



ФРОС

ФИЗИКА



БАЗОВЫЙ
УРОВЕНЬ

ФИЗИКА

БАЗОВЫЙ УРОВЕНЬ



УЧЕБНИК

Допущено
Министерством просвещения
Российской Федерации

4-е издание, стереотипное

Москва
«Просвещение»
2024

УДК 373.167.1:53+53(075.3)

ББК 22.3я721

Ф50

Авторы: И. М. Перышкин, Е. М. Гутник, А. И. Иванов, М. А. Петрова

Учебник (4-е издание, стереотипное соответствует 3-му, переработанному) допущен к использованию при реализации имеющих государственную аккредитацию образовательных программ начального общего, основного общего, среднего общего образования организациями, осуществляющими образовательную деятельность, в соответствии с Приказом Министерства просвещения Российской Федерации № 858 от 21.09.2022 г.

Издание выходит в pdf-формате.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Ответь на вопросы  ; обсуди с товарищами  ;

реши задачи из  УПРАЖНЕНИЯ ;

примени полученные знания  ЗАДАНИЕ :

- | | | | |
|---|----------------------|---|----------------------|
|  | — экспериментальное, |  | — исследовательское, |
|  | — проектное, |  | — графическое; |

расширь свой кругозор  Это любопытно... ;

научись пользоваться приборами  ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ .

Материал для учащихся, интересующихся физикой,
отмечен знаком .

Ф50 **Физика** : 9-й класс : базовый уровень : учебник : издание в pdf-формате / И. М. Перышкин, Е. М. Гутник, А. И. Иванов, М. А. Петрова. — 4-е изд., стер. — Москва : Просвещение, 2024. — 350, [2] с. : ил.

ISBN 978-5-09-116506-7 (электр. изд.). — Текст : электронный.
ISBN 978-5-09-110834-7 (печ. изд.).

Содержание учебника полностью соответствует примерной рабочей программе. Специально созданный авторами аппарат усвоения знаний нацелен не только на достижение предметных и метапредметных результатов, но и на формирование естественно-научной грамотности. Особое внимание удалено использованию физических текстов для развития навыков смыслового чтения.

Разработан в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта основного общего образования, утверждённого Приказом Министерства просвещения РФ № 287 от 31.05.2021 г.

УДК 373.167.1:53+53(075.3)

ББК 22.3я721

ISBN 978-5-09-116506-7 (электр. изд.)

© АО «Издательство «Просвещение», 2021, 2023

ISBN 978-5-09-110834-7 (печ. изд.)

© Художественное оформление.

АО «Издательство «Просвещение», 2021, 2023

Все права защищены

Глава 1



§ 1

МАТЕРИАЛЬНАЯ ТОЧКА. СИСТЕМА ОТСЧЁТА

В окружающем нас мире всё 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 называют 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 скорость, пройденный путь, положение тела и некоторые другие характеристики движения для любого момента времени.

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

Основной задачей механики является определение положения тела в любой момент времени. Одно и то же движение, рассматриваемое относительно разных тел, будет описы-



Механическое движение воздушного шара

ваться по-разному. Представим себе пассажира, сидящего в вагоне движущегося поезда. Относительно попутчика, сидящего напротив, он неподвижен. Относительно стрелочника и машиниста встречного поезда — движется, причём с разной скоростью.

Таким образом, желая определить, движется ли тело и как оно движется, мы должны указать тело, относительно которого рассматривается движение, — *тело отсчёта*.

Из курса математики вы знаете, что положение точки можно задать с помощью координат. Если точка движется прямолинейно, достаточно связать с телом отсчёта одну координатную ось, направленную вдоль линии движения (рис. 1, а). При этом положение точки определяется одной координатой. Если точка движется в пределах плоскости, её положение однозначно задаётся двумя координатами. В этом случае с телом отсчёта связывают две взаимно перпендикулярные координатные оси (рис. 1, б). Если же необходимо описать движение точки в пространстве, вводят трёхмерную систему координат (рис. 1, в). Но как задать положение тела, имеющего размеры? Ведь каждая точка этого тела будет иметь свои собственные координаты.

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 координаты, скорость и другие физические величины, так как она не имеет размеров.

Материальных точек нет в природе, это модель, использование которой упрощает решение многих задач и при этом позволяет получить достаточно точные результаты. Метод моделирования мы применяли и ранее, например, изучая взаимодействие заряженных тел, мы использовали модель точечного заряда.

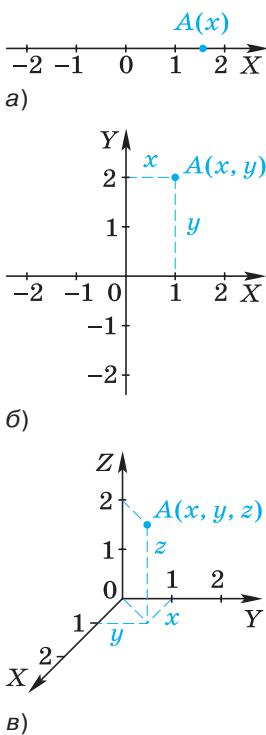


Рис. 1. Положение точки можно задать с помощью координатной прямой или прямоугольной системы координат



Материальными точками считают планеты при изучении их движения вокруг Солнца

Тело можно считать материальной точкой в тех случаях, когда его размерами можно пренебречь, поскольку они несущественны в условиях решаемой задачи.

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

Например, материальной точкой считают Землю при изучении её движения вокруг Солнца. В данном случае различия в движении разных точек планеты, вызванные её суточным вращением, не влияют на величины, описывающие годовое движение.

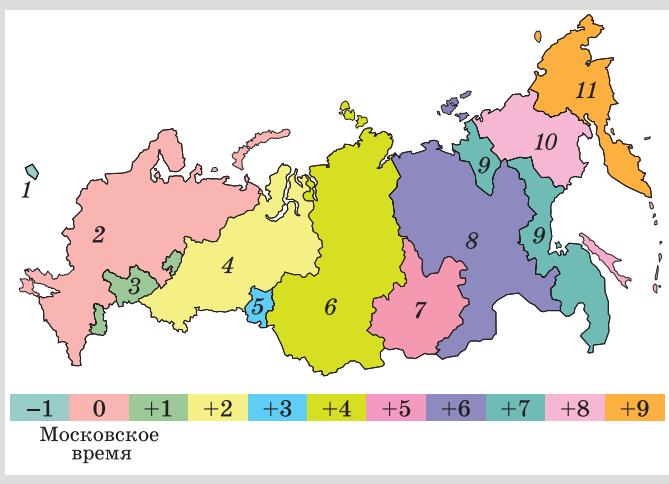
В других условиях к тому же телу нельзя применять модель материальной точки.

Так, при решении задач, связанных с суточным вращением Земли (например, при определении времени восхода солнца в разных местах поверхности земного шара), считать планету материальной точкой нельзя, так как результат задачи зависит от размеров планеты и скорости движения точек её поверхности. Например, во Владивостокской часовой зоне солнце взойдёт на 2 ч позже, в Иркутской — на 4 ч поз-

Часовые зоны России:

- 1** — Калининградская (-1);
- 2** — Московская (0);
- 3** — Самарская (+1);
- 4** — Екатеринбургская (+2);
- 5** — Омская (+3);
- 6** — Красноярская (+4);
- 7** — Иркутская (+5);
- 8** — Якутская (+6);
- 9** — Владивостокская (+7);
- 10** — Магаданская (+8);
- 11** — Камчатская (+9)

Границы России даны на октябрь 2022 г.





За материальную точку можно принять самолёт, летящий из одного города в другой

же, а в Московской — на 9 ч позже, чем в Камчатской.

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

Тело, движущееся *поступательно*¹, можно принимать за материальную точку даже в том случае, если его размеры соизмеримы с проходными им расстояниями. Например,

поступательно движется человек, стоящий на ступеньке движущегося эскалатора (рис. 2, а). В любой момент времени все точки тела человека движутся одинаково. Поэтому если мы хотим описать движение человека, то достаточно рассмотреть движение только одной его точки. При этом решение задачи значительно упрощается.

Рассмотрим движение тележки с капельницей. Положение тележки (рис. 2, б), движущейся по столу прямолинейно и поступательно, можно определить с помощью линейки, расположенной вдоль траектории дви-

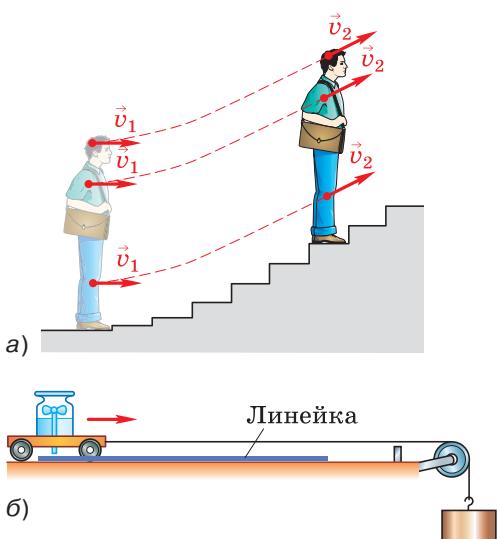


Рис. 2. При поступательном движении тела все его точки движутся одинаково

¹ Поступательное движение — движение тела, при котором прямая, соединяющая любые две точки этого тела, перемещается, оставаясь всё время параллельной своему первоначальному направлению. Поступательным может быть как прямолинейное, так и криволинейное движение. Например, поступательно движется кабина колеса обозрения, ящик, выдвигаемый из стола.



Система отсчёта:
тело отсчёта —
здание речного
вокзала;
прямоугольная система
координат x , y ;
часы

жения (тележка с капельницей принимается за материальную точку). Линейку в этом опыте удобно принять за тело отсчёта, а её шкала может служить координатной осью. Положение тележки с капельницей будет определяться относительно нулевого деления линейки — *начала отсчёта*.

Однако для описания движения тележки не достаточно просто фиксировать её положение в пространстве, необходимо определять положение *в зависимости от времени*. Это значит, что помимо линейки 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, 1 с. Посчитав число промежутков между следами капель на линейке, можно определить соответствующий промежуток времени.

Из приведённых примеров следует, что *для определения положения движущегося тела в любой момент времени необходимы тело отсчёта, связанная с ним система координат и прибор для измерения времени*.

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

Конечно, во многих случаях нельзя 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 самолёта, снаряда, вылетевшего из артиллерийского орудия, различ-

ных небесных тел, движение которых мы наблюдаем, и т. д.

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



1. В чём заключается основная задача механики?
2. С какой целью используется понятие «материальная точка»?
3. В каких случаях к движущемуся телу можно применить модель материальной точки?
4. Приведите пример, показывающий, что одно и то же тело в одной ситуации можно считать материальной точкой, а в другой — нет.
5. В каком случае положение движущегося тела можно задать с помощью одной координатной оси?
6. Что такое система отсчёта?

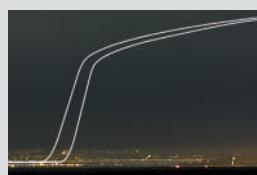


Мимо стоящего автомобиля проезжает колонна велосипедистов, движущихся с одинаковой скоростью. Двигается ли каждый из велосипедистов относительно автомобиля; относительно соседнего велосипедиста? Двигается ли автомобиль относительно велосипедиста?



УПРАЖНЕНИЕ 1

1. Можно ли считать автомобиль материальной точкой при определении пути, который он прошёл за 2 ч, двигаясь со средней скоростью, равной 80 км/ч; при обгоне им другого автомобиля?
2. Самолёт совершает перелёт из Москвы во Владивосток. Может ли рассматривать самолёт как материальную точку диспетчер, наблюдающий за его движением; пассажир этого самолёта?
3. Когда говорят о скорости машины, поезда и других транспортных средств, тело отсчёта обычно не указывают. Что подразумевают в этом случае под телом отсчёта?
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 неё. Мальчик же стал утверждать, что он вместе с домами и деревьями был неподвижен, а двигалась сестра. Относительно каких тел отсчёта рассматривали движение девочки и мальчик? Объясните, кто прав в споре.
5. Относительно какого тела отсчёта рассматривают движение, когда говорят: а) скорость ветра равна 5 м/с; б) бревно плывёт 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?



За время взлёта самолёт проходит путь, равный длине траектории его движения от земли до верхней точки

До сих пор при решении многих задач, связанных с движением различных тел, мы пользовались физической величиной, называемой «путь». Под путём подразумевалась сумма длин всех участков траектории, пройденных телом за рассматриваемый промежуток времени.

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

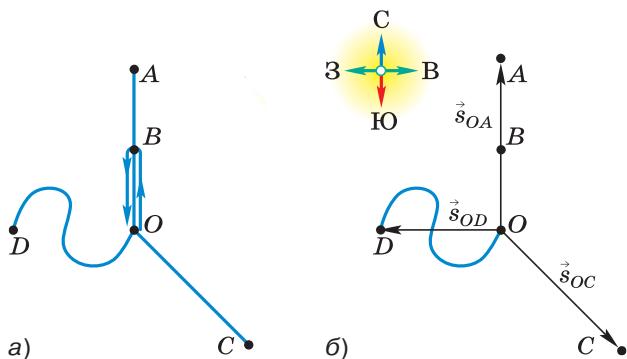
Для решения различных практических задач в разных сферах деятельности (например, в диспетчерской службе наземного и воздушного транспорта, в космонавтике, астрономии и др.) необходимо уметь рассчитывать положение тела в заданный момент времени.

Покажем, что не всегда можно решить такую задачу, даже зная, какой путь прошло тело за данный промежуток времени. Для этого обратимся к рисунку 3, а.

Допустим, нам известно, что некоторое тело (материальная точка) 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 направлении его движения. Тело могло, двигаясь прямолинейно в северном направлении, попасть в точку A , находящуюся на расстоянии 20 км от точки O . Могло, дойдя до точки B , находящейся на рас-

Рис. 3. Знание пройденного телом пути не является достаточным для определения конечного положения тела



стоянии 10 км от точки O , повернуть на юг и вернуться в точку O . 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 изображённой криволинейной траектории.

Чтобы избежать такой неопределённости, для нахождения положения тела в пространстве в заданный момент времени вводят физическую величину, называемую *перемещением*.

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

Согласно определению, перемещение — *векторная величина* (т. е. величина, имеющая, кроме числового значения, ещё и направление). Оно обозначается \vec{s} , т. е. той же буквой, что и путь, только со стрелкой над ней. Единицей модуля перемещения в СИ¹, как и пути, является *метр*. На практике используются и другие единицы длины, например километр, миля 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{so}_A), по прямолинейной траектории OC в юго-восточном направлении (вектор \vec{so}_C) и по криволинейной траектории OD (вектор \vec{so}_D). А если бы тело прошло 20 км, дойдя до точки B и вернувшись обратно в точку O , то в этом случае его перемещение было бы равно нулю.

Зная начальное положение и вектор перемещения тела, т. е. его направление и модуль, можно однозначно определить, где это тело на-

¹ Напомним, что в СИ (Международная система единиц) единицей массы является килограмм (кг), длины — метр (м), времени — секунда (с). Их называют *основными*, так как они выбраны независимо от единиц других величин. Единицы, определяемые через основные, называют *производными*. Примерами производных единиц СИ являются единицы скорости (м/с), плотности (кг/м³) и др.

ходится. Например, если известно, 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 можно найти коначное положение тела, отложив от его начального положения вектор перемещения.



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 и вектор перемещения, совершённого телом за промежуток времени t ? Ответ подтвердите примерами.
4. Может ли быть равным нулю путь; перемещение? Обоснуйте свой ответ.



УПРАЖНЕНИЕ 2

1. Какую физическую величину определяет водитель автомобиля по показаниям одометра — пройденный путь или модуль перемещения? Если вам неизвестно значение слова «одометр», найдите его в Интернете.
2. Как должен двигаться автомобиль в течение некоторого промежутка времени, чтобы по одометру можно было определить модуль перемещения, совершённого автомобилем за этот промежуток времени? Объясните свой ответ.
3. Турист прошёл 2 км строго на север, затем 3 км на восток и 2 км на юг. Сделайте чертёж, выбрав масштаб: в двух клетках 0,5 км, и найдите путь, пройденный телом, и перемещение тела.



ЗАДАНИЕ 1

- Используя приложение «Карты» в мобильном телефоне, охарактеризуйте своё движение в течение дня: определите траекторию, путь, перемещение за день, вид движения.

§ 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТЫ ДВИЖУЩЕГОСЯ ТЕЛА

Зная начальное положение тела и его перемещение за некоторый промежуток времени, можно графически найти положение тела.

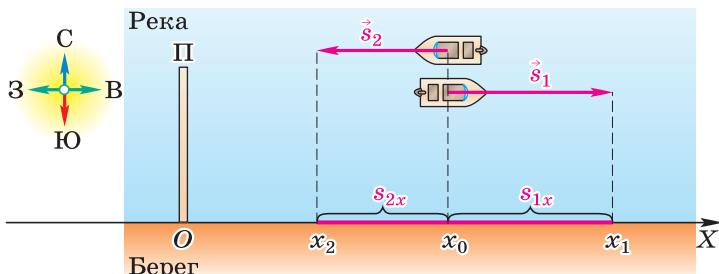


Рис. 4. Определение координаты движущегося тела

Но в большинстве случаев необходимо вычислить положение тела, т. е. определить его координаты.

Покажем, как определить координату движущегося тела, зная координату его начального положения и вектор перемещения. Для этого рассмотрим следующую ситуацию.

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. Определим координаты каждого катера относительно пристани и расстояние между катерами через промежуток времени t после их встречи.

Так как катера движутся поступательно, можно считать их материальными точками.

Проведём координатную ось OX параллельно прямой, вдоль которой движутся катера, и направим её на восток. Начало этой оси ($x = 0$) — точку O — совместим с пристанью, приняв её за тело отсчёта (поскольку требуется определить положение катеров по отношению к пристани). Координату места встречи катеров обозначим x_0 .

Опустим перпендикуляры от начала и конца векторов перемещения \vec{s}_1 и \vec{s}_2 на ось OX , получим отрезки s_{1x} и s_{2x} , которые являются проекциями указанных векторов¹ на ось OX .

¹ Такое действие называют *проецированием*. Действия с векторными величинами рассмотрены в Приложении.

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 $s_{2x} < 0$.

Из рисунка 4 видно, что координаты x_1 и x_2 можно найти следующим образом:

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

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

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

$$l = |x_1 - x_2|. \quad (3)$$

По уравнениям (1) и (2) можно рассчитать искомые координаты x_1 и x_2 . Но какие числа следует подставить в уравнения (1) и (2) 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. Как видно из рисунка 4, координата x_0 находится на положительной полуоси OX , т. е. $x_0 > 0$. Значит, $x_0 = 100$ км.

Поскольку ось OX параллельна векторам перемещений катеров, длины проекций s_{1x} и s_{2x} равны соответственно 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 и 50 км), на которые сместились катера за время t , представляют собой модули векторов их перемещений. 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 проекция s_{2x} отрицательна, поэтому $s_{2x} = -50$ км.

Теперь запишем условие задачи и решим её.

Дано:

$$x_0 = 100 \text{ км}$$

$$s_{1x} = 60 \text{ км}$$

$$\underline{s_{2x} = -50 \text{ км}}$$

$$x_1 = ?$$

$$x_2 = ?$$

$$l = ?$$

Решение:

Координаты каждого катера и расстояние между ними:

$$x_1 = x_0 + s_{1x},$$

$$x_2 = x_0 + s_{2x},$$

$$l = |x_1 - x_2|.$$

$$x_1 = 100 \text{ км} + 60 \text{ км} = 160 \text{ км},$$

$$x_2 = 100 \text{ км} - 50 \text{ км} = 50 \text{ км},$$

$$l = |160 \text{ км} - 50 \text{ км}| = 110 \text{ км}.$$

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

Мы получили формулу, которая позволяет определить координату тела, если известны его координата в начальный момент времени и проекция вектора перемещения.

$$x = x_0 + s_x$$

$$x = x_0 + s_x.$$



- При каком условии проекция вектора на ось будет положительной, а при каком — отрицательной? Запишите уравнение, с помощью которого можно определить координату тела, зная координату его начального положения и проекцию вектора перемещения.



УПРАЖНЕНИЕ 3

- Мотоциклист, переехав через 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).

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

Указание: начертите ось X , направив её в сторону движения мотоциклиста и приняв за тело отсчёта мост. Обозначьте координату светофора (x_c), 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}).

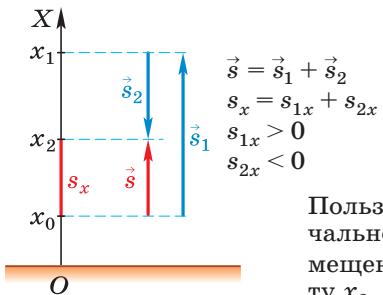


Рис. 5

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 подъёма, и опуститься от этой точки на 1,25 м.

Пользуясь рисунком 5, определите: а) координату x_0 начального положения мяча; б) проекцию s_x вектора перемещения \vec{s} , совершённого мячом за время t ; в) координату x_2 , которую имел мяч через промежуток времени t после броска.

3. Тело, начав движение из точки A с координатами $x_A = 2$ м, $y_A = 3$ м, переместилось в точку B с координатами $x_B = 2$ м, $y_B = -2$ м, затем в точку C с координатами $x_C = -1$ м, $y_C = -2$ м и закончило движение в точке D с координатами $x_D = -1$ м, $y_D = 3$ м. Сделайте чертёж, выбрав масштаб: в двух клетках 1 м. Найдите проекции перемещения на оси координат и модули перемещения на участках AB , BC , CD , а также модуль результирующего перемещения тела.

§ 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. совершающего за любые равные промежутки времени равные перемещения).

Согласно определению,

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

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

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$$

Из формулы (1) можно найти перемещение для прямолинейного равномерного движения, если известна скорость движения тела:

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

По уравнениям, записанным в векторной форме, можно судить о том, как векторные величины направлены по отношению друг к другу. Например, формулы (1) и (2) свидетельствуют о том, что при прямолинейном равномерном движении векторы скорости и перемещения направлены в одну и ту же сторону, так как промежуток времени t (длительность движения) величина положительная.

Для расчёта перемещения применяют формулу, в которую входят проекции векторов на координатную ось:

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

Тогда формулу для определения координаты тела в любой момент времени можно записать так:

$$x = x_0 + v_x t.$$

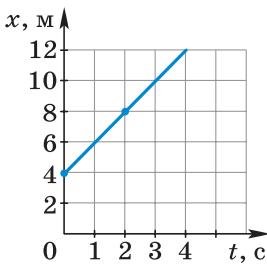
$$x = x_0 + v_x t$$

Мы получили зависимость координаты от времени — закон движения тела. Зависимость $x(t)$ может быть выражена не только алгебраически, но и графически.

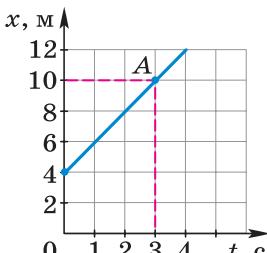
Из курса математики нам известна линейная функция $y = kx + b$, где x — аргумент, k — постоянный коэффициент, b — свободный член. Графиком этой функции является прямая.

Функция $x = x_0 + v_x t$ (или $x = v_x t + x_0$) тоже линейная с аргументом t , постоянным коэффициентом v_x и свободным членом x_0 . Значит, её график — прямая.

Построим для примера график зависимости координаты от времени для тела, движущегося равномерно прямолинейно в положительном направлении оси X со скоростью 2 м/с, из точки с координатой 4 м. Поскольку скорость тела



а)



б)

Рис. 6. График функции $x = 4 + 2t$ (м)

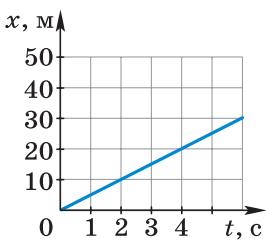


Рис. 7

сонаравлена с осью X , проекция скорости на эту ось будет положительна.

Запишем закон движения для данного случая: $x = 4 + 2t$ (м).

Для построения прямой достаточно знать координаты двух точек. Например, при $t = 0$ $x = 4$ м, при $t = 2$ с $x = 8$ м. Отметим точки на координатной плоскости и проведём через них прямую (рис. 6, а). График зависимости $x(t)$ называют *графиком движения*.

По графику, как и по формуле, можно найти положение тела в любой момент времени. Найдём координату тела через 3 с после начала движения. Для этого из точки с координатой $t = 3$ с (рис. 6, б) восставим перпендикуляр до пересечения с графиком (точка А). Из точки А опустим перпендикуляр на ось x и найдём, что через 3 с после начала движения координата тела $x = 10$ м.

Пример. Тело движется прямолинейно. Пользуясь графиком зависимости $x(t)$ (рис. 7), охарактеризуйте движение тела и запишите закон его движения.

Решение. Из графика движения следует, что тело движется равномерно в положительном направлении оси X . Для того чтобы записать закон движения тела, нужно определить его начальную координату и проекцию скорости. Начальная координата тела (при $t = 0$) $x_0 = 0$.

Поскольку тело движется в положительном направлении оси X , проекция скорости $v_x > 0$. Выберем произвольный момент времени, например 2 с, и, определив проекцию совершённого за это время перемещения, рассчитаем проекцию скорости:

$$v_x = \frac{10 \text{ м}}{2 \text{ с}} = 5 \text{ м/с.}$$

Запишем закон движения в общем виде

$$x = x_0 + v_x t.$$

С учётом данных, полученных при анализе графика, выражение примет вид:

$$x = 5t \text{ (м).}$$

Ответ: $x = 5t$ (м).

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 её при решении задач по физике и математике. Только под буквой s подразумевался пройденный телом путь. Почему же теперь мы говорим, что s — это модуль вектора перемещения?

Дело в том, что *при прямолинейном движении в одном направлении модуль вектора перемещения, совершённого телом за некоторый промежуток времени, равен пути, пройдённому этим телом за тот же промежуток времени.*

Наряду с графиком движения используют и график модуля вектора скорости.

На рисунке 8 представлен график зависимости модуля вектора скорости v от времени t при равномерном движении тела. По графику зависимости $v(t)$ можно определить модуль перемещения s за некоторый промежуток времени. Действительно, модуль вектора перемещения s , совершённого телом, движущимся прямолинейно и равномерно, за промежуток времени t_1 , определяется по формуле:

$$s = v_1 t_1.$$

Произведению $v_1 t_1$ равна также и площадь S закрашенного прямоугольника (см. рис. 8), так как отрезки v_1 и t_1 (или, что то же самое,

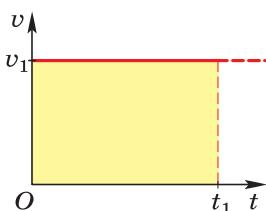


Рис. 8. Определение модуля вектора перемещения тела, движущегося прямолинейно равномерно

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, заключённого 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 многих задач придётся иметь дело не только с модулями, но и с проекциями векторов, рассмотрим график зависимости проекции вектора скорости от времени.

Для этого обратимся ещё раз к задаче с двумя катерами (см. § 3, рис. 4). Пусть промежуток времени t , за который катера совершили указанные перемещения, равен 2 ч. За это время первый катер переместился на 60 км, а второго — на 50 км. Значит, 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.

Графики зависимости проекций скоростей катеров от времени представлены на рисунке 9. Модули проекций перемещений численно равны площадям закрашенных прямоугольников.

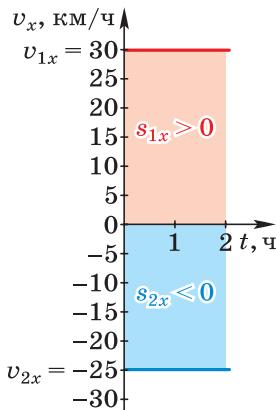


Рис. 9. Графики зависимости проекций скоростей катеров от времени



1. Что называют скоростью равномерного прямолинейного движения?
2. Как найти проекцию вектора перемещения тела, движущегося прямолинейно и равномерно, если известны проекция вектора скорости и время движения?
3. При каком условии модуль вектора перемещения, совершённого телом за некоторый промежуток времени, равен пути, пройденному телом за тот же промежуток времени?
4. Может ли модуль вектора перемещения быть меньше пути, пройденного за тот же промежуток времени? Приведите примеры.
5. Какую информацию о движении двух тел можно получить по графикам, изображённым на рисунке 9?
6. Является ли движение тела прямолинейным равномерным, если за любые равные промежутки времени оно проходит одинаковые пути?



- Проекция на ось X перемещения тела, движущегося параллельно этой оси, может быть равна модулю перемещения или модулю перемещения с обратным знаком. Объясните, от чего это зависит.
- Два мотоцикла движутся прямолинейно и равномерно. Скорость движения первого мотоцикла больше скорости движения второго. Чем будут отличаться их графики зависимости: а) путей от времени; б) скоростей от времени?



УПРАЖНЕНИЕ 4

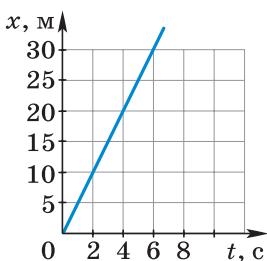


Рис. 10

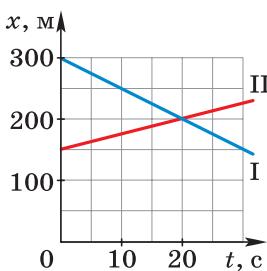


Рис. 11

- Тело движется вдоль оси X . Определите по графику движения (рис. 10) путь, пройденный телом за 5 с, и скорость движения тела. Запишите закон движения тела.
- Охарактеризуйте движение тел, графики движения которых представлены на рисунке 11. По графикам определите начальные координаты тел, направление движения тел, проекции скоростей. Что означает точка пересечения графиков? Напишите закон движения для каждого тела.
- Может ли график зависимости модуля вектора скорости от времени располагаться под осью Ot (т. е. в области отрицательных значений оси скорости)?
- Постройте графики зависимости проекций векторов скорости от времени для трёх 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.
- Координата тела, движущегося прямолинейно и равномерно, изменяется по закону $x = 6 + 3t$ (м). Постройте графики зависимости от времени координаты и пути. Сравните полученные графики.



ЗАДАНИЕ 2

- Возьмите высокую бутылку (удобна пластиковая бутылка вместимостью 1,5—2 л). Наклейте на неё по всей высоте вертикальную бумажную полоску с сантиметровыми делениями. Бросьте на дно бутылки небольшой кусочек пробки или спички. (Это тело, движение которого вы будете исследовать.) Наполните бутылку водой, подставив её под очень тонкую струйку. Определите положение тела через 10, 20, 30 с и т. д. Запишите результаты в таблицу. Постройте график зависимости пути тела от времени. Рассчитайте скорость тела.

§ 5

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕРАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ. ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАВНОУСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

Равномерное движение встречается в жизни довольно редко. Как правило, за равные промежутки времени тело проходит разные пути. Движение тела в этом случае является неравномерным.

Для характеристики неравномерного движения в некоторых случаях пользуются *средней путевой скоростью*.

Средней путевой скоростью называют физическую величину, равную отношению пути к промежутку времени, за который этот путь был пройден.

$$v_{\text{ср. п.}} = \frac{l}{t}.$$

$$v_{\text{ср. п.}} = \frac{l}{t}$$

Средняя путевая скорость характеризует движение в целом и не содержит информации о его деталях. Так, зная среднюю путевую скорость на некотором участке траектории, можно определить время, за которое был пройден этот участок, но нельзя найти время, за которое была пройдена его половина.

Тем не менее в некоторых случаях знание средней путевой скорости позволяет приблизительно определить путь, который будет пройден за данное время, или оценить время, необходимое для прохождения пути. Именно расчёт средней путевой скорости лежит в основе алгоритма навигатора, оценивающего время, через которое вы прибудете в конечную точку маршрута.

В физике используют ещё одно понятие средней скорости, связанное не с пройденным путём, а с перемещением, — *среднюю скорость перемещения*.

Средней скоростью перемещения называют физическую величину, равную отношению перемещения к промежутку времени, за который было совершено это перемещение.

$$\vec{v}_{\text{cp}} = \frac{\vec{s}}{t}.$$

$$\vec{v}_{\text{cp}} = \frac{\vec{s}}{t}$$

Средняя скорость перемещения — векторная величина, её направление совпадает с направлением перемещения.

Как и средняя путевая скорость, средняя скорость перемещения характеризует движение в целом. Она позволяет определить перемещение, совершённое за всё время, но не позволяет вычислять перемещение, а значит, и координаты тела в любой момент времени.

Что же нужно сделать для того, чтобы охарактеризовать быстроту движения в каждой точке траектории в каждый момент времени?

Допустим, что некоторое тело движется прямолинейно, но не равномерно. Будем уменьшать промежуток времени, за который мы рассматриваем перемещение тела (вместе с ним будет уменьшаться и перемещение), и определять среднюю скорость перемещения (рис. 12). Получающиеся значения модуля средней ско-

рости $\frac{|\vec{s}_1|}{t_1}, \frac{|\vec{s}_2|}{t_2}, \frac{|\vec{s}_3|}{t_3}, \dots$ будут всё меньше

и меньше отличаться друг от друга, приближаясь к некоторому предельному значению. Таким образом, мы приходим к физической величине, характеризующей быстроту движения в данный момент времени в данной точке траектории, — **мгновенной скорости**.

Мгновенная скорость, или скорость в данный момент времени в данной точке траектории, равна отношению малого перемещения на участке траектории, примыкающем

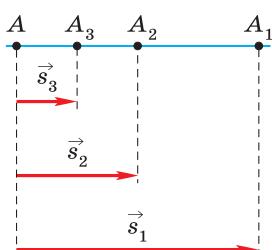


Рис. 12. При уменьшении промежутка времени уменьшается перемещение

к этой точке, к малому промежутку времени, в течение которого это перемещение совершается.

Что означают слова «малый промежуток времени»? Под малым подразумевают такой промежуток времени, при дальнейшем уменьшении которого полученные новые значения средней скорости практически не отличаются друг от друга. Другими словами, движение в течение такого промежутка времени почти неотличимо от прямолинейного равномерного.

Как и средняя скорость перемещения, мгновенная скорость является векторной величиной. Направление мгновенной скорости совпадает с направлением малого перемещения. В дальнейшем, говоря о скорости неравномерного движения, мы будем иметь в виду именно мгновенную скорость.

Из всех видов неравномерного движения остановимся на самом простом — *равноускоренном*, при котором *вектор скорости тела за любые равные промежутки времени изменяется одинаково*.

Если скорость некоторого тела, движущегося равноускоренно, за промежуток времени t изменилась от \vec{v}_0 до \vec{v} , то за каждую единицу времени вектор скорости менялся на величину, равную $\frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$. Это отношение обозначают символом \vec{a} и называют *ускорением*.

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}.$$



Самолёт, равноускоренно разгоняющийся по взлётной полосе

Ускорением тела при равноускоренном движении называют векторную физическую величину, равную отношению изменения скорости к промежутку времени, за который это изменение произошло.

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$$

Как векторная величина ускорение характеризуется не только модулем, но и направлением. Чем больше модуль ускорения, тем быстрее меняется скорость тела.

Из определения ускорения следует, что в СИ единицей ускорения является *метр на секунду в квадрате (м/с²)*.

$$\frac{1 \text{ м/с}}{1 \text{ с}} = 1 \text{ м/с}^2.$$

1 м/с² — это ускорение такого равноускоренного движения, при котором за 1 с модуль изменения скорости равен 1 м/с.

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

Равноускоренное движение может быть прямолинейным и криволинейным. Мы будем рассматривать прямолинейное равноускоренное движение. В этом случае векторы \vec{v} и \vec{v}_0 направлены вдоль одной прямой — траектории движения. Вдоль этой же прямой удобно направить координатную ось.

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

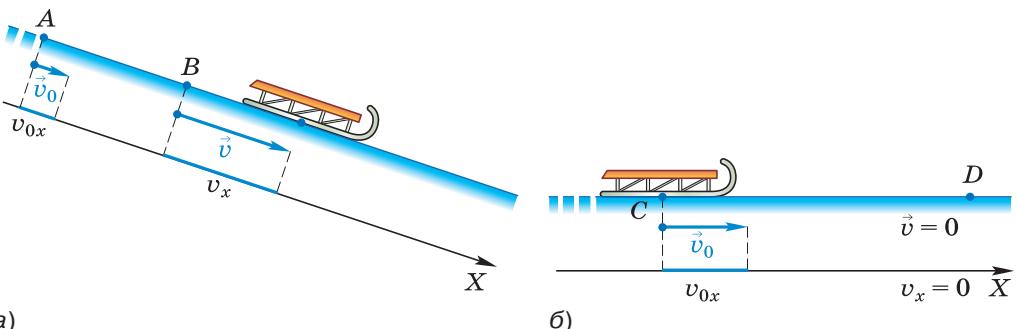
$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}.$$

Покажем на конкретных примерах, как находится ускорение.

