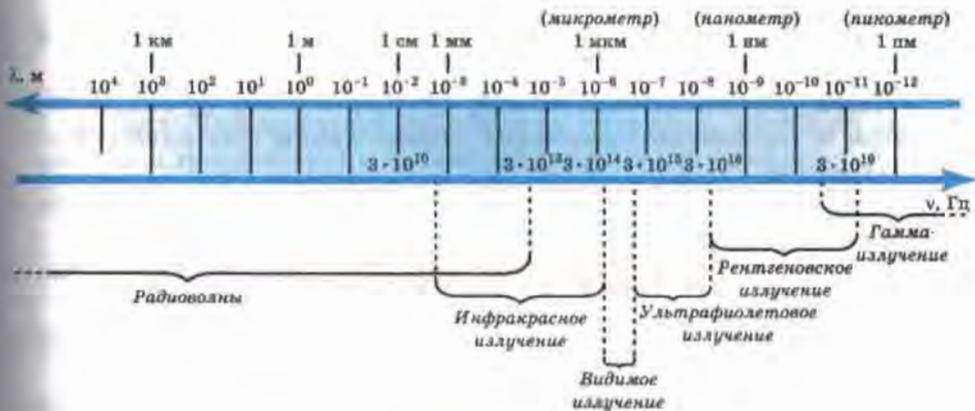


Рис. 143

протекания процесса фотосинтеза в растениях, в результате чего выделяется кислород, необходимый для дыхания живых организмов.

Влияние на человека ультрафиолетового излучения (вызывающего загар) в большой степени определяется интенсивностью и продолжительностью облучения. В допустимых дозах оно повышает сопротивляемость организма человека к различным заболеваниям, в частности инфекционным. Превышение допустимой дозы может вызвать ожоги кожи, развитие онкологических заболеваний, ослабление иммунитета, повреждение сетчатки глаз. Глаза можно защитить с помощью стеклянных очков (как темных, так и прозрачных, но не пластиковых), так как стекло поглощает значительную часть ультрафиолетовых лучей.

Вы знакомы и с рентгеновским излучением, в частности с его широким применением в медицине — флюорографическое обследование или рентгеновский снимок наверняка делали каждому из вас. Но слишком большие дозы или частые обследования с помощью рентгеновских лучей могут вызвать серьезные заболевания.

Получение электромагнитных волн имеет огромное научное и практическое значение. В этом можно убедиться на примере всего лишь одного диапазона — радиоволн, применяемых для телевизионной и радиосвязи, в радиолокации (т. е. для обнаружения объектов и измерения расстояния до них), в радиоастрономии и других сферах деятельности.

? Вопросы

- 1. Какие выводы относительно электромагнитных волн вытекали из теории Максвелла?*
- 2. Какие физические величины периодически меняются в электромагнитной волне?*
- 3. Какие соотношения между длиной волны, ее скоростью, периодом и частотой колебаний справедливы для электромагнитных волн?*
- 4. При каком условии волна будет достаточно интенсивной для того, чтобы ее можно было зарегистрировать?*
- 5. Когда и кем были впервые получены электромагнитные волны?*
- 6. Приведите примеры 2—3 диапазонов электромагнитных волн.*
- 7. Приведите примеры применения электромагнитных волн и их воздействия на живые организмы.*

Упражнение 44

1. На какой частоте суда передают сигнал бедствия SOS, если по международному соглашению длина радиоволны должна быть 600 м?

2. Радиосигнал, посланный с Земли на Луну, может отразиться от поверхности Луны и вернуться на Землю. Предложите способ измерения расстояния между Землей и Луной с помощью радиосигнала.

Указание: задача решается таким же методом, каким измеряется глубина моря с помощью эхолокации (см. § 34).

3. Можно ли измерить расстояние между Землей и Луной с помощью звуковой или ультразвуковой волны? Ответ обоснуйте.

§ 54. Конденсатор

24 марта 1896 г. на заседании Российского физико-химического общества физик и электротехник Александр Степанович Попов с помощью изобретенного им радиопередатчика продемонстрировал передачу сигналов на расстояние 250 м. Он передал азбукой Морзе¹ первую в мире радиограмму из двух слов: «Генрих Герц». Передача осуществлялась посредством электромагнитных волн радиодиапазона, т. е. была беспроводной. В то время это было воспринято как чудо.

Теперь мы настолько привыкли, что можем не только слышать, но и видеть то, что происходит за много километров от нас, что это не вызывает ни малейшего удивления. Тем не менее человеку любознательному и культурному интересно бывает хотя бы в общих чертах постичь суть окружающих нас явлений, узнать, как и почему они происходят. Чтобы понять физические процессы, лежащие в основе передачи и приема звука и изображения, сначала следует познакомиться с таким важным устройством, как *конденсатор*.

Конденсатор (от лат. condensator — тот, кто уплотняет, сгущает) — это устройство, предназначенное для накопления заряда и энергии электрического поля.

¹ Телеграфный код, в котором каждая буква (знак) представлена своей комбинацией коротких посылок электрического тока (точек) и посылок утроенной продолжительности (тире).

На рисунке 144, а изображен простейший плоский конденсатор. Он состоит из двух одинаковых круглых металлических пластин (обкладок) 1 со стержнями 2, с помощью которых пластины укреплены в изолирующих штативах 3. Пластины расположены параллельно друг другу и разделены диэлектриком (в данном случае воздухом).

На рисунке 144, б показано, как обозначается конденсатор на схемах электрических цепей.

Существуют разные способы зарядки конденсатора. Можно, например, соединить его обкладки с источником постоянного напряжения, как показано на рисунке 145. При этом обкладки конденсатора заряжаются равными по величине, но противоположными по знаку зарядами (+ q и $-q$). Под зарядом конденсатора понимается модуль заряда q одной из его обкладок.

Опыт показывает, что заряд q конденсатора прямо пропорционален напряжению U между его обкладками:

$$q = CU. \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности C называется *электрической емкостью* (электроемкостью, емкостью) конденсатора. Из формулы (1) следует, что

$$C = \frac{q}{U}. \quad (2)$$

Единица электроемкости в СИ — *фарад* (Φ) — получила свое название в честь Майкла Фарадея, внесшего большой вклад в развитие электромагнетизма.

Согласно формуле (2)

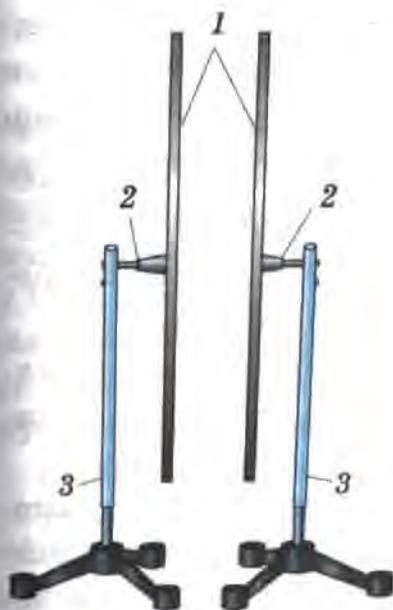
$$1\Phi = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}, \quad (3)$$

т. е. 1 Φ равен емкости такого конденсатора, между обкладками которого возникает напряжение 1 В при сообщении конденсатору заряда 1 Кл.

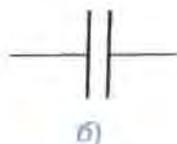
Опыты показывают, что чем больше площадь S перекрытия пластин и чем меньше расстояние d между ними (рис. 146), тем больше емкость плоского конденсатора:

$$C \sim \frac{S}{d}. \quad (4)$$

При внесении в пространство между обкладками стеклянной пластины емкость конденсатора увеличивается, следовательно, она зависит и от свойств используемого диэлектрика.



а)



б)

Рис. 144

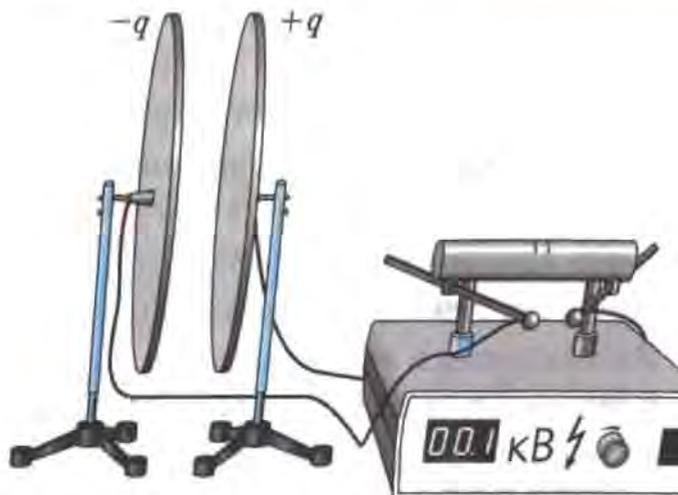


Рис. 145

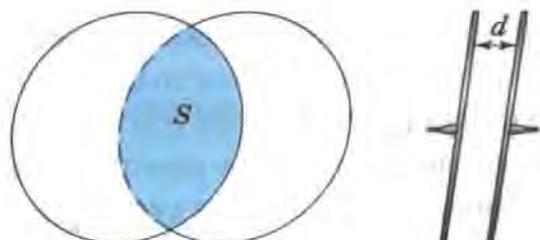


Рис. 146

В ряде случаев для получения требуемой емкости несколько конденсаторов соединяют в *батарею*. На рисунке 147, а показана батарея из трех конденсаторов одинаковой емкости, соединенных параллельно. Эту батарею можно рассматривать как один конденсатор, площадь пластин которого втрое больше, чем у каждого из трех. Поскольку $C \sim S$, то емкость батареи (C_6) будет в три раза больше емкости одного конденсатора (C_k): $C_6 = 3C_k$ (при том что диэлектрик и расстояние между пластинами остались прежними).

Понятно, что емкость батареи из n *одинаковых* параллельно соединенных конденсаторов определяется по формуле $C_6 = nC_k$, а если емкости конденсаторов различны, то емкость батареи равна их сумме: $C_6 = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$.

Вы знаете, что заряженные тела создают в пространстве вокруг себя электрическое поле и взаимодействуют друг с другом посредством этих полей.

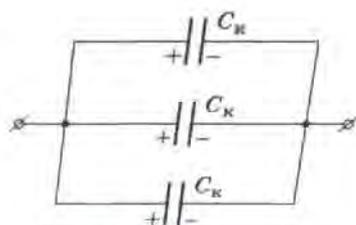


Рис. 147

Силовой характеристикой электрического поля служит напряженность \vec{E} (см. § 53).

Для получения наглядного представления о величине и направлении напряженности электрического поля в любой точке пространства (как и для индукции \vec{B} магнитного поля) пользуются воображаемыми линиями (рис. 148), которые называются линиями напряженности или силовыми линиями электрического поля.

Касательные к этим линиям в любой их точке совпадают с напряженностью \vec{E} в этой точке. Там, где напряженность поля больше, линии гуще.

Линии напряженности электрического поля начинаются на положительных зарядах и либо уходят в бесконечность (рис. 148, б), либо заканчиваются на отрицательных зарядах (рис. 148, а, в). Мы видим, что линии поля плоского конденсатора параллельны и расположены на одинаковом расстоянии друг от друга. Значит поле такого конденсатора *однородно* (см. § 43).

Поле сосредоточено в пространстве между обкладками, если их размеры значительно больше расстояния между ними (см. рис. 148, в).

При зарядке конденсатора внешними силами совершается работа по разделению положительных и отрицательных зарядов. По закону сохранения энергии работа внешних сил равна энергии поля конденсатора. При разрядке конденсатора за счет этой энергии может быть совершена работа.

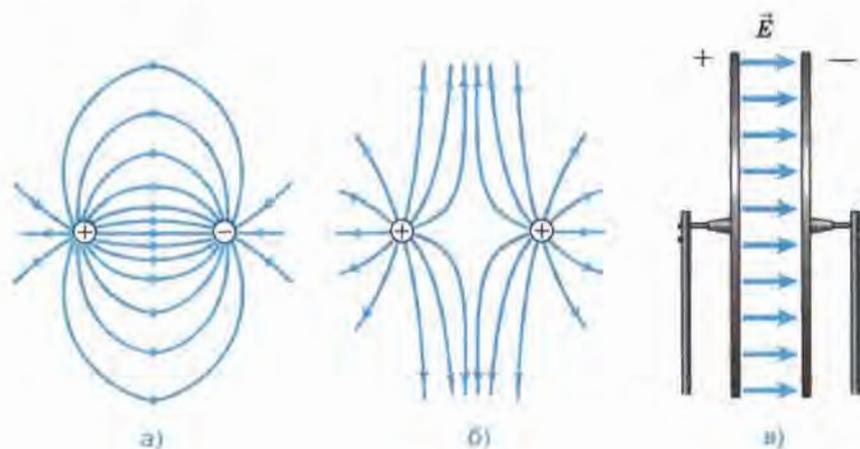


Рис. 148

Убедимся в этом на опыте. Соберем электрическую цепь из источника постоянного тока (ИПТ), конденсатора (К), лампы (Л) и переключателя (П), как показано на рисунке 149. Чтобы зарядить конденсатор, подключим его и источник тока, поставив переключатель в положение 1. Через некоторое время переведем переключатель в положение 2, замкнув цепь с конденсатором и лампой.

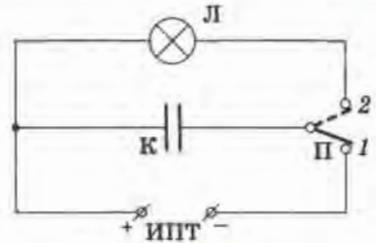


Рис. 149

В результате разрядки конденсатора через лампу пройдет ток, и мы увидим кратковременную вспышку. При вспышке раскаленная током нить накала лампы выделяет энергию в виде света и тепла. Значит, потенциальная энергия электрического поля конденсатора преобразовалась во внутреннюю энергию нити накала и излучилась в виде света и тепла.

Энергию электрического поля конденсатора можно рассчитать по формуле:

$$E_{\text{эл}} = \frac{q^2}{2C}. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что энергия конденсатора данной емкости тем больше, чем больше его заряд.

По типу используемого диэлектрика различают воздушные, бумажные, керамические, оксидно-электролитические, слюдяные и другие конденсаторы.

На рисунке 150 вы видите бумажный (1), электролитический (2) и керамический конденсаторы (3).

В бумажном конденсаторе обкладками служат две одинаковые бумажные ленты из металлической фольги, между которыми в каче-

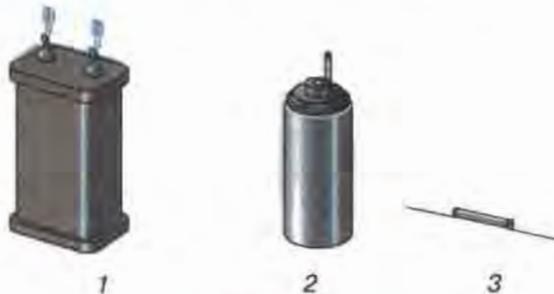


Рис. 150

стве диэлектрика проложена лента из парафинированной бумаги. Все три ленты плотно скручены в рулон и помещены в металлический корпус. При сравнительно небольших габаритах бумажный конденсатор обладает довольно большой емкостью за счет большой площади пластин.

При включении бумажного конденсатора в цепь нет необходимости соблюдать полярность, так как его обкладки совершенно одинаковы.

В оксидно-электролитическом конденсаторе диэлектриком является очень тонкая оксидная пленка, нанесенная на металлическую пластину, являющуюся одной из обкладок. Роль второй обкладки играет электролит, контактирующий с металлическим корпусом. Оксидно-электролитические конденсаторы бывают полярными и неполярными. У полярных центральный электрод, обозначенный знаком «+», соединяют с положительным полюсом источника, а корпус, являющийся вторым электродом, — с отрицательным полюсом (при неправильном включении оксидная пленка разрушается).

В миниатюрных керамических конденсаторах тонкий проводящий слой (обкладки) наносят на керамический цилиндр (изолятор). Необходимо знать, что чем тоньше изоляция, тем меньшее напряжение она выдерживает. Поэтому на корпусе конденсатора обычно указывается его *номинальное напряжение* (при котором исключается интенсивное старение диэлектрика в течение гарантированного срока службы конденсатора). Указывается также емкость конденсатора.

Конденсаторы применяют, например, в лампах-вспышках, лазерах и других устройствах. Широкое применение они нашли в радиотехнике.

В радиотехнических устройствах часто используются конденсаторы переменной емкости (рис. 151, а). Изменение емкости в

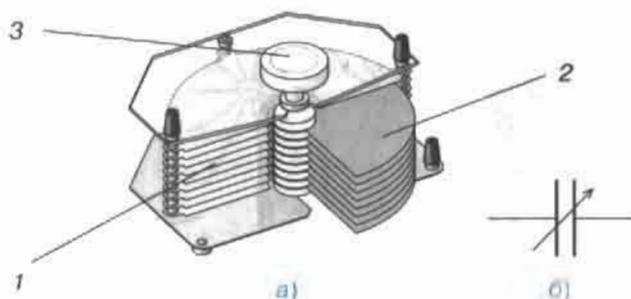


Рис. 151

таким конденсаторе достигается изменением площади перекрытия обкладок. Он состоит из системы неподвижных пластин — статора 1 и системы подвижных пластин — ротора 2, которые поворотом ручки 3 можно вращать вокруг оси. Для увеличения емкости пластины ротора вдвигают в пространство между пластинами статора, увеличивая площадь перекрытия; для уменьшения емкости пластины выдвигают. Условное обозначение конденсатора переменной емкости представлено на рисунке 151, б.

? Вопросы

1. Для чего предназначен конденсатор?
2. Что представляет собой простейший конденсатор? Как он обозначается на схемах?
3. Что понимают под зарядом конденсатора?
4. От чего и как зависит емкость конденсатора?
5. По какой формуле определяется энергия заряженного конденсатора?
6. Как проводился опыт, изображенный на рисунке 149? Что он доказывает?
7. Расскажите об устройстве и действии конденсатора переменной емкости. Где он нашел наиболее широкое применение?

8 Упражнение 45

1. За какой промежуток времени каждый радиосигнал радиогаммы, передаваемой А. С. Поповым, доходил до приемного устройства?
2. Конденсатор емкостью 1 мкФ зарядили до напряжения 100 В. Определите заряд конденсатора.
3. Как изменится емкость плоского конденсатора при уменьшении расстояния между обкладками в 2 раза?
4. Докажите, что энергию поля $E_{эл}$ плоского конденсатора можно определять по формуле $E_{эл} = \frac{CU^2}{2}$.
5. Три конденсатора соединены параллельно. Емкость одного из них равна 15 мкФ, другого — 10 мкФ, а третьего — 25 мкФ. Определите емкость батареи конденсаторов.

§ 55. Колебательный контур. Получение электромагнитных колебаний

Радиовещание (т. е. передача звуковой информации на большие расстояния) осуществляется посредством электромагнитных волн, излучаемых антенной радиопередающего устройства. Мы знаем, что источником электромагнитных волн являются ускоренно движущиеся заряженные частицы (см. § 52). Значит, для того чтобы антенна излучала электромагнитные волны, в ней нужно возбуждать колебания свободных электронов. Такие колебания называются *электромагнитными* (поскольку они порождают электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве в виде электромагнитных волн).

В § 53 отмечалось, что для создания мощной электромагнитной волны, которую можно было бы зарегистрировать приборами на больших расстояниях от излучающей ее антенны, необходимо, чтобы частота волны была не меньше $0,1 \text{ МГц}$ (10^5 Гц)¹. Колебания таких больших частот невозможно получить от генератора переменного электрического тока (см. § 51). Поэтому они подаются на антенну от *генератора высокочастотных электромагнитных колебаний*, имеющегося в каждом радиопередающем устройстве.

Одной из основных частей генератора является *колебательный контур* — колебательная система, в которой могут существовать свободные электромагнитные колебания. Колебательный контур состоит из конденсатора (или батареи конденсаторов) и проволочной катушки.

Получить свободные электромагнитные колебания и удостовериться в их существовании можно с помощью установки, изображенной на рисунке 152.

Из рисунка 152, *а* видно, что катушка 4 имеет сердечник 5 и состоит из двух обмоток: первичной 4₁ (из 3600 витков) и вторичной 4₂ (расположенной поверх первичной в средней ее части и имеющей 40 витков).

Первичная обмотка катушки и батарея конденсаторов 2, соединенные друг с другом через переключатель 3, составляют *колебательный контур*.

¹ Дальность распространения волны зависит от ее мощности P , а мощность — от частоты ν : $P \sim \nu^4$. Из этой зависимости следует, что уменьшение частоты волны, например, всего лишь в 2 раза приведет к уменьшению ее мощности в 16 раз и соответствующему уменьшению дальности распространения.

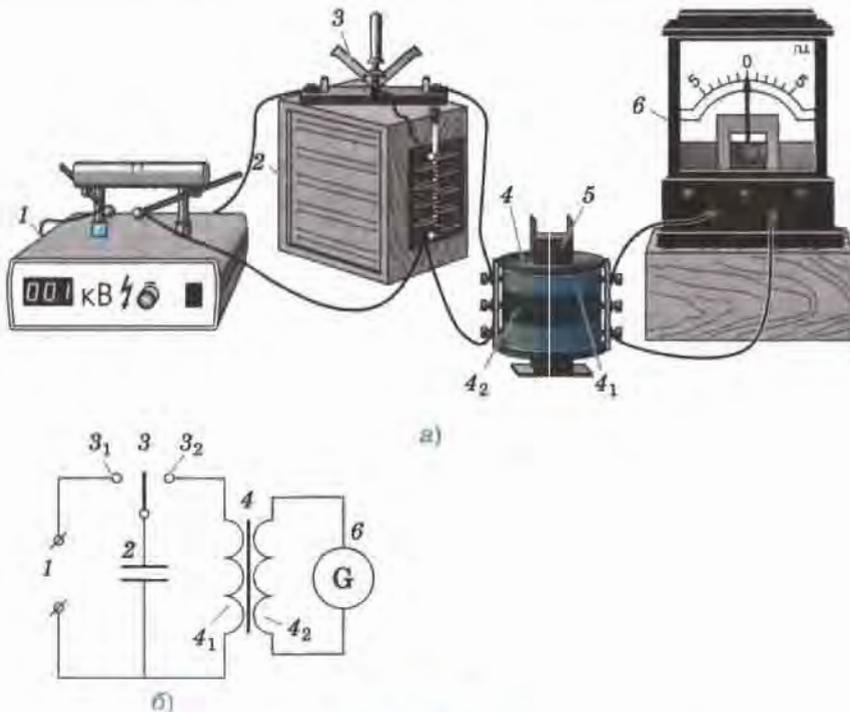


Рис. 152

Вторичная обмотка замкнута на гальванометр *б*, который будет регистрировать возникновение колебаний в контуре.

Поставим переключатель в положение 3_1 (рис. 152, б), соединив батарею конденсаторов с источником постоянного тока *1*. Батарея зарядится от источника. Перекинем переключатель в положение 3_2 , соединив батарею с катушкой. При этом стрелка гальванометра совершит несколько затухающих колебаний, отклоняясь от нулевого деления то в одну, то в другую сторону, и остановится на нуле.

Чтобы объяснить наблюдаемое явление, обратимся к рисунку 153. Пусть при зарядке от источника тока (переключатель в положении 3_1) конденсатор получил некоторый максимальный заряд q_m . Допустим, при этом верхняя его обкладка зарядилась положительно, а нижняя — отрицательно (рис. 153, а). Между обкладками возникло напряжение U_m и электрическое поле, обладающее энергией

$$E_{\text{эл } m} = \frac{q_m^2}{2C} \quad (\text{см. § 54}).$$

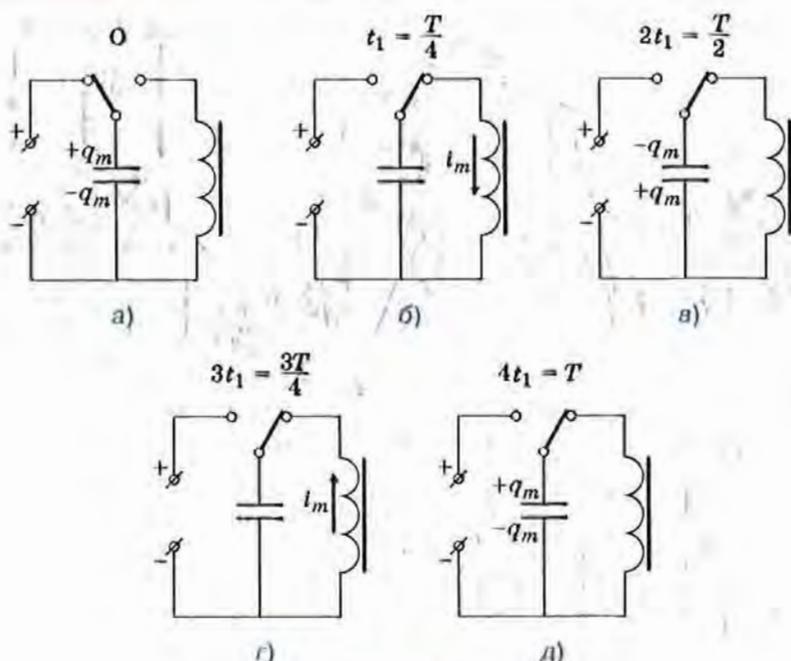


Рис. 153

При замыкании на катушку (переключатель в положении Z_2) в момент, который мы примем за начало отсчета времени, конденсатор начинает разряжаться, и в контуре появляется электрический ток. Сила тока увеличивается постепенно, так как возникший в катушке ток самоиндукции направлен против тока, созданного разряжающимся конденсатором.

Через некоторый промежуток времени t_1 от начала разрядки конденсатор полностью разрядится — его заряд, напряжение между обкладками и энергия электрического поля будут равны нулю (рис. 153, б). Но согласно закону сохранения энергии энергия электрического поля не исчезла — она перешла в энергию магнитного поля тока катушки, которая в этот момент достигает максимального значения: $E_{\text{маг } m} = \frac{L i_m^2}{2}$ (см. § 50). Наибольшему значению энергии соответствует и наибольшая сила тока i_m .

Поскольку конденсатор разряжен, сила тока в контуре начинает уменьшаться. Но теперь ток самоиндукции направлен в ту же сторо-

ну, что и ток разряжавшегося конденсатора, и препятствует его уменьшению. Благодаря току самоиндукции к моменту времени $2t_1$ от начала разрядки конденсатор перезарядится: его заряд вновь будет равен q_m , но теперь верхняя обкладка будет заряжена отрицательно, а нижняя положительно (рис. 153, в).

Понятно, что через промежуток времени, равный $3t_1$, конденсатор вновь будет разряжен (рис. 153, г), а через $4t_1$ будет заряжен так же, как в момент начала разрядки (рис. 153, д).

За промежуток времени, равный $4t_1$, произошло одно полное колебание. Значит $T = 4t_1$, где T — период колебаний (а t_1 , $2t_1$, $3t_1$ — соответственно четверть, половина и три четверти периода).

При периодическом изменении в катушке \mathcal{L}_1 силы тока и его направления соответственно меняется и создаваемый этим током магнитный поток, пронизывающий катушку \mathcal{L}_2 . При этом в ней возникает переменный индукционный ток, регистрируемый гальванометром. Исходя из того что стрелка гальванометра совершила несколько затухающих колебаний и остановилась на нуле, мы можем заключить, что электромагнитные колебания тоже были затухающими. Энергия, полученная контуром от источника тока, постепенно расходовалась на нагревание проводящих частей контура. Когда запас энергии иссяк, колебания прекратились.

Мы знаем, что колебания, происходящие только благодаря начальному запасу энергии называются свободными (см. § 25). Период свободных колебаний равен собственному периоду колебательной системы, в данном случае периоду контура. Формула для определения периода свободных электромагнитных колебаний была получена английским физиком У. Томсоном в 1853 г. Она называется формулой Томсона и выглядит так:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (1)$$

Данная формула показывает, что период колебательного контура определяется параметрами составляющих его элементов: индуктивностью катушки и емкостью конденсатора. Из формулы Томсона следует, например, что при уменьшении емкости или индуктивности период колебаний должен уменьшиться, а их частота — увеличиться. Проверим это на опыте. Уменьшим емкость батареи, отключив от нее несколько конденсаторов. Мы увидим, что колебания стрелки гальванометра участились.

В начале параграфа отмечалось, что подаваемые в антенну высокочастотные колебания необходимы для создания электромагнитных волн. Но для того чтобы волна излучалась в течение длительного времени, нужны незатухающие колебания. Для создания в контуре незатухающих колебаний необходимо восполнять потери энергии, периодически подключая конденсатор к источнику тока. В генераторе это осуществляется автоматически.

? Вопросы

1. Для чего электромагнитные волны подаются в антенну?
2. Почему в радиовещании используются электромагнитные волны высокой частоты?
3. Какую систему представляет собой колебательный контур и из каких устройств он состоит?
4. Расскажите о цели, ходе и наблюдаемом результате опыта, изображенного на рисунке 152?
5. Какие преобразования энергии происходят в результате электромагнитных колебаний?
6. Почему ток в катушке не прекращается в тот момент, когда конденсатор разряжен?
7. Каким образом гальванометр, не входящий в колебательный контур, мог регистрировать происходящие в этом контуре колебания?
8. От чего зависит собственный период колебательного контура? Как его можно изменить?

⚡ Упражнение 46

Колебательный контур состоит из конденсатора переменной емкости и катушки. Как получить в этом контуре электромагнитные колебания, периоды которых отличались бы в 2 раза?