Санки, которые равноускоренно скатываются с горы (рис. 13, а), участок пути *AB* 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 (так как санки движутся поступательно, можно принять их за материальную точку).

Определим, с каким ускорением двигались санки на участке *AB*.

За начало отсчёта времени следует принять момент прохождения санками точки *A*, по-



a)

b)

Рис. 13. Равноускоренное движение санок, скатывающихся с горы (а) и продолжающих движение по равнине (б)

скольку, согласно условию, именно от этого момента отсчитывается промежуток времени, за который модуль вектора скорости изменился от 0,4 до 2 м/с.

Проведём ось X , параллельную вектору скорости движения санок и направленную в ту же сторону. Найдём проекции векторов \vec{v}_0 и \vec{v} на ось X . Обе эти проекции положительны и равны модулям соответствующих векторов: $v_{0x} = 0,4 \text{ м/с}$, $v_x = 2 \text{ м/с}$.

Запишем условие задачи и решим её.

Дано:

$$\begin{aligned} v_{0x} &= 0,4 \text{ м/с} \\ v_x &= 2 \text{ м/с} \\ t &= 4 \text{ с} \end{aligned}$$

$$a_x — ?$$

Решение:

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

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 растёт.

Теперь рассмотрим пример, в котором санки, скатившись с горы, движутся по горизон-

тальному участку CD и останавливаются в точке D (рис. 13, б). Известно, что в точке C санки имели скорость 1,2 м/с, а участок CD был пройден ими за 6 с.

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

Проведём ось X параллельно отрезку CD и со направим её со скоростью движения санок, как показано на рисунке 13, б. 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 условие задачи и решим её.

Дано:

$$v_{0x} = 1,2 \text{ м/с}$$

$$v_x = 0$$

$$t = 6 \text{ с}$$

$$\underline{a_x = ?}$$

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: $a_x = -0,2 \text{ м/с}^2$.

Проекция ускорения на ось X отрицательна. Это значит, что вектор ускорения \vec{a} направлен противоположно оси X и соответственно противоположно скорости движения.

Если векторы скорости и ускорения направлены в противоположные стороны, то скорость уменьшается.

Мы познакомились с ускорением при равнотускоренном движении. Однако понятие ускорения шире. Каким бы сложным ни было движение, говорят об ускорении тела в каждой точке траектории в каждый момент времени. При этом под ускорением (иногда его называют *мгновенным ускорением*) понимают отношение изменения скорости к малому промежутку времени, за который это изменение произо-

шло. При равноускоренном движении мгновенное ускорение во всех точках траектории одинаково.



- Что называют средней путевой скоростью; средней скоростью перемещения?
- Что называют мгновенной скоростью?
- К какому виду движения — равномерному или неравномерному — относится прямолинейное равноускоренное движение?
- Дайте определение ускорения равноускоренного движения. Какова единица ускорения?
- Что такое равноускоренное движение?
- Что показывает модуль вектора ускорения?
- При каком условии модуль вектора скорости движущегося тела увеличивается; уменьшается?



Что вы можете сказать о движении тела, если модуль средней скорости перемещения оказался равен: а) средней путевой скорости; б) начальной скорости?



УПРАЖНЕНИЕ 5

- Тело за 2 с прошло 2 м в положительном направлении оси X , а затем за 3 с — 1 м в противоположном направлении. Определите среднюю путевую скорость и модуль средней скорости перемещения за промежуток времени: а) 2 с; б) 5 с.

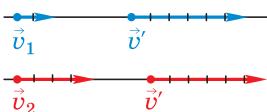


Рис. 14

- За один и тот же промежуток времени t модуль вектора скорости первого автомобиля изменился от v_1 до v' , а второго — от v_2 до v' (векторы скорости изображены в одинаковом масштабе на рисунке 14). Какой из автомобилей двигался в указанный промежуток с большим ускорением?

- Самолёт, разгоняясь перед взлётом, в течение некоторого промежутка времени двигался равноускоренно. Каково было при этом ускорение самолёта, если за 30 с его скорость возросла от 10 до 55 м/с?
- С каким ускорением двигался поезд на некотором участке пути, если за 12 с его скорость возросла на 6 м/с?
- Тело, имеющее начальную скорость 20 м/с, движется с постоянным ускорением и останавливается через 10 с после начала движения. Чему равно ускорение тела?
- Шайба после удара клюшкой движется с начальной скоростью 10 м/с по льду. Лёд уже не гладкий, и шайба тормозит с ускорением 2 м/с^2 . Через какое время после удара шайба остановится?
- ^{1*} Средняя путевая скорость автомобиля на первой половине пути равна 60 км/ч, а на второй половине пути — 40 км/ч. Определите среднюю путевую скорость на всём пути.

¹ Звёздочкой обозначены задачи повышенной сложности.

§ 6

СКОРОСТЬ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ. ГРАФИК СКОРОСТИ

Нам известно, что при равноускоренном движении векторы ускорения и скорости тела связывает формула:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}.$$

Выразим из этой формулы скорость \vec{v} , которую имело тело к концу промежутка времени t , отсчитываемого от момента начала наблюдения, т. е. от $t_0 = 0$:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t.$$

Эта формула позволяет найти скорость тела в любой момент времени, если известна начальная скорость и ускорение тела.

Если в начальный момент тело покончилось, т. е. $\vec{v}_0 = 0$, то последняя формула примет вид:

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

Запишем полученные формулы через проекции векторных величин на ось X :

$$v_x = v_{0x} + a_x t, \quad v_x = a_x t.$$

Зависимость проекции вектора скорости от времени при равноускоренном движении линейная, значит, графиком функции $v_x(t)$ будет прямая.

Построим, например, график зависимости от времени проекции вектора скорости разгоняющегося перед взлётом самолёта, который движется из состояния покоя прямолинейно с ускорением $1,5 \text{ м/с}^2$ в течение 40 с .

Соанправим ось X со скоростью движения самолёта. Тогда проекции векторов скорости и ускорения будут положительны.

Запишем закон изменения скорости $v_x = 1,5t$ (м/с).

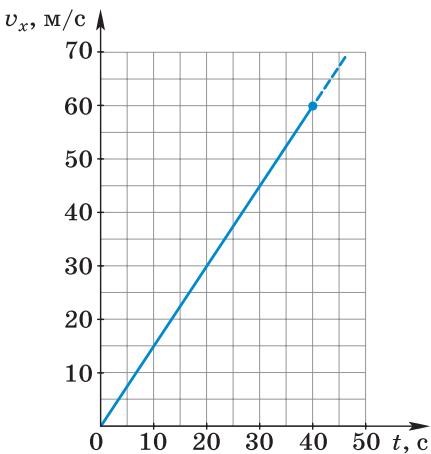


Рис. 15. График функции $v_x = 1,5t$ (м/с)

Для построения заданной прямой достаточно знать координаты (т. е. t и v_x) двух любых её точек.

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 зависимости скорости от времени пройдёт через начало координат (рис. 15).

Теперь построим аналогичный график для случая, когда начальная скорость не равна нулю.

По дороге едет автомобиль со скоростью 10 м/с (36 км/ч). Водитель, 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 зависимости от времени проекции вектора мгновенной скорости на ось X , сонаправленную со скоростью прямолинейно движущегося автомобиля, для первых четырёх секунд разгона.

Поскольку движение автомобиля равноускоренное, зависимость $v_x(t)$ описывается формулой $v_x = 10 + 1,4t$ (м/с). Найдём по этой формуле координаты 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 16. Он отсекает на оси v_x отрезок, равный проекции вектора начальной скорости.

Построим теперь график зависимости проекции вектора скорости от времени, 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.

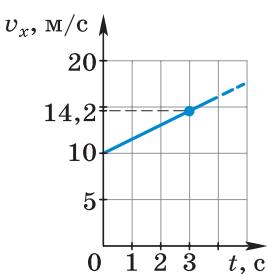


Рис. 16. График функции $v_x = 10 + 1,4t$ (м/с)

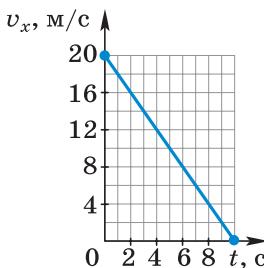


Рис. 17. График функции $v_x = 20 - 2t$ (м/с)

Ось X сонаправим с вектором скорости. За начало отсчёта времени примем момент начала торможения, когда скорость автомобиля ещё была равна 20 м/с. В этом случае координаты двух точек графика очевидны:

при $t_0 = 0$ $v_{0x} = 20$ м/с;

при $t = 10$ с $v_x = 0$.

Закон изменения скорости $v_x = 20 - 2t$ (м/с). Соответствующий график представлен на рисунке 17.



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?



1. Чем сходны и чем отличаются друг от друга движения, графики которых представлены на рисунках 16 и 17?

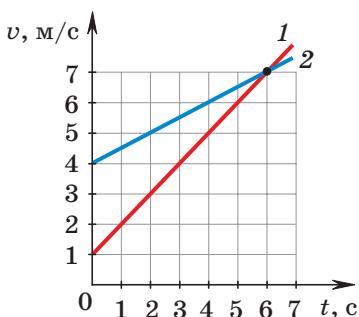


Рис. 18

2. На рисунке 18 представлены графики зависимости модуля скорости от времени для двух тел, движущихся вдоль одной прямой. Охарактеризуйте движение тел. Что означает точка пересечения графиков? Сравните модули ускорений тел, не проводя расчётов. Запишите закон изменения модуля скорости для каждого тела.

3. Автобус, трогаясь от остановки, в течение 3 мин набирает скорость, следующие 5 мин движется равномерно, затем тормозит и останавливается. Ускорения автобуса на участках разгона и торможения одинаковы. Постройте график зависимости скорости автобуса от времени.



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 лёд она движется с ускорением 0,25 м/с²?
2. Лыжник съезжает с горы из состояния покоя с ускорением, равным 0,2 м/с². Через какой промежуток времени его скорость возрастёт до 2 м/с?

3. В одних и тех же координатных осях постройте графики зависимости от времени проекции вектора скорости при прямолинейном равноускоренном движении для случаев: а) $v_{0x} = 1 \text{ м/с}$, $a_x = 0,5 \text{ м/с}^2$; б) $v_{0x} = 1 \text{ м/с}$, $a_x = 1 \text{ м/с}^2$; в) $v_{0x} = 2 \text{ м/с}$, $a_x = 1 \text{ м/с}^2$.

Масштаб: 1 см — 1 м/с; 1 см — 1 с.

4. В одних и тех же координатных осях постройте графики проекции вектора скорости при прямолинейном равноускоренном движении для случаев: а) $v_{0x} = 4,5 \text{ м/с}$, $a_x = -1,5 \text{ м/с}^2$; б) $v_{0x} = 3 \text{ м/с}$, $a_x = -1 \text{ м/с}^2$.

5. На рисунке 19 представлены графики зависимости модуля вектора скорости от времени при прямолинейном движении двух тел. С каким по модулю ускорением движется тело I; тело II? Запишите закон изменения модуля скорости для каждого тела. Постройте в одних и тех же координатных осях графики зависимости $a_x(t)$ (ось X считайте сонаправленной с вектором начальной скорости тела I).

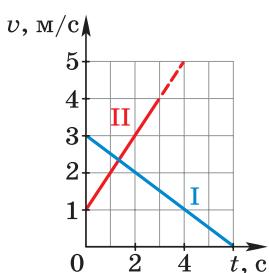


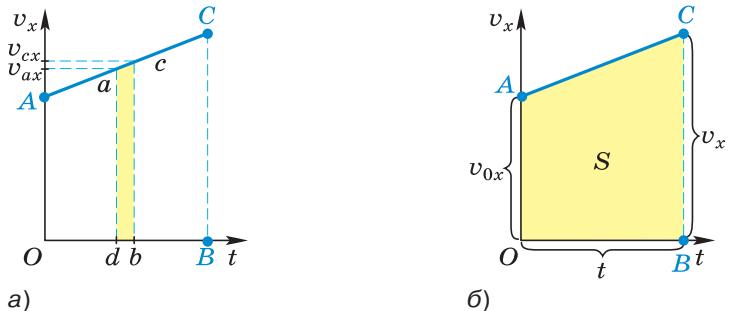
Рис. 19

§ 7

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ТЕЛА ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ

Выведем формулу, с помощью которой можно рассчитать проекцию вектора перемещения тела, движущегося прямолинейно равноускоренно, за любой промежуток времени. Для этого обратимся к рисунку 20. Отрезок AC представляет собой график проекции вектора скорости тела, движущегося с постоянным ускорением a (при начальной скорости v_0).

Рис. 20. Проекция вектора перемещения тела, движущегося прямолинейно и равноускоренно, численно равна площади S под графиком



Мы знаем, что при прямолинейном *равномерном* движении тела проекция вектора перемещения численно равна площади прямоугольника, заключённого под графиком проекции вектора скорости (см. рис. 9).

Покажем, что и в случае прямолинейного *равноускоренного* движения проекция вектора перемещения s_x численно равна площади фигуры под графиком скорости. Для этого на оси Ot (рис. 20, а) выделим малый промежуток времени db . Из точек d и b проведём 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} .

Промежуток времени db должен быть настолько мал, чтобы проекция вектора скорости менялась очень незначительно. Тогда движение тела в течение этого промежутка времени мало отличается от равномерного.

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 фигуру $OACB$, являющуюся трапецией. Её площадь будет равна сумме площадей прямоугольных полосок. Следовательно, *проекция вектора перемещения s_x за промежуток времени, соответствующий отрезку OB , численно равна площади S трапеции $OACB$.*

Из курса геометрии нам известно, что площадь трапеции равна произведению полусуммы её оснований на высоту. Из рисунка 20, б видно, что основаниями трапеции $OACB$ являются отрезки $OA = v_{0x}$ и $BC = v_x$, а высотой — отрезок $OB = t$. Следовательно,

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

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

Поскольку $v_x = v_{0x} + a_xt$, а $S = s_x$, то можно записать:

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

или $s_x = v_{0x}t + \frac{a_xt^2}{2}.$

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

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

Запишем закон движения $x = x_0 + s_x$ для тела, движущегося прямолинейно равноускоренно:

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_xt^2}{2}.$$

Для того чтобы определить положение тела в любой момент времени, необходимо знать начальные условия (начальную координату и начальную скорость) и ускорение тела.



- Пользуясь рисунком 20, а, докажите, что проекция вектора перемещения при прямолинейном равноускоренном движении численно равна площади фигуры $OACB$.
- Запишите уравнения для определения проекции вектора перемещения и координаты тела при его прямолинейном равноускоренном движении.



УПРАЖНЕНИЕ 7

- Велосипедист съехал с горки за 5 с, двигаясь с постоянным ускорением $0,5 \text{ м/с}^2$. Определите длину горки, если в начале спуска скорость велосипедиста была равна 18 км/ч .
- 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 $S = \frac{v_{0x} + v_x}{2} \cdot t$ к виду $s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$. При необходимости воспользуйтесь указаниями в ответах.

4. Постройте график зависимости $v_x(t)$ для тела, движущегося равнотускоренно в положительном направлении оси X с возрастающей по модулю скоростью. Начальная скорость движения равна 1 м/с и ускорение — 0,5 м/с². Какой путь прошло тело за 4 с?

§ 8

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ТЕЛА ПРИ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ БЕЗ НАЧАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

Рассмотрим, как рассчитывается проекция вектора перемещения тела, движущегося равнотускоренно, если его начальная скорость \vec{v}_0 равна нулю. Такое движение обязательно прямолинейное. В этом случае уравнение

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

будет выглядеть так:

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

Перепишем это уравнение, 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 сторону, их проекции имеют одинаковые знаки. Поэтому уравнение для модулей векторов можно записать:

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

Из этой формулы следует, что при равнотускоренном движении без начальной скорости модуль вектора перемещения прямо пропорционален квадрату промежутка времени, в те-

чение 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 совершил 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 равноускоренном движении без начальной скорости наглядно отражена на рисунке 21, где отрезки OA , OB , OC , OD и OE представляют собой модули векторов перемещений (s_1 , s_2 , s_3 , s_4 и s_5), совершивших телом соответственно за промежутки времени t_1 , $t_2 = 2t_1$, $t_3 = 3t_1$, $t_4 = 4t_1$ и $t_5 = 5t_1$.

На рисунке 21 показано, что

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

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.

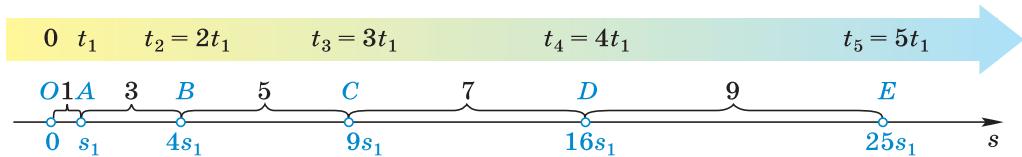


Рис. 21. Закономерности равноускоренного движения без начальной скорости:
 $OA : OB : OC : OD : OE = 1 : 4 : 9 : 16 : 25$; $OA : AB : BC : CD : DE = 1 : 3 : 5 : 7 : 9$

Рисунок 21 иллюстрирует ещё одну закономерность:

$$OA : AB : BC : CD : DE = 1 : 3 : 5 : 7 : 9, \quad (2)$$

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

Закономерности (1) и (2) являются следствием того факта, что модуль перемещения прямо пропорционален квадрату времени. Поэтому они обязательно выполняются, если тело движется равноускоренно без начальной скорости.

Впервые равноускоренное движение было исследовано итальянским учёным **Галилео Галилеем** (1564—1642). Галилей установил закономерности (1) и (2) и экспериментально показал, что движение шарика по гладкому наклонному жёлобу является равноускоренным.



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 состояния 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 (1) и (2)?



УПРАЖНЕНИЕ 8

1. Отходящий от станции поезд в течение первых 20 с движется равноускоренно. Известно, что за третью секунду от начала движения поезд прошёл 2 м. Определите модуль вектора перемещения, совершённого поездом за первую секунду, и модуль вектора ускорения, с которым он двигался.
2. Шарик, скатываясь по наклонному жёлобу равноускоренно без начальной скорости, за 5 с прошёл 75 см. Найдите ускорение шарика.

- 3.** Поезд метрополитена разгоняется с ускорением 1 м/с^2 . Через какое время после отхода от станции скорость поезда достигнет предельной — 75 км/ч ? Какой путь пройдёт поезд за это время?
- 4*.** Автомобиль, двигаясь равнотускоренно из состояния покоя, за пятую секунду разгона проходит $6,3 \text{ м}$. Какую скорость развил автомобиль к концу пятой секунды от начала движения?



ЗАДАНИЕ 3



■ Экспериментальная установка, которой пользовался Галилей, такова. Вдоль деревянной доски прорезан прямой канал, оклеенный изнутри полированым пергаментом. По каналу скользил гладкий бронзовый шарик. Угол наклона доски можно было менять. Для измерения времени Галилей использовал ведро с водой, в дне которого было проделано маленькое отверстие. Вода, вылившаяся из отверстия за время соскальзывания шарика, взвешивалась на точных весах.

«Повторяя опыты сотни раз, мы постоянно находили, что отношение пройденных путей равно отношению квадратов времени их прохождения» — так описывал Галилей выводы из экспериментов.

Спланируйте и проведите опыт, аналогичный опыту Галилея. Продемонстрируйте, выполняются ли закономерности (1) и (2).

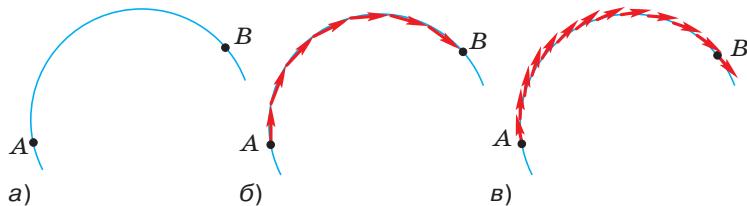
§ 9

СКОРОСТЬ ПРИ КРИВОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ. ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ С ПОСТОЯННОЙ ПО МОДУЛЮ СКОРОСТЬЮ

В природе и технике часто встречается движение, траектория которого представляет собой кривую линию, — *криволинейное движение*. Криволинейным является движение космических тел, Солнца, планет, звёзд. Используя закономерности криволинейного движения, астрономы рассчитывают положения планет на много лет вперёд и назад, а учёные и конструкторы проектируют машины и технические сооружения.

При прямолинейном движении мгновенная скорость тела всегда направлена вдоль линии движения. А что можно сказать о направлении мгновенной скорости, если движение криволинейное?

Рис. 22. Мгновенная скорость в каждой точке направлена по касательной к кривой в этой точке



Рассмотрим тело, которое движется из точки A в точку B по некоторой криволинейной траектории (рис. 22, а). Разобьём траекторию на небольшие прямолинейные участки и будем считать, что тело движется именно по ним (рис. 22, б). Если уменьшать длину этих участков (увеличивая их число), то ломаная линия будет всё меньше отличаться от плавной кривой. При этом векторы перемещений уменьшаются по модулю, как бы стягиваясь в точки, а их направления приближаются к направлениям касательных к кривой. Вектор мгновенной скорости направлен так же, как и вектор перемещения, поэтому скорость в каждой точке направлена по касательной к кривой в этой точке (рис. 22, в).

Мгновенная скорость тела в любой точке криволинейной траектории направлена по касательной к траектории в этой точке.

Подтвердить этот вывод можно на опыте. Если к быстро вращающемуся точильному камню электроточила приложить стальной прут, то из-под него будут вырываться искры (рис. 23). Это мелкие раскалённые частицы стали и камня. После отрыва от камня эти частицы двигаются прямолинейно со скоростью, равной скорости в момент отрыва. Опыт показывает, что направление движения частиц, а значит, и вектор их скорости совпадает с касательной к окружности, по которой они двигались.

Существует бесчисленное множество различных криволинейных траекторий. Но часто криволинейное движение за достаточно малые промежутки времени можно приблизительно



Рис. 23. Искры из-под стального прута, прижатого к вращающемуся точильному камню, летят по касательной к окружности в точке отрыва

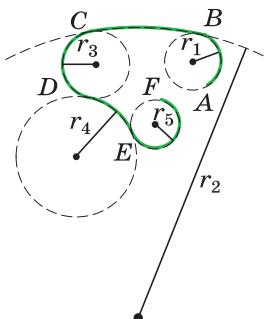


Рис. 24. Траектория $ABCDEF$ может быть представлена в виде совокупности дуг окружностей разных радиусов

рассматривать как движение по дугам окружностей разных радиусов (рис. 24).

Рассмотрим движение тела по окружности более подробно, ограничившись наиболее простым случаем, когда скорость тела не изменяется по модулю, а меняется только по направлению. Тело будем считать настолько малым, что его можно рассматривать как материальную точку (для этого размеры тела должны быть малы по сравнению с радиусом окружности). Введём величины, характеризующие движение по окружности с постоянной по модулю скоростью.

Число оборотов тела по окружности в единицу времени называют **частотой обращения**. Её обозначают греческой буквой ν («ню»). Единица частоты обращения в СИ — **секунда в минус первой степени (с^{-1})**:

$$\frac{1}{\nu} = \text{с}^{-1}.$$

Время, в течение которого тело совершает один полный оборот, называют **периодом обращения**. Его обозначают буквой T и в СИ измеряют в **секундах (с)**.

Если, например, за 1 с тело совершает 10 оборотов, то время одного оборота, или период обращения, составляет $\frac{1}{10}$ с. При ν оборотах в секунду период обращения

$$T = \frac{1}{\nu}.$$

За время, равное периоду T , тело, движущееся по окружности радиусом R , пройдёт путь, равный длине окружности $2\pi R$. Взяв отношение пути $2\pi R$ ко времени T , получим модуль скорости тела:

$$\nu = \frac{2\pi R}{T}.$$

$$\nu = \frac{2\pi R}{T}$$

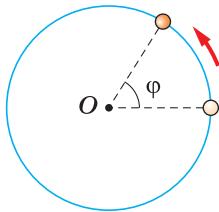


Рис. 25. Поворот точки на угол φ

Учитывая, что $T = \frac{1}{v}$, а значит, $v = \frac{1}{T}$,

$$v = 2\pi R v.$$

Модуль скорости v тела (точки), движущегося по окружности, часто называют **линейной скоростью**.

Пусть за время t тело, двигаясь по окружности с постоянной по модулю скоростью, повернулось на угол φ (рис. 25).

Отношение угла φ поворота тела (точки), движущегося по окружности с постоянной по модулю скоростью, к промежутку времени t , за который этот поворот произошёл, называют угловой скоростью ω .

$$\omega = \frac{\varphi}{t}.$$

$$\omega = \frac{\varphi}{t}$$

В СИ единицей угловой скорости является **радиан в секунду (рад/с)**, т. е. такая угловая скорость, при которой за 1 с точка поворачивается на угол, равный 1 рад¹.

За время, равное периоду обращения, тело поворачивается на угол 2π . Поэтому $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

Как было показано ранее, $v = \frac{2\pi R}{T}$. Значит, линейная и угловая скорости связаны соотношением:

$$v = \omega R.$$

$$v = \omega R.$$

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

¹ Радиан равен центральному углу, опирающемуся на дугу, длина которой равна радиусу окружности. $1 \text{ рад} = \frac{360^\circ}{2\pi} \approx 57^\circ 17' 48''$.

скорости тела, движущегося по окружности, является величиной переменной.

Значит, *движение по окружности всегда происходит с ускорением*.

Получить представление о направлении ускорения, с которым тело движется по окружности с постоянной по модулю скоростью, можно по рисунку 26. На нём изображено тело (материальная точка), движущееся по окружности радиусом R . За очень малый промежуток времени Δt это тело переходит из точки A в точку B , которая расположена очень близко к точке A . При стремлении к нулю промежутка времени Δt точка B стремится к точке A , угол α — к нулю, а угол DBC — к 90° , т. е. при

$\Delta t \rightarrow 0$ вектор ускорения $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}$, который совпадает по направлению с вектором изменения скорости $\vec{v} - \vec{v}_0$, направлен вдоль радиуса к центру окружности.

Пусть все участки траектории тела, движущегося с постоянной по модулю скоростью, представляют собой дуги окружностей (см. рис. 24). Тогда ускорение тела в любой точке этой траектории будет направлено к центру соответствующей окружности.

Ускорение, с которым тело движется по окружности с постоянной по модулю скоростью, в любой точке направлено по радиусу окружности к её центру. Поэтому его называют **центростремительным**.

Модуль вектора центростремительного ускорения $a_{\text{ц. с}}$ тела, движущегося с постоянной по модулю скоростью v по окружности радиусом R , определяется по формуле:

$$a_{\text{ц. с}} = \frac{v^2}{R}.$$

Покажем, как можно получить формулу для модуля центростремительного ускорения.

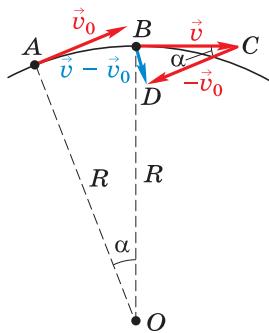


Рис. 26. Вектор центристремительного ускорения тела направлен вдоль радиуса к центру окружности

$$a_{\text{ц. с}} = \frac{v^2}{R}$$



Рассмотрим треугольники DBC и ABO (см. рис. 26). Они подобны, как равнобедренные с равными углами α при вершинах. Значит,

$$\frac{|\vec{v} - \vec{v}_0|}{|\vec{v}|} = \frac{AB}{R}.$$

За малый промежуток времени Δt тело совершает перемещение, модуль которого $AB = |\vec{v}| \Delta t$. Поэтому можно написать:

$$\frac{|\vec{v} - \vec{v}_0|}{|\vec{v}|} = \frac{|\vec{v}| \Delta t}{R}, \text{ или } \frac{|\vec{v} - \vec{v}_0|}{\Delta t} = \frac{|\vec{v}|^2}{R}, \text{ или } |\vec{a}| = \frac{|\vec{v}|^2}{R}.$$



- Опишите опыт, с помощью которого можно убедиться в том, что мгновенная скорость тела, равномерно движущегося по окружности, в любой точке этой окружности направлена по касательной к ней.
- Что такое частота обращения; период обращения?
- Как связаны между собой период и частота обращения?
- Что называют линейной скоростью; угловой скоростью?
- Как направлено ускорение тела при его движении по окружности с постоянной по модулю скоростью? Как называют это ускорение?
- По какой формуле можно вычислить модуль вектора центростремительного ускорения?



Ссылаясь на формулу $a_{\text{ц.с.}} = \frac{v^2}{R}$, Петя утверждал, что центростремительное ускорение обратно пропорционально радиусу окружности. Подставив в эту формулу выражение $v = \omega R$, его друг Гоша получил, что $a_{\text{ц.с.}} = \omega^2 R$ и сделал вывод, что центростремительное ускорение прямо пропорционально радиусу окружности. Кто из ребят прав?



УПРАЖНЕНИЕ 9

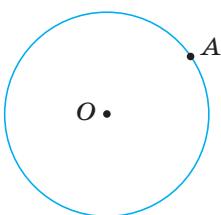


Рис. 27

- Тело движется по окружности с постоянной по модулю скоростью. Покажите направления векторов скорости и ускорения в точке A (рис. 27).
- Точильный камень радиусом 10 см делает 300 оборотов в минуту. Найдите линейную и угловую скорости точек на ободе точильного камня.
- При работе стиральной машины в режиме отжима поверхность её 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.

4. Определите ускорение конца секундной стрелки часов, если он находится на расстоянии $R = 2$ см от центра вращения.
5. Докажите, что ускорение движения крайней точки стрелки часов в 2 раза больше ускорения средней точки этой стрелки (т. е. точки, находящейся посередине между центром вращения стрелки и её концом).
- 6*. Минутная и секундная стрелки часов врачаются 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?
- 7*. Линейная скорость точки на ободе вращающегося колеса равна 2 м/с. Точка, расположенная на 10 см ближе к оси, имеет линейную скорость 1 м/с. Определите угловые скорости этих точек, частоты и периоды их обращения.

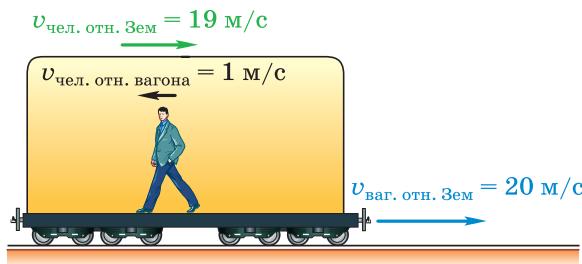
§ 10

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

В курсе физики 7 класса упоминалось об относительности механического движения. Рассмотрим этот вопрос более подробно на примерах и сформулируем, в чём конкретно заключается относительность движения.

Человек идёт по вагону против движения поезда (рис. 28). Скорость поезда относительно поверхности Земли равна 20 м/с, а скорость человека относительно вагона равна 1 м/с. Определим, с какой скоростью и в каком направлении движется человек относительно поверхности Земли.

Рис. 28. Скорость движения человека относительно вагона и относительно поверхности Земли различна по модулю и направлению



Будем рассуждать так. Если бы человек не шёл по вагону, то за 1 с он переместился бы вместе с поездом на расстояние, равное 20 м. Но за это же время он прошёл 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 отсчёта, связанной с поездом, человек движется со скоростью 1 м/с, а в системе отсчёта, связанной с каким-либо телом на поверхности Земли, — со скоростью 19 м/с, причём направлены эти скорости в противоположные стороны. Отсюда следует, что *скорость относительна*, т. е. *скорость одного и того же тела в разных системах отсчёта может быть различной как по модулю, так и по направлению*.

Теперь обратимся к другому примеру. Представьте вертолёт, вертикально опускающийся на землю. Относительно вертолёта любая точка винта, например точка A (рис. 29), будет всё 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 отсчёта*.

Следовательно, путь является величиной относительной, так как он равен сумме длин всех участков траектории, пройденных телом за рассматриваемый промежуток времени. Это особенно наглядно проявляется в тех случаях, когда физическое тело движется в од-

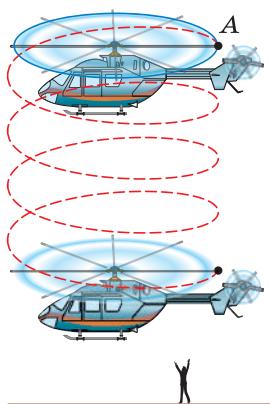


Рис. 29. Относительность траектории и пути

ной системе отсчёта и покоится в другой. Например, человек, сидящий в движущемся поезде, проходит определённый путь s в системе отсчёта, связанной с земной поверхностью, а в системе отсчёта, 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 отсчёта.

Замена системы отсчёта может приводить к существенному упрощению характера движения тел. Это обстоятельство сыграло важную роль в развитии науки.

С давних пор люди замечали, что звёзды в течение ночи, так же как и Солнце днём, 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 неё обращаются все небесные тела. Такая система мира была названа *геоцентрической* (греческое слово «гео» означает «земля»).



Вращение звёздного неба в течение ночи



Геоцентрическая система мира Птолемея



Гелиоцентрическая система мира по Копернику

Во II в.alexандрийский учёный **Клавдий Птолемей** (ок. 100 — ок. 170) 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.

Новые взгляды на строение Вселенной были подробно изложены в XVI в. польским учёным **Николаем Коперником** (1473—1543). Он считал, что Земля и другие планеты движутся вокруг Солнца, одновременно вращаясь вокруг своих осей. Такую систему мира называют **гелиоцентрической**, поскольку в ней за центр Вселенной принимается Солнце (по-гречески «гелиос»). В системе мира, введённой Коперником, характер движения планет настолько упростился, что это позволило впоследствии открыть физические законы, описывающие движение тел в Солнечной системе.

Как же с помощью системы мира Коперника можно объяснить видимое нами суточное обращение Солнца вокруг Земли? На рисунке 30 схематично изображён земной шар, освещаемый с одной стороны солнечными лучами, и человек (наблюдатель), который в течение суток находится в одном и том же месте Земли. Вращаясь вместе с Землёй, он наблюдает за перемещением светил.

Воображаемая ось, вокруг которой вращается Земля, как бы пронзает земной шар, проходя через Северный (N) и Южный (S) географи-



Рис. 30. В гелиоцентрической системе мира видимое движение по небу Солнца днём и звёзд ночью объясняется вращением Земли вокруг своей оси

ческие полюсы. Стрелка указывает направление вращения Земли — с запада на восток.

На рисунке 30, а земной шар изображён в тот момент времени, когда он как бы вывозит наблюдателя с тёмной ночной стороны на освещённую Солнцем, дневную. Но наблюдатель, вращаясь вместе с Землёй относительно её 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 Солнце обращается вокруг Земли, поднимаясь из-за горизонта, перемещаясь в течение дня (рис. 30, б) с востока на запад, а вечером уходит за горизонт (рис. 30, в). Затем наблюдатель видит перемещение звёзд с востока на запад в течение ночи (рис. 30, г).

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

Согласно современным представлениям, во Вселенной не существует центра, так же как и не существует «истинной» системы отсчёта. При рассмотрении движений, происходящих на Земле, удобна система отсчёта, связанная с Землёй. При описании движения планет удобна **гелиоцентрическая система отсчёта**, в которой начало координат совмещено с центром Солнца, а координатные оси направлены на три далёкие звезды.

Тем не менее при переходе от описания движения тел к рассмотрению вопроса о причинах движения обнаруживается принципиальное преимущество определённого класса систем отсчёта. Об этом вы узнаете из следующего параграфа.

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



1. В чём проявляется относительность движения? Ответ проиллюстрируйте примерами. **2.** В чём основное отличие гелиоцентрической системы мира от геоцентрической? **3.** Объясните смену дня и ночи на Земле в гелиоцентрической системе (см. рис. 30).



1. Пассажир скорого поезда смотрит в окно на вагоны встречного поезда. В момент, когда последний вагон встречного поезда прошёл мимо его окна, пассажир ощущал, что его движение резко замедлилось. Почему?

2. Почему дождевые капли в безветренную погоду оставляют наклонные прямые полосы на стёклах равномерно движущегося железнодорожного вагона?

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



УПРАЖНЕНИЕ 10

- 1.** Вода в реке движется со скоростью 2 м/с относительно берега. По реке плывёт плот. Какова скорость плота относительно берега; относительно воды в реке?
- 2.** Пароход идёт от Нижнего Новгорода до Астрахани 5 сут, а обратно 7 сут. Сколько времени плывут по течению плоты от Нижнего Новгорода до Астрахани?
- 3.** В тихую безветренную погоду Дракон пролетает от своего логова до места охоты за 3 ч 40 мин со скоростью 7,5 м/с. Сколько времени потребуется Дракону на обратный путь, если подует встречный ветер со скоростью 150 м/мин?
- 4.** Благодаря суточному вращению Земли человек, сидящий на стуле в своём 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*.** Торпедный катер идёт вдоль шестидесятой параллели южной широты со скоростью 90 км/ч по отношению к суще. Скорость суточного вращения Земли на этой широте равна 223 м/с. Чему равна и куда направлена скорость катера относительно земной оси, если он движется на восток; на запад?



ЗАДАНИЕ 4

- Проведите карандашом линию по линейке, которую перемещайте строго вверх по листу, не смешая её вправо-влево. Начертите векторы перемещения карандаша и линейки относительно листа и вектор перемещения карандаша относительно линейки. Как в этом примере проявляется относительность движения?

§ 11

ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЁТА. 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 Галилея, опубликованной в начале XVII в.

До этого на протяжении многих веков в науке господствовала точка зрения древнегреческого учёного *Аристотеля* (384—322 до н. э.) и его последователей. Согласно взглядам Аристотеля, при отсутствии внешнего воздействия тело может только покояться, а для того, чтобы тело двигалось с постоянной скоростью, нужно, чтобы на него непрерывно действовало другое тело.

Галилей пришёл к выводу о том, что при отсутствии внешних воздействий тело может не только покояться, 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 учёными и до Галилея. Галилей, критически проанализировав идеи своих предшественников, пришёл к правильным выводам и применил их для объяснения конкретных явлений, тем самым дав толчок развитию естествознания.

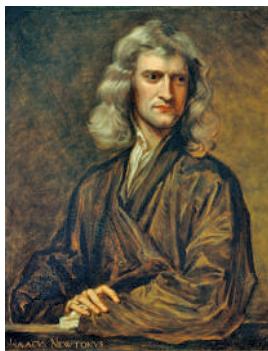
В конце XVII в. английский учёный *Исаак Ньютон* обобщил выводы Галилея, сформулировал закон инерции и включил его в качестве



ГАЛИЛЕО ГАЛИЛЕЙ

(1564—1642)

Итальянский физик, механик, астроном, философ и математик. Основатель экспериментальной физики. Первым использовал телескоп для наблюдения небесных тел и сделал ряд выдающихся астрономических открытий



ИСААК НЬЮТОН

(1643—1727)

Английский физик, математик и астроном. Сформулировал три закона динамики, открыл закон всемирного тяготения и явление дисперсии света

первого из трёх законов 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 своём состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние».

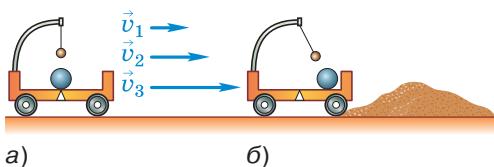
В данной формулировке ничего не сказано о системе отсчёта. Может ли закон инерции выполняться во всех системах отсчёта?

Рассмотрим опыт, изображённый на рисунке 31. На тележке находятся два шарика, один из которых лежит на горизонтальной поверхности, а другой подвешен на нити. Сначала тележка движется прямолинейно и равномерно относительно поверхности Земли (рис. 31, а). Силы, действующие на каждый из шариков по вертикали, уравновешены, или, как говорят, компенсируют друг друга. 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 её движения (v_1 , v_2 , v_3 и т. д.) относительно поверхности Земли — главное, чтобы эта скорость была постоянной.

Но, когда тележка попадает на песчаную насыпь (рис. 31, б), её скорость быстро уменьшается, и тележка останавливается. Во время

Рис. 31. Шары покоятся относительно тележки при её движении с постоянной скоростью и приходят в движение (относительно тележки) при её торможении



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 отсчёта, связанной с тележкой, тормозящей относительно поверхности Земли, закон инерции не выполняется.

Формулируя свои законы, Ньютона стремился описать «истинное» движение тел, т. е. их движение относительно «абсолютного пространства», существующего независимо от реальных тел. Однако с точки зрения современных представлений «абсолютной» системы отсчёта не существует. Современная формулировка *первого закона Ньютона* выглядит так:

существуют такие системы отсчёта, относительно которых тела сохраняют свою скорость неизменной (по модулю и направлению), если на них не действуют другие тела или действия других тел компенсируются.

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

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

Законы движения и взаимодействия тел, которые вам предстоит изучить в 9 классе, сформулированы для инерциальных систем отсчёта. В инерциальных системах отсчёта эти законы имеют наиболее простой вид. Поэтому, прежде чем применять тот или иной закон для решения задачи, нужно выбрать систему отсчёта, которую можно считать инерциальной.

Можно ли считать инерциальной систему отсчёта, связанную с Землёй? Оказывается, это зависит от характера решаемой задачи и требуемой точности. Пусть, например, речь идёт о движении звёзд в доступной наблюдё-

нию части Вселенной. Каждая звезда, ввиду её колossalной удалённости от других небесных тел, практически не подвержена воздействию с их стороны. Значит, в инерциальной системе отсчёта её движение должно быть прямолинейным и равномерным. Очевидно, в системе отсчёта, связанной с Землёй, это не выполняется — звезда совершаёт суточное вращение, а не движется по прямой. С гораздо большей степенью точности можно считать инерциальной гелиоцентрическую систему отсчёта.

Тем не менее обычные, сравнительно грубые опыты по изучению движения тел на Земле не позволяют обнаружить неинерциальность системы отсчёта, связанной с Землёй. Поэтому в дальнейшем мы будем пользоваться данной системой отсчёта, считая её инерциальной.

Любая система отсчёта, которая движется относительно инерциальной с постоянной по модулю и направлению скоростью, также является инерциальной. Так, в опыте, изображённом на рисунке 31, *a*, система отсчёта, связанная с тележкой, движущейся относительно поверхности Земли прямолинейно и равномерно, — инерциальная.

Системы отсчёта, движущиеся относительно инерциальных с ускорением, являются неинерциальными.



1. Как движется тело, если на него не действуют другие тела? 2. Чем отличаются взгляды Галилея от взглядов Аристотеля в вопросе об условиях равномерного движения тел? 3. Как проводился опыт, изображённый на рисунке 31, и какие выводы из него следуют? 4. Дайте современную формулировку первого закона Ньютона. 5. Какие системы отсчёта называют инерциальными; неинерциальными? Приведите примеры.



УПРАЖНЕНИЕ 11

1. На столе в равномерно и прямолинейно движущемся поезде стоит легкоподвижный игрушечный автомобиль. При торможении поезда автомобиль без внешнего воздействия покатился вперёд, сохраняя свою скорость относительно поверхности Земли.

Выполняется ли закон инерции: а) в системе отсчёта, связанной с Землёй; б) в системе отсчёта, связанной с поездом, во время его прямолинейного и равномерного движения; во время торможения? Можно ли в описанном случае считать инерциальной систему отсчёта, связанную с Землёй; с поездом?

2. Определите, действие каких сил компенсируется в следующих примерах: на столе лежит книга; на землю равномерно падает берёзовый лист; на крючке безмена висит пакет с яблоками.

§ 12

ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

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, если равнодействующая F этих сил не равна нулю. Напомним, что равнодействующей нескольких сил, одновременно приложенных к телу, называют силу, производящую 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 бьёт 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 приобретённой мячом скорости можно судить 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.



Лыжник движется с ускорением, так как $F \neq 0$



Чем сильнее футболист ударит по мячу, тем дальше полетит мяч

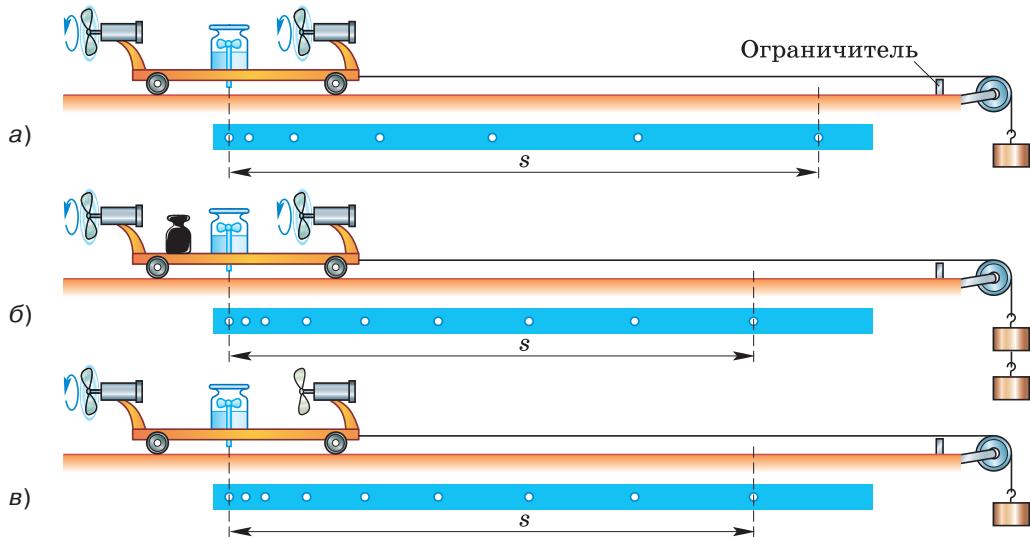


Рис. 32. Демонстрация второго закона Ньютона

Чтобы в этом удостовериться, проделаем опыт с легкоподвижной тележкой, на которой укреплена маленькая капельница и два одинаковых лёгких вентилятора (работающих от находящейся внутри каждого из них батарейки одной и той же мощности (рис. 32, а)). Допустим, масса тележки вместе с капельницей и вентиляторами нам известна. К тележке привязан один из концов нити, перекинутой через блок. К другому концу нити прикреплён небольшой груз. Этот груз нужен для того, чтобы скомпенсировать силу трения, действующую на движущуюся тележку.

Вдоль траектории движения тележки расположим бумажную ленту. Откроем кран капельницы 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 .

Измерив расстояния между соседними метками на ленте, можно убедиться в том, что эти расстояния относятся как ряд нечётных последовательных чисел ($1 : 3 : 5 : 7 : 9 \dots$). Значит, под действием постоянной силы тележка двигалась равноускоренно.

Чтобы определить ускорение тележки, измерим модуль s вектора её 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 32, б (при этом одна гирька добавляется к уже имеющемуся грузу на конце нити для компенсации возросшей силы трения).

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

Из рассмотренного 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 провести 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. 32, в). Но теперь приведём тележку в движение, включив только один вентилятор, в результате чего на тележку будет действовать в 2 раза меньшая сила, чем при двух включённых вентиляторах (придававших тележке ускорение a).

Как показывают измерения и вычисления, при уменьшении силы в 2 раза ускорение тоже уменьшается в 2 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.*

Количественную взаимосвязь между массой тела, ускорением, с которым оно движется, и равнодействующей приложенных к телу сил, вызывающих это ускорение, называют **вторым законом Ньютона**. Он формулируется так:

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

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

Следует помнить, что во втором законе Ньютона под телом подразумевается материальная точка, движение которой рассматривается в инерциальной системе отсчёта.

Математически второй закон Ньютона записывается так:

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

Из формулы следует, что вектор ускорения \vec{a} совпадает по направлению с вектором \vec{F} равнодействующей приложенных к телу сил.

Опыты показывают, что справедлив **принцип суперпозиции сил**:

при одновременном действии сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots$ тело получает такое же ускорение, какое оно получает под действием одной силы \vec{F} , равной векторной сумме данных сил.

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

Таким образом, равнодействующую приложенных к телу сил находят с помощью известных правил векторного сложения (см. Приложение).

Второй закон Ньютона можно записать для проекций векторов:

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

а также для их модулей:

$$a = \frac{F}{m},$$

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 **ньютонах (Н)**.

Покажем, как с помощью второго закона Ньютона даётся определение единицы силы — 1 Н. Для этого запишем выражение для модуля силы:

$$F = ma.$$

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

Получим соотношение между единицами силы, массы и ускорения:

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

Второй закон Ньютона позволяет решить основную задачу механики. Если заданы начальные условия и известны силы, действующие на тело, можно, вычислив ускорение тела

ла, определить его положение в любой момент времени.

Пример. Тело массой 1 кг движется в инерциальной системе отсчёта вдоль оси X в положительном направлении со скоростью 2 м/с. Когда тело находится в точке с координатой 12 м, на него в направлении движения начинает действовать сила, равная 2 Н. Определите координату тела через 5 с после начала действия силы.

Дано:

$$\begin{aligned}m &= 1 \text{ кг} \\v_0 &= 2 \text{ м/с} \\x_0 &= 12 \text{ м} \\F &= 2 \text{ Н} \\t &= 5 \text{ с}\end{aligned}$$

$$x — ?$$

Решение:

После начала действия силы тело будет двигаться равноускоренно. Запишем закон движения тела:

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

Проекцию ускорения тела найдём с помощью второго закона Ньютона

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

Поскольку векторы начальной скорости и силы сонаправлены с осью X , проекции этих векторов равны их модулям: $v_{0x} = v_0$, $F_x = F$.

Теперь можем записать выражение для координаты в общем виде:

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

Вычислим координату тела в момент времени $t = 5$ с:

$$x = 12 \text{ м} + 2 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 5 \text{ с} + \frac{2 \text{ Н} \cdot (5 \text{ с})^2}{2 \cdot 1 \text{ кг}} = 47 \text{ м}.$$

Ответ: $x = 47$ м.



- Что является причиной ускоренного движения тел?
- Приведите примеры из жизни, свидетельствующие о том, что чем больше приложенная к телу сила, тем больше сообщаемое этой силой ускорение.
- Используя рисунок 32, расскажите о ходе опыта и выводах, следующих из него.
- Сформулируйте второй закон Ньютона. Какой мате-

математической формулой он выражается? 5. Что можно сказать о направлении вектора ускорения и вектора равнодействующей приложенных к телу сил?



1. Можно ли по направлению силы судить о направлении движения тела? Приведите примеры.
2. Тело движется прямолинейно с постоянным ускорением. Какая величина, характеризующая движение этого тела, всегда направлена с равнодействующей приложенных к телу сил, а какие величины могут быть направлены противоположно равнодействующей?
- 3*. Тело движется прямолинейно под действием силы, модуль которой изменяется с течением времени (рис. 33). Охарактеризуйте движение, соответствующее каждому участку графика. Сравните изменения модуля скорости тела на каждом участке.

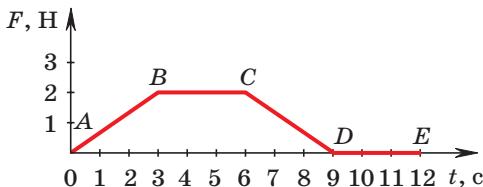


Рис. 33



УПРАЖНЕНИЕ 12

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 ему ускорение, если масса электровоза равна 184 т.
3. Два тела равной массы движутся с ускорениями $0,08$ 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 Н?
4. С каким ускорением будет всплывать находящийся под водой мяч массой 0,5 кг, если действующая на него сила тяжести равна 5 Н, архimedова сила — 10 Н, а средняя сила сопротивления движению — 2 Н?
5. Найдите ускорение тела массой 200 г, на которое действуют две силы, как показано на рисунке 34.

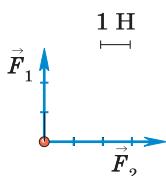


Рис. 34

Вы знаете, 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.

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

Для ответа на этот вопрос проделаем опыты.

К укреплённому на штативе демонстрационному динамометру подвесим второй такой же динамометр. При этом стрелки приборов отклонятся в противоположные стороны, но их показания будут одинаковы (рис. 35). Следовательно, динамометры взаимодействуют равными по модулю и противоположно направленными силами.

Тела действуют друг на друга с равными по модулю силами и в том случае, если взаимодействие происходит на расстоянии. Опыт, доказывающий это, изображён на рисунке 36. На стержни динамометров надеты круглые столики, к которым прикреплены плоские магниты. Магниты отталкиваются, поскольку обращены друг к другу одноимёнными полюсами.

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

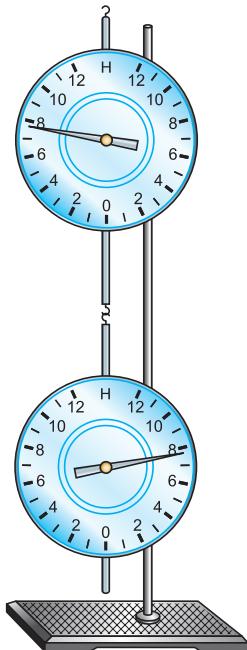


Рис. 35. Сцепленные динамометры показывают одинаковые по модулю силы

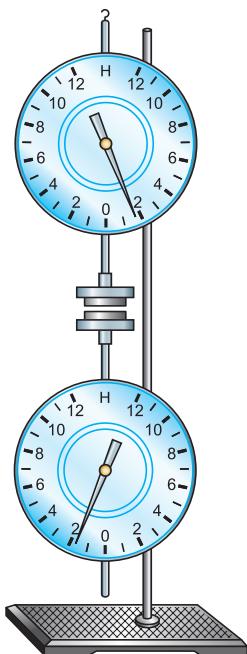


Рис. 36. Взаимодействие магнитов на расстоянии

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

Теперь рассмотрим опыт, в котором силы взаимодействия измеряются в процессе движения взаимодействующих тел. На рисунке 37 изображён 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 прикреплён 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, его называют **третьим законом Ньютона**.

Математически он записывается в следующем виде:

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

Силы, возникающие в результате взаимодействия, направлены вдоль одной прямой. Знак «минус» показывает, что векторы сил направлены в разные стороны.

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

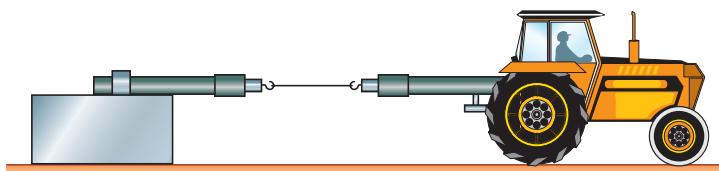


Рис. 37. Взаимодействие движущихся сцепленных тел

Например, идущий человек движется вперёд 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 природы*. Например, Земля и Луна взаимодействуют друг с другом посредством сил всемирного тяготения, стальной гвоздь и магнит притягиваются благодаря действию магнитных сил.

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 либо находится в равновесии, т. е. покоятся, либо движется равномерно и прямолинейно.)

Законы Ньютона выполняются в инерциальных системах отсчёта и справедливы для сил разной природы. Вид их не изменяется при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой.



Катер находится в равновесии, так как $\vec{F}_A = -\vec{F}_{\text{тяж}}$



- Пользуясь рисунками 35—37, расскажите, как проводились изображённые на них опыты и какие выводы были сделаны на основании полученных результатов.
- Сформулируйте третий закон Ньютона. Как он записывается математически?
- Что можно сказать об ускорении, которое получает Земля при взаимодействии с идущим по ней человеком? Ответ обоснуйте.
- Приведите примеры, показывающие, что силы, возникающие в результате взаимодействия двух тел, одинаковы по своей природе.
- Почему неверно говорить о равновесии сил, возникающих при взаимодействии тел?



- На весах уравновесили неполный сосуд с водой. Нарушится ли равновесие весов, если в воду опустить палец так, чтобы он не касался дна и стенок сосуда?
- В известных опытах Отто Герике с магдебургскими полушариями с каждой стороны полушарий впрягалось по 8 лошадей. Возникнет ли большая сила тяги, если прикрепить одно полушарие к стенке, а к другому пропрячь 16 лошадей?
- Вспомните, какие физические величины изменяются при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой. Докажите, что вид второго и третьего законов Ньютона одинаков в инерциальных системах отсчёта.



УПРАЖНЕНИЕ 13

- На рисунке 38 изображён лежащий на доске камень. Сделайте в тетради такой же рисунок и изобразите стрелками две силы, которые по третьему закону Ньютона равны друг другу. Что это за силы? Обозначьте их.



Рис. 38

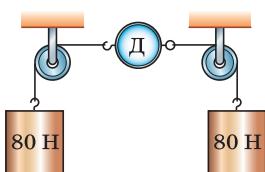


Рис. 39

- Будет ли превышен предел измерений динамометра D , изображённого на рисунке 39, если он рассчитан на измерение сил до 100 Н включительно?

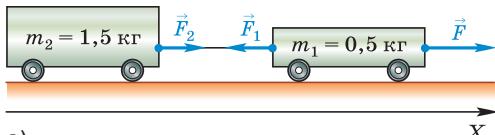
- На рисунке 40, а изображены две тележки, соединённые между собой нитью. Под действием некоторой силы F тележки пришли в движение с ускорением $a = 0,2 \text{ м/с}^2$.

а) Определите проекции на ось X сил \vec{F}_2 и \vec{F}_1 , с которыми нить действует соответственно на вторую и первую тележки. (Массой нити и трением пренебречь.)

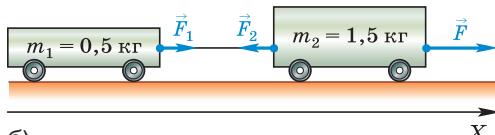
б) Чему будут равны проекции на ось X сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , если тележки поменять местами, как показано на рисунке 40, б?

в) В каком из двух случаев, показанных на рисунке 40, нить между тележками натянута сильнее?

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



а)



б)

Рис. 40

Мы знаем, что сила — количественная мера взаимодействия тел. В задачах по механике в основном рассматривают три вида сил: тяготения, упругости и трения. Обратимся сначала к простому случаю: движение тела под действием одной силы — силы тяжести.

Свободным падением называют движение тел под действием только силы тяжести.



Свободное падение спортсменки, совершающей прыжок с вышки в воду

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 тяжёлого гладкого шарика).

Тела падают свободно в безвоздушном пространстве, например внутри сосуда, из которого откачен 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 следует из второго закона Ньютона).

Опыты подтверждают этот вывод. На рисунке 41 показаны положения свободно падающего шарика, который фотографировали через каждые 0,1 с с момента начала движения¹.

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

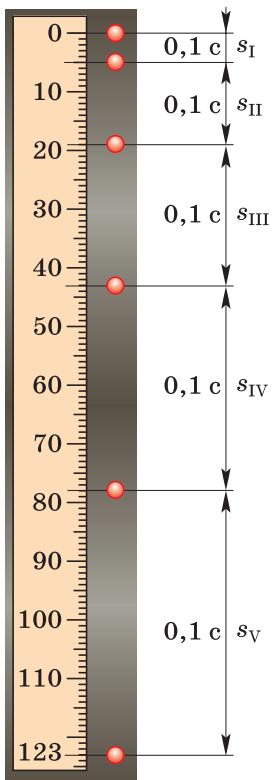


Рис. 41. Равноускоренное движение свободно падающего шарика

Как вам уже известно, модули векторов перемещений, совершаемых телом за последовательные равные промежутки времени при равноускоренном движении без начальной скорости, относятся как ряд последовательных нечётных чисел. Именно такой ряд и образуют соответствующие перемещения шарика, показанные на рисунке 41:

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

Следовательно, шарик в свободном падении двигался равноускоренно.

Из рисунка 41 видно, что с момента начала движения шарик прошёл 1,23 м за 0,5 с, при чём его начальная скорость была равна нулю. По этим данным можно вычислить модуль вектора ускорения шарика, выразив его из формулы $s = \frac{at^2}{2}$:

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

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, объёма, формы и т. д.?

Ответ на этот вопрос даёт опыт, изображённый на рисунке 42. В стеклянной трубке длинной, приблизительно равной 0,8 м, находятся кусочек пробки, дробинка, птичье пёрышко и монетка. Концы трубки герметично закупорены резиновыми пробками, в одной из которых имеется кран. Откачаем воздух из трубки и за-



Рис. 42. Не испытывая сопротивления воздуха, все тела в трубке совершают свободное падение

кроем кран. При перевёртывании трубки мы видим, что все находящиеся в ней тела одновременно достигают дна. В любой момент времени все эти предметы имеют одинаковые мгновенные скорости, а значит, движутся с одинаковым ускорением, которое называют *ускорением свободного падения* и обозначают буквой g .

Существуют способы определения 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 $v_x = a_x t$, $s_x = \frac{a_x t^2}{2}$, если начальная скорость не равна

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

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

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

Тело, подброшенное вверх, при отсутствии сопротивления воздуха тоже движется с постоянным ускорением, вызванным действием силы тяжести. Но в этом случае начальная скo-

рость \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 определённое 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 подъёма 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 :

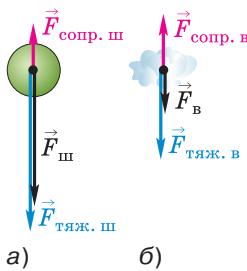
$$v_x = v_{0x} + g_x t \quad \text{и} \quad s_x = v_{0x}t + \frac{g_x t^2}{2}.$$

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

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. $g_x = g = 9,8 \text{ м/с}^2$.



а)

б)

Рис. 43. В воздухе падение шарика допустимо считать свободным, а кусочка ваты — нет

Обычно мы наблюдаем падение тел в воздухе, который действует на тело с некоторой силой. Бывают ли ситуации, когда силой сопротивления воздуха можно пренебречь? Рассмотрим падение тяжёлого шарика. Чем меньше площадь соприкосновения шарика с воздухом, тем меньше сила сопротивления. Чем больше масса шарика, тем больше сила тяжести. При определённых размерах и массе шарика сила сопротивления окажется значительно меньше силы тяжести (рис. 43, а). В этом случае равнодействующая этих двух сил мало отличается от силы $F_{\text{тяж. ш}}$. Значит, можно считать, что шарик движется с ускорением свободного падения g .

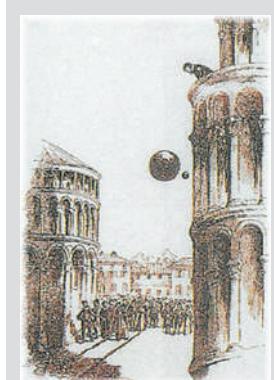
Но если в воздухе падает кусочек ваты (рис. 43, б), то в этом случае сила сопротивления по модулю сравнима с силой тяжести и равнодействующая сила $F_{\text{в}}$ значительно меньше силы тяжести $F_{\text{тяж. в}}$. Поэтому кусочек ваты падает в воздухе с ускорением, гораздо меньшим ускорения свободного падения.

К выводу о том, что ускорение свободного падения не зависит от массы тела, первым пришёл Галилей в конце XVI в. Согласно легенде, одновременно роняя с Пизанской башни тяжёлые шары, он демонстрировал, 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 :

$$F_{\text{тяж}} = mg.$$

Пример. Тело брошено вертикально вверх с начальной скоростью 20 м/с. Через сколько секунд оно будет на высоте 15 м? Сопротивлением воздуха пренебречь.



Роняя шары разных масс с Пизанской башни, Галилей доказал независимость ускорения свободного падения от массы падающего тела

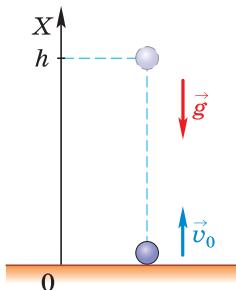


Рис. 44

Дано:
 $v_0 = 20 \text{ м/с}$
 $h = 15 \text{ м}$
 $g = 10 \text{ м/с}^2$
 $t - ?$

Решение:

Движение тела является свободным падением с ускорением g .

Ось X направим по направлению движения тела, начало отсчёта совместим с точкой бросания (рис. 44).

Закон движения тела имеет вид:

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{g_x t^2}{2},$$

где $x_0 = 0$, $v_{0x} = 20 \text{ м/с}$, $g_x = -10 \text{ м/с}^2$.

Подставив значение $x = h = 15 \text{ м}$, получим уравнение:

$$15 = 20t - 5t^2,$$

имеющее корни

$$t_1 = 1 \text{ (с)}, \quad t_2 = 3 \text{ (с)}.$$

Мы получили два значения. Какое же из них выбрать? Оказывается, что правильными являются оба ответа. На высоте 15 м тело окажется дважды: через 1 с на пути вверх и через 3 с на пути вниз.

Ответ: $t_1 = 1 \text{ с}$, $t_2 = 3 \text{ с}$.



1. Что называют свободным падением тел? 2. Как доказать, что свободное падение шарика, изображённого на рисунке 41, было равноускоренным? 3. С какой целью ставился опыт, изображённый на рисунке 42, и какой вывод из него следует? 4. Что такое ускорение свободного падения? 5. Действует ли сила тяжести на подброшенное вверх тело во время его подъёма? 6. С каким ускорением движется подброщенное вверх тело при отсутствии трения? Как меняется при этом скорость движения тела? 7. От чего зависит наибольшая высота подъёма брошенного вверх тела в том случае, когда сопротивлением воздуха можно пренебречь? 8. Что можно сказать о знаках проекций векторов мгновенной скорости тела и ускорения свободного падения при свободном движении этого тела вверх; вниз? 9. Почему в воздухе кусочек ваты падает с меньшим ускорением, чем железный шарик? 10. Кто первым пришёл к выводу о том, что свободное падение является равноускоренным движением?



1. Шарик свободно падает на горизонтальную плиту с высоты H . Начертите графики зависимости скорости шарика и его высоты над плитой от времени. Временем удара пренебречь.

2. Мяч, подброшенный мальчиком, в течение некоторого времени двигался вверх. При этом его скорость всё 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.



УПРАЖНЕНИЕ 141

- 1.** С какой высоты свободно падала сосулька, если расстояние до земли она преодолела за 4 с?
- 2.** Определите время падения монетки, если её выбросили из рук на высоте 80 см над землёй. (Принять $g = 10 \text{ м/с}^2$.)
- 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? (Принять $g = 10 \text{ м/с}^2$.)
- 4.** С какой скоростью камень достигнет земли, если он падал 2,5 с?
- 5.** С высоты 10 м над землёй вертикально вверх брошен камень со скоростью 5 м/с. Определите путь, пройденный камнем до соприкосновения с землёй.
- 6.** 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 совершил при этом мяч?
- 7.** Тело брошено с поверхности земли вертикально вверх. Докажите, что время полёта тела до момента падения на землю вдвое больше времени его подъёма на максимальную высоту.
- 8.** Тело брошено вертикально вверх со скоростью 15 м/с. Какую скорость будет иметь тело при возвращении в точку броска?

§ 15

ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

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

¹ При решении задач считать, что сопротивление воздуха пренебрежимо мало.

К выводу о существовании сил всемирного тяготения (их называют также *гравитационными*) пришёл 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. Закон был сформулирован Ньютоном в 1687 г.

Закон всемирного тяготения гласит:

два любых тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению масс тел и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

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

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

где F — модуль вектора силы гравитационного притяжения между телами массами m_1 и m_2 , r — расстояние между телами (их центрами), G — коэффициент, который называют *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*.

Гравитационная постоянная была измерена экспериментально в 1798 г. английским физиком **Генри Кавендишем** (1731—1810). Её значение

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

Формула даёт точный результат при расчёте силы всемирного тяготения в трёх случаях: 1) если размеры тел пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием между ними (рис. 45, а); 2) если оба тела однородны и име-

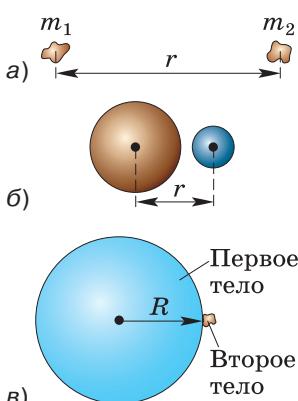


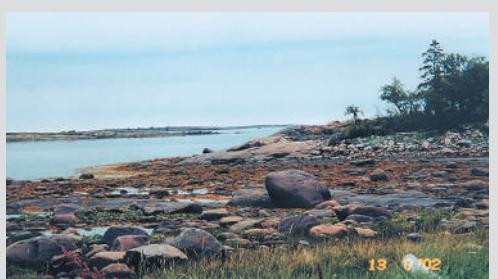
Рис. 45. Условия, определяющие границы применимости закона всемирного тяготения

ют шарообразную форму (рис. 45, б); 3) если одно из взаимодействующих тел — шар, состоящий из однородных концентрических слоёв, размеры которого значительно больше, чем у второго тела (любой формы) (рис. 45, в).

Третий из рассмотренных случаев является основанием для того, чтобы рассчитывать по приведённой 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 её поверхности или вблизи неё, пренебрежимо малы по сравнению с земным радиусом.

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

Закон всемирного тяготения объясняет не только падение тел на Землю, но и устойчивость Солнечной системы, движение Луны и других небесных тел. Даже такое интересное явление, как океанские приливы и отливы, — проявление этого закона.



Прилив и отлив на Белом море



1. Что было названо всемирным тяготением? **2.** Как иначе называют силы всемирного тяготения? **3.** Кто и в каком веке открыл закон всемирного тяготения? **4.** Сформулируйте закон всемирного тяготения. Запишите формулу, выражающую этот закон. **5.** Приведите примеры проявления силы тяготения. **6.** Притягивается ли Земля к висящему на ветке яблоку?



Почему предметы, находящиеся в комнате, несмотря на их взаимное притяжение, не приближаются друг к другу?



УПРАЖНЕНИЕ 15

- 1.** Во сколько раз изменится сила взаимного притяжения двух шаров, если расстояние между ними уменьшить в 3 раза?
- 2.** С какой силой притягиваются в море два корабля массой по 50 т каждый, находящиеся на расстоянии 1 км друг от друга?
- 3.** Космическая станция летит от Земли к Луне. Как меняется при этом модуль вектора силы её притяжения к Земле; к Луне? С одинаковыми или различными по модулю силами притягивается станция к Земле и Луне, когда она находится посередине между ними? Если силы различны, то какая больше и во сколько раз? Все ответы обоснуйте. (Масса Земли примерно в 81 раз больше массы Луны.)
- 4.** 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.

§ 16

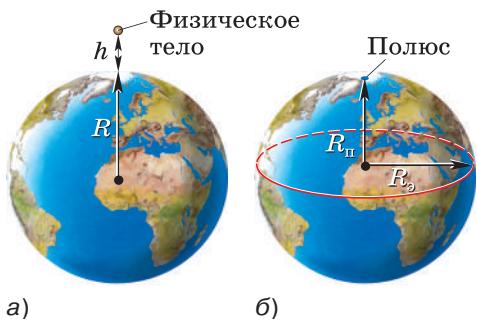
УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ НА ЗЕМЛЕ И ДРУГИХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛАХ

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

Для любого тела массой m , находящегося на поверхности Земли или вблизи неё, можно записать¹:

$$mg \approx G \frac{M_3 m}{R_3^2}, \text{ или } g \approx G \frac{M_3}{R_3^2}.$$

¹ Равенство не будет точным, так как, строго говоря, система отсчёта, связанная с Землёй, не является инерциальной.



а)

б)

Рис. 46. Значение ускорения свободного падения зависит от высоты тела над Землёй и географической широты места

Из последней формулы следует, что ускорение свободного падения постоянно для всех тел, находящихся на поверхности Земли, так как зависит от массы Земли и её радиуса (т. е. расстояния между центром Земли и данным телом).

Если тело поднять на высоту h над Землёй, как показано на рисунке 46, а, то расстояние между этим телом и центром Земли буд-

дет $R_3 + h$. Тогда $g = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2}$.

Чем больше высота h , тем меньше g и тем меньше сила тяжести, действующая на тело. Значит, с увеличением высоты тела над поверхностью Земли действующая на него сила тяжести уменьшается за счёт уменьшения ускорения свободного падения. Например, если альпинист массой 80 кг поднимется на гору высотой 3 км, то действующая на него сила тяжести уменьшится на 0,7 Н (или всего на 0,09%). Уменьшение это очень невелико. Поэтому во многих случаях при расчёте силы тяжести тела, находящегося на небольшой высоте над Землёй, ускорение свободного падения считают равным $9,8 \text{ м/с}^2$, пренебрегая его небольшим уменьшением.

Значение ускорения свободного падения g зависит 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 (рис. 46, б).

Подставив в формулу для ускорения свободного падения вместо массы и радиуса Земли соответственно массу и радиус какой-либо другой планеты или её спутника, можно определить значение ускорения свободного падения

на поверхности любого из этих небесных тел. Например, ускорение свободного падения на Луне рассчитывается по формуле:

$$g_{\text{Л}} \approx G \frac{M_{\text{Л}}}{R_{\text{Л}}^2}$$

и равно $1,6 \text{ м/с}^2$.

Ускорение свободного падения, а значит, и сила притяжения тел к Луне примерно в 6 раз меньше, чем на Земле. Например, человек, масса которого 60 кг, к Земле притягивается с силой 588 Н, а к Луне — с силой всего 98 Н.



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. 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? 4. Почему ускорение свободного падения в данной точке земного шара одинаково для тел любой массы? 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? (Принять $g = 10 \text{ м/с}^2$.)
2. Определите приблизительно силу тяжести, действующую на человека массой 64 кг. (Принять $g = 10 \text{ м/с}^2$.) 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. Ракета пролетает на расстоянии, равном 5000 км от поверхности Земли. Можно ли рассчитывать действующую на космическую ракету силу тяжести, принимая $g = 9,8 \text{ м/с}^2$? (Радиус Земли приблизительно равен 6400 км.) Ответ поясните.
5. Ястреб в течение некоторого времени может парить на одной и той же высоте над Землёй. Значит ли это, что на него не действует сила тяжести? Что произойдёт с ястребом, если он сложит крылья?
- 6*. С Земли стартует космическая ракета с космонавтом на борту. На каком расстоянии от поверхности Земли сила тяжести, действующая на космонавта, будет в 4 раза меньше, чем перед стартом; в 9 раз меньше, чем перед стартом?