§ 56. Принципы радиосвязи и телевидения

Передачу и прием информации с помощью электромагнитных волн называют радиосвязью. Линии радиосвязи используют, например, для осуществления радиотелефонной связи, передачи телеграмм, факсимиле («факсов»), радиовещательных и телевизионных программ.

Радиосвязь представляет собой довольно сложный процесс. Поэтому мы рассмотрим лишь наиболее общие принципы одного из ее видов — радиотелефонной связи, т. е. передачи звуковой информации, например речи, с помощью электромагнитных волн.

Для получения целостного представления об этом процессе обратимся к блок-схеме, представленной на рисунке 154.

На рисунке 154, *а* изображено *передающее устройство*, состоящее из генератора высокочастотных колебаний, микрофона, модулирующего устройства и передающей антенны.

В микрофон поступают звуковые колебания (речь, музыка и т. д.). Они преобразуются микрофоном в электрические колебания такой же формы, какую имеют звуковые. Из микрофона низкочастотные электрические колебания поступают в модулирующее устройство. Туда же из генератора подаются высокочастотные колебания постоянной амплитуды.

В модулирующем устройстве амплитуду высокочастотных колебаний изменяют (модулируют) с помощью электрических колебаний звуковой частоты. В результате амплитуда становится переменной, причем, меняется она точно так же, как и поступающие из микрофона электрические колебания. Такие высокочастотные модулированные по амплитуде колебания несут в себе информацию о форме звукового сигнала. Поэтому частота высокочастотных колебаний называется *несущей*.

Процесс изменения амплитуды высокочастотных колебаний с частотой, равной частоте звукового сигнала, называется амплитудной модуляцией.

Под воздействием модулированных высокочастотных колебаний в передающей антенне возникает переменный ток высокой частоты. Этот ток порождает в пространстве вокруг антенны электромагнитное поле, которое распространяется в пространстве в виде электромагнитных волн и достигает антенн радиоприемных устройств.

Мы уже упоминали о том, что мощность электромагнитной волны пропорциональна четвертой степени ее частоты: $P \sim \nu^4$ (см. § 55).

Электромагнитные волны звуковых, т. е. низких, частот (от 16 Гц до 20 000 Гц) имеют малую мощность и после излучения очень быстро затухают.

Этим и вызвана необходимость использования модулированных радиоволн, которые благодаря высокой несущей частоте распростра-

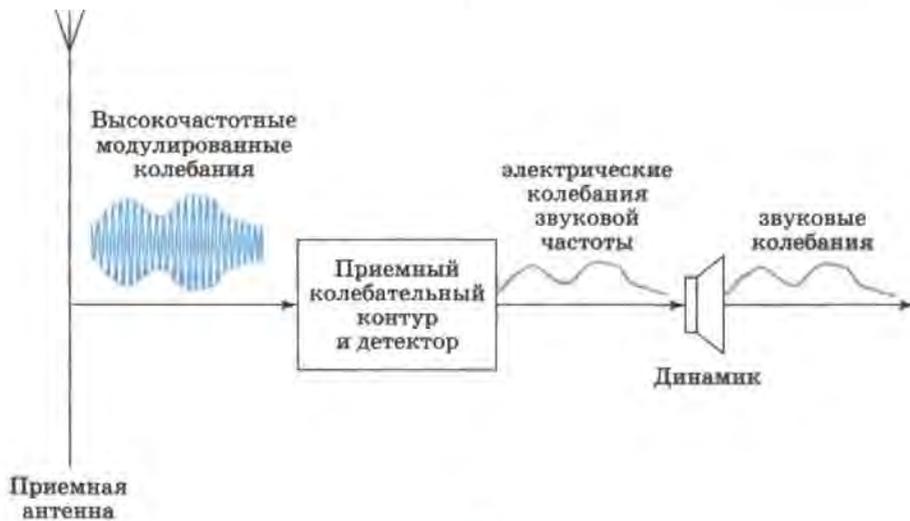
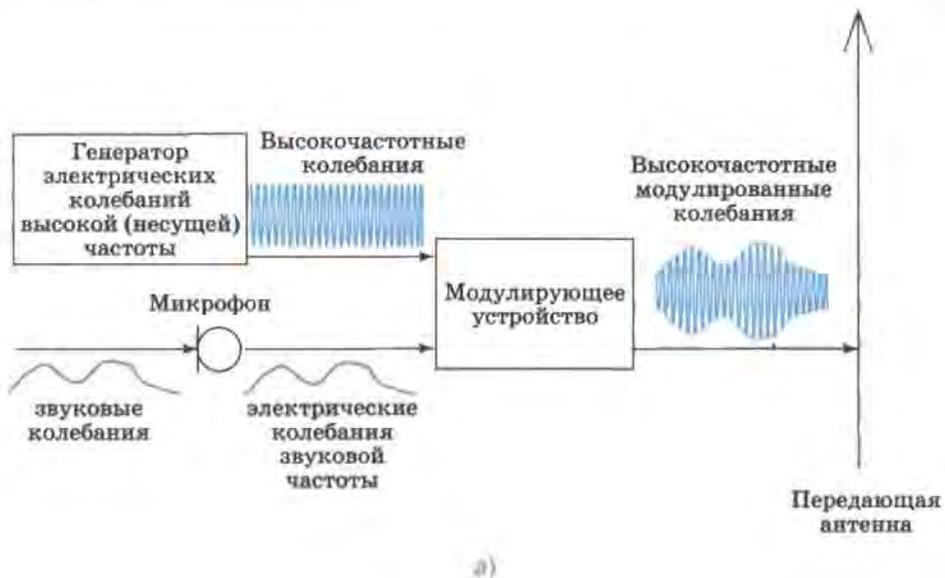


Рис. 154

няются на большие расстояния и при этом содержат информацию о форме передаваемых звуковых колебаний.

Как видно из рисунка 154, б, радиоприемное устройство состоит из приемной антенны, приемного резонирующего колебательного

контура и *детектора* — элемента, пропускающего переменный ток только в одном направлении.

В приемную антенну поступают волны от множества радиостанций. Но каждая радиостанция имеет право осуществлять вещание только на строго определенной, отведенной ей несущей частоте.

Настраивая свой радиоприемник на частоту нужной радиостанции, вы меняете собственную частоту имеющегося в приемнике колебательного контура так, чтобы она была равна несущей частоте данной радиостанции, т. е. чтобы контур был настроен в резонанс с колебаниями, генерируемыми на данной радиостанции. При этом амплитуда колебаний выбранной радиостанции в контуре вашего приемника будет максимальной по сравнению с амплитудами колебаний, поступивших от радиостанций, вещающих на других несущих частотах. В этом заключается второе назначение несущей частоты — она обеспечивает возможность настройки на частоту нужной радиостанции.

Принятые колебания сначала усиливают. Затем для преобразования высокочастотных модулированных колебаний в звуковые производят *детектирование*, т. е. процесс, обратный модуляции. Детектирование проводится в два этапа: сначала с помощью детектора (представляющего собой элемент с односторонней проводимостью) из высокочастотных модулированных колебаний получают пульсирующий ток (рис. 155, а), а затем в динамике этот ток сглаживается и преобразуется в колебания звуковых частот (рис. 155, б).

При передаче телевизионных программ высокочастотные колебания модулируются не только звуковым, но и видеосигналом. Это осуществляется с помощью телевизионной передающей трубки, которая преобразует оптическое изображение в электромагнитные колебания. Модулированные таким образом высокочастотные колебания заключают в себе информацию и о звуке, и об изображении.

В телевидении используются более высокие (порядка миллиардов герц) несущие частоты.

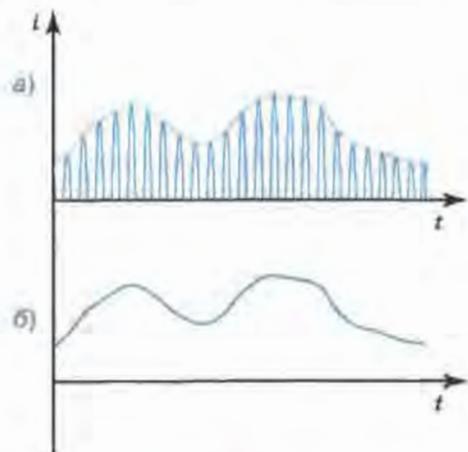


Рис. 155

? Вопросы

1. Что называется радиосвязью?
2. Приведите 2—3 примера использования линий радиосвязи.
3. Пользуясь рисунками 154 и 155, расскажите о принципах осуществления радиотелефонной связи.
4. Частота каких колебаний называется несущей?
5. В чем заключается процесс амплитудной модуляции электрических колебаний?
6. Почему в радиосвязи не используются электромагнитные волны звуковых частот?
7. В чем заключается процесс детектирования колебаний?

🔗 Упражнение 47

Период колебаний зарядов в антенне, излучающей радиоволны, равен 10^{-7} с. Определите частоту этих радиоволн.



§ 57. Интерференция света

Изучая в 8 классе распространение, отражение и преломление света, мы не задавались вопросом о его природе. Теперь уместно было бы обратиться к этому вопросу в связи с изучением электромагнитных волн.

С давних пор существовало два взгляда на природу света. Одни ученые считали, что свет представляет собой волну, другие рассматривали свет как поток частиц (корпускул). Но до начала XIX в. не было достаточно веских доказательств ни в пользу волновых, ни в пользу корпускулярных представлений.

В 1802 г. английский ученый *Томас Юнг* поставил опыт по сложению пучков света от двух источников, в результате чего получил не меняющуюся во времени картину, состоящую из чередующихся светлых и темных полос. Юнг смог дать правильное толкование результатов опыта, объяснив возникновение полос *интерференцией света*.

Вы уже знакомы с интерференцией звуковых волн. Напомним, в чем заключается это явление.

При наложении двух когерентных волн (т. е. волн с одинаковой частотой и постоянной разностью фаз) образуется так называемая интерференционная картина, т. е. не меняющаяся со временем картина распределения амплитуд колебаний в пространстве.

Это значит, что в одних точках пространства колебания всегда происходят с максимальной амплитудой. Это те точки, в которые колебания от обоих источников в любой момент времени приходят в одинаковых фазах и поэтому всегда усиливают друг друга.

В других точках колебания происходят с минимальной амплитудой. Эти точки расположены по отношению к источникам так, что к ним колебания всегда приходят в противоположных фазах, ослабляя друг друга (а при равных амплитудах колебаний волны в любой момент времени полностью гасят друг друга).

В остальных точках колебания также происходят с постоянными амплитудами, значения которых лежат в промежутке от минимальной до максимальной.

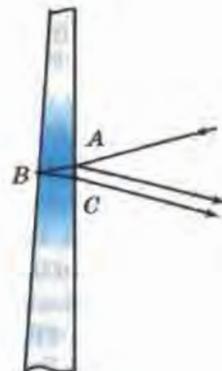
Поскольку явление интерференции присуще только волновым (т. е. периодическим) процессам, то *опыт Юнга явился неопровержимым доказательством того, что свет обладает волновыми свойствами.*

Опыт Юнга сложно осуществить в условиях школьного физического кабинета. Поэтому мы рассмотрим опыт, в котором световую интерференционную картину можно получить с помощью простого и доступного оборудования.

На рисунке 156, а изображено проводочное кольцо с ручкой, затянутое мыльной пленкой. Если в затемненном классе направить на пленку свет какого-либо цвета, например желтого, то на пленке образуются горизонтально расположенные чередующиеся желтые и черные полосы. (Желтый свет можно получить, внося в пламя спиртовки кусочек ваты, смоченный раствором хлорида натрия.)



а)



б)

Рис. 156

Чтобы понять причину появления этих полос, рассмотрим рисунок 156, б. На нем в сильно увеличенном виде показано, как примерно выглядит средняя часть мыльной пленки, если смотреть на нее сбоку. Мы видим, что книзу пленка утолщается. Это связано с тем, что под действием силы тяжести мыльный раствор постепенно стекает вниз.

Пусть в точку A пленки падает световая волна. При этом часть света отражается от передней поверхности в точке A , а часть — от задней в точке B , выходя из пленки в точке C .

Волны, выходящие из точек A и C , являются когерентными, т. е. имеют одну и ту же частоту и постоянную разность фаз, поскольку они порождены одной и той же волной. Разность фаз этих волн зависит, в частности, от того, во сколько раз разность хода ABC больше длины световой волны. А разность хода зависит от толщины пленки в том месте, куда падает световая волна.

Допустим, в каких-либо сечениях толщина пленки такова, что волны, выходящие из точек A и C , имеют одинаковые фазы. Тогда эти волны при сложении усилят друг друга. Значит, в этом месте пленки мы увидим яркую желтую линию.

В других сечениях толщина пленки окажется такой, что волны будут выходить из точек A и C в противоположных фазах. В этом случае волны будут полностью гасить друг друга. При этом мы увидим на пленке темную полосу.

Таким образом, раз наблюдается явление интерференции света, то это означает, что свет представляет собой поток волн.

Юнг не только доказал, что свет — это волна, но и измерил длину световой волны.

Оказалось, что свету разных цветов соответствуют разные интервалы длин волн. Самые большие значения длин волн у красного света: от $7,6 \cdot 10^{-7}$ м до $6,2 \cdot 10^{-7}$ м.

Поскольку частота колебаний в волне обратно пропорциональна длине волны, то красному цвету соответствуют наименьшие по сравнению с другими цветами частоты: $4,0 \cdot 10^{14}$ Гц — $4,8 \cdot 10^{14}$ Гц.

Длины волн убывают (а частоты возрастают) в следующей последовательности цветов: *красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый*. Из этого ряда следует, что фиолетовый свет — самый коротковолновый, его длины волн лежат в интервале $4,5 \cdot 10^{-7}$ м — $3,8 \cdot 10^{-7}$ м, им соответствует интервал частот $6,7 \cdot 10^{14}$ Гц — $8,0 \cdot 10^{14}$ Гц.

Итак, полученные Юнгом световые интерференционные картины свидетельствовали о справедливости волновых взглядов на природу света.

В то же время по мере развития физики к концу XIX в. был открыт целый ряд экспериментальных фактов, которые можно было объяснить только на основе корпускулярных представлений о свете, т. е. рассматривая его как поток частиц.

Поэтому *в настоящее время признана справедливой как волновая, так и корпускулярная теория.*

Обе эти теории, дополняя друг друга, позволяют объяснять многие физические явления.

? Вопросы

1. Какие два взгляда на природу света существовали с давних пор среди ученых?

2. В чем заключалась суть опыта Юнга, что этот опыт доказывал и когда был поставлен?

3. Как проводился опыт, изображенный на рисунке 156, а?

4. Пользуясь рисунком 156, б, объясните, почему на мыльной пленке появляются чередующиеся полосы.

5. Что доказывает опыт, изображенный на рисунке 156, а?

6. Что можно сказать о частоте (или длине волны) световых волн разных цветов?



§ 58. Электромагнитная природа света

В начале XIX в. опытным путем была подтверждена справедливость волновых взглядов на природу света (см. § 57). В то время ни о каких волнах, кроме механических, ученые еще не знали. Поэтому считали, что свет, подобно звуку, представляет собой механическую упругую волну.

Мы знаем, что упругие волны могут возникать только в веществе, поскольку именно частицы вещества совершают упругие колебания, распространяющиеся в пространстве (вспомните опыт, доказывающий, что звук не распространяется в вакууме).

Значит, если свет — *упругая волна, то для его распространения нужна среда.*

Однако свет от звезд доходит до нас через такие области космического пространства, где нет вещества. Учитывая этот факт, сторонники волновых воззрений на природу света выдвинули гипотезу о том, что все мировое пространство заполнено некой невидимой упругой средой, которую они называли *светоносным эфиром* (идея о су-

ществовании эфира была высказана еще в XVII в.). Считалось, что именно в этом эфире и распространяется свет.

В то же время предположение о существовании светоносного эфира порождало много противоречий и вопросов. Так, например, в конце второго десятилетия XIX в. было выяснено, что свет является поперечной волной. Известно, что упругие поперечные волны возникают только в твердых телах. Получалось, что светоносный эфир представляет собой твердое тело.

В связи с этим возникал вопрос о том, как планеты и другие небесные тела могут двигаться сквозь твердый эфир, не испытывая при этом никакого сопротивления.

Необходимость в предположении о существовании специальной среды, в которой распространяется свет, отпала во второй половине XIX в., когда Максвелл теоретически доказал возможность существования электромагнитных волн, распространяющихся не только в веществе, но и в вакууме. Согласно теории Максвелла электромагнитные волны, подобно световым, являются поперечными и распространяются в вакууме со скоростью 300 000 км/с, т. е. со скоростью света.

Исходя из того, что световые и электромагнитные волны обладают общими свойствами (поперечность и одна и та же скорость распространения в вакууме), Максвелл предположил, что *свет является частным проявлением электромагнитных волн.*

Дальнейшее развитие физики подтвердило это предположение. Стало ясно, что видимый свет — это только небольшой диапазон электромагнитных волн с длиной волны от $3,8 \cdot 10^{-7}$ м до $7,6 \cdot 10^{-7}$ м или с частотами от $4,0 \cdot 10^{14}$ Гц до $8,0 \cdot 10^{14}$ Гц (см. рис. 143).

Тем не менее, представление о том, что в некоторых случаях свет ведет себя аналогично потоку частиц, не потеряло своей актуальности.

К началу XX в. выяснилось, что электродинамика Максвелла не позволяет объяснить некоторые экспериментальные факты. Противоречия между теорией и экспериментальными данными удалось разрешить, только предположив, что свет обладает корпускулярными свойствами. В 1900 г. немецкий физик Макс Планк выдвинул гипотезу, что атомы испускают электромагнитную энергию отдельными порциями — *квантами*. Энергия E каждой порции прямо пропорциональна частоте ν излучения:

$$E = h\nu, \quad (1)$$

где h — коэффициент пропорциональности, получивший название *постоянной Планка*.

В 1905 г. немецкий физик Альберт Эйнштейн выдвинул идею, согласно которой электромагнитные волны с частотой ν можно рассматривать как поток квантов излучения с энергией $E = h\nu$.

В настоящее время квант электромагнитного излучения называют также **фотоном**. Фотон (от греч. phos, photos — свет) — это элементарная частица, являющаяся квантом электромагнитного излучения (в том числе света). Фотон не обладает ни массой, ни зарядом и всегда распространяется со скоростью света.

Таким образом, свет обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами.

С увеличением частоты электромагнитного излучения в большей степени проявляются его корпускулярные свойства, т. е. свойства, присущие потоку частиц, и в меньшей — волновые. Из всех диапазонов электромагнитных волн наиболее ярко выраженными корпускулярными свойствами обладает гамма-излучение (оно тоже представлено на рис. 143). Подробнее о гамма-квантах вы узнаете из следующей главы.

? Вопросы

1. В виде каких волн ученые представляли себе свет в начале XIX в.?
2. Чем была вызвана необходимость выдвижения гипотезы о существовании светоносного эфира?
3. Какое предположение о природе света было сделано Максвеллом? Какие общие свойства света и электромагнитных волн явились основанием для такого предположения?
4. Как называется частица электромагнитного излучения?

§ 59. Преломление света.

Физический смысл показателя преломления

В курсе физики 8 класса вы познакомились с явлением преломления света. Теперь вы знаете, что свет представляет собой электромагнитные волны определенного диапазона частот (см. § 58). Опираясь на знания о природе света, вы сможете понять физическую причину преломления и объяснить многие другие связанные с ним световые явления.

Рисунок 157 поможет вам вспомнить некоторые понятия и термины, необходимые для дальнейшего изучения световых явлений. Рассмотрите этот рисунок и прочтите комментарии к нему.



Переходя из одной среды в другую, луч преломляется, т. е. меняет направление распространения

Рис. 157

Рисунок 158 является иллюстрацией к закону преломления света, который в курсе 8 класса излагался в следующей формулировке:

лучи падающий, преломленный и перпендикуляр, проведенный к границе раздела двух сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21}. \quad (1)$$

Величина n_{21} в уравнении (1) называется *относительным показателем преломления* второй среды относительно первой.

Относительным показателем преломления второй среды относительно первой называется физическая величина, равная отношению синуса угла падения луча к синусу угла преломления:

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}. \quad (2)$$

При изменении угла падения будет соответственно меняться и угол преломления (см. рис. 158), но при любом угле падения отношение синусов этих углов будет оставаться постоянным для данных двух сред.

Если луч переходит в какую-либо среду из вакуума, то

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n, \quad (3)$$

где n — называется *абсолютным показателем преломления* (или просто *показателем преломления*) *второй среды*. В этом случае первой «средой» является вакуум, абсолютный показатель которого принят за единицу.

Абсолютный показатель преломления среды — это показатель преломления среды относительно вакуума.

Абсолютным показателем преломления среды называется физическая величина, равная отношению синуса угла падения луча к синусу угла преломления при переходе луча из вакуума в эту среду:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}. \quad (4)$$

Из уравнений (2) и (4) видно, что показатели преломления — как относительный, так и абсолютный — являются величинами неизменными (т. е. не имеют никаких единиц).

Существуют таблицы значений абсолютных показателей преломления для твердых, жидких и газообразных веществ. Абсолютные показатели некоторых из них приведены в таблице 3.

Из двух веществ *оптически более плотным* называется то, у которого больше показатель преломления. Например, согласно данным таблицы, у любого стекла показатель преломления больше, чем у воздуха ($n_{\text{стекла}}$ — от 1,470 до 2,040, а $n_{\text{воздуха}}$ — 1,000). Значит, стекло — среда оптически более плотная, чем воздух.

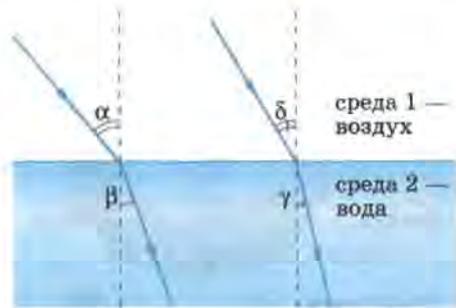


Рис. 158

Таблица 3

Вещество	Показатель преломления	Вещество	Показатель преломления
Воздух	1,000	Спирт метиловый	1,329
Пары ртути	1,001	Алмаз	2,417
Вода	1,333	Органическое стекло	От 1,485 до 1,500
Подсолнечное масло	1,470	Различные сорта стекла	От 1,470 до 2,040

Примечание. В таблице приведены показатели преломления газов (паров), жидкостей и твердых тел для желтой линии натрия ($\lambda = 589,3$ нм в вакууме)¹

На рисунке 159 изображены опыты по преломлению светового луча при его переходе из воздуха в стекло и обратно при разных углах падения. Чтобы вспомнить закономерности преломления, рассмотрите этот рисунок, прочтите все комментарии к нему.

Закон преломления света был открыт опытным путем голландским ученым **Виллебордом Снеллиусом** в 1621 г. Закон был сформулирован в трактате по оптике, который нашли в бумагах ученого после его смерти.

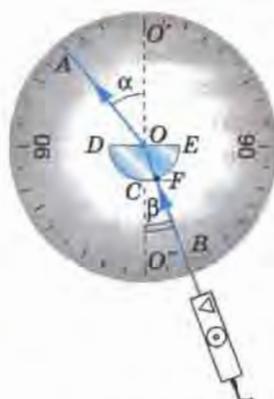
После открытия Снеллиуса несколькими учеными была выдвинута гипотеза о том, что *преломление света обусловлено изменением его скорости при переходе через границу двух сред*. Справедливость этой гипотезы была подтверждена теоретическими доказательствами, выполненными независимо друг от друга французским математиком **Пьером Ферма** (в 1662 г.) и голландским физиком **Христианом Гюйгенсом** (в 1690 г.). Разными путями они пришли к одному и тому же результату, доказав, что

¹ Пояснения по поводу желтой линии натрия и соответствующей ей длины волны в вакууме даны в следующем параграфе.

При переходе из воздуха в стекло ($n_c > n_a$) луч приближается к перпендикуляру $O'O''$, $\beta < \alpha$



а)

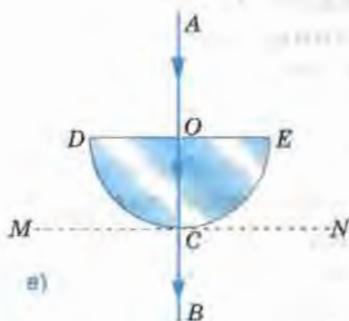


б)

При переходе из стекла в воздух ($n_a < n_c$) луч удаляется от перпендикуляра $O'O''$, $\alpha > \beta$

Обратимость световых лучей:

если луч AO после преломления пошел по направлению OB (рис. а), то луч BO после преломления пойдет по направлению OA (рис. б)



в)

Луч AO не преломляется в т. O , так как $AO \perp DE$.

Луч OC не преломляется в т. C , так как радиус $OC \perp$ касательной MCN .

По той же причине лучи OB и BO не преломляются в т. F

Рис. 159

отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред, равная отношению скоростей света в этих средах:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (5)$$

Утверждение (5) вместе с утверждением о том, что

лучи падающий, преломленный и перпендикуляр, проведенный к границе раздела двух сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости,

представляют собой еще один вариант формулировки **закона преломления света**.

Взаимосвязь величин, входящих в уравнение (5), послужила веским основанием для появления еще одной формулировки определения относительного показателя преломления:

относительным показателем преломления второй среды относительно первой называется физическая величина, равная отношению скоростей света в этих средах:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (6)$$

Пусть луч света переходит из вакуума в какую-либо среду. Подставив в уравнение (6) вместо v_1 скорость света в вакууме c , получим уравнение (7), являющееся определением абсолютного показателя преломления:

абсолютным показателем преломления среды называется физическая величина, равная отношению скорости света в вакууме к скорости света в данной среде:

$$n = \frac{c}{v}. \quad (7)$$

Согласно уравнениям (6) и (7) n_{21} показывает, во сколько раз меняется скорость света при его переходе из одной среды в другую, а n — при переходе из вакуума в среду. В этом заключается *физический смысл показателей преломления*.

Значение абсолютного показателя преломления n любого вещества больше единицы (в этом убеждают данные, содержащиеся в таблице 3 и в аналогичных, но более полных таблицах физических справочников). Тогда, согласно уравнению (7), $c/v > 1$ и $c > v$, т. е. *скорость света в любом веществе меньше скорости света в вакууме*.

Не приводя строгих обоснований (они сложны и громоздки), отметим, что причиной уменьшения скорости света при его переходе из вакуума в вещество является взаимодействие световой волны с атомами и молекулами вещества. *Чем сильнее взаимодействие, тем больше оптическая плотность, и тем меньше скорость света*. Таким образом,

скорость света в среде и абсолютный показатель преломления определяются свойствами этой среды.

* Обратимся теперь к рисунку 160, который поясняет, почему на границе двух сред с изменением скорости меняется и направление распространения световой волны.

На рисунке изображена световая волна, переходящая из воздуха в воду и падающая на границу раздела этих сред под углом α . В воздухе свет распространяется со скоростью v_1 , а в воде — с меньшей скоростью v_2 .

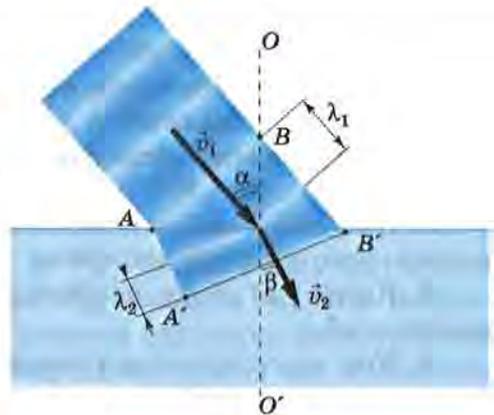


Рис. 160

Первой до границы доходит точка A волны. За промежуток времени Δt точка B , перемещаясь в воздухе с прежней скоростью v_1 , достигнет точки B' . За то же время точка A , перемещаясь в воде с меньшей скоростью v_2 , пройдет меньшее расстояние, достигнув только точки A' . При этом так называемый фронт волны $A'B'$ в воде окажется повернутым на некоторый угол по отношению к фронту AB волны в воздухе. А вектор скорости (который всегда перпендикулярен к фронту волны и совпадает с направлением ее распространения) поворачивается, приближаясь к прямой OO' , перпендикулярной к границе раздела сред. При этом угол преломления β оказывается меньше угла преломления α . Так происходит преломление света.

Из рисунка видно также, что при переходе в другую среду и повороте волнового фронта, меняется и длина волны: при переходе в оптически более плотную среду уменьшается скорость, длина волны тоже уменьшается ($\lambda_2 < \lambda_1$). Это согласуется и с известной вам формулой $\lambda = v/\nu$ (см. § 33), из которой следует, что при неизменной частоте ν (которая не зависит от плотности среды и поэтому не меняется при переходе луча из одной среды в другую) уменьшение скорости распространения волны сопровождается пропорциональным уменьшением длины волны.

* Материал этого параграфа расширил и углубил ваши знания о преломлении света. Благодаря этому мы можем приступить к изучению данного в следующем параграфе явления дисперсии, тесно связанного с преломлением света.

? Вопросы

1. Дайте определение относительного и абсолютного показателя преломления.

2. Чему равен абсолютный показатель преломления вакуума?

3. Для значений какого показателя преломления — относительного или абсолютного — существуют таблицы?

4. Какое из двух веществ называется оптически более плотным?

5. Как определяются показатели преломления через скорость света в средах?

6. Где свет распространяется с наибольшей скоростью?

7. Какова физическая причина уменьшения скорости света при его переходе из вакуума в среду или из среды с меньшей оптической плотностью в среду с большей?

8. Чем определяются (т. е. от чего зависят) абсолютный показатель преломления среды и скорость света в ней?

* 9. Расскажите, что изображено на рисунке 160 и что этот рисунок иллюстрирует.