Открытие планеты Нептуна

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** (1738—1822) путём 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. учёные окончательно убедились в том, что реальная орбита Урана не совпадает с вычисленной. Создавалось впечатление, что за Ураном находится ещё одна планета, которая притягивает к себе Уран и тем самым влияет на его движение.

По отклонениям в движении Урана сначала английский учёный **Джон Адамс** (1819—1892), а несколько позже и французский учёный **Урбен Леверье** (1811—1877) 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 нашёл с помощью теоретических расчётов. Однако поиск планеты был отложен на неопределённый срок.

Леверье послал письмо с указанием точных координат планеты, которая, по его мнению, должна была находиться за Ураном, молодому сотруднику Берлинской обсерватории **Иоганну Галле** (1812—1910). 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: «Ва-

ше 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 Адамса в открытии Нептуна.



Как вы думаете, почему говорят, что Нептун был открыт «на кончике пера»?

§ 17

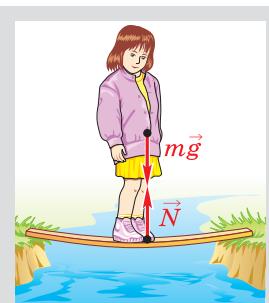
СИЛА УПРУГОСТИ

Вблизи поверхности Земли на любое тело действует сила тяжести, однако большинство тел вокруг нас не падают с ускорением, а находятся в покое.

Груз, висящий на пружине, неподвижен, значит, кроме силы тяжести, на него действует ещё какая-то сила, равная силе тяжести по модулю и противоположная по направлению. В 7 классе вы узнали, что эта сила действует на груз со стороны пружины и обусловлена её деформацией.

Деформация возникает в том случае, когда отдельные части одного и того же тела совершают разные перемещения. Так, при подвешивании к пружине груза её верхний конец остаётся неподвижен, а нижний конец смещается на некоторое расстояние (заметим, что при таком рассмотрении к пружине неприменима модель материальной точки).

Если после прекращения внешнего воздействия деформированное тело восстанавливает свою форму и размеры, то деформацию называют *упругой*. Силу, действующую со стороны упруго деформированного тела на тело, вызывающую деформацию, называют *силой упругости*¹.



Девочка неподвижна, значит, кроме силы тяжести, на неё действует другая сила

¹ Деформацию, не исчезающую после прекращения внешнего воздействия, называют *пластической*. Силы, возникающие при пластических деформациях, мы рассматривать не будем.

$$F_{\text{упр}} = k|x|$$

Для случая малых упругих деформаций связь силы упругости с величиной деформации довольно проста и выражается **законом Гука**.

Возникающая при деформации сила упругости прямо пропорциональна удлинению тела.

$$F_{\text{упр}} = k|x|,$$

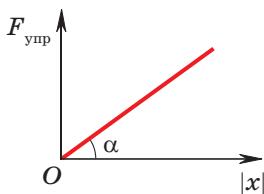


Рис. 47. График зависимости силы упругости от удлинения

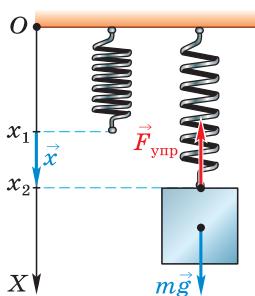


Рис. 48. Направление силы упругости противоположно направлению деформации

где k — коэффициент пропорциональности, называемый жёсткостью тела, $|x|$ — удлинение (модуль разности длин тела в деформированном и недеформированном состояниях).

Графиком зависимости силы упругости от удлинения является прямая (рис. 47). По углу наклона графика к оси абсцисс можно судить о жёсткости пружины. Чем больше угол α , тем большее жёсткость пружины k .

Сила упругости приложена к телу, вызывающему деформацию данного тела, а её направление противоположно направлению деформации. С учётом этого, если ввести вектор \vec{x} перемещения конца пружины (рис. 48), то закон Гука можно записать в векторной форме:

$$\vec{F}_{\text{упр}} = -k \vec{x}.$$

Силу упругости, действующую со стороны нити, называют *силой натяжения нити* \vec{T} , со стороны опоры — *силой нормальной¹ реакции опоры* \vec{N} .

Рассмотрим, как применить законы Ньютона к системе тел, в которой действуют силы упругости.

¹ Нормальной силу называют потому, что она направлена перпендикулярно (по нормали) к опоре. Для краткости будем называть эту силу силой реакции опоры.

Пример 1. С помощью пружины жёсткостью 80 Н/м по гладкой горизонтальной поверхности перемещают металлический кубик массой 600 г, прикладывая к нему горизонтальную силу. Определите удлинение пружины, если ускорение кубика 0,4 м/с².

Дано:	СИ
$m = 600 \text{ г}$	0,6 кг
$k = 80 \text{ Н/м}$	
$a = 0,4 \text{ м/с}^2$	
$x - ?$	

Решение:

В рассматриваемой задаче кубик движется поступательно, поэтому его можно считать материальной точкой.

Будем решать задачу в инерциальной системе отсчёта, связанной с Землёй. Выясним, какие тела и силы действуют на кубик, и покажем их на рисунке. На кубик действуют три силы: сила тяжести, сила реакции опоры (поверхности) и сила упругости со стороны пружины (рис. 49). Так как поверхность гладкая, трением можно пренебречь.

Запишем для кубика второй закон Ньютона в векторной форме:

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

Ось X удобно выбрать по направлению движения тела, ось Y — по направлению силы реакции опоры. Спроецировав векторы на выбранные оси, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} ma = F_{\text{упр}} & (\text{ось } X), \\ 0 = -mg + N & (\text{ось } Y). \end{cases}$$

В данном случае второе уравнение для решения задачи нам не потребуется.

Модуль силы упругости определим по закону Гука

$$F_{\text{упр}} = kx,$$

тогда $ma = kx$.

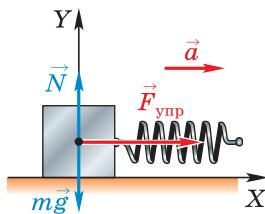


Рис. 49

Выразим и вычислим исковую величину

$$x = \frac{ma}{k},$$

$$x = \frac{0,6 \text{ кг} \cdot 0,4 \text{ м} / \text{с}^2}{80 \text{ Н} / \text{м}} = 0,003 \text{ м} = 3 \text{ мм}.$$

Ответ: $x = 3 \text{ мм}.$

Пример 2. Через неподвижный блок перекинута нить, к концам которой подвешены грузы массой 3 и 2 кг. Найдите ускорение грузов и силу натяжения нити. Трение нити о блок отсутствует, масса нити пренебрежимо мала.

Дано:

$$m_1 = 3 \text{ кг}$$

$$m_2 = 2 \text{ кг}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$a — ?$$

$$T — ?$$

Решение:

Система, рассматриваемая в задаче, состоит из двух грузов, связанных нитью. Грузы можно считать материальными точками, так как они движутся поступательно. Движение грузов будем рассматривать в инерциальной системе отсчёта, связанной с Землёй. Каждый из грузов взаимодействует с Землёй и нитью, значит, на каждый из них действуют две силы: сила тяжести и сила натяжения нити (рис. 50).

Если систему предоставить самой себе, то груз массой m_1 начнёт опускаться, а массой m_2 — подниматься.

Запишем для каждого груза второй закон Ньютона в векторной форме:

$$\begin{cases} m_1 \vec{a}_1 = m_1 \vec{g} + \vec{T}_1, \\ m_2 \vec{a}_2 = m_2 \vec{g} + \vec{T}_2. \end{cases}$$

Поскольку массой нити и трением нити о блок можно пренебречь, силы натяжения, приложенные к грузам, можно считать равными друг другу:

$$T_1 = T_2 = T.$$

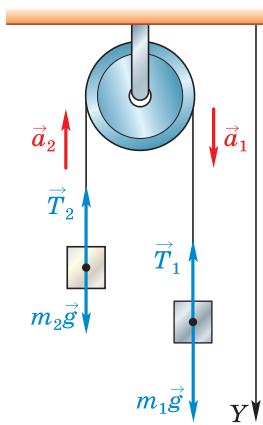


Рис. 50

Если считать, что нить нерастяжима, то ускорение грузов будет одинаковым:

$$a_1 = a_2 = a.$$

За положительное направление оси Y примем направление движения груза большей массы. Запишем второй закон Ньютона через проекции на ось Y :

$$\begin{cases} m_1a = m_1g - T, \\ -m_2a = m_2g - T. \end{cases}$$

Почленно вычитая из первого уравнения второе, получим:

$$m_1a + m_2a = m_1g - T - m_2g + T,$$

$$(m_1 + m_2)a = (m_1 - m_2)g,$$

$$a = \frac{(m_1 - m_2)g}{m_1 + m_2}.$$

Подставляя в уравнение $m_1a = m_1g - T$ выражение для ускорения, получим:

$$\frac{m_1(m_1 - m_2)g}{m_1 + m_2} = m_1g - T,$$

$$T = \frac{2m_1m_2g}{m_1 + m_2}.$$

Подставив в полученные выражения данные задачи, найдём

$$a = \frac{(3 \text{ кг} - 2 \text{ кг}) \cdot 10 \text{ м/с}^2}{3 \text{ кг} + 2 \text{ кг}} = 2 \text{ м/с}^2,$$

$$T = \frac{2 \cdot 3 \text{ кг} \cdot 2 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2}{3 \text{ кг} + 2 \text{ кг}} = 24 \text{ Н.}$$

Ответ: $a = 2 \text{ м/с}^2$; $T = 24 \text{ Н.}$



1. При каких условиях возникает деформация тела? 2. Что является причиной возникновения силы упругости? 3. Сформулируйте закон Гука. Запишите формулу, выражющую этот закон. 4. При каких условиях выполняется закон Гука? 5. Деформация какого тела вы-

зывает появление силы упругости в следующих случаях: мальчик согивает ветку яблони; кубик находится в равновесии на наклонной плоскости; силу измеряют динамометром?



Подумайте, при каких условиях одно и то же тело может испытывать упругую деформацию и при каких — пластическую. Предложите опыт, подтверждающий ваш вывод.



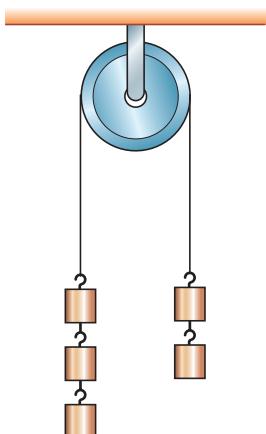
УПРАЖНЕНИЕ 17

1. Изобразите силы, действующие на базу, стоящую на столе; действующие на металлический шарик, подвешенный на нити.
2. Ученник проводил исследование по изучению зависимости деформации пружины от приложенной к ней силы. Подвешивая к пружине грузы известной массы, он измерял растяжение (деформацию) пружины. По результатам опыта ученик составил таблицу.

$F, \text{Н}$	1	2	3
$x, \text{см}$	$2,5 \pm 0,1$	$5,0 \pm 0,1$	$7,4 \pm 0,1$

Постройте график зависимости деформации пружины от модуля приложенной к ней силы с учётом абсолютной погрешности измерения $\Delta x = 1 \text{ мм}$.

Указания. В данном эксперименте ученик изменял силу и измерял деформацию пружины, поэтому ось абсцисс обозначьте F , а ось ординат — x (масштаб: 1 см — 1 Н, 1 см — 1 см). Каждому значению силы на координатной плоскости будет соответствовать не точка, а отрезок, равный удвоенной погрешности измерения. Если ученик правильно произвёл измерения, прямая, построенная вами, будет проходить через все отрезки.



3. Груз какой массы нужно подвесить к пружине жёсткостью 80 Н/м, чтобы растянуть её на 6 см?
4. Электровоз толкает вагон массой 20 т, при этом буферная пружина сжимается на 8 см. С каким ускорением будет двигаться вагон, если жёсткость пружины 50 000 Н/м?
5. С каким ускорением движутся грузы (рис. 51), если их массы одинаковы? Трение в системе отсутствует, нить считать невесомой и нерастяжимой.

Рис. 51

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, с которой тело вследствие притяжения к Земле давит на опору или растягивает подвес, называют *весом тела*. С этой величиной вы познакомились в 7 классе, и теперь пришло время поговорить о ней подробнее.

Напомним, что вес тела, находящегося на неподвижной относительно Земли горизонтальной опоре, численно равен силе тяжести.

Рассмотрим, зависит ли вес тела от ускорения. Представим себе, что автомобиль массой m находится на платформе лифта многоэтажной стоянки. Выберем инерциальную систему отсчёта, связанную с Землёй. Так как автомобиль может двигаться лишь поступательно, то его можно считать материальной точкой.

На автомобиль действуют две силы: сила тяжести $\vec{m}g$ и сила реакции опоры \vec{N} (рис. 52, а). Если автомобиль и платформа неподвижны или движутся равномерно и прямолинейно ($a = 0$), то, согласно второму закону Ньютона,

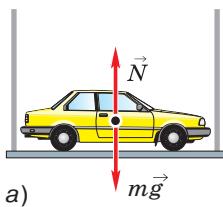
$$\vec{m}g + \vec{N} = m \cdot \vec{0} = \vec{0}.$$

Согласно третьему закону Ньютона, сила реакции опоры \vec{N} равна по модулю и противоположна по направлению силе, с которой тело действует на опору, т. е. его весу \vec{P} : $\vec{N} = -\vec{P}$.

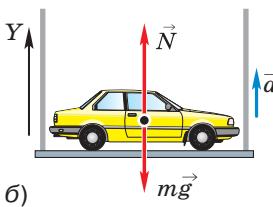
Следовательно,

$$\vec{m}g - \vec{P} = \vec{0}, \quad \vec{P} = \vec{m}g.$$

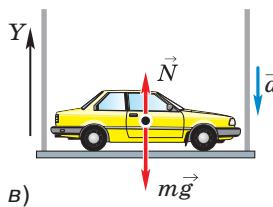
Значит, если ускорение тела равно нулю, то вес тела равен силе тяжести и по модулю,



а)



б)



в)

Рис. 52. Соотношение веса тела и силы тяжести: а — $P = mg$; б — $P > mg$; в — $P < mg$

и по направлению. Но эти силы приложены к разным телам и имеют разную физическую природу. Сила тяжести — гравитационная сила, приложенная к телу, а вес тела является частным случаем силы упругости и приложен к опоре.

Итак, равенство $\vec{P} = \vec{mg}$ является следствием того, что тело находится на неподвижной или движущейся равномерно и прямолинейно относительно Земли опоре.

Если опора начнёт ускоренно двигаться вверх или вниз, вес тела будет отличаться от силы тяжести. Пусть автомобиль начинает подниматься в лифте с ускорением \vec{a} , направленным вверх (рис. 52, б). По второму закону Ньютона

$$\vec{mg} + \vec{N} = \vec{ma}.$$

Направив ось Y вертикально вверх и спроецировав на неё векторы, получим

$$-mg + N = ma.$$

Учитывая, что по третьему закону Ньютона вес тела равен по модулю силе реакции опоры ($P = N$), можно записать

$$P = m(g + a).$$

Следовательно, вес тела, движущегося на опоре (подвесе) с ускорением, направленным противоположно ускорению свободного падения, больше силы тяжести. Состояние, которое испытывает тело в этом случае, называют *перегрузкой*. Перегрузку испытывают космо-

навты при старте ракеты. Вы могли ощутить такое состояние, например, при взлёте самолёта.

Пусть теперь автомобиль начинает спускаться в лифте с ускорением \vec{a} , направленным вниз (рис. 52, в). Уравнение второго закона Ньютона в векторном виде для этого случая выглядит так же, как при движении вверх

$$m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}.$$

А вот при записи через проекции векторов уравнение будет иным:

$$-mg + N = -ma.$$

И, соответственно, вес тела будет выражаться следующей формулой

$$P = m(g - a).$$

Вес тела, движущегося на опоре (подвесе) с ускорением, направленным так же, как ускорение свободного падения, меньше силы тяжести. Подобное состояние вы испытываете в лифте, движущемся с ускорением вниз. Особенно явно оно ощущается при спуске на скоростном лифте в высотных домах.

Заметим, что если в этом случае лифт движется с ускорением свободного падения $a = g$ (лифт свободно падает), то вес тела будет $P = m(g - g) = 0$. Вес тела обращается в нуль! Это состояние **невесомости**, при котором тело вообще не давит на опору. Это объясняется тем, что сила тяжести сообщает всем телам одинаковое ускорение \vec{g} . Падая с одинаковым ускорением, тело и опора не оказывают друг на друга никакого влияния, а значит, они не деформированы.

Любое тело находится в состоянии невесомости, если на него действует только сила тяжести. В этом можно убедиться с помощью опытов, изображённых на рисунке 53.

К динамометру подвешен металлический шарик. Согласно показаниям покоящегося ди-

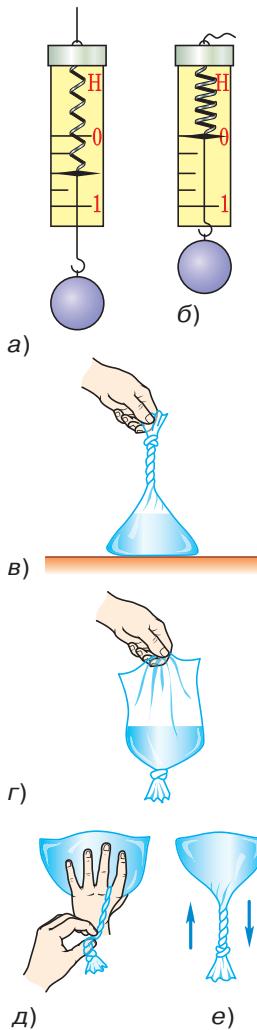


Рис. 53. Демонстрация невесомости тел при их свободном падении

намометра, вес шарика (рис. 53, а) равен 0,5 Н. Если же нить, удерживающую динамометр, перерезать, то он будет свободно падать (сопротивлением воздуха в данном случае можно пренебречь). При этом указатель динамометра переместится на нулевую отметку, свидетельствуя о том, что вес шарика равен нулю (рис. 53, б). Вес свободно падающего динамометра тоже равен нулю. 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 возьмём полимерэтиленовый пакет и примерно на $\frac{1}{3}$ заполним его водой; затем удалим из пакета воздух, скрутив его верхнюю часть в жгут и завязав на узел (рис. 53, 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. 53, г). Если же, переворачивая пакет, удерживать жгут, не позволяя ему раскрутиться (рис. 53, д), а затем подкинуть пакет вверх, то и во время подъёма, и во время падения жгут не будет раскручиваться (рис. 53, е). Это свидетельствует о том, что во время полёта вода не действует своим весом на пакет, так как становится невесомой.

Итак, мы выяснили, что вес тела зависит от ускорения опоры, на которой оно находится, и может быть как больше, так и меньше силы тяжести. При свободном падении вес обращается в нуль.

- ?**
- Что такое вес тела? 2. В каком случае вес тела равен силе тяжести по модулю и направлению? 3. Приведите пример тел, находящихся в состоянии, когда сила тяжести меньше веса тела. Как называется это состояние? 4. Приведите пример тел, находящихся в состоянии, когда сила тяжести больше веса тела. 5. Что такое невесомость? Приведите примеры тел, находящихся в состоянии невесомости.



Предположим, что лифт опускается с ускорением $a > g$. Если воспользоваться формулой $P = m(g - a)$, то для веса получится отрицательное значение. Что это значит?



УПРАЖНЕНИЕ 18

1. Определите вес коробки массой 15 кг, стоящей на полу лифта, если лифт: а) поднимается с постоянной скоростью; б) опускается с постоянной скоростью; в) поднимается, разгоняясь, с ускорением 0,4 м/с²; г) опускается, разгоняясь, с ускорением 0,4 м/с²; д) поднимается, тормозя, с ускорением 0,2 м/с²; е) опускается, тормозя, с ускорением 0,3 м/с²; ж) свободно падает.
2. При старте космического корабля космонавт испытал перегрузку, при которой его вес возрос в 6 раз. При каком ускорении корабля это произошло?

§ 19

СИЛА ТРЕНИЯ

Согласно первому закону Ньютона движение тела с постоянной скоростью не требует для своего поддержания внешнего воздействия. Почему же тележка, которую толкнули, через некоторое время останавливается, если её не подталкивать? Каждый из вас ответит, что это происходит из-за трения.

Как вам известно, различают трение покоя, скольжения и качения. Рассмотрим их более подробно.

Проделаем опыт. Положим на стол брускок. Он находится в покое под действием двух сил: силы тяжести и силы реакции опоры. С помощью динамометра слегка потянем брускок в горизонтальном направлении (рис. 54, а). Уви-

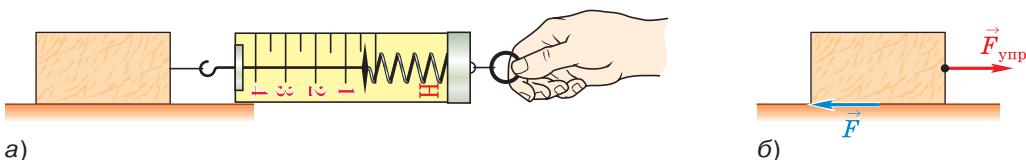


Рис. 54. Возникновение силы трения покоя

дим, что он не сдвинулся с места, хотя показание динамометра отлично от нуля. Значит, на брускок действует сила, равная по модулю и противоположная по направлению силе, с которой мы его тянем, — силе упругости (рис. 54, б). Этую силу называют *силой трения покоя*.

Будем постепенно увеличивать силу, но так, чтобы брускок оставался на месте. Сила трения покоя по-прежнему будет равна по модулю силе упругости, т. е. возрастёт на такую же величину.

При некотором значении действующей на брускок силы он, наконец, придет в движение. Это означает, что сила трения покоя может изменяться от нуля до некоторого максимального значения.

Наибольшее значение силы трения, при котором скольжение ещё не началось, называют максимальной силой трения покоя.

От каких величин может зависеть значение максимальной силы трения покоя?

Жизненный опыт подсказывает, что чем тяжелее тело, тем труднее сдвинуть его с места. Поставим на первый брускок ещё один такой же, увеличив силу давления бруска на опору, а следовательно, и силу реакции опоры (согласно третьему закону Ньютона) в 2 раза. Измерим с помощью динамометра максимальную силу трения покоя. Увидим, что её значение в 2 раза больше, чем в первом опыте. Поставив на два бруска третий, обнаружим, что максимальная сила трения покоя увеличилась в 3 раза.

Таким образом, модуль максимальной силы трения покоя прямо пропорционален модулю силы реакции опоры:

$$F_{\text{тр. п}} = \mu N.$$

Здесь μ (греческая буква «мю») — коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом трения*.

Коэффициент трения зависит от материалов и качества обработки поверхностей соприкасающихся тел. Так, если бы мы изменили условие опыта, постелив на стол металлический лист, значение максимальной силы трения покоя изменилось бы.

Как мы видели, иногда сила трения делает движение невозможным. Но в то же время без действия сил трения покоя не могли бы начать движение ни мы, ни животные, ни автомобили.

Так, при ходьбе усилием мышц ног мы создаём силу, направленную назад (вы же помните свои ощущения, когда на дороге под снегом внезапно попадается замёрзшая лужа!). При этом со стороны дороги на подошву действует сила трения покоя, сообщающая нам ускорение, направленное вперёд. Чтобы увеличить трение покоя, дорожки посыпают песком или гранитной крошкой, а подошву обуви и автомобилей делают рифлёнными.

Если сила, действующая на покоящееся тело, хотя бы немного превысит максимальную силу трения покоя, то тело начнёт скользить, и на него будет действовать *сила трения скольжения*. Эта сила всегда направлена противоположно скорости движения тела относительно соприкасающегося с ним тела.

Опыт показывает, что значение силы трения скольжения при малых скоростях движения тела можно считать постоянным и равным максимальной силе трения покоя:

$$F_{\text{тр. п}} \approx F_{\text{тр}} = \mu N.$$

Обычно коэффициент трения меньше единицы (табл. 1). По этой причине любое тело легче перемещать волоком, чем поднимать или переносить. Чтобы уменьшить силу трения скольжения, используют смазку. Так, для уменьшения трения в деталях и предотвращения их перегревания и разрушения все автомобили имеют встроенную систему смазки.



Таблица 1. Коэффициент трения скольжения для некоторых пар материалов

Материалы	Коэффициент трения
Дерево по дереву	0,3—0,5
Резина по асфальту сухому	0,7
мокрому	0,4
Дерево по льду	0,03—0,04
Сталь по льду	0,02

Если одно тело не скользит, а катится по поверхности другого, то возникающее трение называют *трением качения*. Когда вы перевозите по магазину свои покупки на тележке, едете на велосипеде, перекатываете брёвна по земле, препятствует движению именно трение качения. Сила трения качения существенно меньше силы трения скольжения, поэтому, когда возможно, трение скольжения заменяют трением качения.

Пример. На горизонтальном участке дороги автомобиль массой 3 т, движущийся со скоростью 72 км/ч, начинает торможение с заблокированными колёсами. Определите, через какое время скорость автомобиля будет 36 км/ч, если коэффициент трения 0,6.

Дано:	СИ	Решение:
$m = 3 \text{ т}$	$3 \cdot 10^3 \text{ кг}$	Так как автомобиль движется поступательно, можно считать его материальной точкой. Решать задачу будем в инерциальной системе отсчёта, связанной с Землёй.
$v_0 = 72 \text{ км/ч}$	20 м/с	
$v = 36 \text{ км/ч}$	10 м/с	
$\mu = 0,6$		
$g = 10 \text{ м/с}^2$		
$t — ?$		

На автомобиль действуют сила тяжести, сила реакции опоры и сила трения скольже-

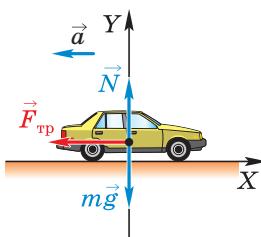


Рис. 55

ния. Ось X сонаправим с направлением движения тела, ось Y — с силой реакции опоры (рис. 55).

Запишем второй закон Ньютона в векторной форме:

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

В проекциях на оси получим:

$$\begin{cases} -ma = -F_{\text{tp}} & (\text{ось } X), \\ 0 = -mg + N & (\text{ось } Y). \end{cases}$$

Учитывая, что $F_{\text{tp}} = \mu N$, запишем:

$$ma = \mu mg.$$

Тогда

$$a = \mu g.$$

Так как известны начальная и конечная скорости движения автомобиля, из формулы для ускорения

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}, \quad a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$$

можно выразить время:

$$t = \frac{v_x - v_{0x}}{a_x} = \frac{v - v_0}{-a}, \quad t = \frac{v_0 - v}{a}.$$

Подставим выражение для a в формулу для нахождения t :

$$t = \frac{v_0 - v}{\mu g}.$$

Мы получили совсем не очевидный результат: время торможения автомобиля не зависит от его массы!

$$t = \frac{20 \text{ м/с} - 10 \text{ м/с}}{0,6 \cdot 10 \text{ м/с}^2} \approx 1,7 \text{ с.}$$

Ответ: $t \approx 1,7 \text{ с.}$



- 1.** Приведите примеры различных видов трения. **2.** От чего зависит сила трения покоя? **3.** По какой формуле можно рассчитать максимальную силу трения покоя; силу трения скольжения? **4.** Как можно уменьшить силу трения? Приведите примеры. **5.** Приведите примеры полезного проявления трения.



Почему мы говорим, что модуль максимальной силы трения покоя прямо пропорционален модулю силы реакции опоры, а не модулю силы тяжести?



УПРАЖНЕНИЕ 19

- 1.** На столе в купе поезда лежит книга. Изобразите силу трения покоя, действующую на книгу, в следующих случаях: а) поезд разгоняется; б) поезд движется на прямолинейном участке пути равномерно; в) поезд тормозит.

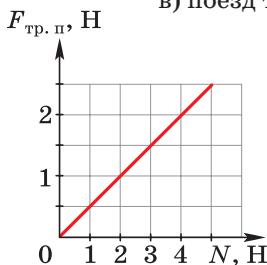


Рис. 56

- 2.** Ученик провёл исследование зависимости максимальной силы трения покоя от силы реакции опоры. По результатам эксперимента он построил график (рис. 56). Какое значение для коэффициента трения получил ученик?
- 3.** Коробку равномерно тянут по горизонтальной поверхности с помощью верёвки, составляющей с горизонтом угол 60° . Определите массу коробки, если сила натяжения верёвки равна 12 Н, коэффициент трения — 0,3.

- 4.** Автомобиль, движущийся по горизонтальному участку дороги со скоростью 54 км/ч, начинает тормозить. Получите формулу для определения пути, пройденного до остановки. Рассчитайте по этой формуле тормозной путь автомобиля, если коэффициент трения 0,6.



ЗАДАНИЕ 5

- Проведите исследование, показывающее, что сила трения скольжения не зависит от площади соприкосновения тел.

Это любопытно...

О жидком трении и прыжках с парашютом

Среди преподавателей физики известен анекдот, в котором на вопрос о скорости спуска парашютиста ученик начал отвечать словами: «Сопротивлением воздуха пренебрежём...»

На самом деле сила сопротивления воздуха спасает парашютисту жизнь. Она уравновешивает силу тяжести, а благодаря определённому

значению площади купола парашюта обеспечивает спуск и приземление парашютиста с безопасной скоростью. Что представляет собой сила со противления воздуха и как её рассчитать?

В параграфе было рассмотрено трение, возникающее при соприкоснении твёрдых тел. Это так называемое сухое трение. При движении твёрдого тела в жидкости или газе тоже возникает сила, препятствующая движению, — *сила жидкого (вязкого) трения*. Жидкое трение подчиняется своим закономерностям, существенно отличающимся от законов сухого трения.

Когда твёрдое тело движется в жидкости, примыкающие к нему слои жидкости как бы «прилипают» к телу и вовлекаются в направленное движение. За счёт обмена молекулами между слоями это движение передаётся соседним слоям, от них — следующим и т. д. Изменение скорости слоёв жидкости обусловлено силами, действующими на неё со стороны тела. Соответственно, на тело со стороны жидкости действует сила сопротивления.

Исследования различных учёных показали, что при падении тела в воздухе почти с самого начала падения сила сопротивления прямо пропорциональна квадрату скорости тела v , площади поперечного сечения тела S и плотности воздуха ρ :

$$F_c \sim \rho v^2 S.$$

При затяжном прыжке парашютист не набирает скорость безгранично, а с определённого момента начинает падать с постоянной скоростью, при которой сила сопротивления воздуха равна силе тяжести. Если бы он не использовал парашют, то приближался бы к Земле со скоростью 50—70 м/с. Парашют рассчитывают так, чтобы предельная скорость спуска с раскрытым парашютом составляла 5—7 м/с.

С момента раскрытия парашюта до установления постоянной скорости парашютист успевает пролететь около 100—150 м, поэтому прыжки с таких малых высот опасны.



Используя содержащуюся в тексте информацию, оцените значение площади купола парашюта, позволяющее парашютисту безопасно приземлиться.

§ 20

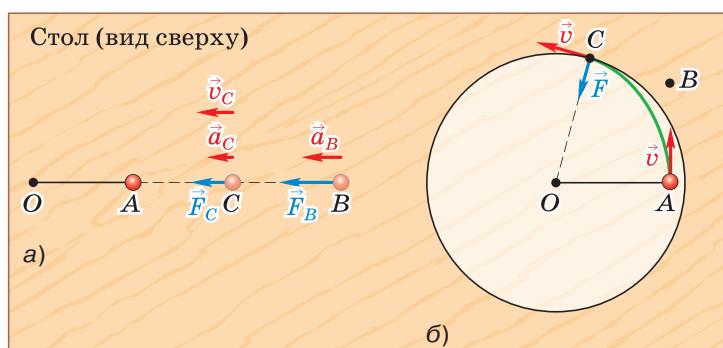
ДИНАМИКА КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ

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

На рисунке 57, а изображён шарик, лежащий на горизонтальной поверхности стола в точке А. Шарик привязан к одному из концов резинового шнуря. Второй конец шнуря прикреплён к столу в точке О. Если шарик переместить в точку В, то шнур растянется. При этом в нём 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 остаётся неизменным, и шарик движется прямолинейно*.

Теперь рассмотрим пример, в котором под действием силы упругости шарик движется криволинейно. На рисунке 57, б изображён тот же шарик на резиновом шнуре, лежащий в точке А. Толкнём шарик к точке В, т. е. *придадим ему начальную скорость, направленную перпендикулярно отрезку ОА*. Если бы на шарик не действовали никакие силы, то он сохранял бы модуль и направление полученной скорости (вспомните явление инерции). Но, двига-

Рис. 57. 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



ясь 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 под углом друг к другу: 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 под углом друг к другу, 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, причём в каждой точке сила и скорость направлены под углом друг к другу.

Как вы знаете, при движении по окружности с постоянной по модулю скоростью ускорение тела направлено по радиусу окружности к её центру.

По второму закону Ньютона ускорение всегда соправлено с силой, в результате действия которой оно возникает.

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

Пример. Автомобиль массой 2 т движется со скоростью 20 м/с по выпуклому участку эстакады радиусом 500 м. Определите вес автомобиля в верхней точке эстакады.

Дано:

$$m = 2 \text{ т}$$

$$v = 20 \text{ м/с}$$

$$R = 500 \text{ м}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$P - ?$$

СИ

$$2 \cdot 10^3 \text{ кг}$$

Решение:

Движение по выпуклому участку эстакады — это движение по окружности. Значит, автомобиль движется с центробежным ускорением. Установим, равнодействующая каких сил сообщает автомобилю это ускорение. На автомобиль в вертикальном направлении действуют сила тяжести и сила реакции опоры (рис. 58). По третьему закону Ньютона вес тела равен по модулю силе реакции опоры $P = N$.

Запишем второй закон Ньютона в векторной форме:

$$m \vec{a} = m \vec{g} + \vec{N}.$$

Направим ось Y вертикально вниз и запишем это уравнение через проекции:

$$ma_{\text{ц. с}} = mg - N, \text{ где } a_{\text{ц. с}} = \frac{v^2}{R}.$$

Выразим искомую величину из уравнения

$$N = m \left(g - \frac{v^2}{R} \right).$$

$$P = 2 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \left(10 \text{ м/с}^2 - \frac{(20 \text{ м/с})^2}{500 \text{ м}} \right) = \\ = 18 \, 400 \text{ Н.}$$

Ответ: $P = 18 \, 400 \text{ Н.}$

Силы, сообщающие телу центробежное ускорение, могут быть силами разной природы. Например, шар легкоатлетического мо-

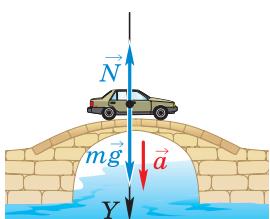


Рис. 58

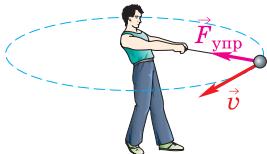


Рис. 59. Движение тела по окружности под действием силы упругости

лота движется по окружности под действием силы упругости троса (рис. 59); планеты обращаются вокруг Солнца, а спутники — вокруг планет под действием силы всемирного тяготения; автомобиль совершает поворот за счёт силы трения колёс о дорогу.

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



1. Рассмотрите рисунок 57, а и ответьте на вопросы: под действием какой силы шарик приобретает скорость и движется от точки *B* к точке *A*? В результате чего эта сила возникла? Как направлены ускорение, скорость шарика и действующая на него сила? По какой траектории движется шарик? 2. Рассмотрите рисунок 57, б и ответьте на вопросы: почему в шнуре возникла сила упругости и как она направлена по отношению к шннуру? Что можно сказать о направлении скорости шарика и действующей на него силы упругости шнруса? Как движется шарик — прямолинейно или криволинейно? 3. При каком условии тело под действием силы движется прямолинейно, а при каком — криволинейно? 4. Как направлена сила, под действием которой тело движется по окружности с постоянной по модулю скоростью?



1. Почему самолёт при повороте наклоняется в сторону поворота, а корабль — в противоположную сторону?
2. Почему на поворотах железной дороги машинист замедляет движение поезда?



УПРАЖНЕНИЕ 20

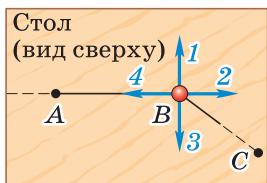


Рис. 60

1. Шарик катился по горизонтальной поверхности стола от точки *A* к точке *B* (рис. 60). В точке *B* на шарик подействовали силой \vec{F} . В результате он стал двигаться к точке *C*. В каком из направлений, обозначенных стрелками 1, 2, 3 и 4, могла действовать сила \vec{F} ?
2. На рисунке 61 изображена траектория движения шарика. На ней 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; 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.



Рис. 61

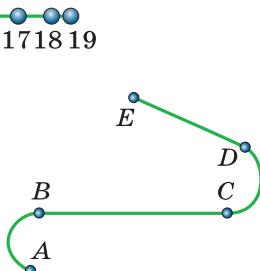


Рис. 62

- 3*. На рисунке 62 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? Ответы обоснуйте.
- 4*. 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 Землёй и Луной; б) центростремительное ускорение, с которым Луна движется вокруг Земли; в) модуль скорости движения Луны относительно Земли.
- 5*. Определите, с какой скоростью движется автомобиль массой 1 т по вогнутому мосту радиусом 100 м, если сила давления автомобиля на середину моста равна 15 кН.

§ 21

ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ ЗЕМЛИ



Искусственные спутники Земли (сокращённо ИСЗ) движутся по орбитам вокруг нашей планеты. Для рассмотрения их движения обратимся ещё раз к рисунку 57, 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.

Подобное движение наблюдается при обращении планет вокруг Солнца и спутников вокруг планет. Действительно, на планеты действует сила тяготения со стороны Солнца, а на спутники — со стороны планет, и направлены эти силы к центральному телу (Солнцу или планете).

Рассмотрим более детально вопрос о запуске и движении искусственных спутников Земли.

Чтобы понять, при каких условиях тело может стать искусственным спутником Земли, рассмотрим рисунок 63. Он представляет собой копию рисунка, сделанного Ньютона. На этом рисунке изображён земной шар, а на нём показана высокая гора, с вершины которой бросают камни, придавая им различные по модулю горизонтально направленные скорости.

В подписи Ньютона к рисунку говорится: «Брошенный камень отклонится под действием силы тяжести от прямолинейного пути и, описав кривую траекторию, упадёт, наконец, на Землю. Если его бросить с большой скоростью, то он упадёт 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 Землёй. Такое тело становится искусственным спутником Земли.



Земля, окружённая ИСЗ и так называемым космическим мусором

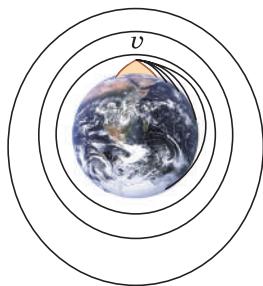


Рис. 63. Копия рисунка Ньютона

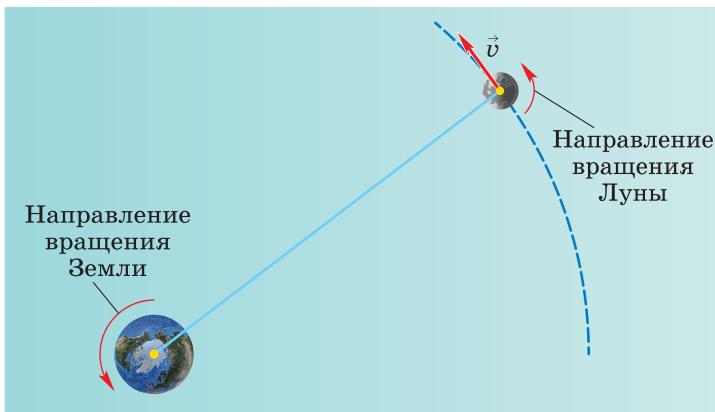


Рис. 64. Обращение Луны вокруг Земли является примером свободного падения

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. Так, естественный спутник Земли Луна (рис. 64) обращается вокруг планеты около четырёх миллиардов лет.

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

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 расчёта скорости, которую надо сообщить телу, чтобы оно стало искусственным спутником Земли.

Движение спутника происходит под действием только силы тяжести. Эта сила сообщает ему ускорение свободного падения g , которое в данном случае является центростремительным.

$$v = \sqrt{gr}$$

Центростремительное ускорение определяется по формуле: $a_{\text{ц. с}} = \frac{v^2}{r}$.

Значит, для спутника

$$g = \frac{v^2}{r}, v^2 = gr,$$

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

По этой формуле определяется скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно обращалось по окружности вокруг Земли на расстоянии r от её центра.

Эту скорость называют *первой космической скоростью* (или *круговой скоростью*).

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 расчёта первой космической скорости спутника, движущегося вблизи поверхности Земли, будет выглядеть так:

$$v = \sqrt{g_0 R_3}.$$

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 Землёй пренебречь нельзя, то расстояние r от центра Земли до спутника и ускорение свободного падения g на высоте h определяются по следующим формулам:

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

$$v = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 + h}}$$

В этом случае формула для расчёта первой космической скорости примет вид:

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

$$v = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 + h}}.$$

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

Из формулы следует, 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 Землёй, превышает соответствующую этой высоте первую космическую, то его орбита представляет собой эллипс (см. рис. 63, внешнюю траекторию). Чем больше скорость, тем более вытянутой будет эллиптическая орбита. При скорости, равной 11,2 км/с, которую называют *второй космической скоростью*, тело преодолевает притяжение Земли и уходит в космическое пространство.

Для запуска спутников применяют ракеты. 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 шара



Первый искусственный спутник Земли



Космический корабль «Восток»

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

12 апреля 1961 г. первый в мире лётчик-космонавт, наш соотечественник **Юрий Алексеевич Гагарин** (1934—1968) совершил полёт в космос на космическом корабле «Восток».

В настоящее время сотни спутников запускаются каждый год в научно-исследовательских и практических целях: для осуществления теле- и радиосвязи, исследования атмосферы, прогнозирования погоды, спутниковой навигации объектов (определения местоположения тел в любом месте Земли и околоземном пространстве) и т. д.



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 расчёта первой космической скорости спутника, движущегося по круговой орбите вблизи поверхности Земли.
6. Как движется спутник, обладающий первой космической скоростью; второй космической скоростью?



Почему тела внутри спутника, движущегося за пределами земной атмосферы, невесомы?



УПРАЖНЕНИЕ 21

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.)
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 её поверхности равно 1,6 м/с².
3. На каком расстоянии от Земли сила всемирного тяготения, действующая на тело, будет в 3 раза меньше, чем на поверхности Земли?
4. Ракета, пущенная вертикально вверх, поднялась на высоту 3200 км над поверхностью Земли и начала падать. Какой путь пройдёт ракета за первую секунду своего падения?

Многие окружающие нас тела находятся в состоянии покоя, несмотря на то что на них со стороны других тел действуют силы. Если тело поконится в некоторой системе отсчёта, говорят, что в этой системе отсчёта оно находится в *равновесии*. Так, картина, висящая на стене в комнате, находится в равновесии относительно инерциальной системы отсчёта, связанной с комнатой. Чемодан, стоящий на полу разговаривающегося лифта, находится в равновесии относительно неинерциальной системы отсчёта, связанной с лифтом. Далее мы будем рассматривать условия равновесия тел только в инерциальных системах отсчёта.

Выясним сначала, при каком условии находится в равновесии материальная точка. Поскольку материальная точка поконится, её ускорение равно нулю. Тогда, согласно второму закону Ньютона,

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots = m \cdot 0 = 0.$$

Итак, *условие равновесия материальной точки* гласит:

чтобы материальная точка могла оставаться в равновесии, векторная сумма всех приложенных к ней сил должна быть равна нулю.

Гораздо чаще условия равновесия необходимо использовать в ситуациях, когда тело нельзя считать материальной точкой. Например, при каких условиях картина на гвозде будет висеть ровно? Прежде чем сформулировать эти условия, нам нужно познакомиться с ещё одной физической моделью.

Все реальные тела под действием приложенных к ним сил деформируются. А деформации существенно влияют на равновесие тел. Однако во многих случаях на практике деформациями можно пренебречь и вести расчёт так, как если бы расстояние между любыми двумя точками

тела оставалось неизменным. Данную физическую модель называют *абсолютно твёрдым* (или просто *твёрдым*) *телом*. Каково условие равновесия твёрдого тела?

Пусть по каким-либо причинам твёрдое тело ограничено в своём движении так, что может двигаться лишь поступательно (например, поршень в цилиндре). В такой ситуации тело можно считать материальной точкой. При этом условием равновесия тела будет равенство нулю векторной суммы действующих на него внешних сил.

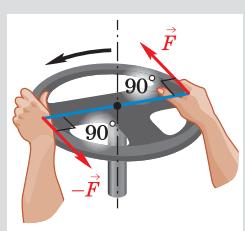
Часто мы встречаемся с ситуацией, когда твёрдое тело может вращаться относительно некоторой закреплённой оси. Чтобы такое тело оставалось в равновесии, не достаточно равенства нулю векторной суммы приложенных к нему сил. В этом нетрудно убедиться. Две одинаковые по модулю и противоположные по направлению силы поворачивают руль велосипеда или автомобиля вокруг оси вращения. Сумма этих сил равна нулю, но тело не находится в равновесии (вращается).

Вращающее действие силы зависит не только от её модуля, но и от расстояния между линией действия силы и осью вращения. Надавив на комнатную дверь рукой недалеко от оси вращения, мы сможем открыть её, только если приложим значительное усилие. Наоборот, дверь открывается легко, если действовать на неё на большом расстоянии от оси.

Напомним и уточним понятие момента силы, известное вам из курса физики 7 класса.

Длину перпендикуляра, проведённого от оси вращения до линии действия силы, называют *плечом силы*. Так, l_1 и l_2 (рис. 65) — плечи сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 соответственно. Вращающее действие силы характеризуют *моментом силы* M относительно оси — величиной, равной произведению модуля силы F на её плечо l :

$$M = Fl.$$



$\vec{F} + (-\vec{F}) = 0$, однако этого не достаточно для того, чтобы твёрдое тело оставалось в равновесии

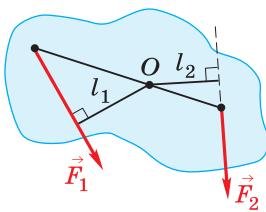


Рис. 65. Силы, действующие на тело, и их плечи

$$M = Fl$$

По этой формуле определяется абсолютная величина момента силы. Момент силы считают положительным, если сила стремится повернуть тело против хода часовой стрелки, и отрицательным, если по ходу часовой стрелки. Сила \vec{F}_1 (см. рис. 65) вращает тело против хода часовой стрелки, поэтому её момент M_1 положительный, а момент M_2 силы \vec{F}_2 , вращающей тело по ходу часовой стрелки, отрицательный.

Для исследования условия равновесия твёрдого тела, имеющего закреплённую ось вращения, воспользуемся установкой, изображённой на рисунке 66. Однородный диск может вращаться вокруг оси O . Чтобы удобнее измерять плечи сил, на диске начертен ряд концентрических окружностей на одинаковом расстоянии (1 см) друг от друга. На окружностях по диаметрам вбиты маленькие гвоздики, на которых можно подвешивать грузы. Вес каждого груза равен 1 Н. На диск (см. рис. 66) действуют три силы: $F_1 = 1$ Н с плечом $l_1 = 4$ см, $F_2 = 3$ Н с плечом $l_2 = 2$ см,

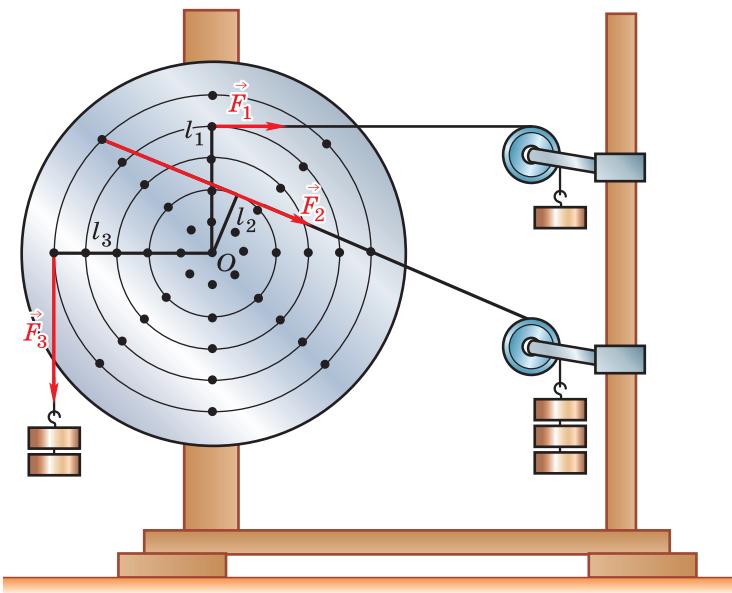


Рис. 66. Установка для исследования условий равновесия тела, имеющего закреплённую ось вращения

$F_3 = 2$ Н с плечом $l_3 = 5$ см. Моменты этих сил относительно оси вращения с учётом знаков:

$$M_1 = -1 \text{ Н} \cdot 0,04 \text{ м} = -0,04 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_2 = -3 \text{ Н} \cdot 0,02 \text{ м} = -0,06 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_3 = 2 \text{ Н} \cdot 0,05 \text{ м} = 0,1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Диск под действием указанных сил находится в равновесии. Таким образом, при равновесии диска

$$M_1 + M_2 + M_3 = -0,04 \text{ Н} \cdot \text{м} - 0,06 \text{ Н} \cdot \text{м} + 0,1 \text{ Н} \cdot \text{м} = 0.$$

Итак, *условие равновесия твёрдого тела с закреплённой осью вращения* гласит:

чтобы твёрдое тело с закреплённой осью вращения могло оставаться в равновесии, алгебраическая сумма моментов относительно этой оси всех действующих на тело внешних сил должна быть равна нулю.

Обратим внимание на два обстоятельства. Во-первых, на тело действует сила со стороны оси вращения, на которую оно посажено. Однако независимо от направления этой силы её момент относительно оси вращения равен нулю из-за равенства нулю плеча силы. Поэтому, исследуя равновесие диска, мы эту силу не рассматривали. Во-вторых, на тело действует сила тяжести. Почему же не была учтена она? Поговорим о силе тяжести более подробно.

Когда на тело действуют силы со стороны тросов, пружин и т. д., то положения точек приложения сил очевидны. Но что можно сказать о точке приложения силы тяжести? Особенностью этой силы является то, что она действует на каждый кусочек тела и как бы распределена по всему его объёму.

Разделим мысленно тело на большое число частей (рис. 67). На каждую часть действует сила тяжести, направленная вертикально вниз. Все эти силы можно заменить одной суммарной силой (равнодействующей сил тяжести) так, чтобы результат её действия был таким же, что и у сил тяжести, действующих на отдельные

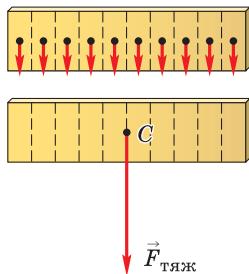


Рис. 67. Центр тяжести тела

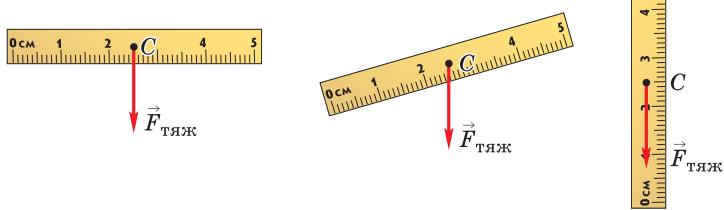


Рис. 68. Направление действия силы тяжести

части тела. Для этого сила должна быть приложена к определённой точке, называемой *центром тяжести тела* — точке *C* (см. рис. 67).

При всевозможных перемещениях тела положение центра тяжести относительно тела остаётся неизменным (рис. 68). Его положение зависит от распределения вещества, а значит, и массы по объёму тела. Именно поэтому только при изменении взаимного расположения частей тела его центр тяжести может сместиться.

Центр тяжести можно найти опытным путём. Рассмотрим, как это сделать, на примере плоского тела. Фигуру из картона будем подвешивать на нити в разных точках по краю вместе с отвесом (рис. 69). При равновесии фигуры действующие на неё сила тяжести и сила упругости направлены вдоль одной вертикальной прямой, отмеченной отвесом. Если в каждом положении фигуры проводить линию по

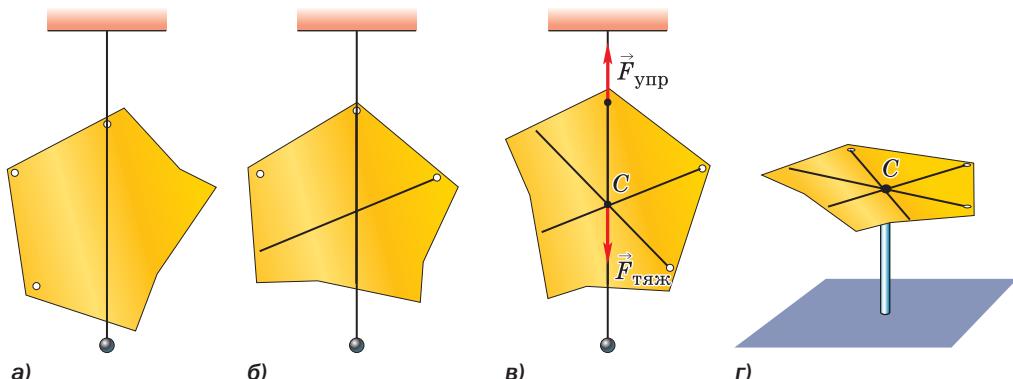


Рис. 69. Нахождение центра тяжести плоского тела неправильной формы

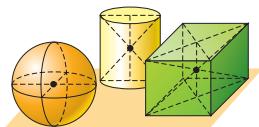


Рис. 70. Центр тяжести однородных тел правильной формы

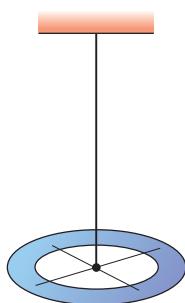


Рис. 71. Центр тяжести кольца

отвесу (рис. 69, *a*, *b*), то все эти линии пересекутся в одной точке (рис. 69, *в*), которая и будет центром тяжести фигуры. Если теперь на остриё карандаша поместить фигуру в её центре тяжести (рис. 69, *г*), то она будет находиться в равновесии.

Центр тяжести в однородных телах правильной формы совпадает с центром симметрии (рис. 70). Именно поэтому в опыте с диском (см. рис. 66) момент силы тяжести относительно оси вращения равен нулю.

Центр тяжести может находиться вне тела. Например, центр тяжести кольца находится на пересечении его диаметров (рис. 71).

Пример. Центр тяжести конструкции, состоящей из однородного стержня длиной l с укреплёнными на его концах грузами массами $m_1 = 2$ кг и $m_2 = 4$ кг, находится на расстоянии $x_C = l/4$ от более тяжёлого груза. Определите массу стержня.

Дано:

$$m_1 = 1 \text{ кг}$$

$$m_2 = 4 \text{ кг}$$

$$x_C = l/4$$

$$m — ?$$

Решение:

Конструкция будет находиться в равновесии, если в её центре тяжести поставить опору. Сделаем рисунок и покажем действующие на конструкцию силы: силу реакции опоры \vec{N} , силы тяжести $m_1\vec{g}$, $m_2\vec{g}$, $m\vec{g}$ (рис. 72).

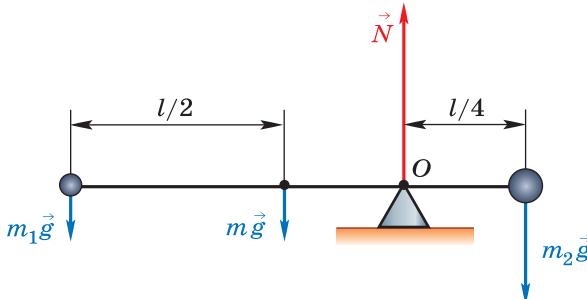


Рис. 72

При этом учтём, что сила тяжести \vec{mg} , действующая на однородный стержень, приложена в его середине.

Согласно условию равновесия, алгебраическая сумма моментов всех внешних сил, действующих на конструкцию, относительно оси, проходящей через центр тяжести O , равна нулю:

$$m_1g \frac{3l}{4} + mg \frac{l}{4} - m_2g \frac{l}{4} = 0.$$

Откуда

$$m = m_2 - 3m_1.$$

$$m = 4 \text{ кг} - 3 \cdot 1 \text{ кг} = 1 \text{ кг.}$$

Ответ: $m = 1$ кг.



1. Сформулируйте условие равновесия материальной точки.
2. В каких случаях реальное тело можно рассматривать как абсолютно твёрдое?
3. Сформулируйте условие равновесия невращающегося твёрдого тела.
4. Что называют плечом силы; моментом силы?
5. Сформулируйте условие равновесия твёрдого тела с закреплённой осью вращения.
6. Что называют центром тяжести?
7. Как экспериментально определить положение центра тяжести тела?
8. Может ли измениться положение центра тяжести тела относительно тела?



1. Выполняется ли в случае равновесия твёрдого тела с закреплённой осью вращения условие равенства нулю суммы действующих на тело внешних сил?
2. Докажите, что сила тяжести и сила упругости, действующие на картонную фигуру (см. рис. 69, е), направлены вдоль одной прямой.
3. Подумайте, при каких условиях картина будет висеть ровно на одном гвозде.



УПРАЖНЕНИЕ 22

1. Однородный стержень, на одном конце которого подвешен груз весом 120 Н, находится в равновесии в горизонтальном положении, если его подпереть на расстоянии $\frac{1}{5}$ длины стержня от груза. Чему равен вес стержня?
2. Две девочки массами $m_1 = 30$ кг и $m_2 = 35$ кг сидят на концах доски длиной $L = 6$ м и массой $M = 25$ кг. Доска находится в равновесии. Определите положение её точки опоры. Чему равна сила реакции опоры, действующая на доску?

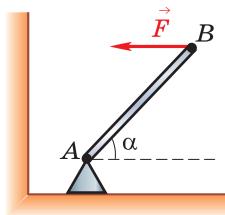


Рис. 73



Рис. 74



Алюминий Медь

Рис. 75

3. На столе перпендикулярно его краю лежит однородная линейка длиной 75 см. Часть линейки свешивается со стола. К этому концу линейки подвешен груз, масса которого в 2 раза больше массы линейки. Найдите длину свешивающейся части, если вся система находится в равновесии.
4. Тонкий однородный стержень AB шарнирно закреплён в точке A . В точке B на стержень действует горизонтальная сила F , в результате чего стержень находится в равновесии (рис. 73). Определите эту силу, если масса стержня $m = 1$ кг, угол его наклона к горизонту $\alpha = 45^\circ$.
5. Найдите построением положение центра тяжести однородной пластинки, имеющей форму, показанную на рисунке 74. Толщина пластины везде одна и та же.
6. Две металлические пластины — алюминиевая и медная — скреплены так, как показано на рисунке 75. Размеры пластин одинаковые. Определите положение центра тяжести конструкции.



ЗАДАНИЕ 6



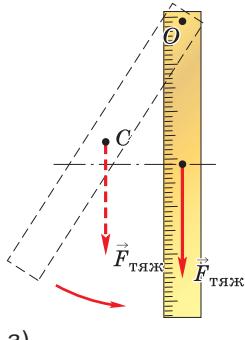
1. Из картона вырежьте фигуру неправильной формы. Определите её центр тяжести, используя отвес (нить с грузом).
2. Вырежьте из картона кольцо толщиной 2 см. Подтвердите на опыте, что его центр тяжести находится на пересечении диаметров.

§ 23

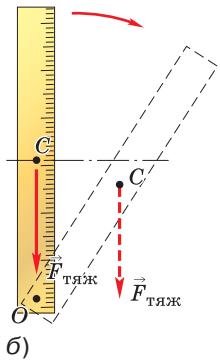
ВИДЫ РАВНОВЕСИЯ ТЕЛ

Пусть твёрдое тело, имеющее закреплённую ось вращения или точку опоры, находится в равновесии. Тело можно вывести из положения равновесия. Как оно будет вести себя после этого? Вернётся в положение равновесия или нет?

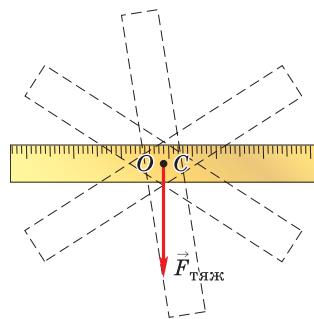
Для ответа на этот вопрос проведём опыт. Подвесим линейку вертикально, укрепив её за



а)



б)



в)

Рис. 76. Различные случаи равновесия линейки

один из концов (рис. 76, а). Центр тяжести линейки находится в её геометрическом центре, поэтому в этом случае точка подвеса выше центра тяжести.

Отклоним линейку от вертикали на некоторый угол и отпустим. Сила тяжести будет стремиться вернуть линейку в первоначальное положение (см. рис. 76, а).

Такое равновесие называют *устойчивым*. При небольшом смещении тела из положения устойчивого равновесия тело вновь к нему возвращается.

Если центр тяжести тела находится на вертикали, проходящей через ось вращения, ниже оси, то равновесие является устойчивым.

В устойчивом равновесии находятся тела, висящие на нитях, цепях и т. п., например люстры.

Изменим положение линейки так, чтобы ось вращения была ниже центра тяжести, но находилась с ним на одной вертикали (рис. 76, б). Если линейку вывести из положения равновесия, то сила тяжести будет уводить её от этого положения всё дальше и дальше, и линейка в исходное положение больше не вернётся.

Такое равновесие называют *неустойчивым*. При неустойчивом равновесии тело, вы-



Равновесие в природе

веденное из положения равновесия, больше в него не возвращается.

Если центр тяжести тела находится выше оси вращения, на вертикали, проходящей через ось, то равновесие является неустойчивым.

Так, в неустойчивом равновесии находятся канатоходцы, балансирующие на канате.

Подвесим теперь линейку так, чтобы ось вращения линейки проходила через её центр тяжести (рис. 76, в). Расположим линейку горизонтально. Она будет находиться в состоянии покоя, или равновесия. Выведем линейку из этого положения, подтолкнув один её край, например, вверх. Линейка повернётся и вновь остановится. Это будет опять положение равновесия.

Такое равновесие называют **безразличным**. При отклонении или перемещении тела, находящегося в безразличном равновесии, оно остаётся в равновесии.

Если ось вращения тела проходит через центр тяжести, то равновесие является безразличным.

Колёса автомобилей, велосипедов, самокатов, вращающиеся симметричные части машин — примеры тел, находящихся в безразличном равновесии.

Таким образом, существует три вида равновесия: устойчивое, неустойчивое, безразличное.

Рассмотрим теперь, как движется центр тяжести тела при выведении его из равновесия в описанном опыте с линейкой. Если тело вывести из положения устойчивого равновесия, то его центр тяжести поднимется (см. рис. 76, а). Если тело вывести из неустойчивого равновесия, то его центр тяжести опустится (см. рис. 76, б). При выведении тела из безразличного равновесия положение его центра тяжести не меняется (см. рис. 76, в).

Справедливость этих закономерностей можно подтвердить и на опытах с шариками (рис. 77), находящимися в устойчивом, неустойчивом и безразличном равновесии.

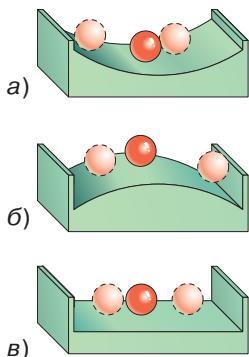


Рис. 77. Виды равновесия шара на опоре:
а — устойчивое;
б — неустойчивое;
в — безразличное

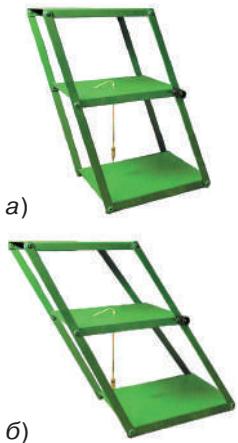


Рис. 78. Равновесие призмы на шарнирах:
а — устойчивое;
б — неустойчивое

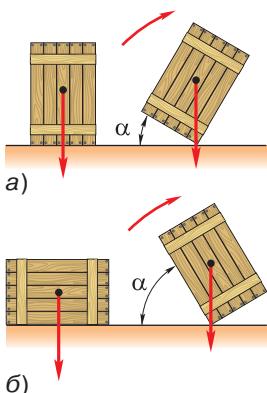


Рис. 79. Зависимость устойчивости положения тела от угла поворота

Мы рассмотрели равновесие тел, имеющих закреплённую ось вращения или точку опоры. Большинство предметов, окружающих нас, опирается на некоторую площадь. Например, дома, автомобили, станки и т. д. Рассмотрим условия равновесия тел, имеющих опоры.

Выясним, при каких условиях призма на шарнирах (рис. 78) будет находиться в устойчивом и неустойчивом равновесии. Будем изменять форму призмы, к центру тяжести которой прикреплён отвес, и наблюдать за положением отвеса. Опыт показывает, что если линия отвеса проходит через опору (рис. 78, а), то равновесие призмы устойчивое. Если линия отвеса оказывается на границе опоры (рис. 78, б), то призма переходит в неустойчивое равновесие. А при выходе линии отвеса за границы опоры призма опрокидывается.

Судить о том, насколько устойчиво равновесие тела, стоящего на горизонтальной поверхности, можно по углу наклона тела, при котором оно ещё не опрокидывается. Рассмотрим тело, изображённое на рисунке 79. Чтобы тело заняло положение неустойчивого равновесия, его нужно отклонить от горизонтальной поверхности. При этом тело будет опираться на одно ребро. Чем меньше угол α , на который нужно отклонить тело, чтобы оно перешло в положение неустойчивого равновесия (см. рис. 79), тем проще его вывести из первоначального устойчивого равновесия. Конкретное значение угла α определяется положением центра тяжести тела и площадью опоры. Чем больше площадь опоры и чем ниже расположен центр тяжести, тем устойчивее равновесие тела.



1. Какие виды равновесия вы знаете? **2.** Как устойчивость равновесия связана с положением центра тяжести тела? **3.** При каком условии тело, имеющее площадь опоры, будет находиться в устойчивом равновесии; упадёт? **4.** Приведите примеры тел, находящихся в равновесии. Поясните, какое это равновесие.



Продолжает ли линия отвеса проходить через центр тяжести конструкции (см. рис. 78) при изменении её формы? Почему?

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).

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

Импульсом тела (материальной точки) \vec{p} называют векторную физическую величину, равную произведению массы тела на его скорость.

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

Направление вектора импульса тела всегда совпадает с направлением вектора скорости движения.

За единицу импульса в СИ принимают импульс тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с. Значит, единицей импульса тела в СИ является **кг · м/с**.

При расчётах пользуются уравнением для проекций векторов:

$$p_x = mv_x.$$

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

Слово «импульс» (*impulsus*) в переводе с латинского означает «толчок».

При взаимодействии тел их импульсы могут изменяться. В этом можно убедиться на опыте.

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

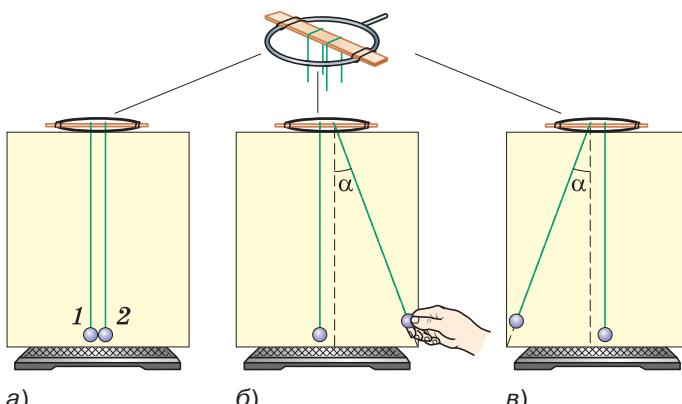


Рис. 80. Демонстрация закона сохранения импульса

Два шарика одинаковой массы подвешиваются на нитяных петлях к укреплённой на кольце штатива деревянной линейке (рис. 80, а). Шарик 2 отклоняют от вертикали на угол α (рис. 80, б) и отпускают. Вернувшись в прежнее положение, он ударяет по шарику 1 и останавливается. При этом шарик 1 приходит в движение и отклоняется на тот же угол α (рис. 80, в).

В данном случае очевидно, что в результате взаимодействия шариков импульс каждого из них изменился: на сколько уменьшился импульс шарика 2, на столько же увеличился импульс шарика 1.

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 (сохраняется) при любых движениях и взаимодействиях тел системы.

В этом заключается **закон сохранения импульса**.

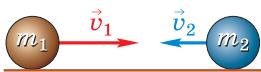


Рис. 81. Система из двух тел — шаров, движущихся прямолинейно навстречу друг другу

Закон сохранения импульса выполняется и в том случае, если на тела системы действуют внешние силы, *векторная сумма которых равна нулю*. Для простоты рассмотрим систему, состоящую только из двух тел — шаров массами m_1 и m_2 , которые движутся прямолинейно навстречу друг другу со скоростями \vec{v}_1 и \vec{v}_2 (рис. 81).

Силы тяжести, действующие на каждый из шаров, уравновешиваются силами реакции опоры, по которой они катятся. Силы сопротивления движению в данном случае малы, поэтому их влияние не будем учитывать. Таким образом, можно считать, что силы, действующие на систему шаров, скомпенсированы.

Через некоторое время шары столкнутся. Во время столкновения, длившегося очень короткий промежуток 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 .

Рассмотрим первый шар. Под действием силы \vec{F}_1 шар получит ускорение

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{v}'_1 - \vec{v}_1}{t}.$$

По второму закону Ньютона $\vec{a}_1 = \frac{\vec{F}_1}{m_1}$. Следовательно,

$$\frac{\vec{v}'_1 - \vec{v}_1}{t} = \frac{\vec{F}_1}{m_1},$$

$$m_1 \vec{v}'_1 - m_1 \vec{v}_1 = \vec{F}_1 t.$$

Но $m_1 \vec{v}'_1 = \vec{p}'_1$, а $m_1 \vec{v}_1 = \vec{p}_1$, поэтому

$$m_1 \vec{v}'_1 - m_1 \vec{v}_1 = \vec{p}'_1 - \vec{p}_1 = \Delta \vec{p}_1,$$

где $\Delta \vec{p}_1$ — изменение импульса первого шара.

Таким образом, $\Delta \vec{p}_1 = \vec{F}_1 t$, где $\vec{F}_1 t$ — величина, называемая **импульсом силы**.

Аналогично можно записать, что для второго шара $\Delta \vec{p}_2 = \vec{F}_2 t$.

Изменение импульса тела равно импульсу силы.

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

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

Умножив обе части уравнения на t , можно записать

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

Учитывая связь между импульсом силы и изменением импульса тела, запишем

$$\begin{aligned}\Delta \vec{p}_1 &= -\Delta \vec{p}_2, \\ \vec{p}'_1 - \vec{p}_1 &= -(\vec{p}'_2 - \vec{p}_2), \text{ откуда}\end{aligned}$$

$$\vec{p}'_1 + \vec{p}'_2 = \vec{p}_1 + \vec{p}_2. \quad (1)$$

Учитывая, что $\vec{p} = m\vec{v}$, запишем уравнение (1) в таком виде:

$$m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2 = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2. \quad (2)$$

Левые части уравнений (1) и (2) 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 (1) и (2) являются математической записью закона сохранения импульса.

При рассмотрении взаимодействия тел, движущихся вдоль одной прямой, для записи за-

кона сохранения импульса достаточно одного уравнения, в которое входят проекции векторных величин на ось X :

$$m_1 v'_{1x} + m_2 v'_{2x} = m_1 v_{1x} + m_2 v_{2x}.$$

Пример. Два тела массами 2 и 4 кг движутся по гладкой горизонтальной поверхности навстречу друг другу с одинаковой скоростью 2 м/с. После удара тела продолжили движение вместе. С какой скоростью и в каком направлении стали двигаться тела?

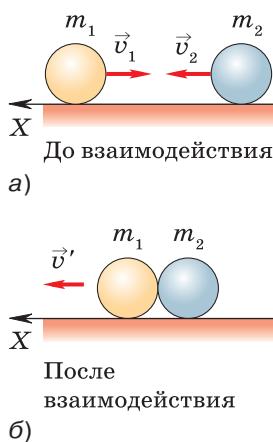


Рис. 82

Дано:

$$m_1 = 2 \text{ кг}$$

$$m_2 = 4 \text{ кг}$$

$$v_1 = v_2 = v = 2 \text{ м/с}$$

$$v' — ?$$

Решение:

Будем считать тела материальными точками. Инерциальную систему отсчёта свяжем с Землёй. Ось X направим в сторону движения тела большей массы (рис. 82, а).

Трения в системе нет, поэтому систему тел можно считать замкнутой.

Запишем закон сохранения импульса:

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

Предположим, что тела после столкновения стали двигаться в направлении, в котором двигалось тело большей массы до столкновения (рис. 82, б). С учётом направления оси X закон сохранения импульса для проекций скоростей будет выглядеть так:

$$-m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v'.$$

Отсюда:

$$v' = \frac{v(m_2 - m_1)}{m_1 + m_2}.$$

$$v' = \frac{2 \text{ м/с} \cdot (4 \text{ кг} - 2 \text{ кг})}{4 \text{ кг} + 2 \text{ кг}} \approx 0,7 \text{ м/с.}$$

Так как значение скорости получилось положительным, значит, предположение о направлении скорости верное.