🔗 Упражнение 48

1. Какие из трех величин — длина волны, частота и скорость распространения волны — изменятся при переходе волны из вакуума в алмаз?

2. Пользуясь уравнениями (6) и (7), докажите, что $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$, где n_1 — абсолютный показатель преломления первой среды, а n_2 — второй.

Указание: выразите из уравнения (7) скорость v света в среде через c и n ; по аналогии с полученной формулой запишите формулы для определения скоростей v_1 и v_2 , входящих в уравнение (6); замените в уравнении (6) v_1 и v_2 на соответствующие им буквенные выражения.

§ 60. Дисперсия света. Цвета тел

В предыдущем параграфе был сделан вывод о том, что абсолютный показатель преломления среды определяется ее свойствами.

Являются ли свойства среды единственным фактором, определяющим показатель преломления, или существуют какие-либо другие причины, от которых он зависит?

Обратите внимание на примечание к таблице 3 в § 59. В нем говорится, что все содержащиеся в этой таблице показатели преломления приведены «...для желтой линии натрия ($\lambda = 589,3$ нм в вакууме)».

Под желтой линией натрия подразумевается свет желтого цвета с длиной волны $\lambda = 589,3$ нм ($= 589,3 \cdot 10^{-9}$ м), который излучают атомы химического элемента натрия (Na) при определенных условиях (вопрос об образовании *линейчатых спектров* при излучении света атомами рассматривается в § 62—64). Поскольку длина волны, как и скорость света данной частоты, в разных средах различна, то для определенности приводится значение длины волны, которую этот свет имеет в вакууме.

Следует ли из этого примечания, что для световых волн других частот (т. е. других цветов) значения показателей преломления сред будут другими? То есть *зависит ли показатель преломления от частоты (цвета) световой волны?*

Для ответа на этот вопрос сделаем опыт, изображенный на рисунке 161 (все изображенные на рисунке предметы размещены на классной доске с металлической основой и удерживаются на ней благодаря имеющимся на них магнитам). Разместим около объектива осветителя О диафрагму Д с горизонтальной щелью (расположенной перпендикулярно к плоскости чертежа) и синий светофильтр Ф (т. е. синее стекло). При этом на экране (роль которого выполняет укрепленная на доске и немного отогнутая бумажная полоска) на уровне световых лучей получится изображение щели синего цвета (на рис. 161, а его положение обозначено символом C_1).

Заменим синий фильтр на красный — и на том же месте вместо синего изображения щели увидим красное K_1 .

Теперь на пути красного светового пучка поставим треугольную стеклянную призму ИЕМ (рис. 161, б; объемное изображение призмы — на рис. 161, в). Проходя через призму, луч отклоняется в сторону более широкой ее части ИМ, в результате чего изображение щели смещается вниз в положение K_2 .

Прделаем тот же опыт, предварительно заменив красный светофильтр на синий (рис. 161, в). Мы обнаружим, что изображение щели, полученное в синих лучах, прошедших через призму, окажется в положении C_2 , т. е. сместится в том же направлении, что и красное, но на большее расстояние.

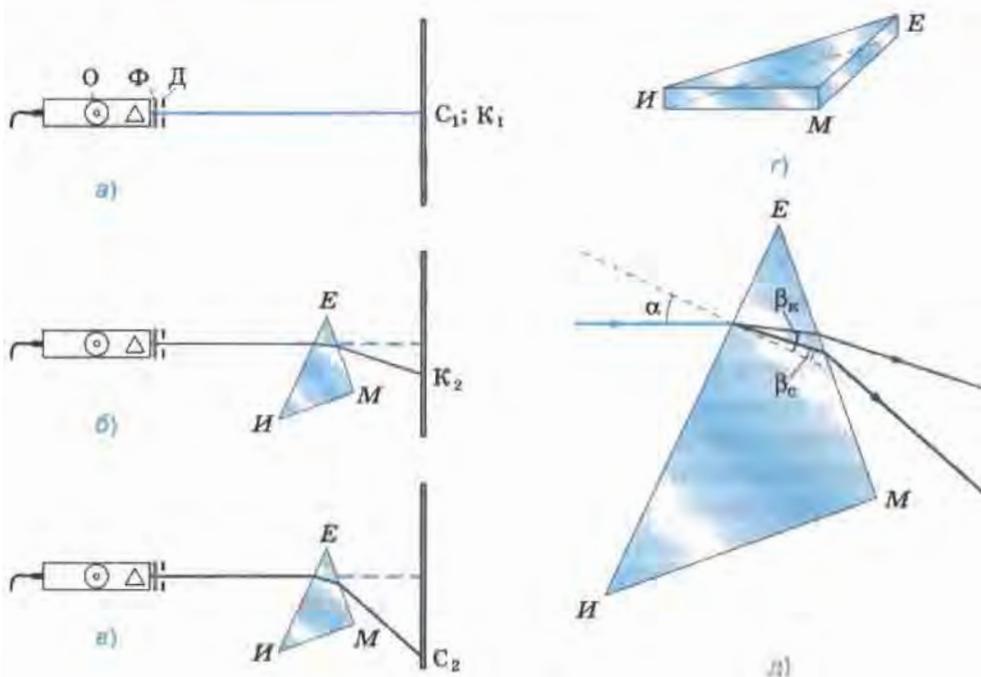


Рис. 161

Проведенный опыт свидетельствует о том, что лучи синего цвета, имеющие большую частоту, чем красные, преломились сильнее красных. Это означает, что абсолютный показатель преломления стекла, из которого изготовлена призма, зависит не только от свойств стекла (как было отмечено в § 59), но и от частоты (от цвета) проходящего через него света.

Из рисунка 161, д видно, что уже на первой боковой грани IE призмы при одном и том же угле падения α синий луч преломился сильнее красного: $\beta_c < \beta_k$, значит, $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta_c} > \frac{\sin \alpha}{\sin \beta_k}$, т. е. $n_c > n_k$. Соответственно, для синих лучей больше и оптическая плотность стекла, но скорость их распространения в стекле меньше скорости красных, поскольку скорость обратно пропорциональна показателю преломления:

$$v = \frac{c}{n}.$$

Зависимость показателя преломления вещества и скорости света в нем от частоты световой волны называется дисперсией света.

Слово дисперсия происходит от латинского *dispersio* и означает «рассеяние», «развешивание».

Теперь, убрав с осветителя фильтр, пропустим через призму пучок белого света (рис. I на цветной вклейке). При этом мы увидим, что этот пучок не только отклонился к более широкой части призмы, но и разложился в *спектр*¹, в котором семь цветов — красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый — как в радуге, плавно переходят друг в друга.

Это наводит на мысль, что белый свет является сложным, состоящим из световых волн разных цветов (и, соответственно, разных частот).

Синий и красный лучи, выделенные в предыдущем опыте из белого света с помощью фильтров, при прохождении через призму не разлагались в спектр. Это говорит о том, что цветные лучи являются *простыми* или, как их еще называют, *монохроматическими* (от греческих слов *monos* — один, единственный и *chromatikos* — цветной, окрашенный). Свет каждого цвета представлен волнами настолько узкого интервала частот, что обычно его характеризуют одной определенной частотой.

Чтобы удостовериться, что призма не окрашивает, а именно разлагает белый свет, поставим на пути вышедшего из призмы и разложившегося в спектр пучка собирающую линзу (см. рис. II на цветной вклейке). Мы увидим, что после преломления в линзе разноцветные лучи, пересекаясь в точке А, «складываются», приобретая белый цвет.

Сложить спектральные цвета и получить белый цвет можно и на более простом опыте. Возьмем картонный диск с изображенными на нем разноцветными секторами и укрепим его на валу центробежной машины (см. рис. III на цветной вклейке). При быстром вращении диска создается впечатление, что он белый.

¹ В данном случае под спектром понимается совокупность частот или длин волн, содержащихся в излучении какого-либо вещества. (В общем случае в физике *спектр* — это совокупность всех значений какой-либо физической величины, характеризующей систему или процесс.)



Рис. 162

Теперь давайте исследуем, почему окружающие нас тела, освещенные одним и тем же солнечным светом, имеют разные цвета. В чем заключается физическая причина такого различия?

Чтобы выяснить это, сделаем следующий опыт. С помощью установки, изображенной на рисунке 162, получим на белом экране (или на укрепленном на доске листе белой бумаги) спектр,

изображенный на рисунке IV, а цветной вклейки. Закроем правую часть спектра широкой бумажной полоской, например зеленого цвета. Мы увидим, что цвет полоски остается ярко-зеленым и не меняет оттенка только в той области, где на нее падают зеленые лучи. А при освещении лучами других цветов она либо меняет оттенок (в желтой части спектра), либо выглядит темной (см. рис. IV, б на цветной вклейке).

Значит, покрывающая полоску краска обладает способностью отражать только зеленый свет и поглощать свет всех остальных цветов.

Мы повторили с вами опыты, которые проделал И. Ньютон в 1666 г. Он пропускал через призму узкий пучок солнечного света, проходящего через маленькое отверстие в ставне.

? Вопросы

1. С какой целью ставился опыт, изображенный на рисунке 161, и как он проводился? Каков результат опыта и какой вывод из него следует?

2. Что называется дисперсией света?

3. Расскажите об опыте по преломлению белого света в призме. (Ход опыта, результаты, вывод.)

4. Какой свет называется простым? Как иначе называют свет простых цветов?

5. В чем мы удостоверились, собрав с помощью линзы свет всех цветов спектра в белый?

6. Расскажите об опыте, изображенном на рисунке III цветной вклейки.

7. В чем заключается физическая причина различия цветов окружающих нас тел?

Упражнение 49

1. На столе в темной комнате лежат два листа бумаги — белый и черный. В центре каждого листа наклеен оранжевый круг. Что мы увидим, осветив эти листы белым светом? оранжевым светом такого же оттенка как и круг?

2. Напишите на белом листе бумаги первые буквы названий всех цветов спектра фломастерами соответствующих цветов: К — красным, О — оранжевым, Ж — желтым и т. д. Рассмотрите буквы через трехсантиметровый слой ярко окрашенной прозрачной жидкости, налитой в тонкостенный стакан. Запишите результаты наблюдений и объясните их.

Указание: в качестве указанной жидкости можно использовать, например, малиновый или лимонный сиропы, различные соки и т. п.

3. Почему при дневном и вечернем освещении цвет одного и того же тела немного различается?

§ 61. Спектрограф и спектроскоп

В настоящее время для получения четких и ярких спектров используют специальные оптические приборы.

Устройство и внешний вид одного из таких приборов — двухтрубного спектроскопа — показано на рисунке 163.

Чтобы понять принцип действия спектроскопа, обратимся к рисунку 163, *а*. В трубе К, называемой *коллиматором*, имеется узкая щель *S*. Через эту щель исследуемый свет входит в прибор и расширяющимся пучком падает на линзу L_1 . Поскольку щель *S* расположена в фокальной плоскости этой линзы, то свет выходит из линзы параллельным пучком, а затем падает на призму П.

Так как волны разных цветов (т. е. разных частот) отклоняются призмой на разные углы, то из призмы выходят параллельные пучки разного направления (на рисунке показаны крайние лучи только двух пучков — красного и фиолетового). Эти пучки, преломившись в линзе L_2 , образуют в ее фокальной плоскости ЭЭ₁ изображения щели *S*. Причем изображения, соответствующие волнам разных частот, приходятся на разные места плоскости ЭЭ₁.

Если на щель падает белый свет, то все изображения щели сливаются в цветную полосу, в которой представлены все цвета.

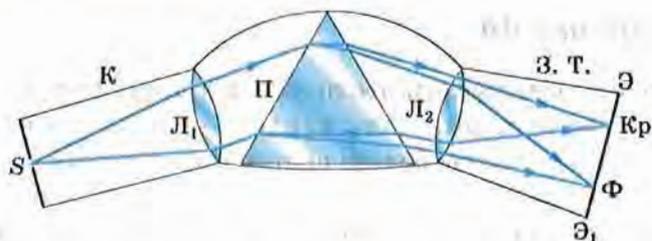


Рис. 163

Если же исследуемый свет представляет собой смесь нескольких монохроматических (простых) цветов, то спектр получится в виде узких линий соответствующих цветов, разделенных темными промежутками.

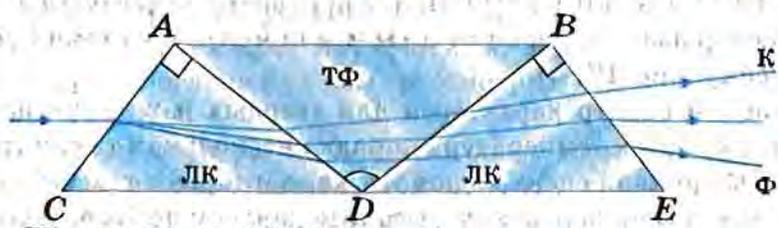
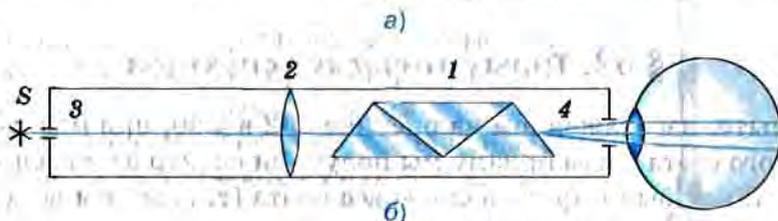
В спектрографе в плоскости $\mathcal{E}\mathcal{E}_1$ помещается фотопластинка, на которой получается фотография спектра. Фотография спектра называется *спектрограммой*.

Если же в плоскость $\mathcal{E}\mathcal{E}_1$ поместить матовое стекло, то образующийся на нем спектр можно наблюдать глазом, увеличив изображение с помощью линзы. В этом случае прибор называется *спектроскопом*. Внешне спектрограф и спектроскоп выглядят одинаково (рис. 163, б).

На рисунке 164 показан однотрубный спектроскоп (внешний вид — рис. а; устройство — рис. б и в). В школе его обычно используют при выполнении лабораторных работ по оптике. В том, как он действует, вы разберетесь самостоятельно при выполнении упражнения 50.

ОПТИКА

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА
СПЕКТРОСКОП ОДНОТРУБНЫЙ



ЛК — стекло «легкий крон»
ТФ — стекло «тяжелый флинт»
Для лучей любого цвета $n_{ТФ} > n_{ЛК}$

в)

Рис. 164

Спектроскоп был сконструирован в 1815 г. немецким физиком **Йозефом Фраунгофером**. Этот прибор был необходим ученому для исследования явления дисперсии, которым он занимался в то время.

? Вопросы

1. Пользуясь рисунком 163, расскажите об устройстве спектрографа.
2. Какого вида спектр получается с помощью спектрографа, если исследуемый в нем свет представляет собой смесь из нескольких простых цветов?
3. Что такое спектрограмма?
4. Чем спектрограф отличается от спектроскопа?

Упражнение 50

Рассмотрите рисунок 164, *в* и объясните, почему при входе в призму *ADB* лучи отклоняются в сторону более широкой ее части (угол преломления меньше угла падения), а при входе в призму *DBE* — в сторону более узкой ее части (угол преломления больше угла падения).



§ 62. Типы оптических спектров

В опыте, изображенном на рисунке 162 в § 60, при пропускании солнечного света через призму мы получили спектр в виде сплошной полосы. В ней были представлены все цвета (т. е. волны всех частот от $4,0 \cdot 10^{14}$ Гц до $8,0 \cdot 10^{14}$ Гц), плавно переходящие один в другой. Такой спектр называется *сплошным* или *непрерывным* (см. цветную вклейку, рис. IV, *а*).

Сплошной спектр характерен для твердых и жидких излучающих тел, имеющих температуру порядка нескольких тысяч градусов Цельсия. Сплошной спектр дают также светящиеся газы и пары, если они находятся под очень высоким давлением (т. е. если силы взаимодействия между их молекулами достаточно велики).

Например, сплошной спектр можно увидеть, если направить спектроскоп на свет от раскаленной нити электрической лампы ($t_{\text{нити}} \approx 2300$ °С), светящуюся поверхность расплавленного металла, пламя свечи. В последнем из перечисленных случаев свет излучается мельчайшими раскаленными твердыми частицами (каждая из которых состоит из огромного числа взаимодействующих между собой атомов).

Иной вид имеет спектр, если в качестве источника света использовать светящиеся газы малой плотности. Такие газы обычно состоят из *изолированных* атомов, т. е. атомов, взаимодействие между которыми пренебрежимо мало. Свечения газа можно добиться, нагрев его до температуры порядка 2000 °С или более высокой.

Например, если внести в пламя газовой горелки кусочек поваренной соли (рис. 165), то пламя окрасится в желтый цвет, а в спектре, наблюдаемом с помощью спектроскопа, будут видны две близко расположенные желтые линии, характерные для спектра паров натрия (см. рис. V на цветной вклейке).

Это означает, что под действием высокой температуры молекулы NaCl распались на атомы натрия и хлора. Свечение атомов хлора воз-

будить гораздо труднее, чем атомов натрия, поэтому в данном опыте линии хлора не видны. Другие химические элементы дают другие наборы отдельных линий определенных длин волн (см. рис. VI и VII на цветной вклейке).

Такие спектры называются *линейчатыми*.

Линейчатые спектры получают от газов и паров малой плотности, при которой свет излучается изолированными атомами.

Описанные выше спектры — сплошные и линейчатые — называются *спектрами испускания*.

Кроме спектров испускания существуют так называемые *спектры поглощения*. Из всех спектров поглощения мы рассмотрим только линейчатые.

Линейчатые спектры поглощения дают газы малой плотности, состоящие из изолированных атомов, когда сквозь них проходит свет от яркого и более горячего (по сравнению с температурой самих газов) источника, дающего непрерывный спектр.

Линейчатый спектр поглощения можно получить, например, если пропустить свет от лампы накаливания через сосуд с парами натрия, температура которых ниже температуры нити лампы накаливания. В этом случае в сплошном спектре света от лампы появится узкая черная линия как раз в том месте, где располагается желтая линия в спектре испускания натрия (сравните рисунки V и VIII на цветной вклейке). Это и будет линейчатый спектр поглощения натрия. Другими словами, линии поглощения атомов натрия точно соответствуют его линиям испускания.

Совпадение частот линий испускания и поглощения можно наблюдать и в спектрах других элементов, например водорода и гелия (см. рис. VI, IX и VII, X на цветной вклейке).

Общий для всех химических элементов закон, согласно которому

атомы данного элемента поглощают световые волны тех же самых частот, на которых они излучают,

был открыт в середине XIX в. немецким физиком *Густавом Кирхгофом*.



Рис. 165

? Вопросы

1. Как выглядит сплошной спектр?

2. От света каких тел получается сплошной спектр?

Приведите примеры.

3. Как выглядят линейчатые спектры?

4. Каким образом можно получить линейчатый спектр испускания натрия?

5. От каких источников света получают линейчатые спектры?

6. Каков механизм получения линейчатых спектров поглощения (т. е. что нужно сделать, чтобы получить их)?

7. Как получить линейчатый спектр поглощения натрия и как он выглядит?

8. В чем заключается суть закона Кирхгофа, касающегося линейчатых спектров излучения и поглощения?



§ 63. Спектральный анализ

Спектр атомов каждого химического элемента уникален. Как не бывает двух людей с одинаковым дактилоскопическим узором¹ или двух китов с одинаковой окраской хвостового плавника, так и не существует двух химических элементов, атомы которых излучали бы одинаковый набор спектральных линий (рис. 166).

Благодаря этому стало возможным появление *метода спектрального анализа*, разработанного в 1859 г. Кирхгофом и его соотечественником немецким химиком Бунзеном.

Спектральным анализом называется метод определения химического состава вещества по его линейчатому спектру.

Для проведения спектрального анализа исследуемое вещество приводят в состояние атомарного газа (атомизируют) и одновременно с этим возбуждают атомы, т. е. сообщают им дополнительную энергию.

Для атомизации и возбуждения используют высокотемпературные источники света: пламя или электрические разряды. В них по-

¹ Расположение рельефных линий кожи на внутренних (ладонных) поверхностях ногтевых фаланг пальцев рук.

мещают образец исследуемого вещества в виде порошка или аэрозоля раствора (т. е. мельчайших капелек раствора, распыленного в воздухе). Затем с помощью спектрографа получают фотографию спектров атомов элементов, входящих в состав данного вещества.

В настоящее время существуют таблицы спектров всех химических элементов. Отыскав в таблице точно такие же спектры, какие были получены при анализе исследуемого образца, узнают, какие химические элементы входят в его состав.

Путем сравнения интенсивности линий определяют количество каждого элемента в образце.

Спектральный анализ выгодно отличается от химического анализа своей простотой, высокой чувствительностью (например, с его помощью можно обнаружить наличие химического элемента, масса которого в данном образце не превышает 10^{-10} г), а также возможностью определять химический состав отдаленных тел, например звезд.

Он используется для контроля состава вещества в металлургии, машиностроении и атомной индустрии. Этот метод применяется также в геологии, археологии, криминалистике и многих других сферах деятельности. В астрономии методом спектрального анализа определяют химический состав атмосфер планет и звезд, температуру звезд и магнитную индукцию их полей. По смещению спектральных линий в спектрах галактик была определена их скорость, и на основании этого сделан вывод о расширении нашей Вселенной,

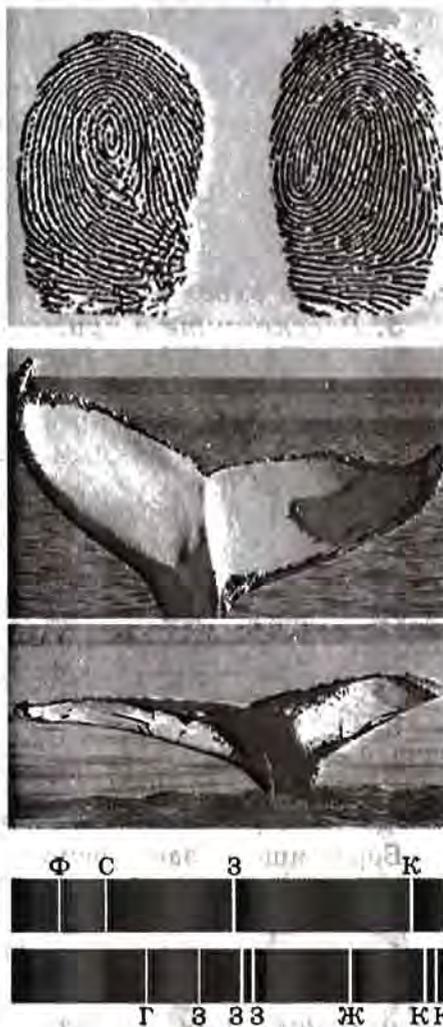


Рис. 166

Вопросы

1. Что такое спектральный анализ?
2. Как проводится спектральный анализ?
3. Как по полученным в эксперименте фотографиям исследуемого образца определяют, какие химические элементы входят в его состав?
4. Можно ли по спектру образца определить количество каждого из входящих в него химических элементов?
5. Расскажите о применении спектрального анализа.



§ 64. Поглощение и испускание света атомами. Происхождение линейчатых спектров

В процессе изучения и применения линейчатых спектров возникли различные вопросы. Как, например, объяснить, почему атомы каждого химического элемента имеют свой строго индивидуальный набор спектральных линий? Почему совпадают линии излучения и поглощения в спектре данного элемента? Чем обусловлены различия в спектрах атомов разных элементов?

Ответы на эти и многие другие вопросы удалось найти только в начале XX в. благодаря возникновению новой физической теории — *квантовой механики*. Одним из основоположников этой теории был датский физик *Нильс Бор*.

Бор пришел к заключению, что свет излучается атомами вещества. В связи с этим в 1913 г. он сформулировал два постулата.

1. Атом может находиться только в особых, стационарных состояниях. Каждому состоянию соответствует определенное значение энергии — энергетический уровень. Находясь в стационарном состоянии, атом не излучает и не поглощает.

Стационарным состояниям соответствуют стационарные орбиты, по которым движутся электроны. Номера стационарных орбит и энергетических уровней (начиная с первого) в общем случае обозначаются латинскими буквами: n , k и т. д. Радиусы орбит, как и энергии стационарных состояний, могут принимать не любые, а определенные дискретные значения. Первая орбита расположена ближе всех к ядру.

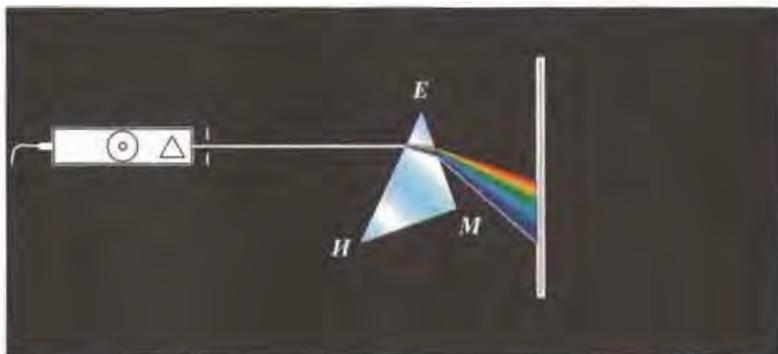


Рис. I

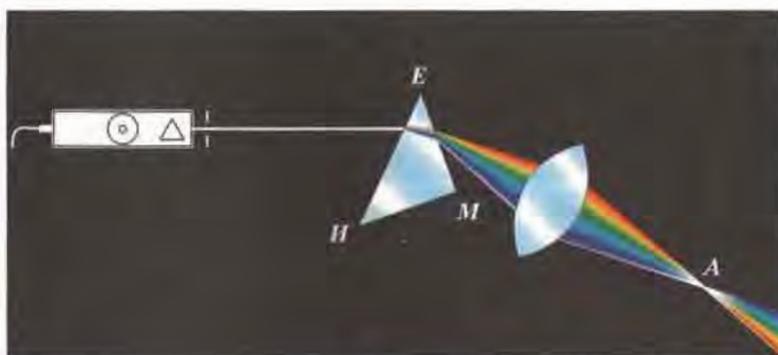
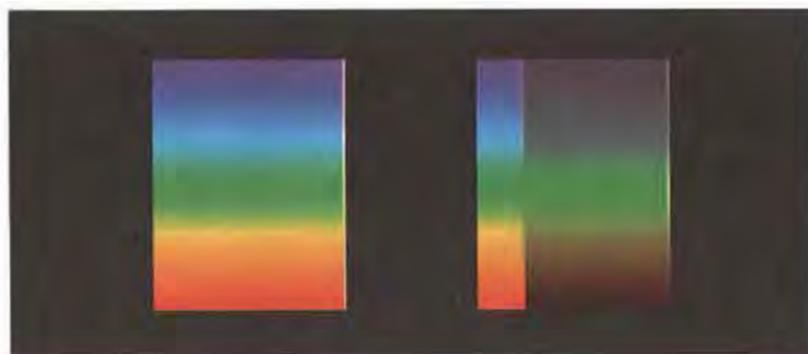


Рис. II



Рис. III



а)

Рис. IV

б)

Рис. V



Рис. VI



Рис. VII



Рис. VIII



Рис. IX



Рис. X



2. Излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией E_k в стационарное состояние с меньшей энергией E_n .

Согласно закону сохранения энергии энергия излученного фотона (см. § 58) равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu = E_k - E_n. \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует, что атом может излучать свет только с частотами

$$\nu = \frac{E_k - E_n}{h}. \quad (2)$$

Атом может также поглощать фотоны. При поглощении фотона атом переходит из стационарного состояния с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией.

Состояние атома, в котором все электроны находятся на стационарных орбитах с наименьшей возможной энергией, называется **основным**. Все другие состояния атома называются **возбужденными**.

У атомов каждого химического элемента имеется свой характерный набор энергетических уровней. Поэтому переходу с более высокого энергетического уровня на более низкий будут соответствовать характерные линии в спектре испускания, отличные от линий в спектре другого элемента.

Совпадение линий излучения и поглощения в спектрах атомов данного химического элемента объясняется тем, что частоты волн, соответствующих этим линиям в спектре, определяются одними и теми же энергетическими уровнями. Поэтому атомы могут поглощать свет только тех частот, которые они способны излучать.

? Вопросы

1. Сформулируйте постулаты Бора.
2. Запишите уравнения для определения энергии и частоты излученного фотона.
3. Какое состояние атома называют основным? возбужденным?
4. Как объясняется совпадение линий в спектрах излучения и поглощения данного химического элемента?

СТРОЕНИЕ АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ АТОМНЫХ ЯДЕР

§ 65. Радиоактивность как свидетельство сложного строения атомов

Предположение о том, что все тела состоят из мельчайших частиц, было высказано древнегреческими философами *Левкиппом* и *Демокритом* примерно 2500 лет назад. Частицы эти были названы *атомами*, что означает «неделимые». Таким названием хотели подчеркнуть, что атом — это мельчайшая, простейшая, не имеющая составных частей и поэтому неделимая частица.

Но примерно с середины XIX в. стали появляться экспериментальные факты, которые ставили под сомнение представления о неделимости атомов. Результаты этих экспериментов наводили на мысль о том, что атомы имеют сложную структуру и что в их состав входят электрически заряженные частицы.

Наиболее ярким свидетельством сложного строения атома явилось открытие явления радиоактивности, сделанное французским физиком *Анри Беккерелем* в 1896 г.

Беккерель обнаружил, что химический элемент уран самопроизвольно (т. е. без каких-либо внешних воздействий) излучает ранее неизвестные невидимые лучи, которые позже были названы *радиоактивным излучением*.