Ответ: $v \approx 0,7$ м/с, в направлении первоначального движения тела большей массы.



1. Что называют импульсом тела? 2. Что можно сказать о направлениях векторов импульса и скорости движущегося тела? 3. Расскажите о ходе опыта, изображённого на рисунке 80. О чём он свидетельствует? 4. Что означает утверждение о том, что несколько тел образуют замкнутую систему? 5. Сформулируйте закон сохранения импульса. 6. Что называют импульсом силы? 7. Для замкнутой системы, состоящей из двух тел, запишите закон сохранения импульса в виде уравнения, в которое входили бы массы и скорости этих тел. Поясните, что означает каждый символ в этом уравнении.



Докажите, что $\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с} = \text{Н} \cdot \text{с}$.



УПРАЖНЕНИЕ 23

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 модуль импульса автомобиля массой 1 т при изменении модуля его скорости от 54 до 72 км/ч?
3. Человек сидит в лодке, покоящейся на поверхности озера. В какой-то момент он встаёт и идёт с кормы на нос. Что произойдёт 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?
5. Мальчик массой 40 кг, стоящий на коньках, оттолкнувшись от тренера, начал двигаться со скоростью 2 м/с. Какова масса тренера, если он начал скользить со скоростью 0,5 м/с?
6. Автомобиль «Ока» массой 600 кг едет со скоростью 36 км/ч. С какой скоростью должна лететь стрекоза массой 1 г, чтобы при их столкновении автомобиль остановился? Можно ли в данной задаче пренебречь массой стрекозы?



ЗАДАНИЕ 7

- Возьмите теннисный шарик. Ударами ракетки или дощечки заставьте его двигаться вверх-вниз на одну и ту же высоту. Проанализируйте, как меняется импульс шарика. В какой момент импульс шарика максимальный; минимальный? В какой момент происходит максимальное изменение импульса шарика и под действием каких сил?

§ 25

РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ. РАКЕТЫ

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 покойится, 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 закону сохранения импульса, суммарный импульс системы, состоящей из двух тел — шарика и воздуха в нём, должен оставаться таким же, каким был до начала истечения воздуха, т. е. равным нулю. Поэтому шарик начинает двигаться в противоположную струе воздуха 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 остаётся равным нулю.

Движение шарика является примером *реактивного движения*. Реактивное движение происходит за счёт того, что от тела отделяется с некоторой скоростью какая-то его часть, в ре-

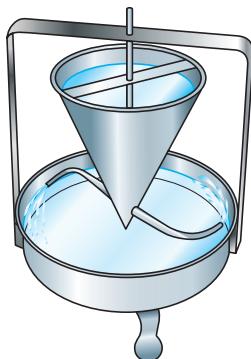


Рис. 83. Демонстрация реактивного движения с помощью сегнерова колеса

зультате чего само тело приобретает противоположно направленный импульс.

На принципе реактивного движения основано вращение устройства, называемого *сегнеровым колесом* (рис. 83). Вода, вытекающая из сосуда конической формы через сообщающуюся с ним изогнутую трубку, вращает сосуд в направлении, противоположном скорости воды в струях. Следовательно, 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 (рис. 84). Движутся 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 неё, чтобы поскорее настичь добычу или спастись от врага.

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

Рис. 84. Реактивное движение для своего перемещения используют головоногие моллюски:
а — каракатица;
б — кальмар;
в — осьминог

а)



б)



в)





Старт ракеты-носителя с космическим кораблём «Союз»

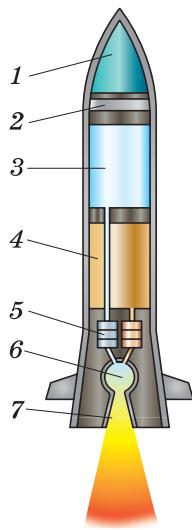


Рис. 85. Схема ракеты

направление и модуль своей скорости. Поэтому для космических полётов могут быть использованы только реактивные летательные аппараты, т. е. ракеты.

Рассмотрим устройство 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 её конструкции, всегда имеется оболочка и топливо с окислителем. На рисунке 85 схематично изображена ракета в разрезе. Оболочка ракеты включает в себя полезный груз (в данном случае это космический корабль 1), приборный отсек 2 и двигатель (камера сгорания 6, насосы 5 и пр.).

Основную массу ракеты составляет топливо 4 с окислителем 3 (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 расстрub специальной формы, называемый *соплом* 7. 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 считать, что ракета представляет собой замкнутую систему (т. е. не будем учитывать действие на неё силы земного притяжения).

Поскольку до старта импульс ракеты был равен нулю, то по закону сохранения суммарный импульс движущейся оболочки и выбра-

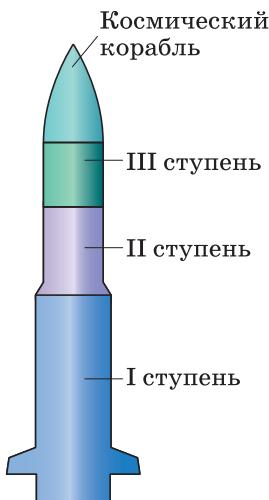


Рис. 86. Схема трёхступенчатой ракеты



КОНСТАНТИН ЭДУАРДОВИЧ ЦИОЛКОВСКИЙ

(1857—1935)

Российский учёный и изобретатель в области аэродинамики, ракетодинамики, теории самолёта и дирижабля. Основоположник теоретической космонавтики

сываемого из неё газа тоже равен нулю. Отсюда следует, что импульс оболочки и направленный противоположно ему импульс струи газа равны 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. В практике космических полётов обычно используют многоступенчатые ракеты, развивающие гораздо большие скорости и предназначенные для более дальних полётов, чем одноступенчатые.

На рисунке 86 показана схема трёхступенчатой 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 путём 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 первые, используется для увеличения скорости ракеты. Если же корабль должен совершить посадку, то третья ступень используется для торможения корабля перед посадкой. При этом ракету разворачивают на 180° , чтобы сопло оказалось впереди. Тогда вырывающийся из ракеты газ сооб-



СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ КОРОЛЁВ

(1907—1966)

Советский учёный, конструктор ракетно-космических систем. Основоположник практической космонавтики

щает ей импульс, направленный против скорости ракеты, что приводит к уменьшению скорости и даёт возможность осуществить посадку.

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

Полвека спустя идея Циолковского была развита и реализована советскими учёными и конструкторами под руководством **Сергея Павловича Королёва**.



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? Расскажите об устройстве и принципе действия ракеты.
4. От чего зависит скорость ракеты?
5. В чём заключается преимущество многоступенчатых ракет перед одноступенчатыми?
6. Как осуществляется посадка космического корабля?



УПРАЖНЕНИЕ 24

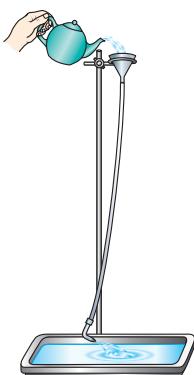


Рис. 87

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 её масса вместе с человеком равна 200 кг?
2. Какую скорость получит модель ракеты, если масса её 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, изображённый на рисунке 87? Какое физическое явление в данном случае демонстрируется, в чём оно заключается и какой физический закон лежит в основе этого явления?

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



ЗАДАНИЕ 8



- Проделайте опыт, изображённый на рисунке 87. Когда резиновая трубка максимально отклонится от вертикали, перестаньте лить воду в воронку. Пока оставшаяся в трубке вода вытекает, понаблюдайте, как будет меняться: а) дальность полёта воды в струе (относительно отверстия в стеклянной трубке); б) положение резиновой трубки. Объясните оба изменения.

§ 26

РАБОТА СИЛЫ. МОЩНОСТЬ

Изучая механическое движение, мы ввели понятие импульса тела и познакомились с одним из фундаментальных физических законов — законом сохранения импульса. Однако не во всех случаях закон сохранения импульса пригоден для оценки изменения состояния тел. Например, после столкновения двух одинаковых свинцовых шаров, движущихся навстречу друг другу с одинаковыми скоростями, шары останавливаются и, кроме того, их температура увеличивается. С помощью импульса нельзя охарактеризовать происходящее в данном случае «превращение» механического движения шаров в тепловое движение молекул. В 7 и 8 классах вы уже встречались с физической величиной, способной охарактеризовать подобное «превращение». Энергия — самая важная сохраняющаяся величина не только в механике, но и в физике вообще.

Прежде чем начать подробно говорить об энергии, необходимо остановиться на важной физической величине — *работе силы*, с которой энергия тесно связана.

Напомним, что работа совершается в процессе движения тела под действием приложенной к нему силы. Так, сила тяжести совершает работу при падении яблока с дерева. Одновременно совершает работу и сила сопротивления воздуха. Когда расправляется согнутая мальчиком ветка дерева, работу совершает сила упругости.



При сгибании мальчиком ветки яблони сила упругости совершает работу

Работа постоянной силы при прямолинейном движении тела — это физическая величина, равная произведению модулей силы, перемещения и косинуса угла между ними.

$$A = F s \cos \alpha.$$

$$A = F s \cos \alpha$$

Единицей работы в СИ является джоуль (Дж). За единицу работы принимают работу, которую совершает сила 1 Н на пути 1 м при условии, что угол между силой и перемещением $\alpha = 0^\circ$.

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Работа силы может быть как положительной, так и отрицательной, в зависимости от знака косинуса угла между силой и перемещением. Если $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$, то $\cos \alpha > 0$ и работа положительна (положительную работу совершает сила тяжести, действующая на санки, скатывающиеся с горы) (рис. 88, а). При $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ $\cos \alpha < 0$ и работа отрицательна (отрицательную работу совершает сила тяжести, действующая на санки, которые тянут в гору) (рис. 88, б). При $\alpha = 90^\circ$ (сила перпендикулярна перемещению) $\cos \alpha = 0$ и работа не совершается. Так, сила тяжести не совершает ра-

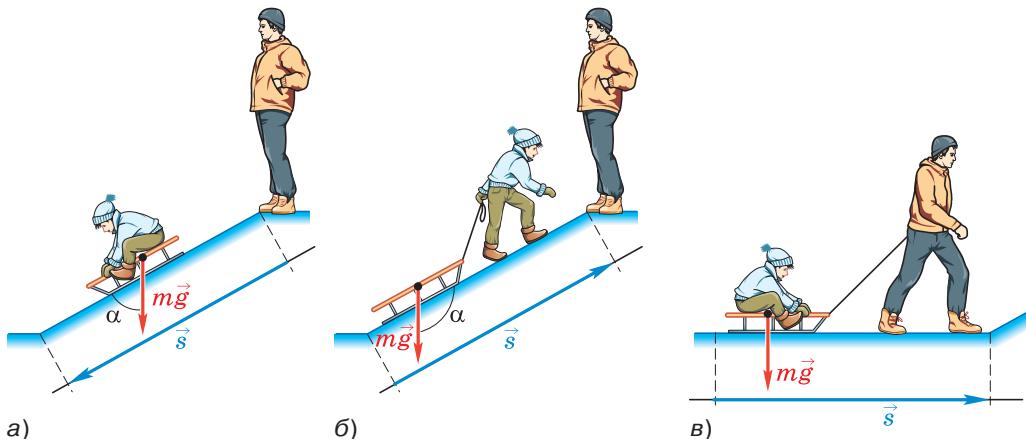


Рис. 88. Работа силы в зависимости от угла между силой и перемещением может быть:
а — положительной; б — отрицательной; в — равной нулю

боты при перемещении санок по горизонтальной дороге (рис. 88, в).

На практике чаще встречаются ситуации, когда движение тела не прямолинейное, а действующая на него сила изменяется. В таком случае для вычисления работы разбивают траекторию на малые участки, на каждом из которых силу можно считать постоянной, а сами участки прямолинейными. Работу вычисляют для каждого малого перемещения и суммируют результаты.

Рассмотрим два важных примера: рассчитаем работу силы тяжести и работу силы упругости.

Пусть шарик массой m падает с высоты h_1 на поверхность стола, находящуюся на уровне h_2 от пола (рис. 89, а). В каждой точке траектории сила тяжести, действующая на него, постоянна по модулю ($F_{\text{тяж}} = mg$) и по направлению (направлена вертикально вниз). Перемещение шарика $s = h_1 - h_2$. Тогда работа силы тяжести будет равна $A = mgh_1 - mgh_2$.

Теперь отпустим шарик с высоты h_1 по наклонной плоскости (рис. 89, б). Работа силы тяжести в этом случае равна $A = mgscos \alpha = mgh_1 - mgh_2$.

Если предоставить телу возможность двигаться из точки 1 в точку 2 по произвольной траектории (1a2 или 1b2, рис. 89, в), то и в этом

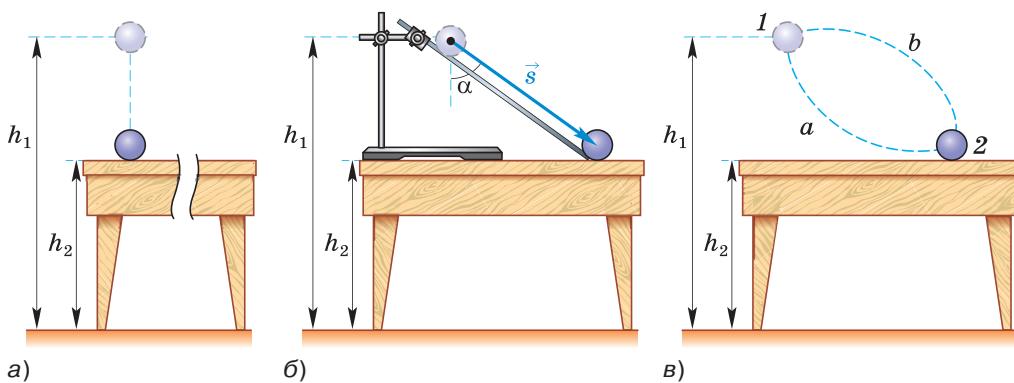


Рис. 89. Работа силы тяжести не зависит от формы траектории

$$A = mgh_1 - mgh_2$$

случае, разбив траекторию на малые участки, можно доказать, что работа силы тяжести будет равна

$$A = mgh_1 - mgh_2.$$

Таким образом, *работа силы тяжести не зависит от формы траектории*.

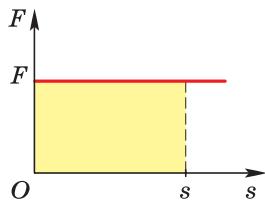


Рис. 90. Если направления постоянной силы и перемещения совпадают, работа силы численно равна площади прямоугольника со сторонами s и F

Для работы можно дать наглядное графическое представление. Пусть тело совершает перемещение \vec{s} в направлении действия постоянной силы \vec{F} . На графике зависимости модуля силы от модуля перемещения (рис. 90) площадь закрашенного прямоугольника $S = Fs$, что численно равно работе, которую совершила сила F , переместив тело на расстояние s : $A = Fs$.

Обратимся к более сложному случаю, когда сила, действующая на прямолинейно движущееся тело, изменяется по модулю. Применив тот же приём, что и при вычислении перемещения тела при прямолинейном равнускоренном движении (см. § 7), можно доказать, что и в этом случае работа силы численно равна площади фигуры, ограниченной графиком $F(s)$, осью абсцисс и перпендикулярами, восстановленными из точек, соответствующих координатам тела. Воспользуемся этим обстоятельством для вычисления работы силы упругости.

Пусть горизонтально расположенная сжатая пружина жёсткостью k одним концом прикреплена к стене, а другим — к грузу, лежащему на гладком горизонтальном столе (рис. 91). Какую работу совершил сила упругости при уменьшении деформации пружины от x_1 до x_2 ($x_1 > x_2$)?

В первоначальном положении пружина сжата на величину x_1 и модуль силы упругости, действующей на груз, равен $F_{\text{упр}1} = kx_1$. Когда под действием пружины груз переместится на расстояние s ,

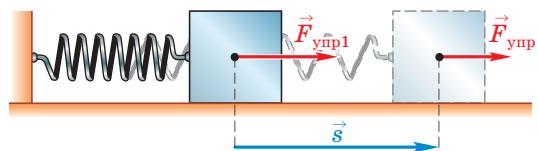


Рис. 91. При уменьшении деформации пружины сила упругости совершаает работу

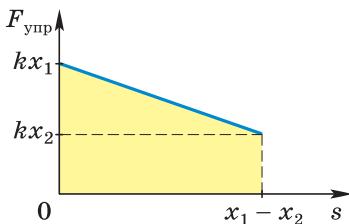


Рис. 92. Работа силы упругости равна площади прямоугольной трапеции с основаниями kx_1 , kx_2 и высотой $x_1 - x_2$

$$A = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}$$

Можно доказать, что данное выражение для работы силы упругости справедливо независимо от того, по какой траектории движется конец пружины между начальным и конечным положениями. Таким образом, сила упругости обладает тем же свойством, что и сила тяжести: её работа не зависит от формы траектории.

Если тело или система тел могут совершить работу, то говорят, что они обладают энергией.

На практике бывает важно знать, насколько быстро может быть совершена работа. Как вам известно из курса 7 класса, скорость совершения работы характеризуется **мощностью**:

$$N = \frac{A}{t}$$

$$N = \frac{A}{t},$$

где t — время, за которое совершена работа.

Единицей мощности в СИ является *ватт* (Вт): 1 Вт = 1 Дж/с.

Пример. Мальчик тянет санки за верёвку с силой 60 Н. Верёвка образует с горизонтом угол 60° . Какую работу совершил мальчик, переместив санки на 30 м?

деформация пружины уменьшится до x_2 и модуль силы упругости будет равен $F_{\text{упр}} = k(x_1 - s)$. Построив график зависимости $F_{\text{упр}}(s)$, получим прямую, проходящую через точки $(0; kx_1)$ и $(x_1 - x_2; kx_2)$.

Искомая работа будет равна площади закрашенной трапеции (рис. 92):

$$A = \frac{kx_1 + kx_2}{2}(x_1 - x_2) = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}.$$

Если деформация пружины изменяется от x_1 до x_2 , работа силы упругости определяется выражением:

$$A = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}.$$

Дано:

$$F = 60 \text{ Н}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$s = 30 \text{ м}$$

$$A — ?$$

Решение:

Так как санки движутся поступательно, будем считать их материальной точкой. Систему отсчёта свяжем с Землёй.

Запишем выражение для работы силы F :

$$A = F s \cos \alpha.$$

$$A = 60 \text{ Н} \cdot 30 \text{ м} \cdot \cos 60^\circ = 900 \text{ Дж.}$$

Ответ: $A = 900 \text{ Дж.}$



1. Что называют работой силы?
2. В каких случаях работа силы положительна; отрицательна; равна нулю? Приведите примеры.
3. Как определить работу изменяющейся силы?
4. Чему равна работа силы тяжести?
5. Чему равна работа силы упругости при растяжении пружины на величину $\Delta x = x_2 - x_1$?
- 6*. Покажите на конкретных примерах, что работа силы зависит от выбора системы отсчёта.



Перемещая груз с помощью неподвижного блока, человек выполняет работу, хотя иногда прилагает силу перпендикулярно направлению движения груза. Объясните кажущееся противоречие.



УПРАЖНЕНИЕ 25

1. Сплавщик передвигает багром бревно, прилагая к багру силу 20 Н. Какую работу совершил сплавщик, переместив бревно на 3 м, если угол между направлением силы и перемещения 45° ?
2. Вычислите работу, которую совершила лошадь, везущая сани массой 300 кг на расстояние 3 км. Коэффициент трения металла о снег равен 0,02. Движение считать равномерным.
3. Мальчик растягивает пружину на 5 см и совершает при этом работу 1,25 Дж. Определите жёсткость пружины.
4. Подъёмный кран поднимает груз массой 3 т со скоростью 0,1 м/с. Определите мощность, развиваемую двигателем крана.

§ 27

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ И КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

В предыдущем параграфе мы выяснили, что поднятое над поверхностью Земли тело, а также деформированная пружина способны совершить работу. При этом работа силы тяжести и силы упругости не зависит от формы траектории тела, а определяется только его начальным и конеч-

ным положениями. Такие силы называют *консервативными*. Работа консервативных сил по замкнутой траектории равна нулю.

Работа консервативных сил равна взятому с обратным знаком изменению величины, которую называют *потенциальной энергией*. Так, в случае силы тяжести работа равна изменению с обратным знаком величины $E_{\text{п}} = mgh$ ($A = mgh_1 - mgh_2$). Это и есть *потенциальная энергия взаимодействия тела с Землёй* вблизи её поверхности. Можно записать:

$$A = E_{\text{п1}} - E_{\text{п2}} = -(E_{\text{п2}} - E_{\text{п1}}) = -\Delta E_{\text{п}}.$$

При совершении силой тяжести положительной работы (при падении тела) потенциальная энергия системы убывает вследствие уменьшения высоты. При движении же тела вверх работа силы тяжести отрицательна, а потенциальная энергия возрастает.

Как мы показали ранее, работа силы упругости определяется изменением с обратным знаком величины $E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$ ($A = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}$). Значит, *потенциальная энергия упруго деформированной пружины* $E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$, где x — величина деформации (растяжения или сжатия), k — жёсткость пружины.

И, так же как для работы силы тяжести, можно записать

$$A = -(E_{\text{п2}} - E_{\text{п1}}) = -\left(\frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}\right) = -\Delta E_{\text{п}}.$$

Обратим внимание на то, что уравнение $A = -(E_{\text{п2}} - E_{\text{п1}})$ определяет потенциальную энергию $E_{\text{п}}$ неоднозначно. Если мы добавим к ней любую постоянную величину, то работа не изменится, так как не изменится разность потенциальных энергий. Только эта разность имеет физический смысл. Ни одно явление в природе или технике не определяется значением самой потенциальной энергии.

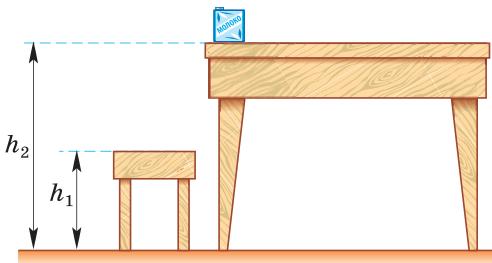


Рис. 93. Потенциальная энергия зависит от выбора нулевого уровня

При решении конкретной задачи мы можем произвольно выбрать «нулевой уровень» — *состояние системы, в котором её потенциальная энергия будет считаться равной нулю*. Так, потенциальную энергию пакета молока (системы «пакет молока — Земля») можно определить относительно пола, относительно табурета или стола (рис. 93).

Если за нулевой уровень принять уровень пола, потенциальная энергия пакета молока будет равна $E_{\text{п}} = mgh_2$, если отсчитывать потенциальную энергию от уровня табурета, то $E_{\text{п}} = mg(h_2 - h_1)$, а если от уровня стола, то $E_{\text{п}} = 0$. При этом работа $A = E_{\text{п1}} - E_{\text{п2}}$, которую совершил сила тяжести при падении пакета молока на пол, не будет зависеть от выбора нулевого уровня.

Иначе обстоит дело с силой трения. Эта сила не является консервативной, её работа зависит от формы траектории тела. Сравним работу силы тяжести и работу силы трения при движении санок по замкнутой траектории: санки съехали с горы, а потом их опять втащили на горку на прежнюю высоту. В этом случае работа силы тяжести равна нулю ($A = mgh - mgh$), а работа силы трения отлична от нуля, так как отрицательна и при движении санок вниз, и при их движении вверх.

Мы познакомились с потенциальной энергией — величиной, которая определяется взаимным положением взаимодействующих тел. Но тела могут обладать энергией (способны совершить работу) не только потому, что они занимают определённое положение, но и потому, что движутся.

Так, катящийся шар способен сжать пружину, движущийся молоток — забить гвоздь, летящая пуля — пробить доску. Во всех этих случаях совершается работа, а скорости тел (шара, молотка, пули) уменьшаются.

Вычислим работу постоянной силы \vec{F} , действующей на тело массой m , в случае, когда тело движется прямолинейно в направлении действия силы.

Предположим, что в течение некоторого времени t тело прошло путь s , а его скорость возросла от v_1 до v_2 . В данном случае пройденный телом путь равен модулю перемещения, поэтому сила F совершает работу, равную $A = Fs$. Согласно второму закону Ньютона, $F = ma$. При равноускоренном движении

$$s = v_1 t + \frac{at^2}{2} = \frac{v_1(v_2 - v_1)}{a} + \frac{a(v_2 - v_1)^2}{2a^2} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a}.$$

Подставив в формулу работы выражения для силы и перемещения, получим:

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

Работа силы \vec{F} равна изменению величины $E_k = \frac{mv^2}{2}$, которую называют **кинетической энергией тела**.

Оказывается, полученное соотношение остаётся справедливым и в том случае, когда переменная по модулю и направлению сила действует на криволинейном участке траектории. Более того, результат может быть обобщён и на случай произвольной системы тел (материальных точек). Под кинетической энергией системы тел понимают сумму кинетических энергий тел, из которых эта система состоит.

Суммарная работа всех сил, действующих на тела системы, равна изменению кинетической энергии этой системы.

$$A = E_{k2} - E_{k1}.$$

Это утверждение называют **теоремой об изменении кинетической энергии**.

$$A = E_{k2} - E_{k1}$$

Если силы совершают положительную работу $A > 0$, то $E_{k2} > E_{k1}$, т. е. кинетическая энергия системы увеличивается. Если же суммарная работа действующих на систему сил отрицательна $A < 0$, то $E_{k2} < E_{k1}$ — кинетическая энергия системы уменьшается.



1. Какую энергию называют потенциальной? 2. От чего зависит значение потенциальной энергии тела, поднятого над землёй? 3. По какой формуле можно рассчитать потенциальную энергию сжатой пружины? 4. Почему потенциальную энергию называют энергией взаимодействия? 5. Какую энергию называют кинетической? 6. Сформулируйте теорему об изменении кинетической энергии.



Скорость — величина относительная, её значение в разных системах отсчёта различно. Зависит ли от выбора системы отсчёта значение кинетической энергии?



УПРАЖНЕНИЕ 26

1. На балконе лежат мяч массой 300 г и гантеля массой 1 кг. Какое тело обладает большей потенциальной энергией относительно поверхности Земли?
2. Кинетическая энергия какого автомобиля больше: грузового или легкового?
3. Пружину динамометра сжали на 2 см. Определите потенциальную энергию пружины, если её жёсткость 120 Н/м. Какую работу надо совершить, чтобы сжать пружину ещё на 2 см?
4. Брусок подняли с земли на высоту 2 м. На сколько изменилась его энергия, если масса бруска 700 г?
5. На горе какой высоты относительно дороги должна находиться машина массой 1000 кг, чтобы её потенциальная энергия была такой же, как кинетическая энергия при движении машины со скоростью 20 м/с?
6. Пуля массой 3 г пробила деревянную плиту. Определите работу силы трения, если скорость пули изменилась от 400 до 100 м/с.

§ 28

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Рассмотрим, как изменяется механическая энергия тел, взаимодействующих только друг с другом. Такие системы, как вы уже знаете, называют замкнутыми.

Пусть замкнутая система такова, что помимо консервативных сил (тяготения и упруго-

сти) между телами действуют ещё и неконсервативные силы (например, силы трения). При изменении положения тел системы консервативные силы совершают работу

$$A_{\text{кс}} = E_{\text{п1}} - E_{\text{п2}},$$

где $E_{\text{п1}}$ и $E_{\text{п2}}$ — соответственно начальное и конечное значения потенциальной энергии системы.

Обозначим через $A_{\text{нкс}}$ суммарную работу, совершаемую за рассматриваемый промежуток времени неконсервативными силами. Согласно теореме об изменении кинетической энергии

$$A_{\text{кс}} + A_{\text{нкс}} = E_{\text{к2}} - E_{\text{к1}},$$

где $E_{\text{к1}}$ и $E_{\text{к2}}$ — соответственно начальное и конечное значения кинетической энергии системы.

Значит, $E_{\text{п1}} - E_{\text{п2}} + A_{\text{нкс}} = E_{\text{к2}} - E_{\text{к1}}$, откуда

$$(E_{\text{к2}} + E_{\text{п2}}) - (E_{\text{к1}} + E_{\text{п1}}) = A_{\text{нкс}}.$$

Сумму кинетической и потенциальной энергии системы называют **механической энергией системы**. Полученное равенство выражает **закон изменения механической энергии**:

изменение механической энергии замкнутой системы тел равно работе неконсервативных сил, действующих внутри системы.

Если же неконсервативные силы отсутствуют, то, очевидно, изменение механической энергии системы равно нулю. Отсюда вытекает **закон сохранения механической энергии**:

механическая энергия замкнутой системы тел остаётся постоянной (сохраняется), если между телами системы действуют только консервативные силы.

$$E_{\text{к1}} + E_{\text{п1}} = E_{\text{к2}} + E_{\text{п2}}.$$

$$E_{\text{к1}} + E_{\text{п1}} = \\ = E_{\text{к2}} + E_{\text{п2}}$$

Потенциальная и кинетическая энергия замкнутой системы, в которой действуют только консервативные силы, могут изменяться, переходя друг в друга. При уменьшении энергии одного вида на столько же увеличивается энергия другого вида, благодаря чему их сумма остаётся неизменной.

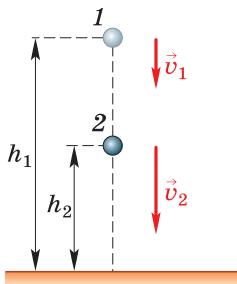


Рис. 94. Свободное падение шарика на землю с некоторой высоты

Рассмотрим случай свободного падения вблизи поверхности Земли маленького стального шарика. В замкнутой системе тел «шарик — Земля» (влиянием других тел на систему пренебрегаем) механическая энергия сохраняется, поскольку внутри системы действуют силы тяготения (консервативные силы). Пусть на высоте h_1 (рис. 94) шарик массой m имеет скорость \vec{v}_1 относительно Земли, а на высоте h_2 — скорость \vec{v}_2 . Тогда для кинетической и потенциальной энергии системы в положениях шарика 1 и 2 получим:

$$E_{\text{к1}} = \frac{mv_1^2}{2}, E_{\text{п1}} = mgh_1,$$

$$E_{\text{к2}} = \frac{mv_2^2}{2}, E_{\text{п2}} = mgh_2.$$

Закон сохранения механической энергии запишется следующим образом:

$$\frac{mv_1^2}{2} + mgh_1 = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2.$$

При падении шарика вниз под действием силы тяжести его скорость увеличивается, а расстояние от шарика до поверхности Земли уменьшается. Согласно закону сохранения механической энергии, кинетическая энергия системы тел «шарик — Земля» возрастает на ту же величину, на какую уменьшается её потенциальная энергия.

Если в системе действуют силы трения, механическая энергия не сохраняется, а уменьшается. Однако это не означает, что энергия исчезает бесследно. Происходит преобразова-

ние механической энергии во внутреннюю, что приводит к нагреванию трущихся тел.

Рассмотрим применение закона сохранения механической энергии для решения задач.

Пример 1. Яблоко массой 200 г падает с дерева с высоты 3 м. Какой кинетической энергией оно будет обладать на высоте 1 м от земли?

Дано:	СИ	Решение:
$m = 200 \text{ г}$	0,2 кг	Запишем закон сохранения механической энергии для замкнутой системы тел «яблоко — Земля»:
$h_1 = 3 \text{ м}$		$E_{\text{п1}} + E_{\text{к1}} = E_{\text{п2}} + E_{\text{к2}}$.
$h_2 = 1 \text{ м}$		
$v_1 = 0$		Поскольку
$g = 10 \text{ м/с}^2$		
$E_{\text{к2}} — ?$		

$$E_{\text{к1}} = \frac{mv_1^2}{2} = \frac{m \cdot 0}{2} = 0, \text{ то } E_{\text{п1}} = E_{\text{п2}} + E_{\text{к2}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{\text{к2}} = E_{\text{п1}} - E_{\text{п2}} = mgh_1 - mgh_2 = mg(h_1 - h_2).$$

$$E_{\text{к2}} = 0,2 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot (3 \text{ м} - 1 \text{ м}) = 4 \text{ Дж.}$$

Ответ: $E_{\text{к2}} = 4 \text{ Дж.}$

Пример 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 не учитывайте.)

Дано:	Решение:
$h_1 = 1,8 \text{ м}$	Поскольку скорость отскочившего от земли мяча в момент его подъёма на максимальную высоту равна нулю, то по закону сохранения механической энергии для замкнутой системы тел «мяч — Земля»:
$v_1 = 8 \text{ м/с}$	
$v_2 = 0$	
$g = 10 \text{ м/с}^2$	
$h_2 — ?$	

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

Преобразуем уравнение и выразим h_2 :

$$m \left(gh_1 + \frac{v_1^2}{2} \right) = mgh_2 \Rightarrow h_2 = \frac{2gh_1 + v_1^2}{2g}.$$

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

Ответ: $h_2 = 5 \text{ м.}$



- 1.** Что называют механической энергией системы? **2.** В чём заключается закон изменения механической энергии? **3.** Сформулируйте закон сохранения механической энергии. Запишите его в виде уравнения. **4.** Может ли меняться с течением времени потенциальная или кинетическая энергия замкнутой системы?



При спуске по канату рекомендуется двигаться, перехватывая его руками, а не скользя руками по поверхности каната. Почему?



УПРАЖНЕНИЕ 27

- Решите рассмотренную в параграфе задачу (*пример 2*) без использования закона сохранения механической энергии.
- Оторвавшаяся от крыши сосулька падает с высоты $h_0 = 36 \text{ м}$ от земли. Какую скорость v она будет иметь на высоте $h = 31 \text{ м}$? (Принять $g = 10 \text{ м/с}^2$.)
- Шарик вылетает из детского пружинного пистолета вертикально вверх с начальной скоростью $v_0 = 5 \text{ м/с}$. На какую высоту от места вылета он поднимется? (Принять $g = 10 \text{ м/с}^2$.)
- Один из мальчиков утверждал, что, спускаясь с горы высотой 20 м на лыжах, он развил скорость 100 км/ч. Правдоподобно ли его утверждение?

$$m_1 = 20 \text{ г}$$

$$v_1 = 2 \text{ м/с}$$

$$m_2 = 20 \text{ г}$$

$$v_2 = 2 \text{ м/с}$$



Рис. 95

- Сосулька массой 100 г падает с высоты 20 м. Чему равен её импульс в момент падения? Какова её кинетическая энергия?
- Пластилиновый шарик сталкивается с таким же шариком, движущимся навстречу ему с такой же скоростью (рис. 95). Чему равна скорость шариков после столкновения? Чему равно изменение кинетической энергии шариков в результате их столкновения?



ЗАДАНИЕ 9

- Придумайте способ определения скорости вытекания воды из шланга.

Вы узнали, в чём заключается основная задача механики, и познакомились с использованием законов Ньютона для её решения. Знаете закон сохранения импульса и закон сохранения механической энергии.

Вы понимаете, что характер движения определяется действующими на тело силами. Можете определить характеристики движения тела как аналитически (с помощью формул), так и графически.

Вы умеете распознавать физические модели в ситуациях, встречающихся в жизни, и понимаете границы применимости физических законов.

ОБСУДИМ? Ребята собрались поиграть в баскетбол. Андрей принёс мяч, Илья подержал мяч в руках и сказал, что его надо бы подкачать. Илья при этом заметил, что существуют стандарты для мяча, который падает с высоты 180 см свободно. Мяч должен после отскока подняться на высоту не менее 120 см и не более 160 см. Предложите схему эксперимента с использованием камеры смартфона, с помощью которого можно определить, соответствует ли мяч необходимым стандартам. Объясните, может ли мяч подскочить на высоту 180 см. Как с помощью того же оборудования определить, зависит ли высота отскока от давления воздуха внутри мяча?

ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

1. «Экспериментальное подтверждение справедливости условия криволинейного движения тел» (возможная форма: презентация, опыт).
2. «История развития искусственных спутников Земли. Научно-исследовательские задачи, решаемые современными спутниками» (возможная форма: презентация, реферат).

§ 29

КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ.
СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

В природе и технике широко распространено движение, которое называют *колебательным*. Колеблются ветви деревьев, струны музыкальных инструментов, мембрана телефона, фундаменты станков, мосты, провода, качели и т. д.

Колебательные движения происходят и в жизни нашей планеты и во Вселенной. Землетрясения, приливы и отливы, пульсации звёзд — примеры колебательных движений.

Колебания мы наблюдаем и в нашем организме. Так колеблются голосовые связки, сердечная мышца и т. д.

На рисунке 96 изображены тела, которые могут совершать колебательные движения, если их вывести из положения равновесия (т. е. отклонить или сместить от линии OO').

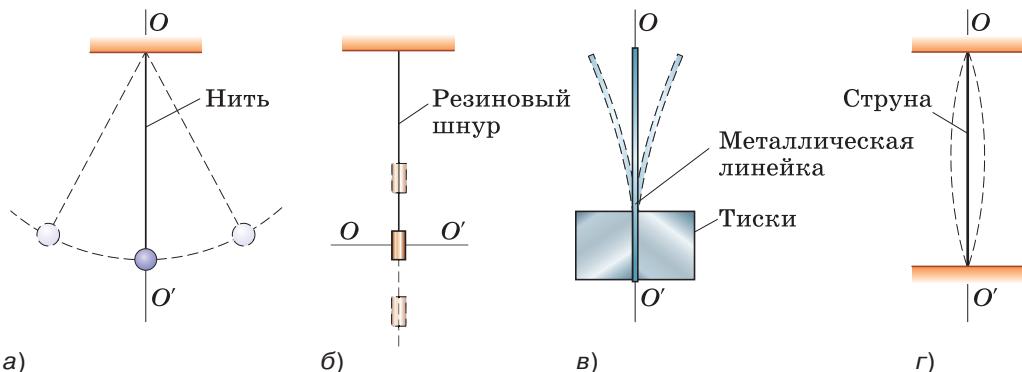


Рис. 96. Примеры тел, совершающих колебательные движения

В движении этих тел можно найти много различий. Например, шарик на нити (рис. 96, *а*) движется криволинейно, а цилиндр на резиновом шнуре (рис. 96, *б*) — прямолинейно; верхний конец линейки (рис. 96, *в*) колеблется с большим размахом, чем средняя точка струны (рис. 96, *г*). За одно и то же время одни тела могут совершать большее число колебаний, чем другие.

Но при всём разнообразии этих движений у них есть важная общая черта: *движение любого из этих тел через некоторое время повторяется точно или почти точно*.

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

Повторяющимися будут и движения остальных тел, изображённых на рисунке 96.

Повторяющиеся во времени движения, при которых тело многократно проходит положение равновесия то в одну, то в другую сторону, называют механическими колебаниями.

Если движение тела повторяется через *равные* промежутки времени, то колебания называют *периодическими*. Наименьший промежуток времени, через который движение повторяется, называют *периодом колебаний*.

Именно периодические колебания и будут предметом нашего изучения.

На рисунке 97 изображён шарик с отверстием, надетый на гладкую стальную струну и прикреплённый к пружине, другой конец которой закреплён неподвижно. Шарик может свободно скользить по струне, т. е. силы трения настолько малы, что не оказывают сущест-

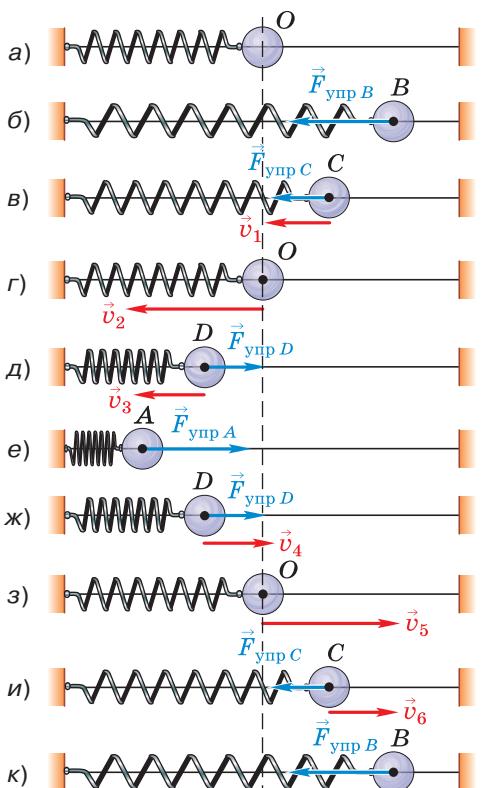


Рис. 97. Динамика свободных колебаний горизонтального пружинного маятника

венного влияния на его движение. Когда шарик находится в точке O (рис. 97, *a*), пружина не деформирована, поэтому никакие силы в горизонтальном направлении на него не действуют. Точка O — *положение равновесия шарика*.

Переместим шарик в точку B (рис. 97, *b*). Пружина при этом растягивается, и в ней возникнет сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}B}$. 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 начнёт 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 возрастать. При этом сила упругости с уменьшением деформации пружины будет уменьшаться (рис. 97, *c*).

Дойдя до положения равновесия (рис. 97, *г*), где сила упругости станет равна нулю, шарик не остановится, а пройдёт положение равновесия по инерции и продолжит 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. 97, *д*, *е*). Поскольку сила упругости на-

правлена против скорости шарика, то она тормозит его движение. В результате в точке *A* скорость шарика станет равной нулю. Сила упругости, направленная к точке *O*, будет продолжать действовать, поэтому шарик устремится обратно к положению равновесия и на участке *AO* его скорость будет возрастать (рис. 97, *е*, *ж*, *з*).

Движение шарика от точки *O* к точке *B* снова приведёт к растяжению пружины, вследствие чего опять возникнет сила упругости, *направленная к положению равновесия* и замедляющая движение шарика до полной его остановки (рис. 97, *з*, *и*, *к*). Таким образом, шарик совершил одно полное колебание. При этом *в каждой точке его траектории (кроме точки O) на него будет действовать сила упругости, направленная к положению равновесия*.

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

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

Свободные колебания всегда происходят в результате взаимодействия тел, образующих *колебательную систему*. В рассмотренном примере в колебательную систему входят шарик и пружина с закреплённым концом. В результате взаимодействия этих тел и возникает сила, возвращающая шарик к положению равновесия.

На рисунке 98 изображён шарик, который совершает свободные колебания под действием двух сил: силы тяжести и силы упругости ни-

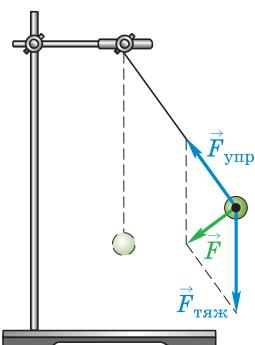


Рис. 98. Нитяной маятник

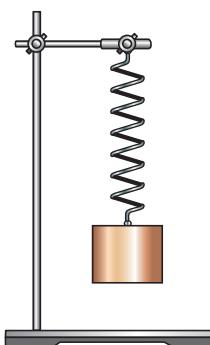


Рис. 99. Пружинный маятник

ти. Их равнодействующая направлена к положению равновесия. Колебательная система в данном случае состоит из шарика, нити с закреплённым концом и Земли (Земля на рисунке не показана).

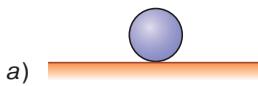
Системы тел, которые способны совершать свободные колебания, называют колебательными системами.

Одно из основных общих свойств всех колебательных систем заключается в наличии у них *положения устойчивого равновесия*. Тогда при выводе системы из положения равновесия возникают силы, стремящиеся вернуть её в это положение.

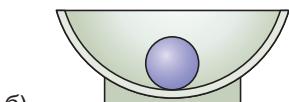
Рассмотренные колебательные системы называют *пружинным маятником* (см. рис. 97, 99) и *нитяным маятником* (см. рис. 98). Колебательное движение будем изучать в основном на примере этих систем.



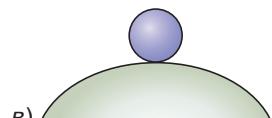
1. Что называют механическими колебаниями? 2. Пользуясь рисунком 97, объясните, почему по мере приближения шарика к точке O его скорость увеличивается, а по мере удаления от точки O скорость шарика уменьшается. 3. Почему шарик не останавливается, дойдя до положения равновесия? 4. Какие колебания называют свободными? 5. Какие системы называют колебательными? Назовите общее свойство колебательных систем. Приведите примеры таких систем.



а)
Шарик
на горизонтальной
поверхности



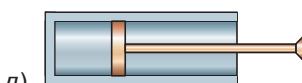
б)
Шарик на дне чаши



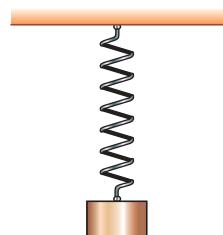
в)
Шарик на выпуклой
поверхности



г)
Тонкая ветка дерева



д)
Поршень в цилиндре
с газом



е)
Пружинный маятник

Рис. 100



Какие системы (рис. 100) являются колебательными, а какие нет? Какому требованию должна удовлетворять система тел, чтобы она являлась колебательной?



УПРАЖНЕНИЕ 28

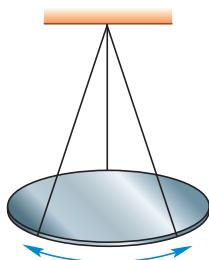


Рис. 101

- На рисунке 101 изображён металлический диск, подвешенный на трёх 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) возникла бы эта сила или нет, если бы диск не действовал на шнурь своим весом; в) какие тела входят в эту колебательную систему.
- Что общего в колебательном движении подвешенного к нити груза (см. рис. 96, а) и движении по окружности шара легкоатлетического молота (см. рис. 59)? Чем отличаются эти движения?

§ 30

ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Сравним колебания двух одинаковых маятников, изображённых на рисунке 102. Первый маятник колеблется с большим размахом, т. е.

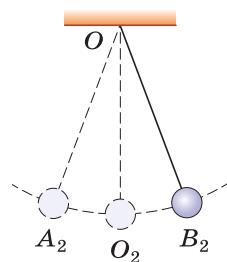
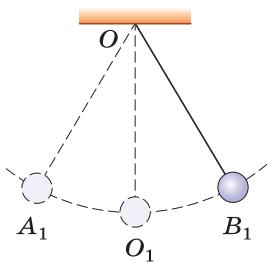


Рис. 102. Колебания маятников, происходящие с разной амплитудой

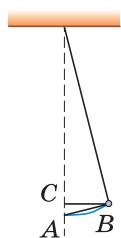


Рис. 103. При колебаниях с малой амплитудой длина дуги \widehat{AB} равна отрезку AB

его крайние положения находятся дальше от положения равновесия, чем у второго маятника.

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

Будем рассматривать колебания, происходящие с малыми амплитудами¹ (рис. 103), при которых длину дуги \widehat{AB} можно считать приблизительно равной длине отрезка AB и даже длине полухорды CB . Поэтому под амплитудой колебаний нитяного маятника можно понимать как дугу, так и любой из этих отрезков. Так, амплитуда колебаний первого маятника (см. рис. 102) равна O_1A_1 или O_1B_1 , а второго — O_2A_2 или O_2B_2 .

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 определённый центральный угол, т. е. угол с вершиной в центре окружности (в данном случае в точке O).

Амплитуда колебаний пружинного маятника (см. рис. 97) равна длине отрезка OB или OA .

Колеблющееся тело совершает одно полное колебание, если от начала колебаний проходит путь, равный четырём амплитудам. Например, переместившись из точки O_1 в точку B_1 , затем в точку A_1 и вновь в точку O_1 (см. рис. 102), шарик совершает одно полное колебание.

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

¹ В большинстве практических задач малой можно считать амплитуду, если угол отклонения не превышает 8° .

Период колебаний, как и период обращения, обозначают буквой T и измеряют в *секундах (с)*.

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

Число колебаний в единицу времени называют частотой колебаний.

Обозначается частота буквой v . За единицу частоты в СИ принимают частоту таких колебаний, при которых в секунду совершается одно полное колебание. Эта единица в честь немецкого учёного **Генриха Герца** (1857—1894) названа *герцем (Гц)*.

Допустим, в одну секунду маятник совершает два колебания, т. е. частота его колебаний равна 2 Гц (или $2 \frac{1}{\text{с}}$). Чтобы найти период колебаний, 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 колебаний T и частота колебаний v связаны следующей зависимостью:

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

Свободные колебания в отсутствие трения и сопротивления воздуха называют собственными колебаниями.

$$v = \frac{1}{T}$$

Оказывается, для большинства колебательных систем собственные колебания малой амплитуды происходят с частотой, зависящей только от параметров системы, но не зависящей от амплитуды колебаний. Эту частоту называют *собственной частотой колебательной системы*. Например, собственная частота

пружинного маятника зависит от массы груза и жёсткости пружины.

Рассмотрим колебания двух одинаковых маятников (рис. 104). В один и тот же момент времени верхний маятник из крайнего левого положения начинает движение вправо, а нижний 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, изображённые на рисунке 102, 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 ещё один случай. В момент, изображённый на рисунке 105, *а*, скорости обоих маятников направлены вправо. Но через некоторое время (рис. 105, *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. Формула для определения фазы в любой момент времени будет рассмотрена в старших классах.

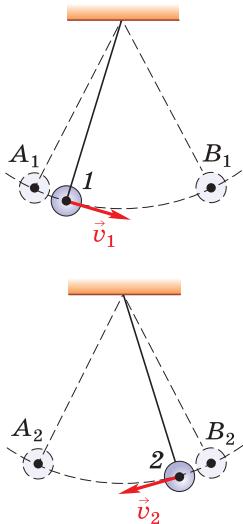


Рис. 104. Колебания маятников, происходящие в противоположных фазах

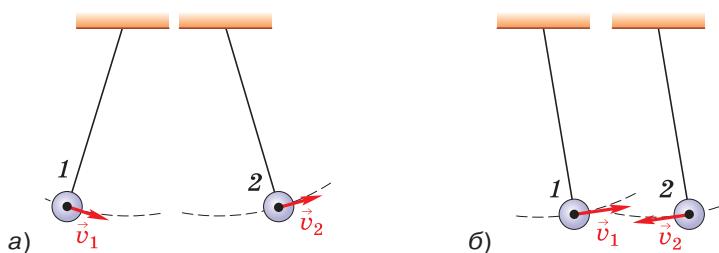


Рис. 105. Колебания маятников, происходящие с некоторой разностью фаз

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



- Что называют амплитудой колебаний; периодом колебаний; частотой колебаний? В каких единицах измеряется каждая из этих величин?
- Как связаны между собой период и частота колебаний?
- Какие колебания называют собственными?
- Что называют собственной частотой колебательной системы?



Предложите способы сообщения нитяному маятнику начального запаса энергии, необходимого для возбуждения колебаний. Механическую энергию какого вида получает при этом система?



УПРАЖНЕНИЕ 29

- На рисунке 106 изображены пары колеблющихся маятников. В каких случаях два маятника колеблются: в одинаковых фазах по отношению друг к другу; в противоположных фазах?

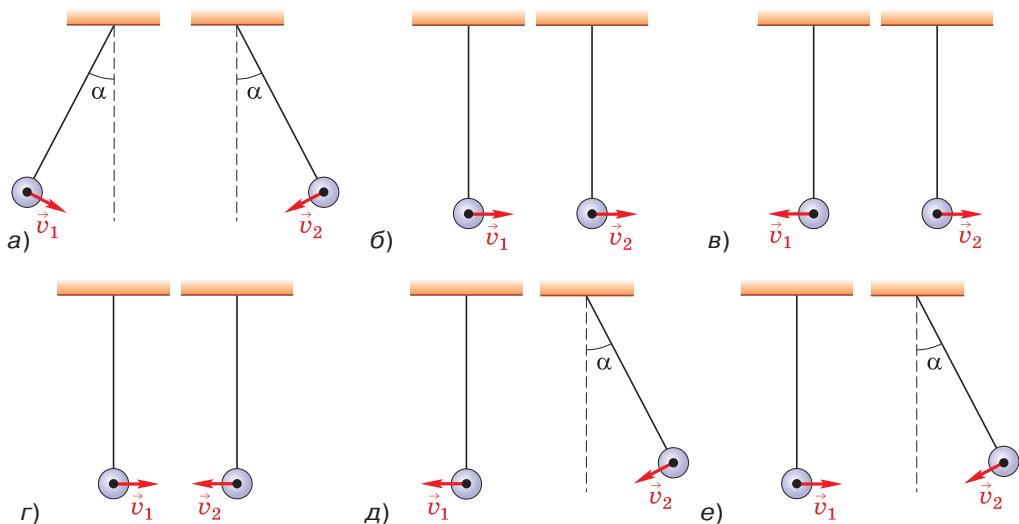


Рис. 106

- Частота колебаний стометрового железнодорожного моста равна 2 Гц. Определите период этих колебаний.
- Период вертикальных колебаний железнодорожного вагона равен 0,5 с. Определите частоту колебаний вагона.

- Маятник совершает 30 колебаний в минуту. Определите период и частоту колебаний.
- Амплитуда колебаний груза на пружине равна 3 см. Какой путь от положения равновесия пройдёт груз за время, равное $\frac{1}{4}T$; $\frac{1}{2}T$; $\frac{3}{4}T$; T ?
- Амплитуда колебаний груза на пружине равна 10 см, частота — 0,5 Гц. Какой путь пройдёт груз за 2 с?



ЗАДАНИЕ 10



- Изготовьте два одинаковых нитяных маятника. Проверьте, что при отклонении на один и тот же угол их периоды колебаний одинаковы. Уменьшите длину нити одного из маятников на 20% и определите, во сколько раз теперь различаются периоды колебаний.

§ 31

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.

Вы уже знаете, что под действием такой силы происходят колебания пружинного маятника, поэтому при определённых условиях они могут служить примером гармонических колебаний (в частности, при условии, что на них не оказывает заметного влияния сила трения).

С помощью опыта, изображённого на рисунке 107, выясним, 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 с маленьким отверстием снизу (например, воронку), а под него кладут длинную бумажную ленту. Сосуд с предварительно насыпанным в него

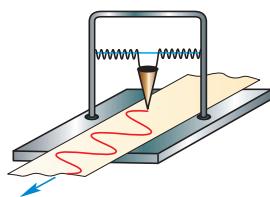


Рис. 107. Опыт по исследованию зависимости от времени координаты пружинного маятника, совершающего колебания

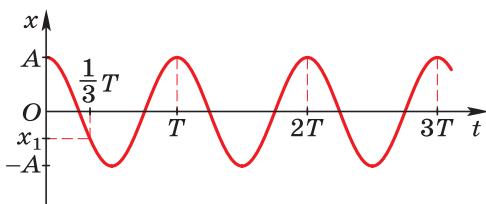


Рис. 108. График зависимости координаты колеблющегося пружинного маятника от времени

песком (или налитой красящей жидкостью) приводят в колебательное движение. Если ленту перемещать с постоянной скоростью в направлении, перпендикулярном плоскости колебаний, то на ней останется волнобразная дорожка из песка, каждая точка которой соответствует положению колеблющегося груза в тот момент, когда он проходил над ней.

На рисунке 108 показан вид полученной кривой. Её называют **косинусоидой** (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 .

Графиком зависимости координаты от времени при гармонических колебаниях является косинусоида (синусоида).

Из графика видно, что наибольшие отклонения груза от положения равновесия в обе стороны одинаковы по модулю и равны амплитуде колебаний A .

Маятник начал движение из крайней точки с координатой $x = A$. За время, равное периоду T , маятник совершил полное колебание, т. е., миновав положение равновесия, дошёл до противоположной крайней точки с координатой $x = -A$, изменил направление движения на противоположное и, вторично пройдя через положение равновесия, вернулся в ту же точку, из которой 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: $v = \frac{1}{T}$.

График (см. рис. 108) даёт 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 косинусоиду (синусоиду), т. е. координата меняется со временем по закону косинуса (синуса), то говорят, что и само тело, и координата совершают гармонические колебания.

На рисунке 109 изображён опыт, аналогичный рассмотренному выше (см. рис. 107), только для нитяного маятника. С помощью этого опыта можно показать, что и для нитяного маятника график зависимости координаты от времени тоже представляет собой косинусоиду, т. е. его колебания являются гармоническими.

Теоретически колебания нитяного маятника были бы строго гармоническими в том случае, если бы он представлял собой материальную точку, колеблющуюся без трения с малой амплитудой при не меняющемся со временем расстоянии от неё до точки подвеса. (Можно доказать, что 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 синуса или косинуса.)

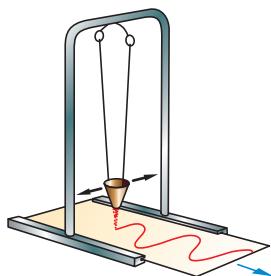


Рис. 109. Гармонические колебания нитяного маятника

Материальную точку, подвешенную на нерастяжимой невесомой нити, называют математическим маятником.

Итак, малые собственные колебания математического маятника являются гармоническими. Математический маятник — это абстрактная модель. Всякий реальный нитяной маятник представляет собой груз определённого размера на нити, которая деформируется при движении и имеет массу.

Практически колебания, близкие к гармоническим, совершают тяжёлый шарик (например, стальной), подвешенный на лёгкой и малорастяжимой нити, длина которой значительно больше диаметра этого шарика, при малой амплитуде и малом трении.

Нидерландский учёный *Христиан Гюйгенс* (1629—1695), исследуя закономерности колебаний маятника, установил, что период малых собственных колебаний математического маятника зависит от длины маятника и ускорения свободного падения:

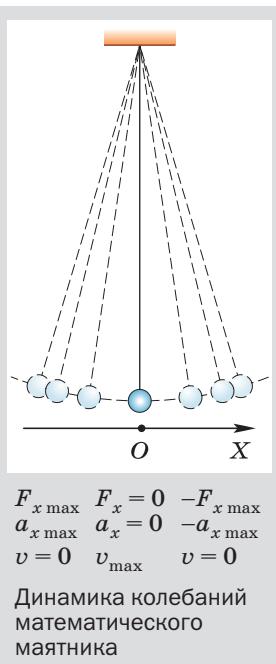
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Чем больше длина нити маятника, тем больше период колебаний и меньше частота.

Гармоническими являются малые собственные колебания пружинного маятника, если масса пружины мала по сравнению с массой груза. Период таких колебаний зависит от массы груза и жёсткости пружины:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

При совершении телом гармонических колебаний не только его координата, но и такие величины, как возвращающая сила, ускорение, скорость, тоже изменяются по закону синуса или косинуса. Это следует из законов, 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 следует, что проекции силы и ускорения достигают наибольших по модулю значений, когда колеблющееся тело находится в крайних положениях, где смещение наиболее велико, и равны нулю, когда тело проходит через положение равновесия.

Скорость же, наоборот, в крайних положениях равна нулю, а при прохождении телом положения равновесия достигает наибольшего значения.



1. Расскажите о цели, порядке выполнения и результатах опытов, изображённых на рисунках 107 и 109.
2. Чему соответствуют отрезки OA и OT на графике (см. рис. 108)?
3. Какие колебания называют гармоническими?
4. Что представляет собой модель математического маятника?
5. При каких условиях реальный нитяной маятник будет совершать колебания, близкие к гармоническим?
6. Как меняются возвращающая сила, ускорение и скорость тела при совершении им гармонических колебаний?



1. На рисунке 110 показан график зависимости координаты колеблющегося пружинного маятника от времени. Каким способом маятнику был сообщён начальный запас энергии? Как изменится график, если тем же способом сообщить этому маятнику больший начальный запас энергии?

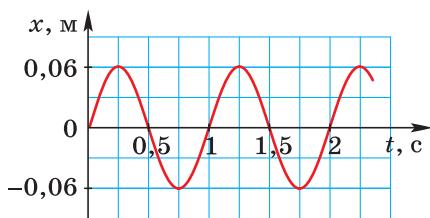


Рис. 110

2. Можно ли сказать, что: а) частота малых собственных колебаний математического маятника обратно пропорциональна длине нити; б) квадрат периода малых собственных колебаний пружинного маятника прямо пропорционален массе груза?



УПРАЖНЕНИЕ 30

1. Определите период, частоту и амплитуду колебаний по графику зависимости $x(t)$, приведённому на рисунке 110.
2. Как и во сколько раз нужно изменить длину нити, чтобы увеличить период колебаний математического маятника в 2 раза?
3. Заменив пружину в опыте по изучению колебаний пружинного маятника, мальчик получил период колебаний в 2 раза меньше. Что можно сказать о жёсткости второй пружины по сравнению с первой?



ЗАДАНИЕ 11



1. Спланируйте эксперимент с участием магнитных сил, имитирующих увеличение ускорения свободного падения и действующих на колеблющийся нитяной маятник. Проведите этот эксперимент и сделайте вывод о качественной зависимости периода колебаний от ускорения свободного падения.
2. Проведите исследование зависимости периода колебаний математического маятника от его массы.

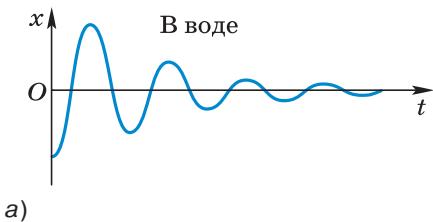
Указание. Создавая модель маятника, возьмите одинаковые по объёму шарики из разных материалов, чтобы сила сопротивления была одинаковая.

§ 32

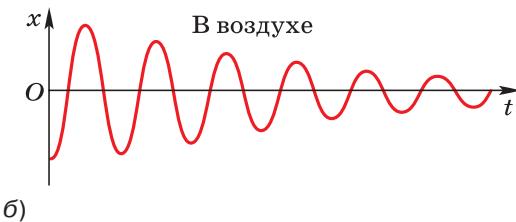
ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Рассматривая колебания маятника, мы считали, что его отклонения от положения равновесия в обе стороны одинаковы. Откуда это следует? Обратимся ещё раз к рисунку 97. Перемещая шарик из точки O (положения равновесия) в точку B , мы растягиваем пружину. При этом мы совершаем некоторую работу по преодолению силы 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, механическую энергию маятника ($E_{\text{п}} + E_{\text{к}}$) в любой момент времени можно считать одинаковой и равной той потенциальной энергии, которую мы изначально сообщили пружине, растянув её на длину отрезка OB . При этом маятник мог бы совершать колебания сколь угодно долго с постоянной амплитудой, равной OB .



а)



б)

Рис. 111. Графики зависимости смещения от времени при свободных колебаниях, происходящих в воде и в воздухе

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 называют **затухающими** (рис. 111).

Чем больше силы сопротивления движению, тем быстрее прекращаются колебания. Например, в воде колебания затухают быстрее, чем в воздухе (см. рис. 111).

Свободные колебания всегда затухающие, так как весь запас энергии, первоначально сообщённый колебательной системе, в конце концов тратится на совершение работы по преодолению сил трения и сопротивления среды (т. е. механическая энергия переходит во внутреннюю).

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, можно добиться того, чтобы колебания не затухали.



Вынужденные колебания качелей

Колебания, совершаемые телом под действием внешней периодически изменяющейся силы, называют вынужденными колебаниями.

Внешнюю, периодически изменяющуюся силу, вызывающую эти колебания, называют **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 счёт работы вынуждающей силы).

В большинстве случаев постоянная амплитуда вынужденных колебаний устанавливается не сразу, а спустя некоторое время после их начала.

Когда амплитуда вынужденных колебаний перестаёт меняться, говорят, что **колебания установились**.

Частота установившихся вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы.

Вынужденные колебания — **незатухающие**. Они происходят до тех пор, пока действует вынуждающая сила.



1. Что можно сказать о механической энергии колеблющегося маятника в любой момент времени, если допустить, что потерь энергии нет? Согласно какому закону это можно утверждать?
2. Как меняется с течением времени амплитуда свободных колебаний, происходящих в реальных условиях? В чём причина такого изменения?
3. Где быстрее прекратятся колебания маятника — в воздухе или в воде? Почему? (Начальный запас энергии в обоих случаях одинаков.)
4. Могут ли свободные колебания быть незатухающими? Почему? Что необходимо делать для того, чтобы колебания были незатухающими?
5. Что можно сказать о частоте установившихся вынужденных колебаний и частоте вынуждающей силы?
6. Как долго могут происходить вынужденные колебания?



Шарик переместили из точки O в точку B (см. рис. 97), отпустили, и он начал двигаться влево к точке O . Возможно ли, что из-за трения шарик остановится, не дойдя до точки O ? Ответ обоснуйте.



УПРАЖНЕНИЕ 31

1. Горизонтальный пружинный маятник, изображённый на рисунке 97, отвели в сторону и отпустили. Как меняются перечисленные в таблице величины при движении маятника на указанных участках его пути? Перечертите таблицу в тетрадь и заполните её.

Направление движения маятника	Сила упругости $F_{\text{упр}}$	Скорость v	Потенциальная энергия $E_{\text{п}}$	Кинетическая энергия E_{k}	Механическая энергия $E_{\text{п}} + E_{\text{k}}$	
					в реальных условиях (т. е. с трением)	в идеальных условиях (т. е. без трения)
От B к O						
От O к A						
От A к O						
От O к B						

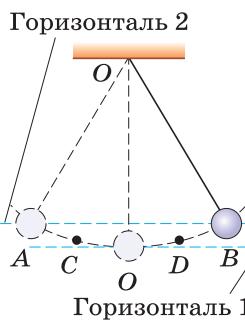


Рис. 112

2. На рисунке 112 изображён 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 отсчёта 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 ?
3. Шарик, подвешенный на нити, отклонили от положения равновесия так, что его высота над землёй увеличилась на 5 см, после чего он начал совершать колебания. С какой скоростью шарик в четвёртый раз пройдёт положение равновесия, если его колебания можно считать незатухающими?
4. Подвешенному на нити шарику сообщили в горизонтальном направлении скорость 1 м/с, после чего он начал совершать затухающие колебания. Через пять полных колебаний энергия системы уменьшилась в 2 раза. Чему равна скорость шарика в этот момент?



ЗАДАНИЕ 12



- Используя тонкие нити одинаковой длины и две гайки разной массы, сконструируйте два нитяных маятника. Определите экспериментально, колебания какого из них затухают быстрее. Объясните результат.

§ 33

РЕЗОНАНС

Приведём исторический факт, имеющий непосредственное отношение к теме данного параграфа.

В 1831 г. в Манчестере сильно раскачался и в результате этого обрушился Бротонский подвесной мост через реку Эруэлл, когда по нему проходил маршевым шагом (т. е. в ногу) небольшой отряд солдат.

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 113 изображены два маятника, висящие на общем шнуре. Длина маятника 2 неизменна, этой длине соответствует определённая 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 шнуря, 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.

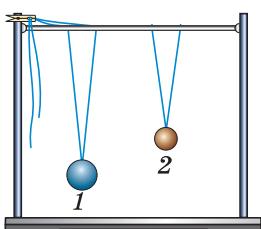


Рис. 113. Демонстрация зависимости амплитуды вынужденных колебаний маятников от частоты изменения вынуждающей силы

Под действием этой силы маятник 2 начнёт совершать вынужденные колебания.

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 v вынуждающей силы совпадёт с собственной частотой v_0 маятника 2. Маятники будут колебаться в одинаковых фазах.

Дальнейшее уменьшение длины маятника 1 приведёт к тому, что частота вынуждающей силы станет больше собственной частоты маятника 2. При этом амплитуда его колебаний начнёт уменьшаться.

На основании этого опыта можно сделать следующий вывод: **амплитуда установившихся вынужденных колебаний достигает своего наибольшего значения при условии, что частота v вынуждающей силы равна собственной частоте v_0 колебательной системы**. В этом заключается явление, называемое **резонансом**.

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 счёт работы вынуждающей силы. Например, чтобы посильнее раскачать качели, мы подталкиваем их таким образом, чтобы направление дейст-

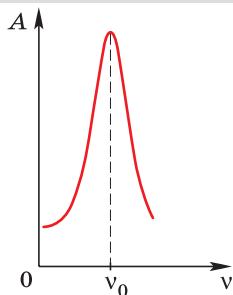


График зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы



При подталкивании качелей в направлении их движения энергия колебательной системы пополняется

вующей силы совпадало с направлением движения качелей.

Следует помнить, что понятие резонанса применимо только к вынужденным колебаниям.

Вернёмся теперь к случаю с обрушенным мостом. Очевидно, мост раскачался до большой амплитуды потому, что частота периодически действующей на него вынуждающей силы (идущих в ногу солдат) 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, причём в одних — полезную, в других — вредную. Его необходимо учитывать, в частности, в тех случаях, когда с помощью наименьшей периодической силы нужно получить определённый размах вынужденных колебаний. Например, тяжёлый язык большого колокола можно раскачать, действуя сравнительно небольшой силой с частотой, равной собственной частоте языка. Но мы не достигнем желаемого результата, действуя с другой частотой (не в такт), 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 колёс 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, устанавливают на массивном фундаменте, препятствуя возникновению колебаний всего станка.



- 1.** С какой целью и как проводился опыт с двумя маятниками, изображённый на рисунке 113? **2.** В чём заключается явление, называемое резонансом? **3.** К каким колебаниям — свободным или вынужденным — применимо понятие резонанса? **4.** Приведите примеры, показывающие, что в одних случаях резонанс может быть полезным явлением, а в других — вредным.



УПРАЖНЕНИЕ 32

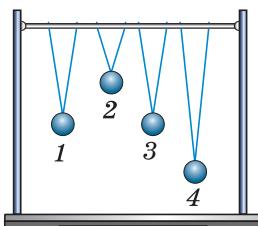


Рис. 114

- 1.** Маятник 3 (рис. 114) совершает свободные колебания.
 - а) Какие колебания — свободные или вынужденные — будут совершать при этом маятники 1, 2 и 4?
 - б) Каковы собственные частоты маятников 1, 2 и 4 по сравнению с частотой колебаний маятника 3?
 - в) Какой из маятников 1, 2 и 4 колеблется в резонанс с маятником 3? По каким признакам вы это определили?
- 2.** Вода, которую мальчик несёт в ведре, начинает сильно расплёскиваться. Мальчик меняет темп ходьбы (или просто «сбивает ногу»), и расплёскивание прекращается. Почему так происходит?
- 3.** Собственная частота качелей равна 0,5 Гц. Через какие промежутки времени нужно подталкивать их в одну сторону, чтобы раскачать как можно сильнее, действуя относительно небольшой силой?

§ 34

РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В СРЕДЕ. ВОЛНЫ

Рассмотрим опыт, показанный на рисунке 115. Длинную пружину подвешивают на нитях. Ударяют рукой по её левому концу (рис. 115, а). От удара несколько витков пружины сближаются, возникает сила упругости, под действием которой эти витки начинают расходитьсяся. Как маятник проходит в своём движении положение равновесия, так и витки, минуя положение равновесия, будут продолжать расходитьсяся. В результате в этом же месте пружины образуется уже некоторое разрежение (рис. 115, б). При ритмичном воздействии витки на конце пружины будут периодически то сближатьсяся, то отходить друг от друга, совершая колебания возле своего положения равновесия. Эти колебания постепенно передадут

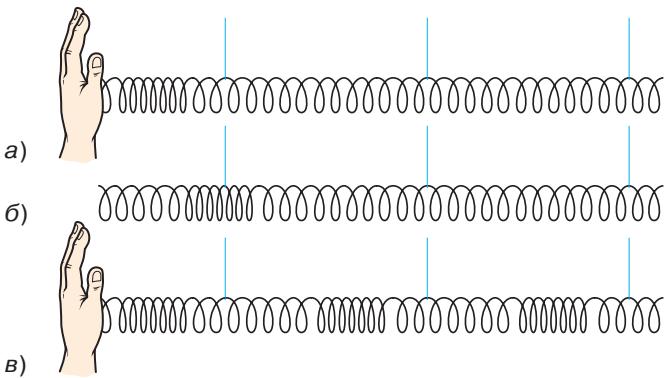


Рис. 115. Возникновение волны в пружине

ся от витка к витку вдоль всей пружины. По пружине распространяются сгущения и разрежения витков, как показано на рисунке 115, *в*.

Другими словами, вдоль пружины от её 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, называют волнами.

В данном определении речь идёт о так называемых *бегущих волнах*. Основное 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, и 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 остаётся на месте.

Таким образом, в бегущей волне происходит перенос энергии без переноса вещества.

В данной теме 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 нём возникнет упругая волна.

Помимо упругих существуют и другие виды волн, например электромагнитные волны (о них мы будем говорить в § 52). Волновые процессы встречаются почти во всех областях физических явлений, поэтому их изучение имеет большое значение.

При возникновении волн в пружине колебания её витков происходили вдоль направления распространения волны в ней (см. рис. 115).

Волны, в которых колебания происходят вдоль направления их распространения, называют продольными волнами.

Кроме продольных волн существуют и *перечные волны*. Рассмотрим опыт. Один конец длинного резинового шнура закреплён (рис. 116, а), а другой приводят в колебательное движение в вертикальной плоскости (перпендикулярно горизонтально расположенному шнуре). Благодаря силам упругости, возникающим в шнуре, колебания будут распространяться вдоль шнура. В нём возникают волны (рис. 116, б), причём колебания частиц шнура

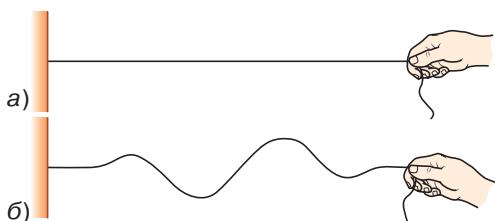


Рис. 116. Возникновение волн в шнуре

ра происходят перпендикулярно направлению распространения волн.