Поскольку радиоактивное излучение обладало необычными свойствами, многие ученые занялись его исследованием. Оказалось, что не только уран, но и некоторые другие химические элементы (например, радий) тоже самопроизвольно испускают радиоактивные лучи. Эту способность атомов некоторых химических элементов к самопроизвольному излучению стали называть *радиоактивностью* (от латинских слов *radio* — излучаю и *activus* — действенный).

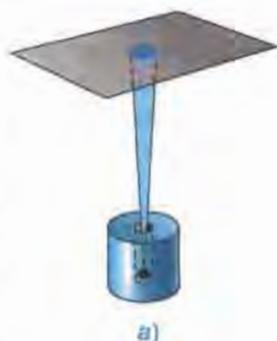
В 1899 г. в результате опыта, проведенного под руководством английского физика *Эрнеста Резерфорда*, было обнаружено, что радиоактивное излучение радия неоднородно, т. е. оно имеет сложный состав. Рассмотрим, как проводился этот опыт.

На рисунке 167, а изображен толстостенный свинцовый сосуд с крупницей радия на дне. Пучок радиоактивного излучения радия выходит сквозь узкое отверстие и попадает на фотопластинку (излучение радия направлено во все стороны, но сквозь толстый слой свинца оно пройти не может). После проявления фотопластинки на ней обнаруживалось одно темное пятно — как раз в том месте, куда попадал пучок.

Потом опыт изменяли (рис. 167, б): создавали сильное магнитное поле, действовавшее на пучок. В этом случае на проявленной пластинке возникало три пятна: одно, центральное, было на том же месте, что и раньше, а два других — по разные стороны от центрального. Если два потока отклонились в магнитном поле от прежнего направления, значит, они представляют собой потоки заряженных частиц. Отклонение в разные стороны свидетельствовало о разных знаках электрических зарядов частиц. В одном потоке присутствовали только положительно заряженные частицы, в другом — отрицательно заряженные. А центральный поток представлял собой излучение, не имеющее электрического заряда.

Положительно заряженные частицы назвали *альфа-частицами*, отрицательно заряженные — *бета-частицами*, а нейтральные — *гамма-частицами* или гамма-квантами (в сокращенном обозначении α -частицы, β -частицы и γ -частицы, называемые также γ -квантами или фотонами).

Некоторое время спустя в результате исследования различных физических характеристик и свойств этих частиц (электрического заряда, массы и др.) удалось установить, что *β -частица представляет собой электрон*, а *α -частица — полностью ионизированный атом химического элемента гелия (т. е. атом гелия,*



а)



б)

Рис. 167

потерявший оба электрона). Выяснилось также, что γ -излучение представляет собой один из видов, точнее, диапазонов электромагнитного излучения (см. рис. 143).

Явление радиоактивности, т. е. самопроизвольное излучение веществом α -, β - и γ -частиц, наряду с другими экспериментальными фактами, послужило основанием для предположения о том, что атомы вещества имеют сложный состав.

? Вопросы

1. В чем заключалось открытие, сделанное Беккерелем в 1896 г.?
2. Как стали называть способность атомов некоторых химических элементов к самопроизвольному излучению?
3. Расскажите, как проводился опыт, схема которого изображена на рисунках 167, а, б. Что выяснилось в результате этого опыта?
4. Как были названы частицы, входящие в состав радиоактивного излучения? Что представляют собой эти частицы?
5. О чем свидетельствовало явление радиоактивности?

§ 66. Модели атомов. Опыт Резерфорда

Явление радиоактивности давало основания предположить, что в состав атома входят отрицательно и положительно заряженные частицы (см. § 65). Кроме того, было известно, что атом в целом нейтрален.

Опираясь на эти и некоторые другие факты, английский физик **Джозеф Джон Томсон** предложил в 1903 г. одну из первых моделей строения атома. По предположению Томсона, атом представляет собой шар, по всему объему которого равномерно распределен положительный заряд. Внутри этого шара находятся электроны. Каждый электрон может совершать колебательные движения около своего положения равновесия. Положительный заряд шара равен по модулю суммарному отрицательному заряду электронов, поэтому электрический заряд атома в целом равен нулю.

Модель строения атома, предложенная Томсоном, нуждалась в экспериментальной проверке. В частности, важно было проверить, действительно ли положительный заряд распределен по всему объему атома с постоянной плотностью. Поэтому в 1911 г. Резерфорд совместно со своими сотрудниками провел ряд опытов по исследованию состава и строения атомов.

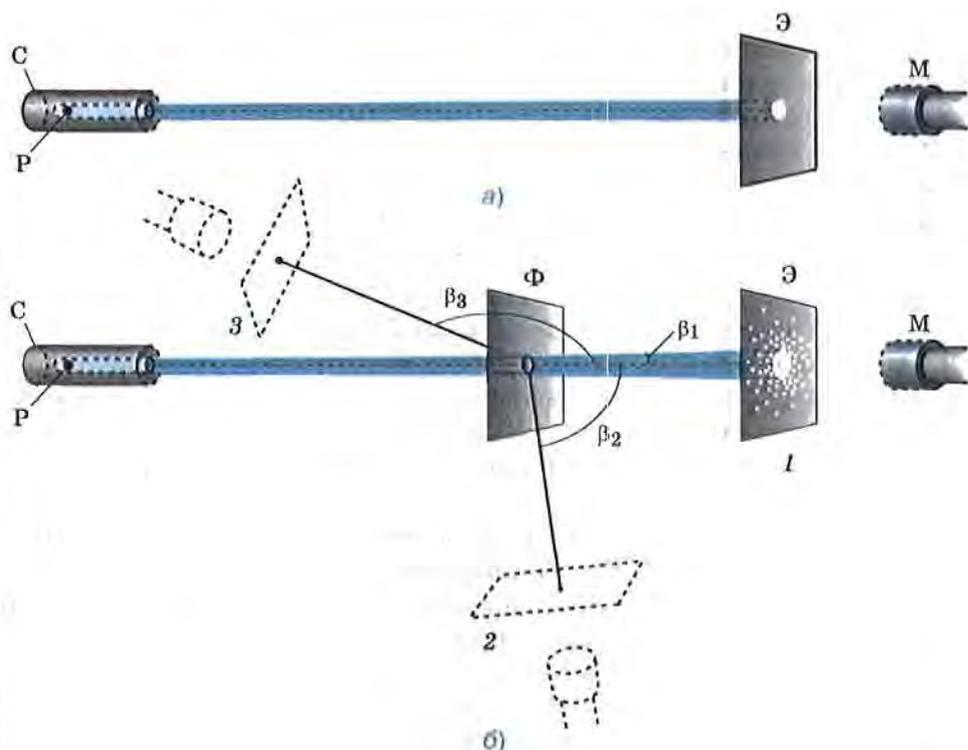


Рис. 168

Чтобы понять, как проводились эти опыты, рассмотрим рисунок 168, *а, б*. На каждом из них изображен свинцовый сосуд *С* с радиоактивным веществом *Р*, излучающим α -частицы (напомним, что α -частицы обладают положительным электрическим зарядом, равным модулю удвоенного заряда электрона). Из этого сосуда α -частицы вылетают через узкий канал со скоростью порядка 15 000 км/с.

Поскольку α -частицы непосредственно увидеть невозможно, то для их обнаружения служит стеклянный экран *Э*. Экран покрыт тонким слоем специального вещества, благодаря чему в местах попадания в экран α -частиц возникают вспышки, которые наблюдаются с помощью микроскопа *М*. Такой метод регистрации частиц называется *методом сцинтилляций* (т. е. вспышек).

Вся эта установка помещается в сосуд, из которого откачан воздух (чтобы устранить рассеяние α -частиц за счет их столкновений с молекулами воздуха).

Если на пути α -частиц нет никаких препятствий, то они падают на экран узким, слегка расширяющимся пучком (см. рис. 168, а). При этом все возникающие на экране вспышки сливаются в одно небольшое световое пятно.

Если же на пути α -частиц поместить тонкую фольгу Φ из исследуемого металла (см. рис. 168, б), то при взаимодействии с веществом α -частицы рассеиваются по всем направлениям на разные углы β (на рисунке изображены только три угла: β_1 , β_2 и β_3).

Когда экран находится в положении 1, наибольшее количество вспышек расположено в центре экрана. Значит, основная часть всех α -частиц прошла сквозь фольгу, почти не изменив первоначального направления (рассеялась на малые углы). При удалении от центра экрана количество вспышек становится все меньше и меньше. Следовательно, с увеличением угла рассеяния β количество рассеянных на эти углы частиц резко уменьшается.

Перемещая экран вместе с микроскопом вокруг фольги, можно обнаружить, что некоторое (очень небольшое) число частиц рассеялось на углы, близкие к 90° (это положение экрана обозначено цифрой 2), а некоторые единичные частицы — на углы порядка 180° , т. е. в результате взаимодействия с фольгой были отброшены назад (положение 3).

Именно эти случаи рассеяния α -частиц на большие углы дали Резерфорду наиболее важную информацию для понимания того, как устроены атомы веществ. Проанализировав результаты опытов, Резерфорд пришел к выводу, что

столь сильное отклонение α -частиц возможно только в том случае, если внутри атома имеется чрезвычайно сильное электрическое поле. Было рассчитано, что такое поле могло быть создано зарядом, сконцентрированным в очень малом объеме (по сравнению с объемом атома).

Поскольку масса электрона примерно в 8000 раз меньше массы α -частицы, электроны, входящие в состав атома, не могли существенным образом изменить направление движения α -частиц. Поэтому в данном случае речь может идти только о силах электрического отталкивания между α -частицами и положительно заряженной частью атома, масса которой значительно больше массы α -частицы.

Исходя из этих соображений, Резерфорд предложил ядерную (планетарную) модель атома (о которой вы уже имеете представление из курса физики 8 класса). Напомним, что согласно этой модели в центре

атома находится положительно заряженное ядро, занимающее очень малый объем атома. Вокруг ядра движутся электроны, масса которых значительно меньше массы ядра. Атом электрически нейтрален, поскольку заряд ядра равен модулю суммарного заряда электронов.

На основании результатов вышеописанных опытов Резерфорд сумел оценить размеры атомных ядер. Оказалось, что в зависимости от массы атома его ядро имеет диаметр порядка 10^{-14} — 10^{-15} м, т. е. оно в десятки и даже сотни тысяч раз меньше атома (атом имеет диаметр около 10^{-10} м).

Рисунок 169 поясняет процесс прохождения α -частиц сквозь атомы вещества с точки зрения ядерной модели. На этом рисунке показано, как меняется траектория полета α -частиц в зависимости от того, на каком расстоянии от ядра они пролетают. Напряженность (E) создаваемого ядром электрического поля, а значит, и сила действия на α -частицу довольно быстро убывают с увеличением расстояния от ядра. Поэтому направление полета частицы сильно меняется только в том случае, если эта частица проходит очень близко к ядру.

Поскольку диаметр ядра значительно меньше диаметра атома, то большая часть из числа всех α -частиц проходит сквозь атом на таких расстояниях от ядра, где сила отталкивания создаваемого им поля слишком мала, чтобы существенно изменить направление движения α -частиц. И только очень немногие частицы пролетают рядом с ядром, т. е. в области сильного поля, и отклоняются на большие углы. Именно такие результаты и были получены в опыте Резерфорда.

Таким образом, в результате опытов по рассеянию α -частиц была доказана несостоятельность модели атома Томсона, выдвинута ядерная модель строения атома и проведена оценка диаметров атомных ядер.

? Вопросы

1. Что представлял собой атом согласно модели, предложенной Томсоном?
2. Пользуясь рисунком 168, расскажите, как проводился опыт по рассеянию α -частиц.

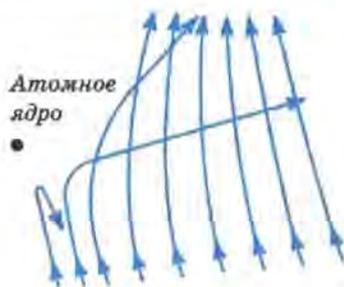


Рис. 169

3. Какой вывод был сделан Резерфордом на основании того, что некоторые α -частицы при взаимодействии с фольгой рассеялись на большие углы?

4. Что представляет собой атом согласно ядерной модели, выдвинутой Резерфордом?

5. По рисунку 169 расскажите, как проходят α -частицы сквозь атомы вещества согласно ядерной модели.

§ 67. Радиоактивные превращения атомных ядер

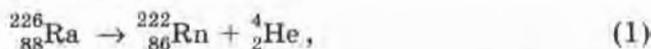
В 1903 г. (т. е. еще до обнаружения существования атомных ядер) Эрнест Резерфорд и его сотрудник, английский химик **Фредерик Содди**, обнаружили, что радиоактивный элемент радий в процессе α -распада (т. е. самопроизвольного излучения α -частиц) превращается в другой химический элемент — радон.

Радий и радон — это совершенно разные вещества, они отличаются по своим физическим и химическим свойствам. Радий — металл, при обычных условиях он находится в твердом состоянии, а радон — инертный газ. Эти химические элементы занимают разные клетки в таблице Д. И. Менделеева (см. форзац учебника). Их атомы отличаются массой, зарядом ядра, числом электронов в электронной оболочке. Они по-разному вступают в химические реакции.

Дальнейшие опыты с различными радиоактивными препаратами показали, что *не только при α -распаде, но и при β -распаде происходит превращение одного химического элемента в другой.*

После того как в 1911 г. Резерфордом была предложена ядерная модель атома (положительно заряженное ядро и движущиеся вокруг него электроны), стало очевидным, что *именно ядро претерпевает изменения при радиоактивных превращениях.* Действительно, если бы изменения затрагивали только электронную оболочку атома (например, потеря одного или нескольких электронов), то при этом атом превращался бы в ион того же самого химического элемента, а вовсе не в атом другого элемента, с другими физическими и химическими свойствами.

Реакция α -распада ядра атома радия с превращением его в ядро атома радона записывается так:



где знаком ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ обозначено ядро атома радия, знаком ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ — ядро атома радона и знаком ${}_2^4\text{He}$ — α -частица, или, что то же самое, ядро

атома гелия (т. е. ядра атомов обозначаются так же, как и сами атомы в таблице Д. И. Менделеева).

Число, стоящее перед буквенным обозначением ядра сверху, называется *массовым числом*, а снизу — *зарядовым числом* (или атомным номером).

В § 71 приводятся определения и условные обозначения массового и зарядового чисел, раскрывается их физический смысл, указывается, как их можно найти.

Пока же нам достаточно знать об этих числах следующее.

Массовое число ядра атома данного химического элемента с точностью до целых чисел равно числу атомных единиц массы, содержащихся в массе этого ядра. (Напомним, что одна атомная единица массы (сокращенно 1 а. е. м.) равна $1/12$ части массы атома углерода $^{12}_6\text{C}$.)

Зарядовое число ядра атома данного химического элемента равно числу элементарных электрических зарядов, содержащихся в заряде этого ядра. (Напомним, что элементарным электрическим зарядом называется наименьший электрический заряд, положительный или отрицательный, равный по модулю заряду электрона.)

Можно сказать и так: *зарядовое число равно заряду ядра, выраженному в элементарных электрических зарядах.*

Оба эти числа — массовое и зарядовое — всегда целые и положительные. Они не имеют никакого наименования, поскольку указывают, во сколько раз масса и заряд ядра больше единичных.

Запись (1) означает, что ядро атома радия в результате излучения им α -частицы теряет приблизительно четыре атомные единицы массы и два элементарных заряда, превращаясь при этом в ядро атома радона.

Из этой записи видно, что в процессе радиоактивного распада выполняются *законы сохранения массового числа и заряда*: массовое число (226) и заряд (88) распадающегося ядра атома радия равны соответственно сумме массовых чисел ($222 + 4 = 226$) и сумме зарядов ($86 + 2 = 88$) ядер атомов радона и гелия, образовавшихся в результате этого распада.

Таким образом, из открытия, сделанного Резерфордом и Содди, следовало, что *ядра атомов имеют сложный состав*, т. е. состоят из каких-то частиц. Кроме того, стало ясно, что *радиоактивность* —

это способность некоторых атомных ядер самопроизвольно превращаться в другие ядра с испусканием частиц.

Явление радиоактивности позволило ученым сделать вывод о сложном строении ядра.

? Вопросы

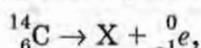
1. Что происходит с радием в результате α -распада?
2. Что происходит с радиоактивными химическими элементами в результате α - или β -распада?
3. Какая часть атома — ядро или электронная оболочка — претерпевает изменения при радиоактивном распаде? Почему вы так думаете?
4. Запишите реакцию α -распада радия и объясните, что означает каждый символ в этой записи.
5. Как называются верхнее и нижнее числа, стоящие перед буквенным обозначением элемента?
6. Чему равно массовое число? зарядовое число?
7. На примере реакции α -распада радия объясните, в чем заключаются законы сохранения заряда (зарядового числа) и массового числа.
8. Какой вывод следовал из открытия, сделанного Резерфордом и Содди?
9. Что такое радиоактивность?

🔗 Упражнение 51

1. Определите массу (в а. е. м. с точностью до целых чисел) и заряд (в элементарных зарядах) ядер атомов следующих элементов: углерода ${}^{12}_6\text{C}$; лития ${}^6_3\text{Li}$; кальция ${}^{40}_{20}\text{Ca}$.
2. Сколько электронов содержится в атомах каждого из химических элементов, перечисленных в предыдущей задаче?
3. Определите (с точностью до целых чисел), во сколько раз масса ядра атома лития ${}^6_3\text{Li}$ больше массы ядра атома водорода ${}^1_1\text{H}$.
4. Для ядра атома бериллия ${}^9_4\text{Be}$ определите: а) массовое число; б) массу ядра в а. е. м. (с точностью до целых чисел); в) во сколько раз масса ядра больше $1/12$ массы атома углерода ${}^{12}_6\text{C}$ (с точностью до целых чисел); г) зарядовое число; д) заряд ядра в элементарных электри-

ческих зарядах; е) суммарный заряд всех электронов в атоме в элементарных электрических зарядах; ж) число электронов в атоме.

5. Пользуясь законами сохранения массового числа и заряда, определите массовое число и заряд ядра химического элемента X, образующегося в результате следующей реакции β -распада:



где ${}^0_{-1}e$ — β -частица (электрон).

Найдите этот элемент в таблице Д. И. Менделеева на форзаце учебника. Как он называется?

§ 68. Экспериментальные методы исследования частиц

Для дальнейшего развития ядерной физики (в частности, для исследования строения атомных ядер) необходимы были специальные устройства, с помощью которых можно было бы регистрировать ядра и различные частицы, а также изучать их взаимодействия.

Один из методов регистрации частиц — метод сцинтилляций — описан в § 66. Но этот метод не дает необходимой точности, так как результат подсчета вспышек на экране в большой степени зависит от остроты зрения наблюдателя. Кроме того, длительное наблюдение оказывается невозможным, так как глаз быстро устает.

Более совершенным прибором для регистрации частиц является так называемый **счетчик Гейгера**, изобретенный в 1908 г.

Для рассмотрения устройства и принципа действия этого прибора обратимся к рисунку 170. Счетчик Гейгера состоит из металлического цилиндра, являющегося катодом (т. е. отрицательно заряженным электродом), и натянутой вдоль его оси тонкой проволоочки — анода (т. е. положительного электрода). Катод и анод через сопротивление R присоединены к источнику высокого напряжения (порядка 200—1000 В), благодаря чему в пространстве между электродами возникает сильное электрическое поле.

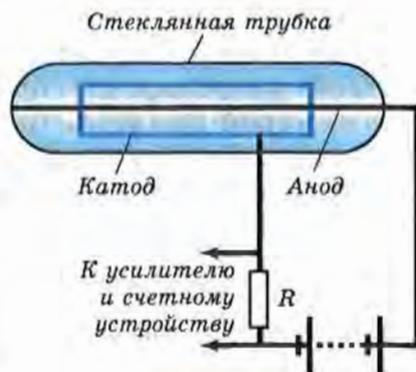


Рис. 170

Оба электрода помещают в герметичную стеклянную трубку, заполненную разреженным газом (обычно аргоном).

Пока газ не ионизирован, ток в электрической цепи источника напряжения отсутствует. Если же в трубку сквозь ее стенки влетает какая-нибудь частица, способная ионизировать атомы газа, то в трубке образуется некоторое количество электрон-ионных пар. Электроны и ионы начинают двигаться к соответствующим электродам.

Если напряженность электрического поля достаточно велика, то электроны на длине свободного пробега (т. е. между соударениями с молекулами газа) приобретают достаточно большую энергию и тоже ионизируют атомы газа, образуя новое поколение ионов и электронов, которые тоже могут принять участие в ионизации, и т. д. В трубке образуется так называемая электронно-ионная лавина, в результате чего происходит кратковременное и резкое возрастание силы тока в цепи и напряжения на сопротивлении R . Этот импульс напряжения, свидетельствующий о попадании в счетчик частицы, регистрируется специальным устройством.

Поскольку сопротивление R очень велико (порядка 10^9 Ом), то в момент протекания тока основная доля напряжения источника падает именно на нем, в результате чего напряжение между катодом и анодом резко уменьшается и разряд автоматически прекращается (так как это напряжение становится недостаточным для образования новых поколений электронно-ионных пар). Счетчик готов к регистрации следующей частицы.

Счетчик Гейгера применяется в основном для регистрации электронов, но существуют модели, пригодные и для регистрации γ -квантов.

Счетчик Гейгера позволяет только регистрировать тот факт, что через него пролетает частица. Гораздо бóльшие возможности для изучения микромира дает прибор, изобретенный в 1912 г. и называемый *камерой Вильсона* (рис. 171).

Камера Вильсона состоит из невысокого стеклянного цилиндра CC со стеклянной крышкой LL (на рисунке цилиндр показан в разрезе). Внутри цилиндра может двигаться поршень P . На дне камеры находится черная ткань FF . Благодаря тому что ткань увлажнена смесью воды со спиртом, воздух в камере насыщен парами этих жидкостей.

При быстром движении поршня вниз находящиеся в камере воздух и пары расширяются, их внутренняя энергия уменьшается, температура понижается.

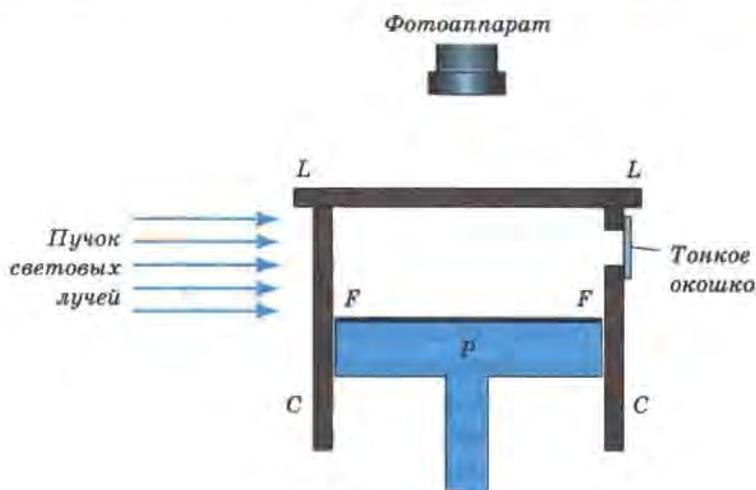


Рис. 171

В обычных условиях это вызвало бы конденсацию паров (появление тумана). Однако в камере Вильсона этого не происходит, так как из нее предварительно удаляются так называемые *ядра конденсации* (пылинки, ионы и пр.). Поэтому в данном случае при понижении температуры в камере пары становятся *пересыщенными*, т. е. переходят в крайне неустойчивое состояние, при котором они будут легко конденсироваться на любых образующихся в камере ядрах конденсации, например на ионах.

Изучаемые частицы впускаются в камеру через тонкое окошко (иногда источник частиц помещают внутри камеры). Пролетая с большой скоростью через газ, частицы создают на своем пути ионы. Эти ионы и становятся ядрами конденсации, на которых пары конденсируются в виде маленьких капелек (водяной пар конденсируется преимущественно на отрицательных ионах, пары этилового спирта — на положительных). Вдоль всего пути частицы возникает тонкий след из капелек (*трек*), благодаря чему траектория движения становится видимой.

Если поместить камеру Вильсона в магнитное поле, то траектории заряженных частиц искривляются. По направлению изгиба следа можно судить о знаке заряда частицы, а по радиусу кривизны определять ее массу, энергию, заряд.

Треки существуют в камере недолго, так как воздух нагревается, получая тепло от стенок камеры, и капельки испаряются. Чтобы по-

лучить новые следы, необходимо удалить имеющиеся ионы с помощью электрического поля, сжать воздух поршнем, выждать, пока воздух в камере, нагретый при сжатии, охладится, и произвести новое расширение.

Обычно треки частиц в камере Вильсона не только наблюдают, но и фотографируют. При этом камеру освещают сбоку мощным пучком световых лучей, как показано на рисунке 171.

С помощью камеры Вильсона был сделан ряд важнейших открытий в области ядерной физики и физики элементарных частиц.

Одной из разновидностей камеры Вильсона является изобретенная в 1952 г. **пузырьковая камера**. Она действует примерно по тому же принципу, что и камера Вильсона, но вместо пересыщенного пара в ней используется перегретая выше точки кипения жидкость (например, жидкий водород). При движении в этой жидкости заряженной частицы вдоль ее траектории образуется ряд пузырьков пара. Пузырьковая камера обладает большим быстродействием по сравнению с камерой Вильсона.

? Вопросы

1. По рисунку 170 расскажите об устройстве и принципе действия счетчика Гейгера.

2. Для регистрации каких частиц применяется счетчик Гейгера?

3. По рисунку 171 расскажите об устройстве и принципе действия камеры Вильсона.

4. Какие характеристики частиц можно определить с помощью камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле?

5. В чем преимущество пузырьковой камеры перед камерой Вильсона? Чем отличаются эти приборы?

§ 69. Открытие протона

Когда выяснилось, что ядра атомов имеют сложное строение, встал вопрос о том, из каких именно частиц они состоят.

В 1913 г. Э. Резерфорд выдвинул гипотезу о том, что одной из частиц, входящих в состав атомных ядер всех химических элементов, является ядро атома водорода.

Основанием для такого предположения послужил ряд появившихся к тому времени фактов, полученных опытным путем. В част-

ности, было известно, что массы атомов химических элементов превышают массу атома водорода в целое число раз (т. е. кратны ей).

В 1919 г. Резерфорд поставил опыт по исследованию взаимодействия α -частиц с ядрами атомов азота.

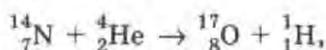
В этом опыте α -частица, летящая с огромной скоростью, при попадании в ядро атома азота выбивала из него какую-то частицу. По предположению Резерфорда, этой частицей было ядро атома водорода, которое Резерфорд назвал *протоном* (от греческого слова *protos* — первый). Но поскольку наблюдение этих частиц велось методом сцинтилляций (т. е. вспышек на экране, в который попадали частицы), то нельзя было точно определить, какая именно частица вылетала из ядра атома азота.

Удостовериться в том, что из ядра атома действительно вылетал протон, удалось только несколько лет спустя, когда реакция взаимодействия α -частицы с ядром атома азота была проведена в камере Вильсона.

Через прозрачное круглое окошко камеры Вильсона даже невооруженным глазом можно увидеть треки (т. е. траектории) частиц, быстро движущихся в ней (рис. 172).

На рисунке видны расходящиеся веером прямые линии. Это следы α -частиц, которые пролетели сквозь пространство камеры, не испытав соударений с ядрами атомов азота. Но след одной α -частицы раздваивается, образуя так называемую «вилку». Это означает, что в точке раздвоения трека произошло взаимодействие α -частицы с ядром атома азота, в результате чего образовались ядра атомов кислорода и водорода. То, что образуются именно эти ядра, было выяснено по характеру искривления треков при помещении камеры Вильсона в магнитное поле.

Реакцию взаимодействия ядра азота с α -частицами с образованием ядер кислорода и водорода записывают так:



где символом ${}^1_1\text{H}$ обозначен протон, т. е. ядро атома водорода, с массой, приблизительно равной 1 а. е. м. (точнее, 1,0072765 а. е. м.), и поло-



Рис. 172

жительным зарядом, равным элементарному (т. е. модулю заряда электрона). Для обозначения протона используют также символ 1_1p .

В дальнейшем было исследовано взаимодействие α -частиц с ядрами атомов других элементов: бора (B), натрия (Na), алюминия (Al), магния (Mg) и многих других. В результате выяснилось, что из всех этих ядер α -частицы выбивали протоны. Это давало основания полагать, что протоны входят в состав ядер атомов всех химических элементов.

? Вопросы

1. Расскажите об опыте, проведенном Резерфордом в 1919 г.
2. О чем говорит фотография треков частиц в камере Вильсона (рис. 172)?
3. Как иначе называется и каким символом обозначается ядро атома водорода? Каковы его масса и заряд?
4. Какое предположение (относительно состава ядер) позволяли сделать результаты опытов по взаимодействию α -частиц с ядрами атомов различных элементов?

§ Упражнение 52

Рассмотрите запись ядерной реакции взаимодействия ядер азота и гелия, в результате чего образуются ядра кислорода и водорода. Сравните суммарный заряд взаимодействующих ядер с суммарным зарядом ядер, образованных в результате этого взаимодействия. Сделайте вывод о том, выполняется ли закон сохранения электрического заряда в данной реакции.

§ 70. Открытие нейтрона

Открытие протона не давало полного ответа на вопрос о том, из каких частиц состоят ядра атомов. Если считать, что атомные ядра состоят только из протонов, то возникает противоречие.

Покажем на примере ядра атома бериллия (${}^9_4\text{Be}$), в чем заключается это противоречие.

Допустим, что ядро ${}^9_4\text{Be}$ состоит только из протонов. Поскольку заряд каждого протона равен одному элементарному заряду, то число

протонов в ядре должно быть равно зарядовому числу, в данном случае четырем.

Но если бы ядро бериллия действительно состояло только из четырех протонов, то его масса была бы приблизительно равна 4 а. е. м. (так как масса каждого протона приблизительно равна 1 а. е. м.).

Однако это противоречит опытным данным, согласно которым масса ядра атома бериллия приблизительно равна 9 а. е. м.

Таким образом, становится ясно, что в ядра атомов помимо протонов входят еще какие-то частицы.

В связи с этим в 1920 г. Резерфордом было высказано предположение о существовании электрически нейтральной частицы с массой, приблизительно равной массе протона.

В начале 30-х гг. XX в. были обнаружены неизвестные ранее лучи. Они были названы *бериллиевым излучением*, так как возникали при бомбардировке α -частицами бериллия.

В 1932 г. английский ученый *Джеймс Чедвик* (ученик Резерфорда) с помощью опытов, проведенных в камере Вильсона, доказал, что бериллиевое излучение представляет собой поток электрически нейтральных частиц, масса которых приблизительно равна массе протона. Отсутствие у исследуемых частиц электрического заряда следовало, в частности, из того, что они не отклонялись ни в электрическом, ни в магнитном поле. А массу частиц удалось оценить по их взаимодействию с другими частицами.

Эти частицы были названы *нейтронами*. Нейтрон принято обозначать символом 1_0n . Точные измерения показали, что масса нейтрона равна 1,0086649 а. е. м., т. е. чуть больше массы протона. Во многих случаях массу нейтрона (как и массу протона) считают равной 1 а. е. м. Поэтому вверху перед символом нейтрона ставят единицу. Нуль внизу означает отсутствие электрического заряда.

? Вопросы

1. К какому противоречию приводит предположение о том, что ядра атомов состоят только из протонов? Поясните это на примере.

2. Кем впервые было высказано предположение о существовании электрически нейтральной частицы с массой, приблизительно равной массе протона?

3. Кто и когда первым доказал, что бериллиевое излучение представляет собой поток нейтронов?

4. Как было доказано отсутствие у нейтронов электрического заряда? Как была оценена их масса?

5. Как обозначается нейтрон, какова его масса по сравнению с массой протона?

§ 71. Состав атомного ядра. Массовое число. Зарядовое число

Открытие нейтрона дало толчок к пониманию того, как устроены ядра атомов.

В том же 1932 г., когда был открыт нейтрон, советским физиком **Дмитрием Дмитриевичем Иваненко** и немецким физиком **Вернером Гейзенбергом** была предложена **протонно-нейтронная модель строения ядер**, справедливость которой была впоследствии подтверждена экспериментально.

Протоны и нейтроны называются **нуклонами** (от латинского nucleus — ядро). Используя этот термин, можно сказать, что атомные ядра состоят из нуклонов.

Общее число нуклонов в ядре называется массовым числом и обозначается буквой A .

Массовое число ставится сверху перед буквенным обозначением химического элемента. Так, например, для азота ${}^{14}_7\text{N}$ массовое число $A = 14$, для железа ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ $A = 56$, для урана ${}^{235}_{92}\text{U}$ $A = 235$.

Понятно, что **массовое число A (т. е. общее число нуклонов в ядре) численно равно массе ядра m , выраженной в атомных единицах массы и округленной до целых чисел** (поскольку масса каждого нуклона примерно равна 1 а. е. м.). Например, для азота $A = 14$, $m \approx 14$ а. е. м., для железа $A = 56$, $m \approx 56$ а. е. м. и т. д.

Число протонов в ядре называется зарядовым числом и обозначается буквой Z .

Например, для азота ${}^{14}_7\text{N}$ $Z = 7$, для железа ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ $Z = 26$, для урана ${}^{235}_{92}\text{U}$ $Z = 92$ и т. д. Как видно из приведенных примеров, зарядовое число ставится внизу перед буквенным обозначением элемента.

Заряд каждого протона равен элементарному электрическому заряду. Поэтому *зарядовое число Z (т. е. число протонов в ядре) численно равно заряду ядра, выраженному в элементарных электрических зарядах. Для каждого химического элемента зарядовое число равно атомному (порядковому) номеру в таблице Д. И. Менделеева.*

Ядро любого химического элемента в общем виде обозначается так: A_ZX (под X подразумевается символ химического элемента).

Число нейтронов в ядре обычно обозначают буквой N (не путайте с химическим символом азота). Поскольку массовое число A представляет собой общее число протонов и нейтронов в ядре, то можно записать: $A = Z + N$.

На основе протонно-нейтронной модели строения атомных ядер было дано объяснение интересным экспериментальным фактам, открытым в первые два десятилетия XX в.

Так, в ходе изучения свойств радиоактивных элементов было обнаружено, что у одного и того же химического элемента встречаются атомы с различными по массе ядрами.

Одинаковый заряд ядер свидетельствует о том, что они имеют один и тот же порядковый номер в таблице Д. И. Менделеева, т. е. занимают в таблице одну и ту же клетку, одно и то же место. Отсюда и произошло название всех разновидностей одного химического элемента: **изотопы** (от греческих слов *isos* — одинаковый и *topos* — место).

Изотопы — это разновидности данного химического элемента, различающиеся по массе атомных ядер.

Благодаря созданию протонно-нейтронной модели ядра (т. е. примерно через два десятилетия после открытия изотопов), удалось объяснить, почему атомные ядра с одним и тем же зарядом обладают разными массами. Очевидно, ядра атомов изотопов содержат одинаковое число протонов, но различное число нейтронов.

Так, например, существует три изотопа водорода: ${}^1_1\text{H}$ (протий), ${}^2_1\text{H}$ (дейтерий) и ${}^3_1\text{H}$ (тритий). Ядро изотопа ${}^1_1\text{H}$ вообще не имеет нейтронов — оно представляет собой один протон. В состав ядра дейтерия (${}^2_1\text{H}$) входят две частицы: протон и нейтрон. Ядро трития ${}^3_1\text{H}$ состоит из трех частиц: одного протона и двух нейтронов.

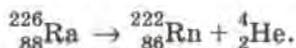
? Вопросы

1. Как называются протоны и нейтроны вместе?
2. Что называется массовым числом и какой буквой оно обозначается?
3. Что можно сказать о числовом значении массы атома (в а. е. м.) и его массовом числе?
4. Как называется и какой буквой обозначается число протонов в ядре?
5. Что можно сказать о зарядовом числе, заряде ядра (выраженном в элементарных электрических зарядах) и порядковом номере в таблице Д. И. Менделеева для любого химического элемента?
6. Как в общем виде принято обозначать ядро любого химического элемента?
7. Какой буквой обозначают число нейтронов в ядре?
8. Какой формулой связаны между собой массовое число, зарядовое число и число нейтронов в ядре?
9. Как с точки зрения протонно-нейтронной модели ядра объясняется существование ядер с одинаковыми зарядами и различными массами?

🔗 Упражнение 53

1. Сколько нуклонов в ядре атома бериллия ${}^9_4\text{Be}$? Сколько в нем протонов? нейтронов?
2. Для атома калия ${}^{39}_{19}\text{K}$ определите: а) зарядовое число; б) число протонов; в) заряд ядра (в элементарных электрических зарядах); г) число электронов; д) порядковый номер в таблице Д. И. Менделеева; е) массовое число ядра; ж) число нуклонов; з) число нейтронов; и) массу ядра (в а. е. м. с точностью до целых чисел).
3. Определите с помощью таблицы Д. И. Менделеева, атом какого химического элемента имеет: а) 3 протона в ядре; б) 9 электронов.
4. При α -распаде исходное ядро, излучая α -частицу ${}^4_2\text{He}$, превращается в ядро атома другого химического элемента.

Например,

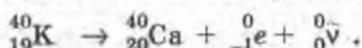


На сколько клеток и в какую сторону (к началу или к концу таблицы Д. И. Менделеева) смещен образовавшийся элемент по отношению к исходному?

Перепишите в тетрадь данное ниже *правило смещения для α -распада*, заполнив пропуски:

при α -распаде одного химического элемента образуется другой элемент, который расположен в таблице Д. И. Менделеева на ... клетки ближе к ее ..., чем исходный.

5. При β -распаде исходного ядра один из входящих в это ядро нейтронов превращается в протон, электрон ${}_{-1}^0e$ и антинейтрино ${}_{0}^0\bar{\nu}$ (частицу, легко проходящую сквозь земной шар и, возможно, не имеющую массы). Электрон и антинейтрино вылетают из ядра, а протон остается в ядре, увеличивая его заряд на единицу. Например,



Перепишите данное ниже *правило смещения для β -распада*, заполнив пропуски нужными словами:

при β -распаде одного химического элемента образуется другой элемент, который расположен в таблице Д. И. Менделеева на ... клетку ближе к ... таблицы, чем исходный.

§ 72. Ядерные силы

Гипотеза о том, что атомные ядра состоят из *протонов и нейтронов*, подтверждалась многими экспериментальными фактами. Это свидетельствовало о справедливости протонно-нейтронной модели строения ядра.

Но возникал вопрос: почему ядра не распадаются на отдельные нуклоны под действием сил электростатического отталкивания между положительно заряженными протонами?

Расчеты показывают, что нуклоны не могут удерживаться вместе за счет сил притяжения гравитационной или магнитной природы, поскольку эти силы существенно меньше электростатических.

В поисках ответа на вопрос об устойчивости атомных ядер ученые предположили, что *между всеми нуклонами в ядрах* действуют какие-то особые силы притяжения, которые значительно превосходят электростатические силы отталкивания между протонами. Эти силы назвали *ядерными*.

Гипотеза о существовании ядерных сил оказалась правильной. Выяснилось также, что ядерные силы являются короткодействующими: на расстоянии 10^{-15} м они примерно в 100 раз больше сил электростатического взаимодействия, но уже на расстоянии 10^{-14} м они оказываются ничтожно малыми. Другими словами, ядерные силы действуют на расстояниях, сравнимых с размерами самих ядер.

? Вопросы

1. Какой вопрос возникал в связи с гипотезой о том, что ядра атомов состоят из протонов и нейтронов? Какое предположение пришлось сделать ученым для ответа на этот вопрос?

2. Как называются силы притяжения между нуклонами в ядре и каковы их характерные особенности?

⚡ Упражнение 54

Как вы думаете, действуют ли между нуклонами в ядре силы гравитационного притяжения (т. е. силы всемирного тяготения)?

§ 73. Энергия связи. Дефект масс

Для того чтобы разбить ядро на отдельные, не взаимодействующие между собой (свободные) нуклоны, необходимо произвести работу по преодолению ядерных сил, т. е. сообщить ядру определенную энергию. Наоборот, при соединении свободных нуклонов в ядро выделяется такая же энергия (по закону сохранения энергии).

Минимальная энергия, необходимая для расщепления ядра на отдельные нуклоны, называется энергией связи ядра.

Каким же образом можно определить величину энергии связи ядра?

Наиболее простой путь нахождения этой энергии основан на применении закона о взаимосвязи массы и энергии, открытого знаменитым ученым Альбертом Эйнштейном в 1905 г.

Согласно этому закону между массой m системы частиц и *энергией покоя*, т. е. внутренней энергией E_0 этой системы, существует прямая пропорциональная зависимость:

$$E_0 = mc^2, \quad (1)$$

где c — скорость света в вакууме.

Значит, если энергия покоя системы частиц в результате каких-либо процессов изменится на величину ΔE_0^1 , то это повлечет за собой соответствующее изменение массы этой системы на величину Δm , причем связь между этими величинами выразится равенством:

$$\Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2}, \quad (2)$$

или

$$\Delta E_0 = \Delta mc^2. \quad (3)$$

Таким образом, при слиянии свободных нуклонов в ядро в результате выделения энергии (которая уносится излучаемыми при этом фотонами) должна уменьшиться и масса нуклонов. Другими словами,

масса ядра всегда меньше суммы масс нуклонов, из которых оно состоит.

Недостаток массы ядра Δm по сравнению с суммарной массой составляющих его нуклонов можно записать так:

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - M_{\text{я}}, \quad (4)$$

где $M_{\text{я}}$ — масса ядра, Z и N — число протонов и нейтронов в ядре, а m_p и m_n — масса свободных протона и нейтрона.

Величина Δm в формуле (4) называется *дефектом масс*.

Наличие дефекта масс подтверждается многочисленными опытами.

Пользуясь формулой (3), рассчитаем, например, энергию связи ΔE_0 ядра атома дейтерия ${}^2_1\text{H}$ (тяжелого водорода), состоящего из одного протона и одного нейтрона. Другими словами, рассчитаем энергию, необходимую для расщепления ядра на протон и нейтрон.

Для этого определим сначала дефект масс Δm этого ядра, взяв приближенные значения масс нуклонов и массы ядра атома дейте-

¹ Греческой буквой Δ («дельта») принято обозначать изменение той физической величины, перед символом которой эта буква ставится.

рия из соответствующих таблиц. Согласно табличным данным, масса протона приблизительно равна 1,0073 а. е. м., масса нейтрона — 1,0087 а. е. м., масса ядра дейтерия — 2,0141 а. е. м. Значит,

$$\begin{aligned}\Delta m &= (1,0073 \text{ а. е. м.} + 1,0087 \text{ а. е. м.}) - 2,0141 \text{ а. е. м.} = \\ &= 0,0019 \text{ а. е. м.}\end{aligned}$$

Если мы хотим получить энергию связи в джоулях, то дефект масс нужно выразить в килограммах. Учитывая, что 1 а. е. м. = $1,6605 \cdot 10^{-27}$ кг, получим:

$$\Delta m = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 0,0019 = 0,0032 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Подставив это значение дефекта масс в формулу (3), получим:

$$\begin{aligned}\Delta E_0 &= 0,0032 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \left(2,9979 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2 = 0,0288 \cdot 10^{-11} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м} = \\ &= 0,0288 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}.\end{aligned}$$

По формуле (3) можно рассчитывать энергию, выделяющуюся или поглощающуюся в процессе любых ядерных реакций, если известны массы взаимодействующих и образующихся в результате этого взаимодействия ядер и частиц.

? Вопросы

1. Что называется энергией связи ядра?
2. Запишите формулу для определения дефекта масс любого ядра.
3. Запишите формулу для расчета энергии связи ядра по его дефекту масс.

§ 74. Деление ядер урана

Деление ядер урана при бомбардировке их нейтронами было открыто в 1939 г. немецкими учеными *Отто Ганом* и *Фрицем Штрассманом*.

Рассмотрим механизм этого явления. На рисунке 173, а условно изображено ядро атома урана (${}_{92}^{235}\text{U}$). Поглотив лишний нейтрон, ядро возбуждается и деформируется, приобретая вытянутую форму (рис. 173, б).

Мы уже знаем, что в ядре действует два вида сил: *электростатические силы отталкивания между протонами*, стремящиеся разорвать ядро, и *ядерные силы притяжения между всеми нуклонами*, благодаря которым ядро не распадается. Но ядерные силы — короткодействующие, поэтому в вытянутом ядре они уже не могут удержать сильно удаленные друг от друга части ядра. Под действием электростатических сил отталкивания ядро разрывается на две части (рис. 173, в), которые разлетаются в разные стороны с огромной скоростью и излучают при этом 2—3 нейтрона.

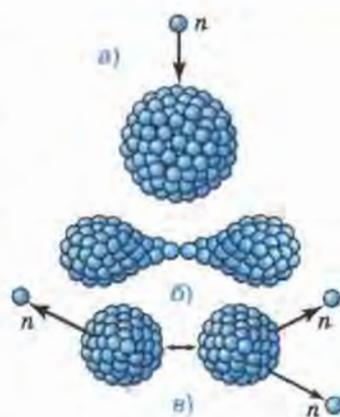


Рис. 173

Получается, что часть внутренней энергии ядра переходит в кинетическую энергию разлетающихся осколков и частиц. Осколки быстро тормозятся в окружающей среде, в результате чего их кинетическая энергия преобразуется во внутреннюю энергию среды (т. е. в энергию взаимодействия и теплового движения составляющих ее частиц).

При одновременном делении большого количества ядер урана внутренняя энергия окружающей уран среды и соответственно ее температура заметно возрастают (т. е. среда нагревается).

Таким образом, *реакция деления ядер урана идет с выделением энергии в окружающую среду*.

Энергия, заключенная в ядрах атомов, колоссальна. Например, при полном делении всех ядер, имеющихся в 1 г урана, выделилось бы столько же энергии, сколько выделяется при сгорании 2,5 т нефти.

? Вопросы

1. Когда было открыто деление ядер урана при бомбардировке их нейтронами?
2. Почему деление ядра может начаться только тогда, когда оно деформируется под действием поглощенного им нейтрона?
3. Что образуется в результате деления ядра?
4. В какую энергию переходит часть внутренней энергии ядра при его делении?

5. В какой вид энергии преобразуется кинетическая энергия осколков ядра урана при их торможении в окружающей среде?

6. Как идет реакция деления ядер урана — с выделением энергии в окружающую среду или, наоборот, с поглощением энергии?

§ 75. Цепная реакция

Для преобразования внутренней энергии атомных ядер в электрическую на атомных электростанциях используют так называемые *цепные реакции деления ядер*.

Рассмотрим механизм протекания цепной реакции деления ядра изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$. На рисунке 173 вверху изображено ядро атома урана, которое в результате захвата нейтрона разделилось на две части, излучив при этом три нейтрона. Два из этих нейтронов вызвали реакцию деления еще двух ядер, при этом образовалось уже четыре нейтрона. Эти, в свою очередь, вызвали деление четырех ядер, после чего образовалось девять нейтронов и т. д.

Цепная реакция возможна благодаря тому, что при делении каждого ядра образуется 2—3 нейтрона, которые могут принять участие в делении других ядер.

На рисунке показана схема цепной реакции, при которой общее число свободных нейтронов в куске урана *лавинобразно* увеличивается со временем. Соответственно резко возрастает число делений ядер и энергия, выделяющаяся в единицу времени. Поэтому такая реакция носит взрывной характер (она протекает в атомной бомбе).

Возможен другой вариант, при котором число свободных нейтронов уменьшается со временем. В этом случае цепная реакция прекращается. Следовательно, такую реакцию тоже нельзя использовать для производства электроэнергии.

В мирных целях возможно использовать энергию только такой цепной реакции, в которой число нейтронов не меняется с течением времени.

Как же добиться того, чтобы число нейтронов все время оставалось постоянным? Для решения этой проблемы нужно знать, какие факторы влияют на увеличение и на уменьшение общего числа свободных нейтронов в куске урана, в котором протекает цепная реакция.

Одним из таких факторов является *масса урана*. Дело в том, что не каждый нейтрон, излученный при делении ядра, вызывает деление других ядер (рис. 174). Если масса (и соответственно размеры)

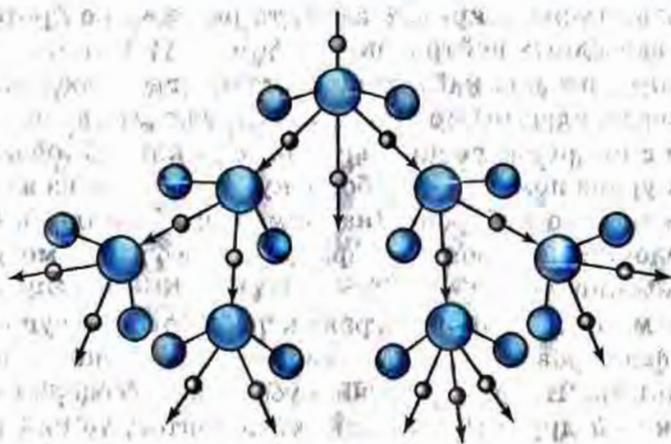


Рис. 174

куска урана слишком мала, то многие нейтроны вылетят за его пределы, не успев встретиться на своем пути ядро, вызвать его деление и породить таким образом новое поколение нейтронов, необходимых для продолжения реакции. В этом случае цепная реакция прекратится. Чтобы реакция не прекращалась, нужно увеличить массу урана до определенного значения, называемого **критическим**.

Почему при увеличении массы цепная реакция становится возможной? Чем больше масса куска, тем больше его размеры и тем длиннее путь, который проходят в нем нейтроны. При этом вероятность встречи нейтронов с ядрами возрастает. Соответственно увеличивается число делений ядер и число излучаемых нейтронов.

При некоторой так называемой критической массе урана число нейтронов, появившихся при делении ядер, становится равным числу потерянных нейтронов (т. е. захваченных ядрами без деления и вылетевших за пределы куска).

Поэтому их общее число остается неизменным. При этом цепная реакция может идти длительное время, не прекращаясь и не приобретая взрывного характера.

Наименьшая масса урана, при которой возможно протекание цепной реакции, называется критической массой.

Если масса урана больше критической, то в результате резкого увеличения числа свободных нейтронов цепная реакция приводит к

взрыву, а если меньше критической, то реакция не протекает из-за недостатка свободных нейтронов.

Уменьшить потерю нейтронов (которые вылетают из урана, не прореагировав с ядрами) можно не только за счет увеличения массы урана, но и с помощью специальной *отражающей оболочки*. Для этого кусок урана помещают в оболочку, сделанную из вещества, хорошо отражающего нейтроны (например, из бериллия). Отражаясь от этой оболочки, нейтроны возвращаются в уран и могут принять участие в делении ядер.

Помимо массы и наличия отражающей оболочки существует еще несколько факторов, от которых зависит возможность протекания цепной реакции. Например, если кусок урана содержит слишком много *примесей* других химических элементов, то они поглощают большую часть нейтронов и реакция прекращается.

Еще одним фактором, влияющим на ход реакции, является наличие в уране так называемого *замедлителя нейтронов*. Дело в том, что ядра урана-235 с наибольшей вероятностью делятся под действием медленных нейтронов. А при делении ядер образуются быстрые нейтроны. Если быстрые нейтроны замедлить, то большая их часть захватится ядрами урана-235 с последующим делением этих ядер. В качестве замедлителей используются такие вещества, как *графит, вода, тяжелая вода* (в состав которой входит дейтерий — изотоп водорода с массовым числом 2) и некоторые другие. Эти вещества только замедляют нейтроны, почти не поглощая их.

Таким образом, возможность протекания цепной реакции определяется *массой урана, количеством примесей в нем, наличием оболочки и замедлителя* и некоторыми другими факторами.

Критическая масса шарообразного куска урана-235 приблизительно равна 50 кг. При этом его радиус составляет всего 9 см, поскольку уран имеет очень большую плотность.

Применяя замедлитель и отражающую оболочку и уменьшая количество примесей, удастся снизить критическую массу урана до 0,8 кг.

? Вопросы

1. Расскажите о механизме протекания цепной реакции, пользуясь рисунком 174.
2. Что называется критической массой урана?
3. Возможно ли протекание цепной реакции, если масса урана меньше критической? Почему?

4. Как идет цепная реакция в уране, если его масса больше критической? Почему?

5. За счет каких факторов можно увеличить число свободных нейтронов в куске урана, обеспечив тем самым возможность протекания в нем цепной реакции?

§ 76. Ядерный реактор.

Преобразование внутренней энергии атомных ядер в электрическую энергию

Ядерный реактор — это устройство, предназначенное для осуществления управляемой ядерной реакции.

Управление ядерной реакцией заключается в регулировании скорости размножения свободных нейтронов в уране, чтобы их число оставалось неизменным. При этом цепная реакция будет продолжаться столько времени, сколько это необходимо, не прекращаясь и не приобретая взрывного характера.

Рассмотрим устройство и принцип действия реактора, в котором в качестве делящегося вещества (его называют также *ядерным топливом* или *горючим*) используется в основном уран-235. В природном уране этого изотопа недостаточно для протекания цепной реакции (всего 0,7%), поэтому природный уран обогащают, т. е. увеличивают процентное содержание в нем урана-235 (до 5%).

Реактор, работающий на этом изотопе урана, называется **реактором на медленных нейтронах**. Он назван так, потому что уран-235 наиболее эффективно делится под действием медленных нейтронов. Поскольку при делении ядер образуются в основном быстрые нейтроны, их необходимо замедлять. Для этого в реакторе с таким ядерным топливом используется замедлитель нейтронов.

На рисунке 175, а изображены основные части реактора на медленных нейтронах. В активной зоне находится *ядерное топливо* в виде урановых стержней (они на рисунке не показаны) и *замедлитель нейтронов* — в данном случае вода.

Масса каждого уранового стержня значительно меньше критической, поэтому в одном стержне цепная реакция происходить не может (это делается специально из соображений безопасности). Она начинается после погружения в активную зону всех урановых стержней, т. е. когда масса урана достигнет критического значения.

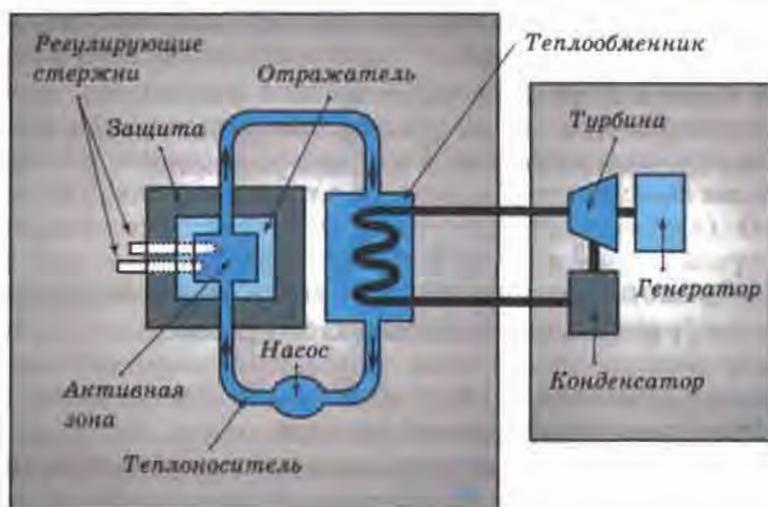


Рис. 175

Активная зона окружена слоем вещества, отражающего нейтроны (*отражатель*), и *защитной оболочкой* из бетона, задерживающей нейтроны и другие частицы.

Для управления реакцией служат *регулирующие стержни*, эффективно поглощающие нейтроны. При их полном погружении в активную зону цепная реакция идти не может. Для запуска реактора регулирующие стержни постепенно выводят из активной зоны до тех пор, пока не начнется цепная реакция деления ядер урана.

Образующиеся в процессе этой реакции нейтроны и осколки ядер, разлетаясь с большой скоростью, попадают в воду, сталкиваются с ядрами атомов кислорода и водорода, отдают им часть своей кинетической энергии и замедляются. Вода при этом нагревается, а замедленные нейтроны через какое-то время опять попадают в урановые стержни и участвуют в делении ядер.

Активная зона реактора посредством труб соединяется с *теплообменником*, образуя так называемый первый замкнутый контур. Насосы обеспечивают циркуляцию воды в этом контуре. При этом вода, нагретая в активной зоне за счет внутренней энергии атомных ядер, проходя через теплообменник, нагревает воду в змеевике второго контура, превращая ее в пар. Таким образом, *вода в активной зоне реактора служит не только замедлителем нейтронов, но и теплоносителем, отводящим тепло.*

На рисунке 175, б схематично показаны устройства, в которых энергия пара, образовавшегося в змеевике, преобразуется в электроэнергию. Посредством этого пара вращается турбина, которая, в свою очередь, приводит во вращение ротор генератора электрического тока. Отработанный пар поступает в конденсатор и превращается в воду. Затем весь цикл повторяется.

Таким образом, при получении электрического тока на атомных электростанциях происходят следующие преобразования энергии: часть внутренней энергии атомных ядер урана → кинетическая энергия нейтронов и осколков ядер → внутренняя энергия воды → внутренняя энергия пара → кинетическая энергия пара → кинетическая энергия ротора турбины и ротора генератора → электрическая энергия.

? Вопросы

1. Что такое ядерный реактор?
2. В чем заключается управление ядерной реакцией?
3. Назовите основные части реактора.
4. Что находится в активной зоне?
5. Для чего нужно, чтобы масса каждого уранового стержня была меньше критической массы?
6. Для чего нужны регулирующие стержни? Как ими пользуются?
7. Какую вторую функцию (помимо замедления нейтронов) выполняет вода в первом контуре реактора?
8. Какие процессы происходят во втором контуре?
9. Какие преобразования энергии происходят при получении электрического тока на атомных электростанциях?

§ 77. Атомная энергетика

Одной из важнейших проблем, стоящих перед человечеством, является проблема источников энергии. Потребление энергии растет столь быстро, что известные в настоящее время запасы топлива окажутся исчерпанными в сравнительно короткое время.

Например, надежно подтверждаемых запасов угля может хватить примерно на 350 лет, нефти — на 40 лет, природного газа — на 60 лет.

Проблему «энергетического голода» не решает и использование энергии так называемых возобновляемых источников (энергии рек, ветра, солнца, морских волн, глубинного тепла Земли), так как они

могут обеспечить в лучшем случае только 5—10% наших потребностей. В связи с этим в середине XX в. возникла необходимость поиска новых источников энергии.

В настоящее время реальный вклад в энергоснабжение вносит ядерная энергетика. До 1940 г. многие ученые считали, что ядерная физика представляет чисто научный интерес, не имея при этом никакого практического применения. Так, в 1937 г. Резерфорд утверждал, что получение ядерной энергии в более или менее значительных количествах, достаточных для практического использования, никогда не будет возможным.

Однако уже в 1942 г. в США под руководством *Энрико Ферми* был построен первый ядерный реактор. Первый европейский реактор был создан в 1946 г. в Советском Союзе под руководством *Игоря Васильевича Курчатова*.

В 1954 г. в нашей стране (в г. Обнинске) была введена в действие первая в мире атомная электростанция (АЭС). Ее мощность была невелика — всего 5000 кВт. Современные АЭС имеют в сотни раз большую мощность.

АЭС имеют ряд преимуществ перед другими видами электростанций. Основное их преимущество заключается в том, что для работы АЭС требуется очень небольшое количество топлива (вспомните, что энергия, заключенная в 1 г урана, равна энергии, выделяющейся при сгорании 2,5 т нефти). В связи с этим эксплуатация атомных электростанций обходится значительно дешевле, чем тепловых (для работы которых необходимы большие затраты на добычу и транспортировку топлива).

Правда, строительство тепловых станций (ТЭС) обходится дешевле, чем атомных. Поэтому на сегодняшний день стоимость тепловых и атомных станций сопоставима. Но в перспективе атомная энергетика станет более выгодной.

Второе преимущество АЭС (при правильной их эксплуатации) заключается в их экологической чистоте по сравнению с ТЭС. Конечно, в выбросах АЭС содержатся радиоактивные газы и частицы. Но большая часть радиоактивных ядер (так называемых радионуклидов), содержащихся в выбросах АЭС, довольно быстро распадается, превращаясь в нерадиоактивные. А количество долгоживущих радионуклидов и мощность их излучения сравнительно невелики. Поэтому для населения, проживающего в районах размещения АЭС, дополнительная радиационная нагрузка не превышает нескольких десятых процента от естественного радиационного фона.

Что же касается электростанций, работающих на угле, то именно они являются одним из основных источников поступления в среду обитания человека долгоживущих радионуклидов. Дело в том, что в угле всегда содержатся микропримеси радиоактивных элементов, которые выносятся с продуктами сгорания, осаждаются на прилегающей местности и накапливаясь на зольных полях возле ТЭС.

Например, на зольных полях Рефтинской ТЭС, расположенной в 80 км от Екатеринбурга, за время ее работы накопилось до 7 кг урана, тория, радия и других радиоактивных изотопов.

Кроме того, используемое на ТЭС природное органическое топливо (уголь, нефть, газ) содержит от 1,5 до 4,5% серы. Образующийся при сгорании топлива сернистый ангидрид, даже пройдя через фильтры и системы очистки, частично выбрасывается в атмосферу. Вступая в контакт с атмосферной влагой, он образует раствор серной кислоты и вместе с дождями выпадает на землю. Такие кислотные дожди наносят огромный ущерб растительности, разрушают структуру почвы и значительно меняют ее состав (для восстановления которого необходима не одна сотня лет).

Неблагоприятные экологические последствия связаны и с использованием энергии рек. Эти последствия заключаются в отчуждении больших площадей земли (в связи со строительством водохранилищ и образованием вследствие этого болот), гибелью рыбы в результате перекрытия рек и т. д.

Для строительства электростанций достаточной мощности, преобразующих энергию солнца и ветра, тоже требуются, как оказалось, огромные территории.

Что же касается ядерной энергетики, то она не сопровождается вышеперечисленными негативными явлениями. Но это вовсе не означает, что АЭС не порождают серьезных проблем.

В настоящее время квалифицированная критика ядерной энергетики концентрируется вокруг трех ее принципиальных проблем: *действие распространению ядерного оружия, радиоактивные отходы и возможность аварий.*

Первая проблема может быть решена только в рамках мирового сообщества. Большой вклад в ее решение вносит, в частности, деятельность Международного агентства по атомной энергии при ООН (МАГАТЭ), созданного в 1957 г. для контроля за нераспространением ядерного оружия и безопасным применением ядерной энергии в мирных целях.

Обезвреживание радиоактивных отходов сводится в основном к трем задачам: 1) к совершенствованию технологий с целью уменьшения образования отходов при работе реакторов; 2) к переработке отходов для их консолидации (т. е. скрепления, связывания) и уменьшения опасности от распространения в окружающей среде; 3) к надежной изоляции отходов от биосферы и человека за счет создания могильников разных типов.

Для выполнения поставленных задач в проектах всех АЭС предусмотрены установки для отверждения жидких отходов. На Санкт-Петербургской, Тверской и многих других АЭС они уже действуют; на остальных — подготовлены к внедрению или проходят опытно-экспериментальную проверку.

Кроме того, на заводах по переработке ядерного топлива производится остеклование отходов. Газообразные отходы подвергаются очистке.

Помимо перечисленных принимаются и многие другие меры, направленные на решение проблемы радиоактивных отходов.

Что касается безопасности АЭС, деятельность МАГАТЭ в этой области включает в себя, в частности, разработку стандартов безопасности (касающихся выбора мест размещения АЭС, их проектирования, эксплуатации и пр.), консультирование стран — членов МАГАТЭ (например, по проблеме создания программы помощи состоящим в нем странам в случае аварий, по оказанию содействия развивающимся странам в вопросах безопасности и многим другим аспектам).

Проводимый экспертами МАГАТЭ анализ произошедших на атомных станциях аварий, выдача рекомендаций по их профилактике, внедрение в практику современных методов анализа безопасности и многие другие меры содействуют выравниванию и повышению в целом уровня безопасности АЭС в мире.

? Вопросы

1. В связи с чем в середине XX в. возникла необходимость нахождения новых источников энергии?

2. Назовите два основных преимущества АЭС перед ТЭС. Ответ обоснуйте.

3. Назовите три принципиальные проблемы современной атомной энергетики.

4. Приведите примеры путей решения проблем атомной энергетики.

§ 78. Биологическое действие радиации. Закон радиоактивного распада

Известно, что радиоактивные излучения при определенных условиях могут представлять опасность для здоровья живых организмов. В чем причина негативного воздействия радиации на живые существа?

Дело в том, что α -, β - и γ -частицы, проходя через вещество, ионизируют его, выбивая электроны из молекул и атомов. Ионизация живой ткани нарушает жизнедеятельность клеток, из которых эта ткань состоит, что отрицательно сказывается на здоровье всего организма.

Степень и характер отрицательного воздействия радиации зависят от нескольких факторов, в частности, от того, какая энергия передана потоком ионизирующих частиц данному телу и какова масса этого тела. Чем больше энергии получает человек от действующего на него потока частиц и чем меньше при этом масса человека (т. е. чем большая энергия приходится на каждую единицу массы), тем к более серьезным нарушениям в его организме это приведет.

Энергия ионизирующего излучения, поглощенная облучаемым веществом (в частности, тканями организма) и рассчитанная на единицу массы, называется поглощенной дозой излучения (D).

Поглощенная доза излучения D равна отношению поглощенной телом энергии E к его массе m :

$$D = \frac{E}{m}. \quad (1)$$

В СИ единицей поглощенной дозы излучения является *грэй* (Гр). Из формулы $D = \frac{E}{m}$ следует, что $1 \text{ Гр} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}}$. Это означает, что поглощенная доза излучения будет равна 1 Гр, если веществу массой 1 кг передается энергия излучения в 1 Дж.

В определенных случаях (например, при облучении мягких тканей живых существ рентгеновским или γ -излучением) поглощенную дозу можно измерять в *рентгенах* (Р): 1 Гр соответствует приблизительно 100 Р.

Известно, что чем больше поглощенная доза излучения, тем больший вред (при прочих равных условиях) может нанести организму это излучение.

Но для достоверной оценки тяжести последствий, к которым может привести действие ионизирующих излучений, необходимо учитывать также, что *при одинаковой поглощенной дозе разные виды излучений вызывают разные по величине биологические эффекты.*

Биологические эффекты, вызываемые любыми ионизирующими излучениями, принято оценивать по сравнению с эффектом от рентгеновского или от γ -излучения. Например, при одной и той же поглощенной дозе биологический эффект от действия α -излучения будет в 20 раз больше, чем от γ -излучения, от действия быстрых нейтронов эффект может быть в 10 раз больше, чем от γ -излучения, от действия β -излучения — такой же, как от γ -излучения.

В связи с этим принято говорить, что *коэффициент качества (К)* α -излучения равен 20, вышеупомянутых быстрых нейтронов — 10, при том, что коэффициент качества γ -излучения (так же, как рентгеновского и β -излучения) считается равным единице. Таким образом,

коэффициент качества К показывает, во сколько раз радиационная опасность от воздействия на живой организм данного вида излучения больше, чем от воздействия γ -излучения (при одинаковых поглощенных дозах).

В связи с тем, что при одной и той же поглощенной дозе разные излучения вызывают различные биологические эффекты, для оценки этих эффектов была введена величина, называемая *эквивалентной дозой (Н)*.

Эквивалентная доза H определяется как произведение поглощенной дозы D на коэффициент качества K :

$$H = D \cdot K. \quad (2)$$

Эквивалентная доза может измеряться в тех же единицах, что и поглощенная, однако для ее измерения существуют и специальные единицы. В Международной системе единиц единицей эквивалентной дозы служит *зиверт (Зв)*. Применяются также дольные единицы, такие как миллизиверт (мЗв), микрозиверт (мкЗв) и др.

Из формулы (2) понятно, что для рентгеновского, γ - и β -излучений (для которых $K = 1$) 1 Зв соответствует поглощенной дозе в 1 Гр, а для всех остальных видов излучения — дозе в 1 Гр, умноженной на соответствующий данному излучению коэффициент качества.

При оценке воздействий ионизирующих излучений на живой организм учитывают и то, что одни части тела (органы, ткани) более

чувствительны, чем другие. Например, при одинаковой эквивалентной дозе возникновение рака в легких более вероятно, чем в щитовидной железе. Другими словами, каждый орган и ткань имеют определенный коэффициент радиационного риска (для легких, например, он равен 0,12, а для щитовидной железы — 0,03).

Поглощенная и эквивалентная дозы зависят и от времени облучения (т. е. от времени взаимодействия излучения со средой). При прочих равных условиях эти дозы тем больше, чем больше время облучения, т. е. дозы накапливаются со временем.

При оценке степени опасности, которую радиоактивные изотопы представляют для живых существ, важно учитывать и то, что число радиоактивных (т. е. еще не распавшихся) атомов в веществе уменьшается с течением времени. При этом пропорционально уменьшается число радиоактивных распадов в единицу времени и излучаемая энергия.

Энергия, как мы уже знаем, является одним из факторов, определяющих степень отрицательного воздействия излучения на человека. Поэтому так важно найти количественную зависимость (т. е. формулу), по которой можно было бы рассчитать, сколько радиоактивных атомов остается в веществе к любому заданному моменту времени.

Для вывода этой зависимости необходимо знать, что скорость уменьшения количества радиоактивных ядер у разных веществ различна и зависит от физической величины, называемой *периодом полураспада*.

Период полураспада (T) — это промежуток времени, в течение которого исходное число радиоактивных ядер в среднем уменьшается вдвое.

Выведем зависимость числа N радиоактивных атомов от времени t и периода полураспада T . Время будем отсчитывать от момента начала наблюдения $t_0 = 0$, когда число радиоактивных атомов в источнике излучения было равно N_0 . Тогда через промежуток времени $t_1 = 1 \cdot T$

число радиоактивных атомов будет $N_1 = \frac{1}{2} \cdot N_0 = \frac{N_0}{2^1}$; через $t_2 = 2 \cdot T$

— $N_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{N_0}{2^1} = \frac{N_0}{2^2}$; через $t_3 = 3 \cdot T$ — $N_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{N_0}{2^2} = \frac{N_0}{2^3}$ и т. д., а через

$t = n \cdot T$ — $N = \frac{N_0}{2^n}$.

Формула $N = \frac{N_0}{2^n}$ называется законом радиоактивного

распада. Ее можно записать и в другом виде, например, $N = \frac{N_0}{2^{t/T}}$.

Из последней формулы следует, что чем больше T , тем меньше $2^{t/T}$, и тем больше N (при заданных значениях N_0 и t). Значит, чем больше период полураспада элемента, тем дольше он «живет» и излучает, представляя опасность для живых организмов. В этом со всей наглядностью убеждают представленные на рисунке 176 графики зависимости N от t , построенные для изотопов йода (^{131}I , $T_{\text{I}} = 8$ сут.) и селена (^{75}Se , $T_{\text{Se}} = 120$ сут.).

Следует знать способы защиты от радиации. Радиоактивные препараты ни в коем случае нельзя брать в руки — их берут специальными щипцами с длинными ручками.

Легче всего защититься от α -излучения, так как оно обладает низкой проникающей способностью и поэтому задерживается, например, листом бумаги, одеждой, кожей человека. В то же время α -частицы, попавшие внутрь организма (с пищей, воздухом, через открытые раны), представляют большую опасность.

β -Излучение имеет гораздо большую проникающую способность, поэтому от его воздействия труднее защититься. β -Излучение может проходить в воздухе расстояние до 5 м; оно способно проникать и в ткани

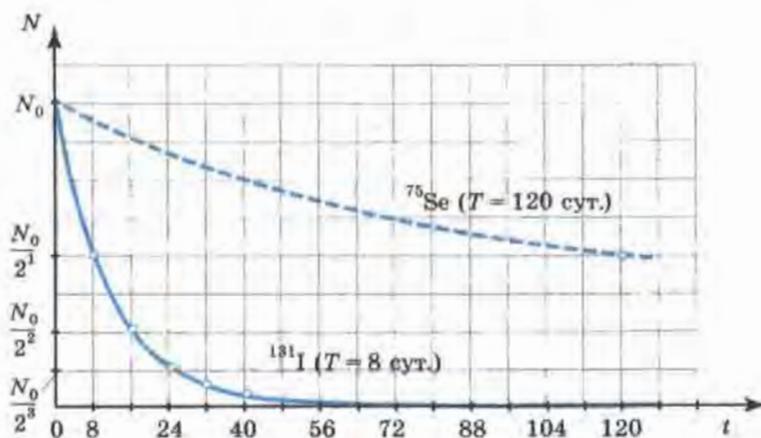


Рис. 176

организма (примерно на 1—2 см). Защитой от β -излучения может служить, например, слой алюминия толщиной в несколько миллиметров.

Еще большей проникающей способностью обладает γ -излучение, оно задерживается толстым слоем свинца или бетона. Поэтому γ -радиоактивные препараты хранят в толстостенных свинцовых контейнерах. По этой же причине в ядерных реакторах используют толстый бетонный слой, защищающий людей от γ -лучей и различных частиц (α -частиц, нейтронов, осколков деления ядер и пр.).

? Вопросы

1. В чем причина негативного воздействия радиации на живые существа?

2. Что называется поглощенной дозой излучения? По какой формуле она определяется и в каких единицах измеряется?

3. При большей или меньшей дозе излучение наносит организму больший вред, если все остальные условия одинаковы?

4. Одинаковый или различный по величине биологический эффект вызывают в живом организме разные виды ионизирующих излучений? Приведите примеры.

5. Что показывает коэффициент качества излучения? Чему он равен для α -, β -, γ и рентгеновского излучений?

6. В связи с чем и для чего была введена величина, называемая эквивалентной дозой излучения? По какой формуле она определяется и в каких единицах измеряется?

7. Какой еще фактор (помимо энергии, вида излучения и массы тела) следует учитывать при оценке воздействий ионизирующих излучений на живой организм?

8. Какой процент атомов радиоактивного вещества останется через 6 суток, если период его полураспада равен 2 суткам?

9. Расскажите о способах защиты от воздействия радиоактивных частиц и излучений.

§ 79. Термоядерная реакция

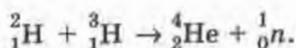
Вы уже знаете, что в середине XX в. возникла проблема поиска новых источников энергии. В связи с этим внимание ученых привлекли *термоядерные реакции*.

Термоядерной называется реакция слияния легких ядер (таких, как водород, гелий и др.), происходящая при температурах порядка сотен миллионов градусов.

Создание высокой температуры необходимо для придания ядрам достаточно большой кинетической энергии — только при этом условии ядра смогут преодолеть силы электрического отталкивания и сблизиться настолько, чтобы попасть в зону действия ядерных сил. На таких малых расстояниях силы ядерного притяжения значительно превосходят силы электрического отталкивания, благодаря чему возможен синтез (т. е. слияние, объединение) ядер.

В § 74 на примере урана было показано, что при делении тяжелых ядер может выделяться энергия. В случае с легкими ядрами энергия может выделяться при обратном процессе — при их синтезе. Причем реакция синтеза легких ядер энергетически более выгодна, чем реакция деления тяжелых (если сравнивать выделившуюся энергию, приходящуюся на один нуклон).

Примером термоядерной реакции может служить слияние изотопов водорода (дейтерия и трития), в результате чего образуется гелий и излучается нейтрон:



Это первая термоядерная реакция, которую ученым удалось осуществить. Она была реализована в термоядерной бомбе и носила неуправляемый (взрывной) характер.

Как уже было отмечено, термоядерные реакции могут идти с выделением большого количества энергии. Но для того чтобы эту энергию можно было использовать в мирных целях, необходимо научиться проводить *управляемые* термоядерные реакции. Одна из основных трудностей в осуществлении таких реакций заключается в том, чтобы удержать внутри установки высокотемпературную плазму (т. е. почти полностью ионизированный газ, в котором и происходит синтез ядер). Плазма не должна соприкасаться со стенками установки, в которой она находится, иначе стенки обратятся в пар. В настоящее время для удерживания плазмы в ограниченном пространстве на соответствующем расстоянии от стенок применяются очень сильные магнитные поля. Но этот метод еще нуждается в совершенствовании.

Термоядерные реакции играют важную роль в эволюции Вселенной, в частности в преобразованиях химических веществ в ней.

Благодаря термоядерным реакциям, протекающим в недрах Солнца, выделяется энергия, дающая жизнь обитателям Земли.

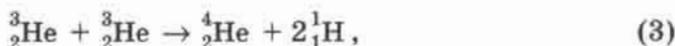
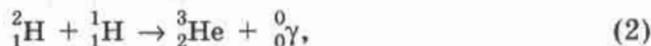
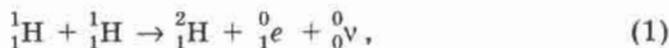
Наше Солнце излучает в пространство свет и тепло уже почти 4,6 млрд лет. Естественно, что во все времена ученых интересовал вопрос о том, что является «топливом», за счет которого на Солнце вырабатывается огромное количество энергии в течение столь длительного времени.

На этот счет существовали разные гипотезы. Одна из них заключалась в том, что энергия на Солнце выделяется в результате химической реакции горения. Но в этом случае, как показывают расчеты, Солнце могло бы просуществовать всего нескольких тысяч лет, что противоречит действительности.

Оригинальная гипотеза была выдвинута в середине XIX в. Она состояла в том, что увеличение внутренней энергии и соответствующее повышение температуры Солнца происходит за счет уменьшения его потенциальной энергии при гравитационном сжатии. Она тоже оказалась несостоятельной, так как в этом случае срок жизни Солнца увеличивается до миллионов лет, но не до миллиардов.

Предположение о том, что выделение энергии на Солнце происходит в результате протекания на нем термоядерных реакций, было высказано в 1939 г. американским физиком *Хансом Бете*.

Им же был предложен так называемый *водородный цикл*, т. е. цепочка из трех термоядерных реакций, приводящая к образованию гелия из водорода:



где ${}^0_0\nu$ — частица, называемая «нейтрино», что в переводе с итальянского означает «маленький нейтрон».

Чтобы получилось два ядра ${}^3_2\text{He}$, необходимые для третьей реакции, первые две должны произойти дважды.

Мы знаем, что в соответствии с формулой $E = mc^2$ (см. § 73), с уменьшением внутренней энергии тела уменьшается и его масса.

Чтобы представить, какое колоссальное количество энергии теряет Солнце в результате превращения водорода в гелий, достаточно

знать, что масса Солнца каждую секунду уменьшается на несколько миллионов тонн.

Но, несмотря на потери, запасов водорода на Солнце должно хватить еще на 5—6 миллиардов лет.

Такие же реакции протекают в недрах других звезд, масса и возраст которых сравнимы с массой и возрастом Солнца.

? Вопросы

1. Какая реакция называется термоядерной?
2. Почему протекание термоядерных реакций возможно только при очень высоких температурах?
3. Какая реакция энергетически более выгодна (в расчете на один нуклон): синтез легких ядер или деление тяжелых?
4. Приведите пример термоядерной реакции.
5. В чем заключается одна из основных трудностей при осуществлении термоядерных реакций?
6. Какова роль термоядерных реакций в существовании жизни на Земле?
7. Какие гипотезы об источниках энергии Солнца вы знаете?
8. Что является источником энергии Солнца по современным представлениям?
9. На какой период должно хватить запаса водорода на Солнце по подсчетам ученых?



§ 80. Элементарные частицы, Античастицы

(для дополнительного чтения)

Частицы, из которых состоят атомы различных веществ — электрон, протон и нейтрон, — называли элементарными. Слово «элементарный» подразумевало, что эти частицы являются первичными, простейшими, далее неделимыми и неизменяемыми. Но вскоре оказалось, что эти частицы вовсе не являются неизменными. Все они обладают способностью превращаться друг в друга при взаимодействии.

Поэтому в современной физике термин «элементарные частицы» обычно употребляется не в своем точном значении, а для наименования большой группы мельчайших частиц материи, не являющихся атомами или ядрами атомов (исключение составляет протон, пред-

ставляющий собой ядро атома водорода и в то же время относящийся к элементарным частицам).

В настоящее время известно более 350 различных элементарных частиц. Частицы эти очень разнообразны по своим свойствам. Они могут отличаться друг от друга массой, знаком и величиной электрического заряда, временем жизни (т. е. временем с момента образования частицы и до момента ее превращения в какую-либо другую частицу), проникающей способностью (т. е. способностью проходить сквозь вещество) и другими характеристиками. Например, большинство частиц являются «короткоживущими» — они живут не более двух миллионных долей секунды, в то время как среднее время жизни нейтрона, находящегося вне атомного ядра, 15 мин.

Важнейшее открытие в области исследования элементарных частиц было сделано в 1932 г., когда американский физик *Карл Дейвид Андерсон* обнаружил в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле, след неизвестной частицы. По характеру этого следа (по радиусу кривизны, направлению изгиба и пр.) ученые определили, что он оставлен частицей, которая представляет собой как бы электрон с положительным по знаку электрическим зарядом. Эту частицу назвали *позитроном*.

Интересно, что за год до экспериментального открытия позитрона его существование было теоретически предсказано английским физиком *Полем Дираком* (существование именно такой частицы следовало из выведенного им уравнения). Более того, Дирак предсказал так называемые процессы *аннигиляции* (исчезновения) и *рождения электронно-позитронной пары*. Аннигиляция заключается в том, что электрон и позитрон при встрече исчезают, превращаясь в γ -кванты (фотоны). А при столкновении γ -кванта с каким-либо массивным ядром происходит рождение электронно-позитронной пары.

Оба эти процесса впервые удалось пронаблюдать на опыте в 1933 г. На рисунке 177 показаны треки электрона и позитрона, образовавшихся в результате столкновения γ -кванта с атомом свинца при прохождении γ -лучей сквозь свинцовую пластинку. Опыт проводился в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле. Одинаковая кривизна треков свидетельствует об одинаковой массе частиц, а искривление в разные стороны — о противоположных знаках электрического заряда.

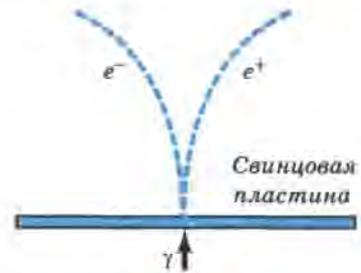


Рис. 177

В 1955 г. была обнаружена еще одна античастица — **антипротон** (существование которой тоже вытекало из теории Дирака), а несколько позже — **антинейтрон**. Антинейтрон, так же как и нейтрон, не имеет электрического заряда, но он, бесспорно, относится к античастицам, поскольку участвует в процессе аннигиляции и рождения пары нейтрон-антинейтрон.

Возможность получения античастиц привела ученых к идее о создании **антивещества**. Атомы антивещества должны быть построены таким образом: в центре атома — отрицательно заряженное ядро, состоящее из антипротонов и антинейтронов, а вокруг ядра обращаются позитроны. В целом атом нейтрален. Эта идея тоже получила блестящее экспериментальное подтверждение. В 1969 г. на ускорителе протонов в г. Серпухове советские физики получили ядра атомов антигелия.

В настоящее время экспериментально обнаружены античастицы почти всех известных элементарных частиц.



Лабораторная работа № 1

Исследование равноускоренного движения
без начальной скорости

Вариант 1

Цель работы: определить ускорение движения шарика и его мгновенную скорость перед ударом о цилиндр.

Оборудование: желоб лабораторный металлический длиной 1,4 м, шарик металлический диаметром 1,5—2 см, цилиндр металлический, метроном (один на весь класс), лента измерительная, кусок мела.

Теоретические обоснования

Известно, что шарик скатывается по прямолинейному наклонному желобу равноускоренно.

При равноускоренном движении без начальной скорости пройденное расстояние определяется по формуле:

$$s = \frac{at^2}{2}, \quad (1)$$

отсюда

$$a = \frac{2s}{t^2}. \quad (2)$$

Зная ускорение, можно определить мгновенную скорость по формуле:

$$v = at. \quad (3)$$

Если измерить промежуток времени t от начала движения шарика до его удара о цилиндр и расстояние s , пройденное им за это время, то по формуле (2) мы вычислим ускорение шарика a , а по формуле (3) — его мгновенную скорость v .

Промежуток времени t измеряется с помощью метронома. Метроном настраивают на 120 ударов в минуту, значит, промежуток времени между двумя следующими друг за другом ударами равен 0,5 с. Удар метронома, одновременно с которым шарик начинает движение, считается нулевым.

В нижней половине желоба помещают цилиндр для торможения шарика. Наклон желоба и положение цилиндра опытным путем подбирают так, чтобы удар шарика о цилиндр совпадал с третьим или четвертым от начала движения ударом метронома. Тогда время движения t можно вычислить по формуле:

$$t = 0,5 \cdot n,$$

где n — число ударов метронома, не считая нулевого удара (или число промежутков времени по 0,5 с от начала движения шарика до его соударения с цилиндром).

Начальное положение шарика отмечается мелом. Расстояние s , пройденное им до остановки, измеряют сантиметровой лентой.

Указания к работе

1. Соберите установку по рисунку 178. (Наклон желоба должен быть таким, чтобы шарик проходил всю длину желоба не менее чем за три удара метронома.)



Рис. 178

2. Перечертите в тетрадь таблицу 4.

Таблица 4

Число ударов метронома n	Расстояние s , м	Время движения $t = 0,5 \cdot n$, с	Ускорение $a = \frac{2s}{t^2}$, м/с ²	Мгновенная скорость $v = at$, м/с

удара метронома. Результаты измерений занесите в таблицу 4.

4. Вычислите время t движения шарика, его ускорение и мгновенную скорость перед ударом о цилиндр. Результаты измерений занесите в таблицу 4 с учетом абсолютной погрешности, полагая

$$\Delta s = 5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \Delta t = 1 \text{ с}; \Delta a = \frac{2s\Delta t + t\Delta s}{t^3}; \Delta v = a\Delta t + t\Delta a.$$

Вариант II

Цель работы: убедиться в равноускоренном характере движения бруска и определить его ускорение и мгновенную скорость.

Оборудование: прибор для изучения движения тел, ленты из миллиметровой и копировальной бумаги длиной 300 мм и шириной 20 мм, штатив с муфтой и лапкой.

Описание устройства и действия прибора

Прибор, изображенный на рисунке 179, а, представляет собой желоб, состоящий из двух соединенных друг с другом частей: верхней 1а и нижней 1б. На верхней части желоба находится вибратор 2.

Вибратор имеет подвижную часть 3 с бойком (рис. 179, б).

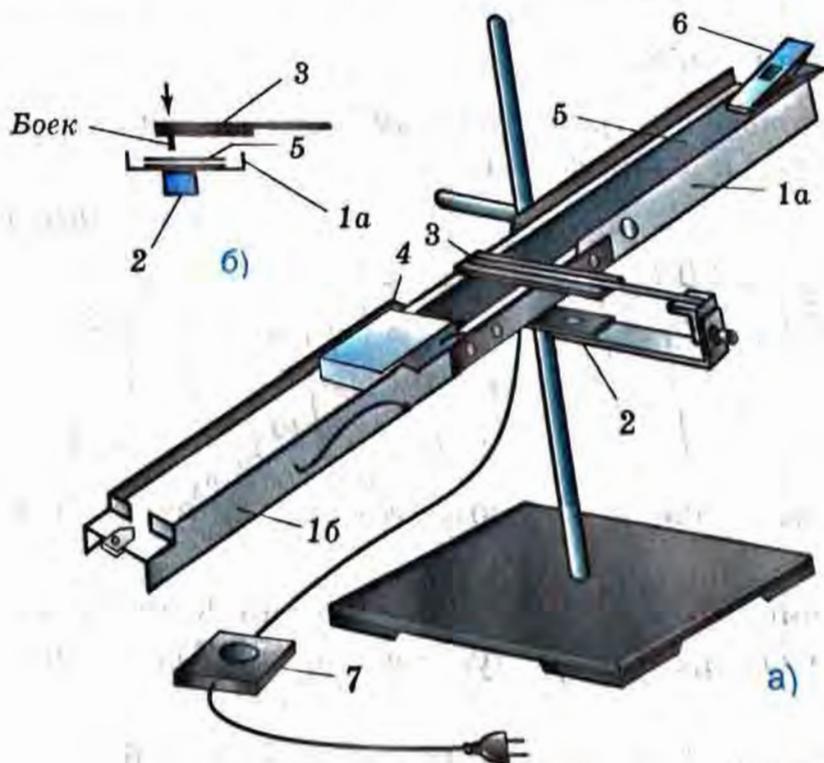


Рис. 179

К бруску 4 прикрепляются бумажная и копировальная ленты 5. Эти ленты пропускаются под бойком подвижной части вибратора и удерживаются зажимом 6.

Если вибратор включить в сеть переменного тока и нажать на кнопку 7, то его подвижная часть будет совершать колебания с $T = 0,02$ с. При освобождении бумаги брусок начинает скользить по желобу. На ленте остаются метки в виде точек от удара бойка (рис. 180).

Задание 1. Убедитесь в том, что брусок движется по наклонной плоскости равноускоренно.

Теоретические обоснования

Убедиться в равноускоренном характере движения можно, например, с помощью закономерности:

$$s_1 : s_2 : s_3 : \dots : s_n = 1 : 4 : 9 : \dots : n^2,$$

где $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ — модули векторов перемещений, совершенных бруском за промежутки времени $t_1, t_2 = 2t_1, t_3 = 3t_1, \dots, t_n = nt_1$, отсчитываемые от начала движения (см. § 8).

Если указанная закономерность выполняется, значит, движение является равноускоренным.

Указания к работе

1. Подготовьте в тетради таблицу 5 для записи результатов измерений и вычислений.

Таблица 5

$t, \text{с}$	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30
$s, \text{мм}$	0															

2. Соберите установку в соответствии с рисунком 179, а.

3. Включите вибратор в сеть, нажмите на кнопку 7, а затем освободите зажим 6, не отпуская кнопку 7 до конца движения бруска.

4. Освободите бумажную ленту. Измерьте на ней расстояния между нулевой и каждой следующей меткой. Это



Рис. 180

будут расстояния $s_1, s_2, s_3, \dots, s_{15}$, соответствующие промежуткам времени $0,02$ с, $0,04$ с, $0,06$ с, ..., $0,3$ с. Результаты измерений запишите в таблицу 5.

5. Вычислите отношения: $\frac{s_2}{s_1}, \frac{s_3}{s_1}, \dots, \frac{s_{15}}{s_1}$, округлив результаты до

целых чисел.

6. Результаты вычислений запишите в виде ряда отношений, дописав правую часть в следующем уравнении:

$$s_1 : s_2 : s_3 : s_4 : s_5 : s_6 : s_7 : s_8 : s_9 : s_{10} : s_{11} : s_{12} : s_{13} : s_{14} : s_{15} = 1 : \dots,$$

где под s_1 в данном случае подразумевается $\frac{s_1}{s_1} = 1$, под s_2 — $\frac{s_2}{s_1}$ и т. д.

7. Сделайте вывод о характере движения бруска.

Задание 2. Определите ускорение движения бруска.

1. Из формулы $s = \frac{at^2}{2}$ выразите a через s и t .

2. Воспользуйтесь полученными вами экспериментальными данными и вычислите значение ускорения дважды, например при $t_{10} = 0,2$ с и соответствующем s_{10} и при $t_{15} = 0,3$ с и соответствующем s_{15} (маленькие значения t и s брать не рекомендуется, так как чем меньше значения, тем с большей погрешностью будет выполнено определение ускорения).

Задание 3. Определите мгновенную скорость движения бруска в разные моменты времени и постройте график зависимости мгновенной скорости от времени.

1. По формуле $v = at$ определите мгновенную скорость бруска к концу промежутков времени $0,10$, $0,20$ и $0,30$ с от начала движения.

2. По полученным данным постройте график зависимости модуля мгновенной скорости бруска от времени.

Задание 4. Постройте график зависимости координаты x бруска от времени t , отсчитываемого от начала движения.

Для построения графика воспользуйтесь данными таблицы 5, приняв за начало отсчета момент начала движения и соответствующую этому моменту координату ($t_0 = 0$ и $x_0 = 0$).

Поскольку брусок двигался прямолинейно в одном и том же направлении, то расстояния $s_1, s_2, s_3, \dots, s_{15}$ и будут являться координатами.

натами $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{15}$, которые имело движущееся тело к концу промежутков времени $0,02 \text{ с}, 0,04 \text{ с}, 0,06 \text{ с}, \dots, 0,3 \text{ с}$.

Указание: график рекомендуется строить на листе миллиметровой бумаги высотой 25 см и шириной 18 см , откладывая промежутки времени по оси абсцисс (менее длинной, чем ось ординат) в масштабе: $10 \text{ мм} — 0,02 \text{ с}$.

Лабораторная работа № 2

Измерение ускорения свободного падения

Цель работы: измерить ускорение свободного падения с помощью прибора для изучения движения тел.

Оборудование: прибор для изучения движения тел, полоски из миллиметровой и копировальной бумаги длиной 300 мм и шириной 20 мм , штатив с муфтой и лапкой.

Описание устройства и действия прибора

В приборе (рис. 181) желоб 1 с установленным на нем вибратором 2 укреплен вертикально в лапке штатива 8 .

К грузу 4 прикреплены две бумажные ленты 5 : одна — из миллиметровой бумаги, а вторая (поверх первой) — из копировальной. Ленты вместе с висящим на них грузом удерживаются на желобе зажимом 6 .

Если отпустить зажим, то груз вместе с лентами будет совершать падение, близкое к свободному.

Подвижная часть 3 вибратора (который включается заранее кнопкой 7) колеблется, оставляя метки на движущейся мимо нее ленте через промежутки времени $T = 0,02 \text{ с}$ (рис. 182).

Теоретические обоснования

Измерив расстояние между нулевой и любой другой меткой, можно определить, какой путь s прошел груз с лентой за время $t = nT$, где n — число интервалов между указанными метками.

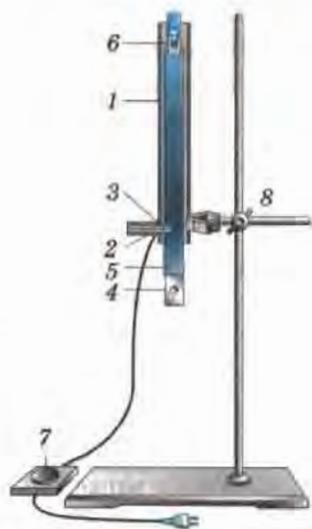


Рис. 181

Зная путь s и промежуток времени t , за который этот путь был пройден, можно рассчитать ускорение свободного падения g по формуле: $g = \frac{2s}{t^2}$.

Указания к работе

1. Соберите установку в соответствии с рисунком 181.
2. Перечертите в тетрадь данную ниже таблицу 6.

Таблица 6

Время движения $t = nT$, с	Путь s , мм	Путь s , м	Ускорение свободного падения $g = 2s/t^2$, м/с ²

3. Включите вибратор в сеть, нажмите на кнопку 7, а затем освободите зажим, не отпуская кнопку до конца движения бруска.

4. Сделайте необходимые измерения и вычисления. Результаты занесите в таблицу 6.

5. Определите отклонение полученного вами значения g от действительного значения, равного $9,8 \text{ м/с}^2$ (т. е. найдите разность между ними). Вычислите, какую часть (в процентах) составляет эта разность от действительного значения g . Это отношение называется относительной погрешностью ε . Чем меньше относительная погрешность, тем выше точность измерений.

Лабораторная работа № 3

Исследование зависимости периода и частоты свободных колебаний нитяного маятника от его длины

Цель работы: выяснить, как зависят период и частота свободных колебаний нитяного маятника от его длины.

Оборудование: штатив с муфтой и лапкой, шарик с прикрепленной к нему нитью длиной 130 см, протянутой сквозь кусочек резины¹, часы с секундной стрелкой или метроном.

Указания к работе

1. Перечертите в тетрадь таблицу 7 для записи результатов измерений и вычислений.

Таблица 7

Физическая величина	№ опыта	1	2	3	4	5
	l , см		5	20	45	80
N		30	30	30	30	30
t , с						
T , с						
ν , Гц						

2. Укрепите кусочек резины с висящим на нем маятником в лапке штатива, как показано на рисунке 183. При этом длина маятника должна быть равна 5 см, как указано в таблице 7 для первого опыта. Длину l маятника измеряйте так, как показано на рисунке, т. е. от точки подвеса до середины шарика.

3. Для проведения первого опыта отклоните шарик от положения равновесия на небольшую амплитуду (1—2 см) и отпустите. Измерьте промежуток времени t , за который маятник совершит 30 полных колебаний. Результаты измерений запишите в таблицу 7.

4. Проведите остальные четыре опыта так же, как и первый. При этом длину l маятника

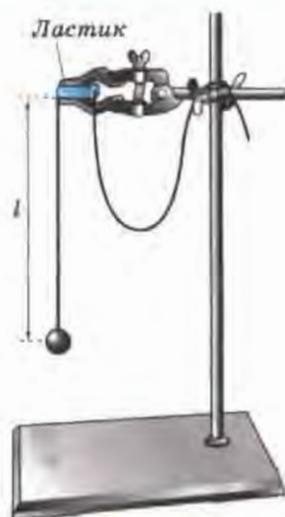


Рис. 183

¹ Кусочек резины (например, ластик) используется для того, чтобы нить не выскальзывала из лапки штатива и чтобы можно было быстро и точно установить нужную длину маятника. Нить протягивается сквозь резину с помощью иголки.

каждый раз устанавливайте в соответствии с ее значением, указанным в таблице 7 для данного опыта.

5. Для каждого из пяти опытов вычислите и запишите в таблицу 7 значения периода T колебаний маятника.

6. Для каждого из пяти опытов рассчитайте значения частоты ν колебаний маятника по формуле: $\nu = \frac{1}{T}$ или $\nu = \frac{N}{t}$. Полученные результаты внесите в таблицу 7.

7. Сделайте выводы о том, как зависят период и частота свободных колебаний маятника от его длины. Запишите эти выводы.

8. Ответьте на вопросы. Увеличили или уменьшили длину маятника, если: а) период его колебаний сначала был 0,3 с, а после изменения длины стал 0,1 с; б) частота его колебаний вначале была равна 5 Гц, а потом уменьшилась до 3 Гц?

Дополнительное задание

Цель задания: выяснить, какая математическая зависимость существует между длиной маятника и периодом его колебаний.

Указания к работе

1. Перечертите в тетрадь таблицу 8.

Таблица 8

$\frac{T_2}{T_1} =$	$\frac{T_3}{T_1} =$	$\frac{T_4}{T_1} =$	$\frac{T_5}{T_1} =$
$\frac{l_2}{l_1} =$	$\frac{l_3}{l_1} =$	$\frac{l_4}{l_1} =$	$\frac{l_5}{l_1} =$

2. Пользуясь данными таблицы 7, вычислите и запишите приведенные в таблице 8 отношения периодов и длин (при вычислении отношений периодов округляйте результаты до целых чисел).

3. Сравните результаты всех четырех столбцов таблицы 8 и постарайтесь найти в них общую закономерность. На основании этого выберите из пяти приведенных ниже равенств те, которые верно от-

ражают зависимость между периодом колебаний маятника T и его длиной l :

$$1) \frac{T_k}{T_1} = \frac{l_k}{l_1}, 2) \frac{T_k}{T_1} = \frac{l_1}{l_k}, 3) \frac{T_k}{T_1} = \sqrt{\frac{l_k}{l_1}}, 4) \sqrt{\frac{T_k}{T_1}} = \frac{l_k}{l_1}, 5) \left(\frac{T_k}{T_1}\right)^2 = \frac{l_k}{l_1},$$

где k может принимать следующие значения: 2, 3, 4, 5; например,

$$\left(\frac{T_3}{T_1}\right)^2 = \frac{l_3}{l_1}.$$

4. Из пяти приведенных ниже утверждений выберите верное.

При увеличении длины нити маятника в 4 раза период его колебаний: а) увеличивается в 4 раза; б) уменьшается в 4 раза; в) увеличивается в 2 раза; г) уменьшается в 2 раза; д) увеличивается в 16 раз.

Лабораторная работа № 4

Изучение явления электромагнитной индукции

Цель работы: изучить явление электромагнитной индукции.

Оборудование: миллиамперметр, катушка-моток, магнит дугообразный, источник питания, катушка с железным сердечником от разборного электромагнита, реостат, ключ, провода соединительные, модель генератора электрического тока (одна на класс).

Указания к работе

1. Подключите катушку-моток к зажимам миллиамперметра.
2. Наблюдая за показаниями миллиамперметра, подводите один из полюсов магнита к катушке, потом на несколько секунд остановите магнит, а затем вновь приближайте его к катушке, вдвигая в нее (рис. 184). Запишите, возникал ли в катушке индукционный ток во время движения магнита относительно катушки; во время его остановки.

3. Запишите, менялся ли магнитный поток Φ , пронизывающий катушку, во время движения магнита; во время его остановки.

4. На основании ваших ответов на предыдущий вопрос сделайте и запишите вывод о том, при каком условии в катушке возникал индукционный ток.



Рис. 184

5. Почему при приближении магнита к катушке магнитный поток, пронизывающий эту катушку, менялся? (Для ответа на этот вопрос вспомните, во-первых, от каких величин зависит магнитный поток Φ и, во-вторых, одинаков ли модуль вектора индукции \vec{B} магнитного поля постоянного магнита вблизи этого магнита и вдали от него.)

6. О направлении тока в катушке можно судить по тому, в какую сторону от нулевого деления отклоняется стрелка миллиамперметра.

Проверьте, одинаковым или различным будет направление индукционного тока в катушке при приближении к ней и удалении от нее одного и того же полюса магнита.

7. Приближайте полюс магнита к катушке с такой скоростью, чтобы стрелка миллиамперметра отклонялась не более чем на половину предельного значения его шкалы.

Повторите тот же опыт, но при большей скорости движения магнита, чем в первом случае.

При большей или меньшей скорости движения магнита относительно катушки магнитный поток Φ , пронизывающий эту катушку, менялся быстрее?

При быстром или медленном изменении магнитного потока сквозь катушку в ней возникал больший по модулю ток?

На основании вашего ответа на последний вопрос сделайте и запишите вывод о том, как зависит модуль силы индукционного тока, возникающего в катушке, от скорости изменения магнитного потока Φ , пронизывающего эту катушку.

8. Соберите установку для опыта по рисунку 185.

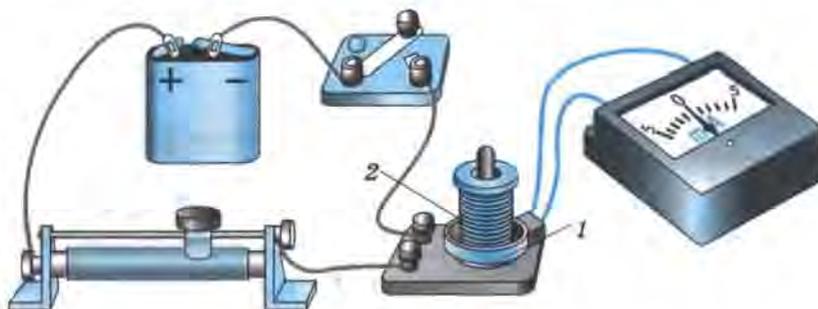


Рис. 185

9. Проверьте, возникает ли в катушке-мотке 1 индукционный ток в следующих случаях:

а) при замыкании и размыкании цепи, в которую включена катушка 2;

б) при протекании через катушку 2 постоянного тока;

в) при увеличении и уменьшении силы тока, протекающего через катушку 2, путем перемещения в соответствующую сторону движка реостата.

10. В каких из перечисленных в пункте 9 случаев меняется магнитный поток, пронизывающий катушку 1? Почему он меняется?

11. Пронаблюдайте возникновение электрического тока в модели генератора (рис. 186). Объясните, почему в рамке, вращающейся в магнитном поле, возникает индукционный ток.

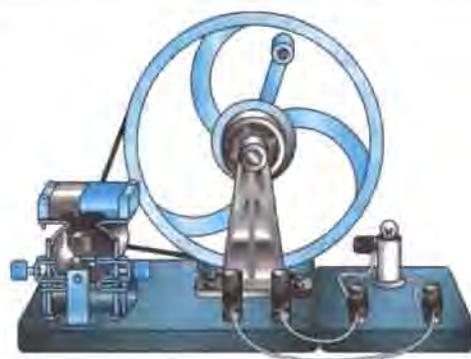


Рис. 186

✿ Лабораторная работа № 5

Изучение деления ядра атома урана по фотографии треков

Цель работы: применить закон сохранения импульса для объяснения движения двух ядер, образовавшихся при делении ядра атома урана.

Оборудование: фотография треков заряженных частиц (рис. 187), образовавшихся при делении ядра атома урана.

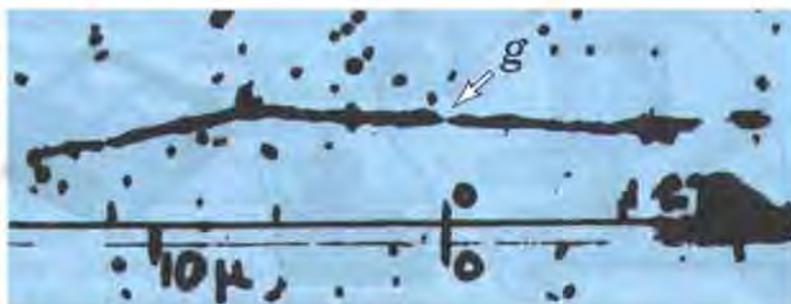


Рис. 187

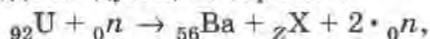
Пояснения. На данной фотографии вы видите треки двух осколков, образовавшихся при делении ядра атома урана, захватившего нейтрон. Ядро урана находилось в точке *g*, указанной стрелочкой.

По трекам видно, что осколки ядра урана разлетелись в противоположных направлениях (излом левого трека объясняется столкновением осколка с ядром одного из атомов фотоэмульсии, в которой он двигался).

Задание 1. Пользуясь законом сохранения импульса, объясните, почему осколки, образовавшиеся при делении ядра атома урана, разлетелись в противоположных направлениях.

Задание 2. Известно, что осколки ядра урана представляют собой ядра атомов двух разных химических элементов (например, бария, ксенона и др.) из середины таблицы Д. И. Менделеева.

Одна из возможных реакций деления урана может быть записана в символическом виде следующим образом:



где символом ${}_Z\text{X}$ обозначено ядро атома одного из химических элементов.

Пользуясь законом сохранения заряда и таблицей Д. И. Менделеева, определите, что это за элемент.

Лабораторная работа № 6

Изучение треков заряженных частиц по готовым фотографиям

Цель работы: объяснить характер движения заряженных частиц.

Оборудование: фотографии треков заряженных частиц, полученных в камере Вильсона, пузырьковой камере и фотоэмульсии.

Пояснения. При выполнении данной лабораторной работы следует помнить, что:

а) длина трека тем больше, чем больше энергия частицы (и чем меньше плотность среды);

б) толщина трека тем больше, чем больше заряд частицы и чем меньше ее скорость;

в) при движении заряженной частицы в магнитном поле трек ее получается искривленным, причем радиус кривизны трека тем больше, чем больше масса и скорость частицы и чем меньше ее заряд и модуль индукции магнитного поля;

г) частица двигалась от конца трека с большим радиусом кривизны к концу с меньшим радиусом кривизны (радиус кривизны по мере движения уменьшается, так как из-за сопротивления среды уменьшается скорость частицы).

Задание 1. На двух из трех представленных вам фотографий (рис. 188, 189 и 190) изображены треки частиц, движущихся в магнитном поле. Укажите на каких. Ответ обоснуйте.

Задание 2. Рассмотрите фотографию треков α -частиц, двигавшихся в камере Вильсона (рис. 188), и ответьте на данные ниже вопросы.

а) В каком направлении двигались α -частицы?

б) Длина треков α -частиц примерно одинакова. О чем это говорит?

в) Как менялась толщина трека по мере движения частиц? Что из этого следует?

Задание 3. На рисунке 189 дана фотография треков α -частиц в камере Вильсона, находившейся в магнитном поле. Определите по этой фотографии:

а) Почему менялись радиус кривизны и толщина треков по мере движения α -частиц?

б) В какую сторону двигались частицы?

Задание 4. На рисунке 190 дана фотография трека электрона в пузырьковой камере, находившейся в магнитном поле. Определите по этой фотографии:

а) Почему трек имеет форму спирали?

б) В каком направлении двигался электрон?

в) Что могло послужить причиной того, что трек электрона на рисунке 190 гораздо длиннее треков α -частиц на рисунке 189?

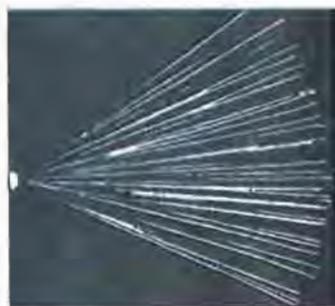


Рис. 188



Рис. 189



Рис. 190

ЗАДАЧИ, ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ И ПРИ 3 ЧАСАХ ФИЗИКИ В НЕДЕЛЮ

1. Для каждого из векторов, изображенных на рисунке 191, определите:

- а) координаты начала и конца;
- б) проекции на ось y ;
- в) модули проекций на ось y ;
- г) модули векторов.

2. На рисунке 192 векторы \vec{a} и \vec{c} перпендикулярны оси X , а векторы \vec{b} и \vec{d} параллельны ей. Выразите проекции a_x, b_x, c_x и d_x через модули этих векторов или соответствующие числа.

3. На рисунке 193 изображена траектория движения шарика, переместившегося из точки A в точку B . Определите:

- а) координаты начального и конечного положений шарика;
- б) проекции s_x и s_y перемещения шарика;
- в) модули $|s_x|$ и $|s_y|$ проекций перемещения;
- г) модуль перемещения $|\vec{s}|$.

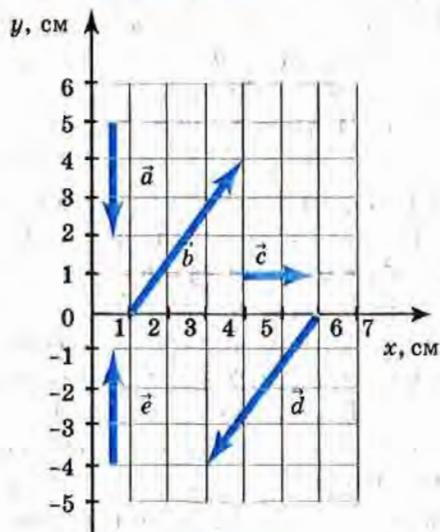


Рис. 191

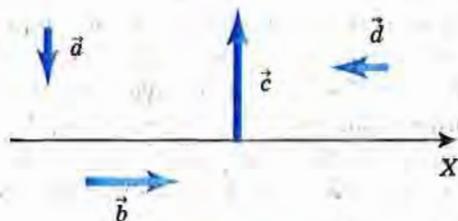


Рис. 192

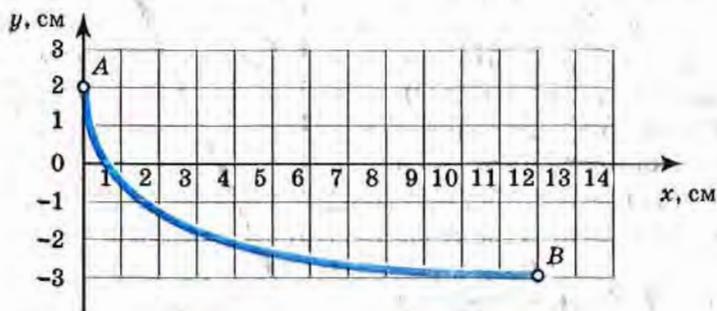


Рис. 193

4. Катер переместился относительно пристани из точки $A(-8; -2)$ в точку $B(4; 3)$. Сделайте чертеж, совместив начало координат с пристанью и указав на нем точки A и B . Определите перемещение катера AB . Мог ли путь, проделанный катером, быть больше совершенного им перемещения? меньше перемещения? равен перемещению? Все ответы обоснуйте.

5. Известно, что для определения координаты прямолинейно движущегося тела используется уравнение $x = x_0 + s_x$. Докажите, что координата тела при его прямолинейном равномерном движении для любого момента времени определяется с помощью уравнения $x = x_0 + v_x t$, где x_0 и v_x — постоянные величины, а t — переменная.

6. Запишите уравнение для определения координаты тела, движущегося прямолинейно со скоростью 5 м/с вдоль оси X , если в момент начала наблюдения его координата была равна 3 м.

7. Два поезда — пассажирский и товарный — движутся по параллельным путям. Относительно здания вокзала движение пассажирского поезда описывается уравнением $x_{\text{п}} = 260 - 10t$, а товарного — уравнением $x_{\text{т}} = -100 + 8t$. Приняв вокзал и поезда за материальные точки,

укажите на оси X их положения в момент начала наблюдения. Через какой промежуток времени от начала наблюдения поезда встретились? Какова координата места их встречи? Укажите положение места встречи на оси X . Считать, что ось X параллельна рельсам.

8. Туристы сплавляются на плоту по реке. На рисунке 194 показано, как меняется со временем координата плота относительно места стоянки туристов (точки O). Начало наблюдения совпадает с моментом спуска плота на воду и началом движения.

Где плот был спущен на воду: от места стоянки, выше по течению или ниже? Если выше или ниже места стоянки, то на сколько метров?

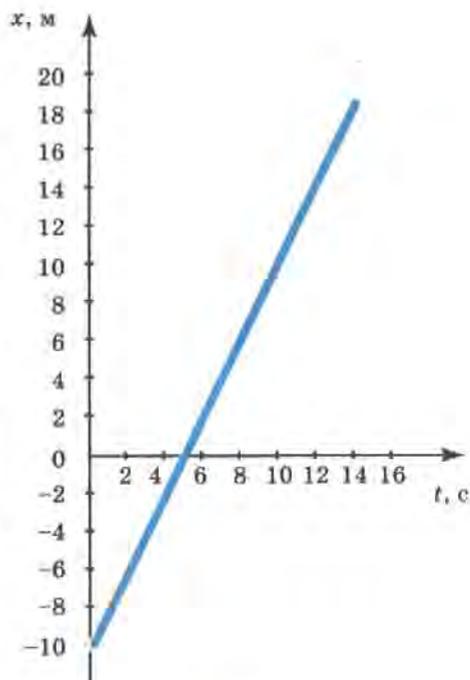


Рис. 194

Определите начальную координату и скорость движения плота и запишите уравнение, описывающее зависимость координаты плота от времени.

9. Мальчик съезжает с горы на санках, двигаясь из состояния покоя прямолинейно и равноускоренно. За первые 2 с после начала движения его скорость возрастает до 3 м/с. Через какой промежуток времени от начала движения скорость мальчика станет равной 4,5 м/с? Какой путь он пройдет за этот промежуток времени?

10. Преобразуйте формулу $\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a} t^2}{2}$ к виду: $\vec{s} = \frac{\vec{v}_0 + \vec{v}}{2} \cdot t$.

11. Исходя из того, что $s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ и $a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$, выведите формулу $a_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2s_x}$.

12. На рисунке 27 показаны положения шарика через каждую 0,1 с его равноускоренного падения из состояния покоя. Координаты всех шести положений отмечены черточками по правому краю линейки. Пользуясь рисунком, определите среднюю скорость шарика за первые 0,3 с от начала движения и его мгновенную скорость, которую он приобрел к концу этого же промежутка времени.

13. Два лифта — обычный и скоростной — одновременно приходят в движение и в течение одного и того же промежутка времени движутся равноускоренно. Во сколько раз путь, который пройдет за это время скоростной лифт, больше пути, пройденного обычным лифтом, если его ускорение в 3 раза превышает ускорение обычного лифта? Во сколько раз большую скорость по сравнению с обычным лифтом приобретет скоростной лифт к концу этого промежутка времени?

14. На рисунке 195 представлен график зависимости проекции скорости лифта при разгоне от времени. Перечертите этот график в тетрадь и в тех же координатных осях постройте аналогичный график для скоростного лифта, ускорение которого в 3 раза больше, чем обычного.

15. Автомобиль движется прямолинейно вдоль оси X. Уравнение зависимости проекции вектора скорости автомобиля от времени в СИ выглядит так: $v_x = 10 + 0,5t$. Определите модуль и направление начальной скорости и ускорения автомобиля. Как меняется модуль вектора скорости автомобиля?

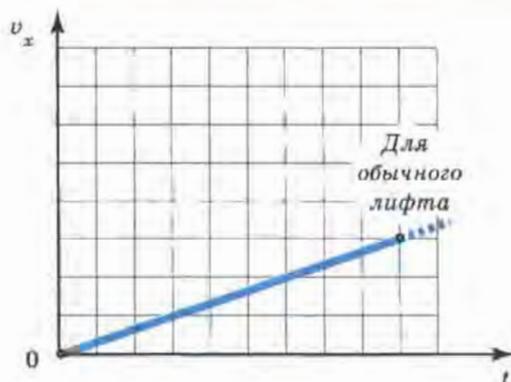


Рис. 195

16. От удара клюшкой шайба приобрела начальную скорость 5 м/с и стала скользить по льду с ускорением 1 м/с². Запишите уравнение зависимости проекции вектора скорости шайбы от времени и постройте соответствующий этому уравнению график.

17. Известно, что для определения координаты прямолинейно движущегося тела используется уравнение $x = x_0 + s_x$. Докажите, что координата тела при его прямолинейном равноускоренном движении для любого момента времени определяется с помощью уравнения

$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$, где x_0 , v_{0x} и a_x — постоянные величины, а t — переменная.

18. Лыжник скатывается с горы, двигаясь прямолинейно с постоянным ускорением 0,1 м/с². Напишите уравнения, выражающие зависимость от времени координаты и проекции вектора скорости движения лыжника, если его начальные координата и скорость равны нулю.

19. Велосипедист движется по шоссе прямолинейно со скоростью, модуль которой равен 40 км/ч относительно земли. Параллельно ему движется автомобиль. Что можно сказать о модуле вектора скорости и направлении движения автомобиля относительно земли, если относительно велосипедиста модуль его (автомобиля) скорости равен: а) 0; б) 10 км/ч; в) 40 км/ч; г) 60 км/ч?

20. Скорость катера относительно воды в реке в 5 раз больше скорости течения воды относительно берега. Рассматривая движение катера относительно берега, определите, во сколько раз быстрее катер движется по течению, чем против него.

21. Мальчик держит в руках шарик массой 3,87 г и объемом $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Что произойдет с этим шариком, если его выпустить из рук?

22. Стальной шар равномерно катится по горизонтальной поверхности и сталкивается с неподвижным алюминиевым шаром, в результате чего алюминиевый шар получает некоторое ускорение. Может ли при этом модуль ускорения стального шара быть равен нулю? быть больше или меньше ускорения алюминиевого шара? Все ответы обоснуйте.

23. Пусть M_3 и R_3 — соответственно масса и радиус земного шара, g_0 — ускорение свободного падения на поверхности Земли, а g — на высоте h . Исходя из формул $g = \frac{GM_3}{(R_3 + h)^2}$ и $g_0 = \frac{GM_3}{R_3^2}$, выведите

формулу: $g = \frac{g_0 R_3^2}{(R_3 + h)^2}$.

24. На рисунке 196 изображены равные по массе шарики 1 и 2, привязанные к нитям длиной r и $2r$ соответственно и движущиеся по окружностям с одинаковой по модулю скоростью \vec{v} . Сравните центростремительные ускорения, с которыми движутся шарики, и силу натяжения нитей.

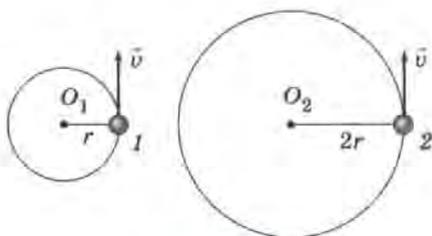


Рис. 196

25. Исходя из формулы $a_{ц.с} = \frac{v^2}{r}$ для определения центростремительного ускорения при движении по окружности и формулы $g = \frac{g_0 \cdot R_3^2}{(R_3 + h)^2}$, выведенной вами при решении задачи 23, получите следующую формулу для расчета первой космической скорости на

высоте h над поверхностью Земли: $v = \sqrt{\frac{g_0 R_3^2}{R_3 + h}}$.

26. Среднее значение радиуса Земли равно 6400 км, а ускорение свободного падения у земной поверхности равно $9,8 \text{ м/с}^2$. Пользуясь только этими данными, вычислите первую космическую скорость на высоте 3600 км над поверхностью Земли.

27. Постройте график зависимости проекции вектора скорости от времени для тела, свободно падающего в течение 4 с ($v_0 = 0$, считать $g = 10 \text{ м/с}^2$).

28. Тело массой 0,3 кг свободно падает из состояния покоя в течение 3 с. На сколько увеличивается его импульс за первую секунду падения? за вторую секунду падения?

29. С помощью графика, построенного вами при решении задачи 27, покажите, что импульс свободно падающего тела за равные промежутки времени меняется на одну и ту же величину.

30. Алюминиевый и медный шарики одинакового объема свободно падают из состояния покоя с одной и той же высоты в течение 2,5 с. Импульс какого из шариков будет больше и во сколько раз к концу первой секунды падения? к концу второй секунды падения? Ответы обоснуйте.

31. Два одинаковых бильярдных шара, двигаясь вдоль одной прямой, сталкиваются друг с другом. Перед столкновением проекция вектора скорости первого шара на ось X была равна $0,2 \text{ м/с}$, а второго — $0,1 \text{ м/с}$. Определите проекцию вектора скорости второго шара после столкновения, если у первого она стала равна $0,1 \text{ м/с}$.

Сделайте два рисунка, на первом из которых изобразите ось X , шары и векторы их скоростей до столкновения, а на втором — после столкновения.

32. Решите предыдущую задачу для случая, при котором $v_{1x} = 0,2 \text{ м/с}$, $v_{2x} = -0,1 \text{ м/с}$, $v'_{1x} = -0,1 \text{ м/с}$ (где v_{1x} и v_{2x} — проекции векторов скорости соответственно 1-го и 2-го шаров до их столкновения, а v'_{1x} — проекция вектора скорости 1-го шара после столкновения).

33. Используя данные и результат решения задачи 32, покажите, что при столкновении шаров выполняется закон сохранения полной механической энергии.

34. На рисунке 197 показано, как меняется с течением времени проекция вектора скорости одной из точек сидения качелей. С какой

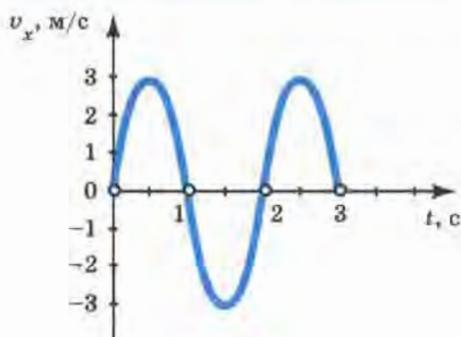


Рис. 197

частотой происходит это изменение? Какова частота изменения скорости любой другой точки качелей, совершающей колебания?

35. Струна арфы совершает гармонические колебания с частотой 40 Гц. Постройте график зависимости координаты от времени для средней точки струны, амплитуда колебаний которой равна 3 мм. (Для построения графика рекомендуем разметить ось t так, как показано на рисунке 198; ось x разметьте самостоятельно.)

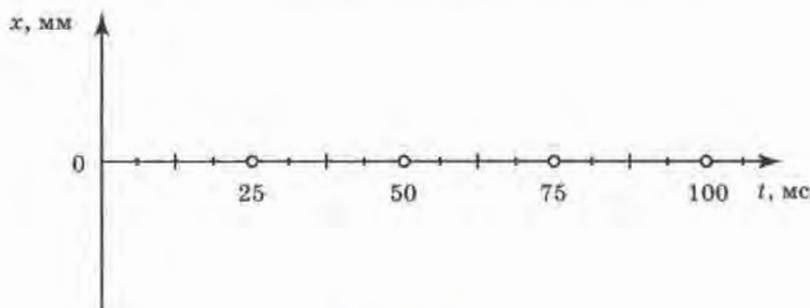


Рис. 198

Годится ли построенный вами график для других точек той же самой струны? для средних точек других струн арфы? Почему?

36. Как добиться звучания одного из двух одинаковых камертонов на резонаторных ящиках, не дотрагиваясь до него? Как при этом следует расположить отверстия резонаторных ящиков по отношению друг к другу? Ответы поясните.

Какое физическое явление лежит в основе предложенного вами опыта?

37. Качели периодически подталкивают рукой, т. е. действуют на них вынуждающей силой. На рисунке 199 изображен график зависимости амплитуды установившихся колебаний качелей от частоты данной вынуждающей силы. Пользуясь этим графиком, определите:

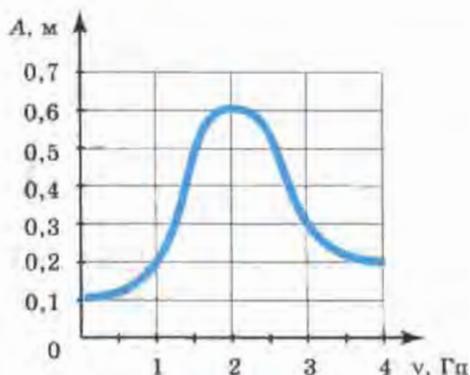


Рис. 199

а) При какой частоте воздействия на качели — при 1 Гц или при 3 Гц — амплитуда их установившихся колебаний будет больше?

б) С какой частотой надо подталкивать качели, чтобы амплитуда их установившихся колебаний достигла наибольшего значения?

в) Чему равна собственная частота качелей? На основании какого физического закона вы определили собственную частоту?

38. На рисунке 200 изображен проводник AB длиной 10 см и массой 2 г, помещенный в однородное магнитное поле с индукцией $4 \cdot 10^{-2}$ Тл перпендикулярно линиям магнитной индукции. По проводнику протекает электрический ток (подводимый по тонким проводам, на которых подвешен данный проводник). Какой должна быть сила тока, чтобы сила тяжести, действующая на проводник AB , уравновешивалась силой действия магнитного поля на ток?

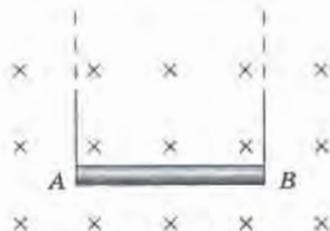


Рис. 200



Рис. 201

39. В камеру Вильсона, помещенную в однородное магнитное поле, влетает электрон и движется по дуге окружности (см. белую штриховую линию на рисунке 201). Под действием какой силы меняется направление скорости электрона? В какой точке он влетел в камеру?

40. Известно, что сила F , с которой однородное магнитное поле с индукцией B действует на частицу с зарядом e , движущуюся со ско-

ростью v перпендикулярно линиям магнитной индукции, определяется по формуле: $F = Bev$.

По дуге окружности какого радиуса будет двигаться в однородном магнитном поле электрон, если его скорость v направлена перпендикулярно линиям магнитной индукции и равна $3 \cdot 10^7$ м/с, модуль заряда $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, а индукция магнитного поля $B = 8,5 \cdot 10^{-3}$ Тл?

41. В результате какого радиоактивного распада углерод $^{14}_6\text{C}$ превращается в азот $^{14}_7\text{N}$?

42. При бомбардировке ядер алюминия $^{27}_{13}\text{Al}$ нейтронами из образовавшегося ядра выбрасывается α -частица. Напишите уравнение этой реакции.

43. Пользуясь законом сохранения массового и зарядового чисел, заполните пропуск в записи следующей ядерной реакции: $^{10}_5\text{B} + \dots \rightarrow$
 $\rightarrow ^7_3\text{Li} + ^4_2\text{He}$.

44. Какой химический элемент образуется в результате α -распада изотопа урана $^{238}_{92}\text{U}$? Запишите эту реакцию.

45. В результате какого числа β -распадов ядро атома тория $^{234}_{90}\text{Th}$ превращается в ядро атома урана $^{238}_{92}\text{U}$?

Ответы к упражнениям

Упр. 5. 2. $1,5 \text{ м/с}^2$. 3. $0,5 \text{ м/с}^2$.

Упр. 6. 1. 1 м/с . 2. 10 с . 5. $a_1 = -0,5 \text{ м/с}^2$; $a_2 = 1 \text{ м/с}^2$.

Упр. 7. 1. $31,25 \text{ м}$. 2. 150 м . Указания: замените в формуле (1) время t его выражением, полученным из формулы (2) § 5, а площадь S — проекцией перемещения s_x ; проведите преобразования с учетом того, что $(a + b)(a - b) = a^2 - b^2$ и что $a + b = b + a$.

Упр. 8. 1. $0,4 \text{ м}$; $0,8 \text{ м/с}^2$. 2. 7 м/с .

Упр. 9. 5*. 248 м/с при движении на восток и 198 м/с при движении на запад.

Упр. 11. 2. $36,8 \text{ кН}$. 3. $9,6 \text{ Н}$. 4. 6 м/с^2 .

Упр. 12. 2. Не будет. 3. а) $F_{2x} = 0,3 \text{ Н}$, $F_{1x} = -0,3 \text{ Н}$; б) $F_{1x} = 0,1 \text{ Н}$, $F_{2x} = -0,1 \text{ Н}$; г) $F_x = 0,4 \text{ Н}$.

Упр. 13. 1. $78,4 \text{ м}$. 3. 3 с ; $4,9 \text{ м}$; $24,5 \text{ м}$.

Упр. 14. 1. 1 с ; $4,9 \text{ м}$.

Упр. 15. 4. в) При движении вверх \vec{v} и \vec{g} направлены в противоположные стороны, а при движении вниз — в одну и ту же.

Упр. 16. 2. Притягивается с такой же по модулю силой. 6*. $h_1 = R_3$; $h_2 = 2R_3$.

Упр. 17. 3*. На участках AB и CD . Могла.

Упр. 18. 2. $2 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$. 4. 3600 . Секундная. 5. а) $\approx 1,9 \cdot 10^{20} \text{ Н}$; б) $\approx 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$; в) $\approx 1 \text{ км/с}$.

Упр. 19. 1. $6,67 \text{ км/с}$. 2. $1,7 \cdot 10^3 \text{ км}$.

Упр. 20. 1. $0,02 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$; $-0,02 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. 2. $5 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. 4. $0,9 \text{ м/с}$.

Упр. 21. 1. $2,25 \text{ м/с}$. 2. $\approx 33 \text{ м/с}$.

Упр. 22. 2. 10 м/с . 3. $1,25 \text{ м}$.

Упр. 23. 2. а) Под действием силы упругости шнуров.

Упр. 24. 4. 10 Гц . 6. 40 см .

Упр. 27. 3. 2 с .

Упр. 28. 1. 20 м/с .

Упр. 30. 2. Понизится. 3. Понизится.

Упр. 32. 4. 20 м/с . 5*. Для того чтобы звук дошел до наблюдателя, требуется определенное время, поэтому наблюдатель должен слышать звук от удара позже, чем он видит, как ударяют в колокол. Но при небольших расстояниях между наблюдателем и колоколом это запаздывание звука настолько мало, что наблюдатель не замечает его (например, при расстоянии 10 м звук запаздывает всего на $0,03 \text{ с}$). По мере удаления наблюдателя запаздывание звука все увеличивается и становится заметным (так, при расстоянии 170 м запаздывание составляет $0,5 \text{ с}$). Когда же наблюдатель отойдет на 340 м от колокола, то звук удара запоздает на 1 с и совпадет со следующим ударом.

Упр. 33. 1. Да. 2. N , M .

Упр. 34. 1. а) C и D ; б) A . 2. Можно.

Упр. 35. 6. В первом — магнитными, а во втором — электрическими.

Упр. 36. 1. Вправо. 2. От A к B .

Упр. 37. 1. $0,5 \text{ Тл}$.

Упр. 44. 1. $5 \cdot 10^5 \text{ Гц}$. 3. Нельзя.

Упр. 51. 3. В 6 раз.

Упр. 53. 1. Нуклонов — 9, протонов — 4, нейтронов — 5.

Ответы к задачам, предлагаемым для повторения
и при 3 часах физики в неделю

1. а) \vec{a} : (0,5; 5), (0,5; 2); \vec{b} : (1; 0), (4; 4); б) $a_y = -3$; $b_y = 4$; в) $|a_y| = 3$; $|b_y| = 4$;
г) $|\vec{a}| = 3$, $|\vec{b}| = 5$.
2. $a_x = 0$, $b_x = b$.
3. г) $|\vec{s}| = 13$.
4. $|\vec{s}| = 13$.
6. $x = 3 + 5t$.
7. $t = 20$ с.
8. $x = -10 + 2t$.
9. $t_2 = 3$ с; $s_{2x} = 6,75$ м.
12. $v_{\text{ср. } x} \approx 1,4$ м/с; $v_x \approx 2,9$ м/с.
15. $v_0 = 10$ м/с; $a = 0,5$ м/с².
16. $v_x = 5 - t$.
18. $x = 0,05t^2$; $v_x = 0,1t$.
19. б) $v_a = 50$ км/ч или $v_a = 30$ км/ч, $\vec{v}_a \uparrow \uparrow \vec{v}_b$; г) $v_a = 100$ км/ч, $\vec{v}_a \uparrow \uparrow \vec{v}_b$ или
 $v_a = 20$ км/ч, $\vec{v}_a \uparrow \downarrow \vec{v}_b$.
20. $\frac{v_{\text{к. по течен}}}{v_{\text{к. против течен}}} = 1,5$.
21. Шар будет покоиться на том месте, где его выпустили из рук.
22. Модуль ускорения стального шара не может быть равен нулю.
Если масса стального шара больше массы алюминиевого, то ускорение стального будет меньше ускорения алюминиевого, если же масса стального меньше, то его ускорение будет больше, чем у алюминиевого.
24. $\frac{a_{\text{ц. с 1}}}{a_{\text{ц. с 2}}} = 2$; $\frac{F_{\text{ц. с 1}}}{F_{\text{ц. с 2}}} = 2$.
26. $v \approx 6,3$ км/с.
28. $\Delta p_1 = 2,94$ кг·м/с; $\Delta p_{\text{II}} = 2,94$ кг·м/с.
30. $\frac{P_{\text{M1}}}{P_{\text{A1}}} = \frac{P_{\text{M2}}}{P_{\text{A2}}} \approx 3,3$.
31. $v'_{2x} = 0,2$ м/с.
34. $\nu = 0,5$ Гц (для любой колеблющейся точки качелей).
35. Построенный график не годится ни для других точек данной струны (так как у них другие амплитуды колебаний), ни для средних точек других струн арфы (так как они колеблются с другими частотами).
37. а) $\nu = 3$ Гц.
38. $I = 5$ А.
40. $r = 2 \cdot 10^{-2}$ м.
41. ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}\text{e}$.
42. ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{24}_{11}\text{Na} + {}^4_2\text{He}$.

- Альфа-распад 245
- Альфа-частицы 227
- Амплитуда 103
- Антинейтрино 245
- Атом 228

- Батарея конденсаторов 187
- Бел (единица уровня громкости звука) 127
- Бета-распад 245
- Бета-частицы 227

- Величина векторная 11
 - скалярная 10
- Водородный цикл 265
- Волна 114
 - бегущая 114
 - поперечная 115
 - продольная 115
 - световая 202
 - упругая 114
 - электромагнитная 182
- Волны когерентные 138
- Высота звука 124

- Гамма-частицы (гамма-кванты, гамма-излучение) 227, 228
- Генератор высокочастотных электромагнитных колебаний 192
 - переменного электрического тока 174
- Герц (единица частоты) 99
- Гравитационная постоянная 60
- Громкость звука 126

- Грэй (единица поглощенной дозы излучения) 259

- Движение колебательное 93
 - криволинейное 68
 - неравномерное 20
 - периодическое 93
 - по окружности 70
 - поступательное 7
 - прямолинейное
 - равномерное 16, 17
 - равноускоренное 20, 21
 - равномерное 20, 68
 - реактивное 84
- Дейтерий 243
- Деление ядер 248
- Детектирование 199
- Детектор 199
- Дефект масс 247
- Дефектоскопия 132
- Децибел (дольная единица от бела) 127
- Дисперсия света 215
- Длина волны 118
 - световой 182
- Доза излучения поглощенная 259
 - эквивалентная 259

- Единица громкости 127
 - импульса 79
 - силы 46
 - уровня громкости 127
 - ускорения 21
 - частоты 99

- Закон всемирного тяготения 60
 — Ньютона второй 46
 — — первый (закон инерции) 40, 41
 — — третий 49, 50
 — преломления света 206, 208, 209
 радиоактивного распада 262
 — сохранения заряда 233
 — — импульса 80
 — — массового числа 233
 Заряд конденсатора 186
- Излучение видимое 143
 — инфракрасное 143
 — рентгеновское 143
 — ультрафиолетовое 143
 Изолированные атомы 220
 Изотопы 243
 Импульс тела 79
 Индуктивность 173
 Индукция магнитного поля (магнитная индукция) 156, 157
 Интерференция волн звуковых 139
 — — световых 200
 Искусственный спутник Земли 75
- Камера Вильсона 236
 — пузырьковая 238
 Камертон 121
 Квант 204
 Колебания вынужденные 108
 — гармонические 102, 104
 — затухающие 106
 — звуковые 122
 — инфразвуковые 122
 — свободные 95
 — ультразвуковые 122
 — электромагнитные 192
 — — модулированные 198
 Колебательный контур 192
 Конденсатор 185
 — бумажный 189
 — керамический 189
 — оксидно-электролитический 189
 — переменной емкости 190
- Корпускулярные (и волновые) представления о свете 204
 Коэффициент качества (радиоактивного излучения) 260
- Линии магнитной индукции 158
- Магнитный поток (поток магнитной индукции) 160
 Масса критическая 251
 Маятник математический 105
 — пружинный 96
 Метод сцинтилляций 229
 Модель ядра протонно-нейтронная 198
 Модуляция амплитудная 197
- Напряженность электрического поля 182
 Невесомость 59
 Нейтрино 265
 Нейтрон 241
 Нуклон 242
 Ньютон (единица силы) 46
- Обертон 125
 Оптическая плотность среды 210
 Опыт Юнга 200
 Опыты Резерфорда (по рассеянию α -частиц) 229
 Относительность движения 36
- Падение свободное 52, 54, 57, 63, 64
 Перемещение 11, 30, 31, 32
 Период колебаний 93, 99
 — полураспада 261
 Показатель преломления абсолютный 207
 — — относительный 206
 Поле вихревое электрическое 180
 — магнитное 140
 — электромагнитное 180
 Постоянная Планка 204

- Постулаты Бора 224
Правило буравчика 147
— левой руки 152, 153
— Ленца 169
— правой руки 148
— смещения 245
Протий 243
Протон 239
- Радиоактивность 226
Радиосвязь 196
Разность фаз 100
— хода (волн) 136
Ракета 85
Реактор ядерный 253
Реакции термоядерные 264
— цепные 250
Резонанс 111
— звуковой (акустический) 133
Резонатор 134
Рентген (единица дозы излучения) 259
Ротор 174
- Самоиндукция 172
Сегнерово колесо 84
Сердечник 174
Сила всемирного тяготения 60
— вынуждающая 108
Силы ядерные 245
Синусоида 103
Система единиц Международная 11
— замкнутая 81
— инерциальная 41
— колебательная 95
— неинерциальная 41
— отсчета 8
Скорость волны 119
— вторая космическая 77
— звука 130
— мгновенная 20
— первая космическая 76, 77
— равномерного прямолинейного движения 17
— света 129, 181
— электромагнитных волн 181
Смещение 94
Сон (единица условной шкалы громкости звука) 127
Сопло 85
Спектр 215
— испускания линейчатый 221
— — непрерывный (сплошной) 220
— поглощения линейчатый 221
Спектральный анализ 222
Спектрограф (спектроскоп) 217, 218
Статор 174
Счетчик Гейгера 235
- Тело отсчета 7
Тембр 125
Тесла (единица магнитной индукции) 157
Ток переменный 174
Тон основной 125
— чистый 125
Точка материальная 6, 7
Трансформатор 177
— повышающий 178
— понижающий 178
Трек 237
Третий 243
- Ускорение 21
— свободного падения 54
— центростремительное 71
- Фарад 186
Физический смысл показателя преломления 210
Фон (единица уровня громкости звука) 127
Формула Томсона 195
— Эйнштейна (взаимосвязи массы и энергии) 247
Фотон 205
- Частота колебаний 99
— — несущая 197

- Частота колебаний основная 127
— — собственная 99
— — установившихся 109
— переменного тока 176
- Число зарядовое 242
— массовое 242
- Электромагнитная индукция 165
Электрон 230
Емкость 186
Энергия магнитного поля тока 173
- покоя 247
— связи 264
— фотона (кванта электромагнитного излучения) 204
— электрического поля конденсатора 189
- Эфир светонесущий 203
Эхолокация 123
- Ядра конденсации 237
Ядро атомное 231

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

Глава I

ЗАКОНЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ

§ 1. Материальная точка. Система отсчета	5
§ 2. Перемещение	10
§ 3. Определение координаты движущегося тела.	12
§ 4. Перемещение при прямолинейном равномерном движении	16
§ 5. Прямолинейное равноускоренное движение. Ускорение . . .	20
§ 6. Скорость прямолинейного равноускоренного движения. График скорости.	24
§ 7. Перемещение при прямолинейном равноускоренном движении	28
§ 8. Перемещение тела при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости.	31
§ 9. Относительность движения	34
§ 10. Инерциальные системы отсчета. Первый закон Ньютона . . .	39
§ 11. Второй закон Ньютона	42
§ 12. Третий закон Ньютона	48
§ 13. Свободное падение тел	52
§ 14. Движение тела, брошенного вертикально вверх. Невесомость	57
§ 15. Закон всемирного тяготения	60
§ 16. Ускорение свободного падения на Земле и других небесных телах	62
§ 17. Открытие планет Нептун и Плутон (для дополнительного чтения).	65
§ 18. Прямолинейное и криволинейное движение.	67
§ 19. Движение тела по окружности с постоянной по модулю скоростью	70
§ 20. Искусственные спутники Земли	74
§ 21. Импульс тела. Закон сохранения импульса	79
§ 22. Реактивное движение. Ракеты	83
§ 23. Вывод закона сохранения полной механической энергии. . .	88

Глава II

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ. ЗВУК

§ 24. Колебательное движение	92
§ 25. Свободные колебания. Колебательные системы. Маятник . .	94
§ 26. Величины, характеризующие колебательное движение	98
* § 27. Гармонические колебания	102
§ 28. Затухающие колебания	106
§ 29. Вынужденные колебания	108
§ 30. Резонанс	110
§ 31. Распространение колебаний в среде. Волны	113
§ 32. Продольные и поперечные волны	115
§ 33. Длина волны. Скорость распространения волн	117
§ 34. Источники звука. Звуковые колебания	120
§ 35. Высота и тембр звука	123
§ 36. Громкость звука	126
§ 37. Распространение звука	128
§ 38. Звуковые волны. Скорость звука	129
§ 39. Отражение звука. Эхо	132
§ 40. Звуковой резонанс	133
* § 41. Интерференция звука	135

Глава III

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

§ 42. Магнитное поле и его графическое изображение	140
§ 43. Неоднородное и однородное магнитное поле	143
§ 44. Направление тока и направление линий его магнитного поля	146
§ 45. Обнаружение магнитного поля по его действию на электрический ток. Правило левой руки	150
§ 46. Индукция магнитного поля	156
§ 47. Магнитный поток	160
§ 48. Явление электромагнитной индукции	163
§ 49. Направление индукционного тока. Правило Ленца	166
§ 50. Явление самоиндукции	170
§ 51. Получение и передача переменного электрического тока. Трансформатор	173
§ 52. Электромагнитное поле	179
§ 53. Электромагнитные волны	181

§ 54. Конденсатор	185
§ 55. Колебательный контур. Получение электромагнитных колебаний	192
§ 56. Принципы радиосвязи и телевидения	196
* § 57. Интерференция света	200
§ 58. Электромагнитная природа света	203
§ 59. Преломление света. Физический смысл показателя преломления	205
§ 60. Дисперсия света. Цвета тел	212
* § 61. Спектрограф и спектроскоп	217
§ 62. Типы оптических спектров	220
* § 63. Спектральный анализ	222
§ 64. Поглощение и испускание света атомами. Происхождение линейчатых спектров	224

Глава IV

СТРОЕНИЕ АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ АТОМНЫХ ЯДЕР

§ 65. Радиоактивность как свидетельство сложного строения атомов	226
§ 66. Модели атомов. Опыт Резерфорда	228
§ 67. Радиоактивные превращения атомных ядер	232
§ 68. Экспериментальные методы исследования частиц	235
§ 69. Открытие протона	238
§ 70. Открытие нейтрона	240
§ 71. Состав атомного ядра. Массовое число. Зарядовое число	242
§ 72. Ядерные силы.	245
§ 73. Энергия связи. Дефект масс.	246
§ 74. Деление ядер урана	248
§ 75. Цепная реакция	250
§ 76. Ядерный реактор. Преобразование внутренней энергии атомных ядер в электрическую энергию	253
§ 77. Атомная энергетика	255
§ 78. Биологическое действие радиации. Закон радиоактивного распада	259
§ 79. Термоядерная реакция.	263
* § 80. Элементарные частицы. Античастицы (для дополнительного чтения)	266
Лабораторные работы	269

Задачи, предлагаемые для повторения и при 3 часах физики в неделю	283
Ответы к упражнениям	292
Ответы к задачам, предлагаемым для повторения и при 3 часах физики в неделю	293
Предметный указатель	294

Учебное издание

**Перышкин Александр Васильевич
Гутник Елена Моисеевна**

ФИЗИКА

9 класс

Учебник

для общеобразовательных учреждений

Ответственный редактор *Е. Н. Тихонова*
Художественный редактор *М. В. Мандрыкина*
Художники *Н. А. Николаева, З. А. Флоринская*
Технический редактор *И. В. Грибкова*
Компьютерная графика *О. А. Новотоцких*
Компьютерная верстка *А. В. Маркин*
Корректор *Г. И. Мосякина*

Санитарно-эпидемиологическое заключение
№ 77.99.60.953.Д.009000.08.08 от 21.08.2008.

Подписано к печати 15.06.09. Формат 70 × 90¹/₁₆. Бумага офсетная.
Гарнитура «Школьная». Печать офсетная. Усл. печ. л. 22,23 + 0,146 усл. печ. л. цв. вкл.
Тираж 100 000 экз. Заказ № 0912870.

ООО «Дрофа». 127018, Москва, Суцеский вал, 49.

Предложения и замечания по содержанию и оформлению книги просим направлять в редакцию общего образования издательства «Дрофа»: 127018, Москва, а/я 79. Тел.: (495) 795-05-41. E-mail: chief@drofa.ru

По вопросам приобретения продукции издательства «Дрофа» обращаться по адресу: 127018, Москва, Суцеский вал, 49.
Тел.: (495) 795-05-50, 795-05-51. Факс: (495) 795-05-52.

Торговый дом «Школьник». 109172, Москва, ул. Малые Каменщики, д. 6, стр. 1А. Тел.: (495) 911-70-24, 912-15-16, 912-45-76.

Сеть магазинов «Переплетные птицы».
Тел.: (495) 912-45-76.

Интернет-магазин: <http://www.drofa.ru>



Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленных диапозитивов в ОАО «Ярославский полиграфкомбинат» 150049, Ярославль, ул. Свободы, 97



ΠΡΟΦΑ

ISBN 978-5-358-06901-5



9 785358 069015