Волны, в которых колебания происходят перпендикулярно направлению их распространения, называют поперечными волнами.

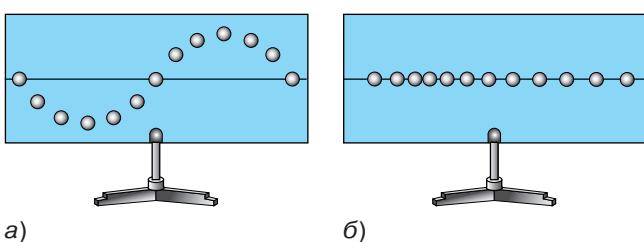
Движение частиц среды, в которой образуются как поперечные, так и продольные волны, можно наглядно продемонстрировать с помощью волновой машины (рис. 117). На рисунке 117, *а* показана поперечная волна, а на рисунке 117, *б* — продольная. Обе волны распространяются в горизонтальном направлении.

На волновой машине представлен только один ряд шариков. Но, наблюдая за их движением, можно понять, как распространяются волны в сплошных средах, протяжённых во всех трёх направлениях (например, в некотором объёме твёрдого, жидкого или газообразного вещества).

Для этого представьте себе, что каждый шарик является частью вертикального слоя вещества, расположенного перпендикулярно к плоскости рисунка. Из рисунка 117, *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*.

Известно, что упругие силы при сдвиге слоёв возникают только в твёрдых телах. В жидкостях и газах смежные слои свободно скользят друг по другу без появления противодействующих упругих сил. Поэтому распространение

Рис. 117. Демонстрация на волновой машине:
а — поперечная волна;
б — продольная волна



поперечных волн в жидкостях и газах невозможно. Поперечные волны могут распространяться только в твёрдых телах.

А продольные волны, как видно из рисунка 117, б, — это волны сжатия и растяжения. В этом случае деформация слоёв среды состоит в изменении их плотности, так что продольные волны представляют собой чередующиеся сгущения и разрежения.

При сжатии и растяжении (т. е. при изменении объёма участков тела) упругие силы возникают как в твёрдых телах, так и в жидкостях и газах. Поэтому продольные волны могут распространяться в любой среде — твёрдой, жидкой и газообразной.

Нередко волны, наблюдающиеся в природе, переносят большую энергию и могут стать причиной разрушений. От очага землетрясения в грунте и недрах Земли распространяются упругие волны, называемые *сейсмическими*. Они могут быть продольными и поперечными. Если землетрясение происходит вблизи морского дна, то оно может привести к *цунами* — высоким волнам, охватывающим всю толщу воды.



1. Что называют волнами? 2. В чём заключается основное свойство бегущих волн любой природы? Происходит ли в бегущей волне перенос вещества? 3. Что такое упругие волны? 4. Приведите пример волн, не относящихся к упругим. 5. Какие волны называют продольными; поперечными? Приведите примеры. 6. Какие волны — поперечные или продольные — являются волнами сдвига; волнами сжатия и разрежения? 7. Почему поперечные волны не распространяются в жидких и газообразных средах?

§ 35

ДЛИНА ВОЛНЫ. СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН

Рассмотрим более подробно процесс передачи колебаний от точки к точке при распространении поперечной волны. Для этого обратимся к рисунку 118, на котором показаны различные стадии процесса распространения поперечной

волны через промежутки времени, равные $\frac{1}{4}T$.

На рисунке 118, а изображена цепочка пронумерованных шариков. Это модель: шарики символизируют частицы среды. Будем считать, что между шариками, как и между частицами среды, существуют 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 четвёртый шарик отстает от первого на $\frac{1}{4}$ колебания (рис. 118, б). Ведь когда первый шарик прошёл $\frac{1}{4}$ часть пути полного колебания, максимально

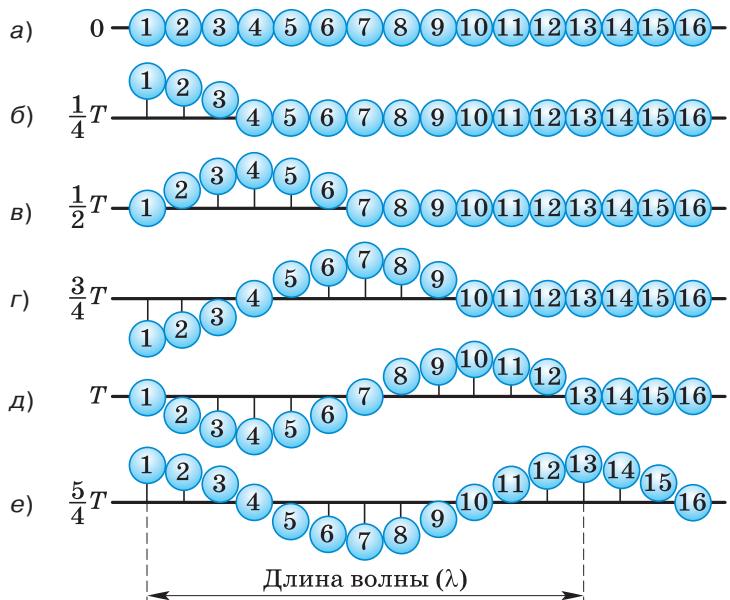


Рис. 118. Схема процесса распространения в пространстве поперечной волны

отклонившись вверх, четвёртый шарик только начинает движение из положения равновесия. Движение седьмого шарика отстает от движения первого на $\frac{1}{2}$ колебания (рис. 118, *в*), десятого — на $\frac{3}{4}$ колебания (рис. 118, *г*). Тринадцатый шарик отстает от первого на одно полное колебание (рис. 118, *д*), т. е. находится с ним в одинаковых фазах. Движения этих двух шариков совершенно одинаковы (рис. 118, *е*).

Расстояние между ближайшими друг к другу точками, колеблющимися в одинаковых фазах, называют длиной волны.

Длина волны обозначается греческой буквой λ («лямбда»). Расстояние между первым и тринадцатым шариками (см. рис. 118, *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 118 видно, что колебательный процесс распространился от первого шарика до тринадцатого, т. е. на расстояние, равное длине волны λ , за то же 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 $T = \frac{1}{v}$, то длина волны может быть выражена через скорость волны и частоту:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}.$$

$$\lambda = \frac{v}{\nu}$$

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

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:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

и

$$v = \lambda v.$$

$$v = \lambda v$$

Формулы для нахождения скорости волны справедливы как для поперечных, так и для продольных волн.

Образование продольной волны можно представить с помощью рисунка 119. На нём изображена (в разрезе) труба с поршнем. Поршень совершает колебания с небольшой амплитудой вдоль трубы. Его движения передаются 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.

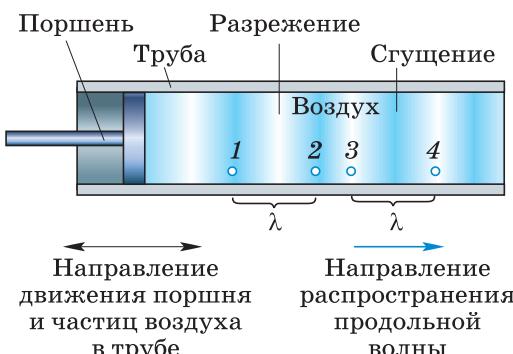


Рис. 119. Образование продольной волны в трубе при периодическом сжатии и разрежении воздуха поршнем



- 1.** Что называют длиной волны? **2.** За какое время колебательный процесс распространяется на расстояние, равное длине волны? **3.** По каким формулам можно рассчитать длину волны и скорость распространения поперечных и продольных волн? **4.** Расстояние между какими точками равно длине волны, изображённой на рисунке 119?



УПРАЖНЕНИЕ 33

- С какой скоростью распространяется волна в океане, если длина волны равна 270 м, а период колебаний равен 13,5 с?
- Определите длину волны при частоте 200 Гц, если скорость распространения волны равна 340 м/с.
- Лодка качается на волнах, распространяющихся со скоростью 1,5 м/с. Расстояние между двумя ближайшими гребнями волн равно 6 м. Определите период колебаний лодки.

§ 36

ИСТОЧНИКИ ЗВУКА. ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Полученные знания о колебаниях и волнах позволяют нам перейти к рассмотрению звуковых явлений.

Мир окружающих нас звуков разнообразен — голоса людей и музыка, пение птиц и жужжение пчёл, гром во время грозы и шум леса на ветру, звук проезжающих автомобилей, самолётов и т. д. *Источниками звука являются колеблющиеся тела, а распространение механических колебаний в пространстве — это механическая волна.* Таким образом, *звук является механической волной.*

Рассмотрим различные источники звука.

На рисунке 120 изображена укреплённая в тисках упругая металлическая линейка. Если её свободную часть, длина которой подобрана определённым образом, привести в колебательное движение (крайние положения колеблющейся линейки показаны штриховыми линиями), то линейка будет издавать звук. В данном случае колебания источника звука очевидны.



Рис. 120. Пример источника звука

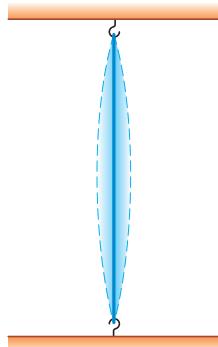


Рис. 121. Звучащая струна, концы которой закреплены, совершают колебания

Теперь обратимся к рисунку 121. На нём изображена звучащая струна, концы которой закреплены. Размытые очертания этой струны и кажущееся утолщение в середине свидетельствуют о том, что струна колеблется. Если к звучащей струне приблизить конец бумажной полоски, то полоска будет подпрыгивать от толчков струны. Пока струна колеблется, слышен звук; остановим струну, и звук прекращается.

Прибор, изображённый на рисунке 122, называют **камертоном**. Он представляет собой изогнутый металлический стержень на ножке. В данном случае камертон укреплён на резонаторном ящике (о его назначении вы узнаете из § 39).

Заставим колебаться ветви камертона, ударив по камертону мягким молоточком или проведя по нему смычком. Мы услышим звук. Амплитуда и период колебаний ветвей камертона малы, поэтому их движение трудно заметить. Чтобы обнаружить это движение, используем лёгкий шарик, подвешенный на нити. Поднеся его к ветви звучащего камертона, увидим, что шарик отскакивает от неё. Значит, ветви камертона колеблются.

На рисунке 123 показано, как можно «запись» 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 остриём.

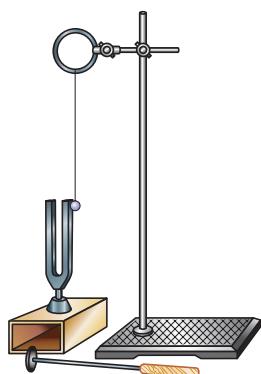


Рис. 122. Обнаружение колебаний ветвей звучащего камертона

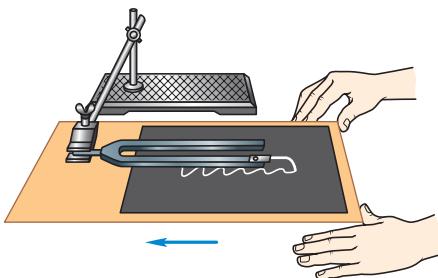


Рис. 123. Запись колебаний ветви камертона



Дельфины излучают и используют ультразвук для общения друг с другом: предупреждения сородичей об опасности, обнаружение косяков рыбы



Для летучих мышей ультразвук является средством ориентации в пространстве, обнаружения добычи



Медузы чувствуют приближение шторма благодаря улавливанию создаваемой им инфразвуковой волны

Остриё загнуто вниз и слегка касается лежащей на столе закопчённой стеклянной пластиинки. При быстром перемещении пластиинки под колеблющимися ветвями остриё оставляет на ней след в виде волнообразной линии.

Волнообразная линия, прочерченная на пластиинке остриём, очень близка к синусоиде. Таким образом, можно считать, что каждая ветвь звучащего камертонса совершаает гармонические колебания.

Различные опыты свидетельствуют о том, что любой источник звука обязательно колеблется (хотя чаще всего эти колебания незаметны 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 издаёт звука колеблющийся грузик, подвешенный на нити или пружине. Перестанет звучать и металлическая линейка, изображённая на рисунке 120, если переместить её 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 с частотой в пределах от 16 до 20 000 Гц (передающиеся обычно через воздух). Поэтому колебания этого диапазона частот называют **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 — неко-



Рис. 124. Использование ультразвуковых колебаний для измерения глубины моря

торые 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, называют *ультразвуковыми*, а колебания с частотами менее 16 Гц — *инфразвуковыми*.

Ультразвук и инфразвук широко распространены в природе. Летучие мыши, дельфины и некоторые другие животные излучают и используют ультразвук для ориентации в пространстве и общения. При помощи инфразвука общаются между собой киты и слоны.

Ультразвук находит широкое применение в технике. Например, направленные узкие пучки ультразвука применяются для измерения глубины моря (рис. 124). Для этой цели на дне судна помещают излучатель и приёмник ультразвука. Излучатель испускает короткие сигналы, которые доходят до дна и, отражаясь от него, достигают приёма. Моменты излучения и приёма сигнала регистрируются. Таким образом, за время t , которое проходит с момента отправления сигнала до момента его приёма, сигнал, распространяющийся со скоростью v , проходит путь, равный удвоенной глубине моря, т. е. $2h$:

$$2h = vt.$$

Отсюда легко вычислить глубину:

$$h = \frac{vt}{2}.$$

Описанный метод определения расстояния до объекта называют *эхолокацией*.



1. Расскажите о ходе опытов, изображённых на рисунках 120—123. Какой вывод из них следует?
2. Что являются источниками звука?
3. Механические колебания каких частот называют звуковыми и почему?
4. Какие колебания называют ультразвуковыми; инфразвуковыми?
5. Расскажите об измерении глубины моря методом эхолокации.



1. Если по краю стакана, наполовину наполненного водой, провести смычком, то на воде появляются мелкие волны. Объясните явление.
2. Почему изданный звук с течением времени исчезает?



УПРАЖНЕНИЕ 34

1. Звук от взмахов крыльев летящего комара мы слышим, а летящей птицы нет. Почему?
2. Удар грома был услышен через 8 с после вспышки молнии. Считая скорость звука в воздухе при 0°C равной 331 м/с, вычислите, на каком расстоянии от наблюдателя произошёл грозовой разряд.

Это любопытно...

Инфразвук

Звуки с частотой менее 16 Гц — инфразвуки — не воспринимаются человеческим ухом. Но это не значит, что они не оказывают влияние на организм человека. Любопытный случай с воздействием инфразвука произошёл в начале XX в. в лондонском театре.

В театре ставили пьесу, одна из сцен которой должна была переносить зрителей в далёкое прошлое. Режиссёр пытался придумать, как погрузить зрителей в атмосферу таинственности, заставить их почувствовать тревогу. Известный американский физик **Роберт Вуд** (1868—1955) предложил использовать для этой цели низкий рокочущий звук. Вуд сконструировал трубу, которую соединил с органом. Однако, рассчитывая размеры трубы, физик, возможно, ошибся — на репетиции при нажатии на клавиши вместо ожидаемого звука в полной тишине начали дребезжать хрустальные подвески канделябров, оконные стёкла. Ужас испытали не только артисты, но и проходящие мимо театра люди. Причиной этого был инфразвук.

Впоследствии звуками, «рождающимися у порога тишины», заинтересовались многие исследователи. Было установлено, что на организм человека инфразвук воздействует из-за резонанса, поскольку частоты колебаний, характерные для многих процессов в организме, лежат в инфразвуковом диапазоне. Инфразвуки могут вызывать головную боль, приводить к повышенной утомляемости, снижать работоспособность. Инфразвук определённой частоты способен нарушить работу нашего мозга, вызвать обмороки и привести к временной слепоте.

Довольно часто инфразвук возникает вследствие природных причин: его источником могут быть грозы, бури, ураганы, землетрясения. Неко-

торые животные, например слоны, используют инфразвук для подачи сигналов сородичам, а также для отпугивания врагов.

Для инфразвука характерно малое поглощение, поэтому он может распространяться на большие расстояния. Так, «голос моря» — инфразвук, возникающий при обдувании сильным ветром морских волн, — распространяется, обгоняя ветер и волны, на сотни и тысячи километров. Многие виды морской фауны (например, медузы) улавливают «голос моря». О шторме, сформировавшемся в 1000 км от берега и распространяющемся со скоростью 20 м/с, медузы узнают ранее чем за 13 ч до его появления и уходят на глубину, чтобы не погибнуть в прибойной зоне.

По принципу «инфрауха» медузы учёные-бионики создали электронный предсказатель бурь, который может предупредить о надвигающейся буре задолго до наступления ненастя. Инфразвуковые колебания применяют для исследования океанов, атмосферы, в том числе для определения мест взрывов или извержения вулканов.



Используя приведённые данные, оцените, во сколько раз скорость, с которой распространяется «голос моря», превосходит скорость перемещения области шторма.

§ 37

ВЫСОТА, ТЕМБР И ГРОМКОСТЬ ЗВУКА

Как уже говорилось, свободная часть линейки в опыте, изображённом на рисунке 120, создаёт звук только в том случае, если она колеблется с частотой, не меньшей чем 16 Гц. Переместим линейку в тисках вниз (укоротив тем самым верхнюю часть) и приведём её в колебательное движение. Заметим, что частота колебаний линейки увеличилась, а издаваемый ею звук стал выше. Продолжая периодически укорачивать колеблющуюся часть линейки, убедимся в том, что с увеличением частоты колебаний звук повышается.

Проверим этот вывод на другом опыте. Возьмём зубчатый диск (рис. 125, а), с помощью специального устройства приведём его во вращение и прикоснёмся к зубчатому краю тонкой картонной пластинкой (рис. 125, б). Под воздействием зубьев вращающегося диска пластина начнёт совершать вынужденные коле-

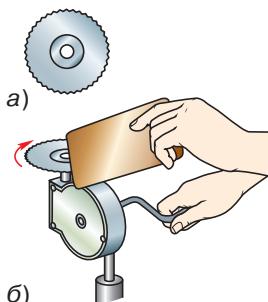


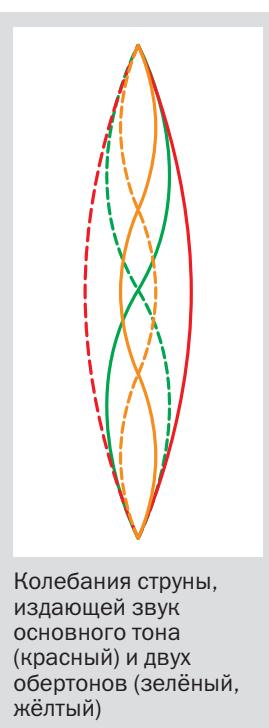
Рис. 125. Исследование зависимости высоты звука от частоты колебаний источника

бания, в результате чего мы услышим звук. Увеличим скорость вращения диска, и пластинка станет колебаться чаще, а издаваемый ею звук будет выше.

На основании описанного опыта можно сделать вывод, что **высота звука зависит от частоты колебаний**: чем больше частота колебаний источника звука, тем выше издаваемый им звук.

Напомним, что ветви камертона совершают гармонические (синусоидальные) колебания, которые являются самым простым видом колебаний. Таким колебаниям присуща только одна строго определённая частота. Звук камертона является **чистым тоном**.

Чистым тоном называют звук источника, совершающего гармонические колебания определённой частоты.

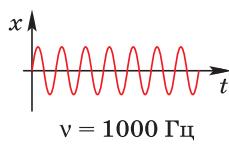
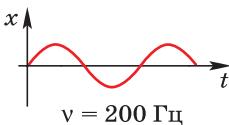


Звуки от других источников (например, звуки различных музыкальных инструментов, голоса людей, звук сирены и многие другие) представляют собой совокупность гармонических колебаний разных частот, т. е. совокупность чистых тонов.

Самую низкую (т. е. самую малую) частоту такого сложного звука называют **основной частотой**, а соответствующий ей звук определённой высоты — **основным тоном** (иногда его называют просто *тоном*). **Высота сложного звука определяется именно высотой его основного тона.**

Все остальные тоны сложного звука называют **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



При равных амплитудах женский голос, имеющий большую частоту, чем мужской, воспринимается как более громкий

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.

Чтобы выяснить, от чего зависит громкость звука, вернёмся к опыту, изображённому на рисунке 122. К одной ветви камертона подвешают вплотную 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 сравнить звуки разных частот, то кроме амплитуды колебаний пришлось бы учитывать ещё один фактор, влияющий на громкость. Дело в том, что чувствительность человеческого уха к звукам разной частоты различна. При одинаковых амплитудах как более громкие воспринимаются зву-

ки, частоты которых лежат в пределах от 1000 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.

Систематическое воздействие на человека громких звуков, особенно шумов (совокупности 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.



1. С какой целью проводился опыт, изображённый на рисунке 125? Какой был сделан вывод по результатам этого опыта? 2. От чего зависит высота звука? 3. Что называют чистым тоном; основным тоном; обертоном? 4. Чем определяется тембр звука? Как изменится громкость звука, если уменьшить амплитуду колебаний его источника? 5. Звук какой частоты — 500 Гц или 3000 Гц — человеческое ухо воспримет как более громкий при одинаковых амплитудах колебаний источников этих звуков? 6. От чего зависит громкость звука? 7. Как отражается на здоровье человека систематическое воздействие громких звуков?



1. Как на опыте удостовериться в том, что из двух камертонов более высокий звук издаёт тот, у которого больше собственная частота? (Частоты на камертонах не указаны.)
2. Известно, что чем туже натянута струна на гитаре, тем более высокий звук она издаёт. Как изменится высота звучания струны при значительном повышении температуры окружающего воздуха? Ответ поясните.



УПРАЖНЕНИЕ 35

1. Какое насекомое чаще машет крыльями в полёте — шмель, комар или муха? Почему вы так думаете?
2. Зубья вращающейся циркулярной пилы создают в воздухе звуковую волну. Как изменится высота звука, издаваемого пилой, если на ней начать распиливать толстую доску из плотной древесины? Почему?

§ 38

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА. ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

Мы воспринимаем звуки, находясь на расстоянии от их источников. Обычно звук доходит до нас по воздуху. Воздух является упругой средой, передающей звук.

Известно, что плотность воздуха мала. А что будет происходить, если около источника звука не будет воздуха вообще, т. е. он окажется в вакууме?

Проделаем опыт. Источник звука — мобильный телефон — поместим под колокол воздушного насоса (рис. 126). Когда телефон зазвонит, мы услышим звук. Начнём откачивать воздух из-под колокола, звук будет становиться тише и тише, и в некоторый момент мы перестанем слышать звонок. Это произойдёт тогда, когда под колоколом не останется воздуха. Впустим под колокол воздух, снова услышим звук. Таким образом, *для распространения звука необходима среда*.

Хорошо проводят звуки упругие вещества, например металлы, древесина, жидкости, газы.

То, что жидкости хорошо проводят звуки, используется при оборудовании бассейнов для синхронного плавания специальными подводными динамиками. Это позволяет спортсменам под водой слышать музыку.

Во времена, когда не было мобильных телефонов, дети забавлялись верёвочными телефо-



Рис. 126. Опыт, доказывающий, что в пространстве, где нет вещества, звук не распространяется

нами: две коробочки, соединённые натянутой верёвочкой или проволокой. Если в одну коробочку говорить, как в микрофон, то в другую, приложенную к уху, как динамик, можно услышать всё, что вам тайно хотят поведать! Попробуйте через такое устройство поговорить со своим другом, находящимся в другой комнате. Как лучше передаётся звук, по верёвке или по проволоке?

Плохими проводниками звука являются пористые и мягкие материалы, такие как войлок, пробка, различные синтетические материалы (например, пенопласт), изготовленные на основе вспененных полимеров. Это учитывают при защите жилых помещений от проникновения посторонних звуков, проектировании звукового оснащения театров (обивка кресел, занавес и другие материалы поглощают звук) и др.

Итак, звук распространяется в любой упругой среде — твёрдой, жидкой и газообразной, но не может распространяться в пространстве, где нет вещества.

Колебания источника создают в окружающей его среде упругую волну звуковой частоты. Волна, достигая уха, воздействует на барабанную перепонку, заставляя её колебаться с частотой, равной частоте источника звука. Дрожания барабанной перепонки передаются посредством системы косточек окончаниям слухового нерва, раздражают их и тем вызывают ощущение звука.

Скорость распространения звуковой волны не бесконечна, для распространения звука требуется некоторое время. Экспериментально определить скорость звука можно, наблюдая, например, за стрельбой из ружья. Человек, находящийся на расстоянии s от стрелка, сначала увидит огонь и дым. Они появляются в момент выстрела, тогда же происходит первое

звуковое колебание. Позже, через некоторое время t , наблюдатель услышит звук выстрела. Зная расстояние до стрелка, можно определить скорость распространения звука в воздухе:

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

Скорость звука в газах тем больше, чем выше их температура. Например, при температуре 0 °C скорость звука в воздухе равна 332 м/с, при 20 °C — 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 её деформации, тем быстрее передаются колебания от одной точки к другой.

Скорость звука зависит также от свойств среды, в которой распространяется звук. Например, при температуре 0 °C скорость звука в водороде равна 1284 м/с, а в углекислом газе — 259 м/с, так как молекулы водорода менее массивны и менее инертны.

В настоящее время скорость звука может быть измерена в любой среде. В таблице 2 приведены скорости звука в некоторых средах.

Таблица 2. Скорость звука в различных средах ($t = 20$ °C)

Среда	Скорость, м/с	Среда	Скорость, м/с
Вода	1483	Дерево (ель)	5000
Гранит	3850	Сталь	5000—6100
Медь	4700	Стекло	5500

Молекулы в жидкостях и твёрдых телах расположены ближе друг к другу и взаимодействуют сильнее, чем молекулы газов. Поэтому скорость звука в жидких и твёрдых средах больше, чем в газообразных.

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 $v = \nu\lambda$. При решении задач скорость звука в воздухе обычно считают равной 340 м/с.



1. С какой целью ставят опыт, изображённый на рисунке 126? Расскажите, как этот опыт проводится и какой вывод из него следует.
2. Может ли звук распространяться в газах, жидкостях, твёрдых телах? Ответы подтвердите примерами.
3. Какие тела лучше проводят звук — упругие или пористые? Приведите примеры упругих и пористых тел.
4. Какую волну — продольную или поперечную — представляет собой звук, распространяющийся в воздухе; в воде?
5. Приведите пример, показывающий, что звуковая волна распространяется не мгновенно, а с определённой скоростью.



УПРАЖНЕНИЕ 36

1. Может ли звук сильного взрыва на Луне быть слышен на Земле? Ответ обоснуйте.
2. Если к концам нити привязать по половинке мыльницы, то с помощью такого телефона можно переговариваться даже шёпотом, находясь в разных комнатах. Объясните явление.
3. Определите скорость звука в воде, если источник, колеблющийся с периодом 0,002 с, возбуждает в воде волны длиной 2,9 м.
4. Звуковая волна распространяется в стали со скоростью 5000 м/с. Найдите частоту этой волны, если длина волны равна 16,06 м.
5. Определите длину звуковой волны частотой 725 Гц в воздухе, в воде и в стекле.
6. По одному концу длинной металлической трубы один раз ударили молотком. Объясните, почему у другого конца трубы был слышен двойной удар.
7. 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 прошёл мимо наблюдателя. Определите скорость движения паровоза.

Измерение скорости звука

Опыты по определению скорости звука в воздухе были поставлены во Франции в 1822 г. В одном из районов Парижа, на Монмартре, установили две пушки. На холме возле Парижа организовали наблюдательный пункт. Расстояние от пушек до холма тщательно измерили. Определили промежуток времени между моментами вспышки огня и прихода звука. Такими опытами было установлено, что при температуре воздуха 0 °С звук распространяется в воздухе со скоростью примерно 330 м/с.

Скорость распространения звука в воде впервые была определена в 1827 г. швейцарским учёным **Жаком Штурмом** (1803—1855) на Женевском озере. Исследователи находились в лодках на расстоянии в несколько километров друг от друга. Один из наблюдателей ударял молотком по погружённому в воду колоколу. В момент удара автоматически производилась вспышка пороха. Другой наблюдатель видел появление огня и с помощью погруженной в воду слуховой трубы определял момент, когда звук удара доходил до него. Этими опытами было установлено, что в пресной воде скорость звука — 1435 м/с. Как оказалось позднее, в более плотной морской воде скорость звука немного больше (1475 м/с).

Ещё быстрее распространяется звук в твёрдых телах. Французский физик **Жан Батист Био** (1774—1862) наблюдал за распространением звука в чугунной трубе. У одного конца трубы длиной 951 м ударяли в колокол. У другого её конца слышали два звука: сначала один, пришедший по трубе, потом другой, пришедший по воздуху. По измерениям Био, скорость звука в чугуне приблизительно в 10,5 раза больше, чем в воздухе.



Используя приведённые данные, оцените промежуток времени между двумя звуками в опыте Био.

§ 39

ОТРАЖЕНИЕ ЗВУКА. ЗВУКОВОЙ РЕЗОНАНС

Каждый из вас знаком с таким звуковым явлением, как эхо. Эхо образуется в результате отражения звука от различных препятствий — стен большого пустого помещения, леса, гор, сводов высокой арки в здании (рис. 127).

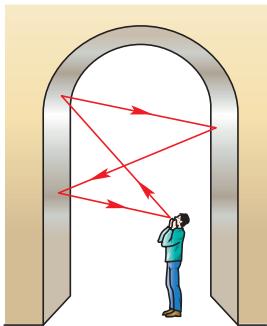


Рис. 127. Отражение звуковых волн

Но почему мы не слышим эха в небольшой квартире? Ведь и в ней звук должен отражаться от стен, потолка, пола.

Оказывается, эхо слышно лишь в том случае, когда отражённый звук воспринимается отдельно от произнесённого. Для этого нужно, чтобы промежуток времени между воздействием этих двух звуков на барабанную перепонку уха составлял не менее 0,06 с.

Определим, через какое время после произнесённого вами короткого возгласа отражённый от стены звук достигнет вашего уха, если вы стоите на расстоянии 3 м от этой стены.

Звук должен пройти расстояние до стены и обратно, т. е. 6 м, распространяясь со скоростью 340 м/с. На это потребуется время $t = \frac{s}{v}$:

$$t = \frac{6 \text{ м}}{340 \text{ м/с}} \approx 0,02 \text{ с.}$$

В данном случае интервал между двумя воспринимаемыми вами звуками — произнесённым и отражённым — 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 отражённый звук. Поэтому в таком помещении речь людей и другие звуки не искажаются эхом и звучат чётко и разборчиво.

Бывают ситуации, когда эхо мешает различать речь. В одной из церквей итальянского города Пизы звук «живёт» двенадцать секунд. А в зале библиотеки американского города Лос-Анджелес звук не угасает в течение двадцати секунд. Приглашать докладчика в такое помещение не имеет смысла: кроме гула, никто ничего не услышит. Это происходит из-за того, что гладкие стены, потолок и пол хорошо отражают звуковые волны. Они распространяются по помещению, накладываются друг на



В пустом спортивном зале из-за наложения отражённых от разных поверхностей звуковых волн вместо чёткого звука слышен гул

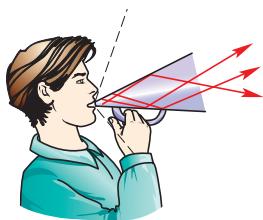


Рис. 128. Принцип действия рупора



Рис. 129. Пример механического резонанса

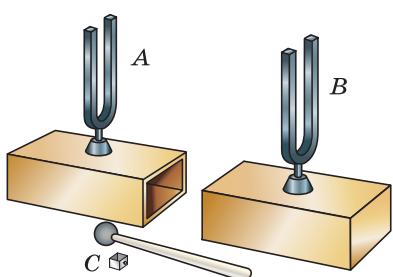


Рис. 130. Оборудование для демонстрации звукового резонанса

друга и образуют многократное эхо, воспринимаемое как гул.

На свойстве звука отражаться от гладких поверхностей основано действие рупора — расширяющейся трубы обычно круглого или прямоугольного сечения (рис. 128). При использовании рупора звуковые волны не рассеиваются в стороны, а образуют узконаправленный пучок, за счёт чего мощность звука увеличивается и он распространяется на большее расстояние.

Напомним, что амплитуда установившихся вынужденных механических колебаний достигает наибольшего значения в том случае, если частота вынуждающей силы совпадает с собственной частотой колебательной системы.

Например, довольно тяжёлый нитяной маятник (рис. 129) можно сильно раскачать, если периодически дуть на него (даже очень слабой струёй) в направлении его движения с частотой, равной его собственной частоте.

Резонанс можно наблюдать и в случае совпадения собственной частоты колебательной системы с частотой звуковой волны. Для наблюдения такого явления воспользуемся двумя одинаковыми камертонами, укреплёнными на специальных ящиках, открытых с одной стороны (рис. 130) и повёрнутых друг к другу открытыми частями. Камертон *A* используется в качестве источника звука. Заставим его колебаться, ударив молоточком по ветви камертона, затем остановим колебания камертона рукой. Звук всё равно будет слышен. Его стал издавать камертон *B* из-за того, что дошедшая до него звуковая волна вызывает колебания его ветвей. Если использовать разные камертоны, явление наблюдать не будет.

Изменим частоту колебаний одного камертона, оставив неизменной частоту другого. Тогда звук, издаваемый камертоном *B*, будет меняться в соответствии с частотой колебаний камертона *A*. Это явление называется звуковым резонансом.

ту другого. Для этого на ветвь камертона *B* наденем небольшую муфточку *C*. Заставим звучать камертон *A*. Камертон *B* при этом не зазвучит.

Объяснить эти явления можно следующим образом. Если собственные частоты камертонов одинаковые, то колебания камертона *A* вызывают вынужденные колебания камертона *B* с максимальной амплитудой. Возникает резонанс. Если собственные частоты камертонов разные, то резонанс возникать не будет. Амплитуда колебаний ветвей камертона *B* будет столь мала, что мы звука не услышим.

Ящики, на которых установлены камертоны, способствуют усилинию звука и наиболее полной передаче энергии от одного камертона к другому. Усиление звука происходит за счёт колебаний самого ящика и особенно столба воздуха в нём. Размеры ящика подбирают таким образом, чтобы собственная частота воздушного столба в нём 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, снабжённый таким ящиком (*резонатором*), издаёт 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. 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 струны и тем, гладкая она или витая.



Дека гитары служит резонатором

Люди слышат голоса друг друга тоже благодаря резонаторам, которые есть в голосовом аппарате человека. Человек издаёт звуки из-за того, что голосовые связки колеблются под действием воздуха, выходящего из лёгких. Резонаторы человека — это полости, окружённые костными границами. Так, резонаторами являются полости глотки, рта и носа. Форму глотки и рта человек может менять с помощью артикуляционного аппарата — языка, губ и мягкого нёба. Это позволяет подстроить резонатор под необходимую частоту.



1. Какова причина образования эха? Почему эхо не возникает в маленькой, заполненной мебелью комнате? Ответы обоснуйте. **2.** Как можно улучшить звуковые свойства большого зала? **3.** Почему при использовании рупора звук распространяется на большее расстояние? **4.** Приведите примеры проявления звукового резонанса, не упомянутые в тексте параграфа. **5.** Для чего камертоны устанавливают на резонаторных ящиках? Каково назначение резонаторов, применяемых в музыкальных инструментах? **6.** Что является источником голоса человека?



ЗАДАНИЕ 13



- Придумайте, с помощью каких предметов (кроме камертонов на резонаторных ящиках) можно продемонстрировать явление звукового резонанса. Проделайте опыт, опишите наблюдаемые результаты.

ИТОГИ ГЛАВЫ

Вы расширили свои знания о видах механического движения и познакомились с колебательным движением. Можете назвать характеристики колебательного движения и вычислить их, объяснить, как меняется энергия колебательной системы в процессе колебаний. Понимаете, чем отличаются свободные колебания от вынужденных, почему может происходить затухание колебаний. Знаете, когда можно применить модель гармонических колебаний. Можете привести примеры колебательного движения, встречающегося в природе и технике. Знаете, что такое резонанс, его вредные и полезные проявления.

Вы познакомились с механическими волнами, узнали, как они образуются и каковы их свойства. Понимаете, что звук — это механическая волна. Можете объяснить, чем вызвано разнообразие звуков, воспринимаемых ухом человека, а также как возникает эхо.

ОБСУДИМ? Иван и Пётр прочитали научную статью в книге Л. В. Тарасова «Физика в природе». В книге автор проводил аналогию между явлением оптической рефракции — искривлением световых лучей в оптически неоднородной среде — и явлением акустической рефракции. Ребят заинтересовало, где в повседневной жизни они могут услышать подтверждение этого факта. Иван предположил, что именно из-за этого эффекта плохо слышно, когда человек кричит против ветра.

В подтверждение своих слов он из этой книги привёл следующие данные: при удалении от земли скорость ветра увеличивается, это заставляет при встречном ветре звуковые лучи искривляться кверху.

Прав ли Иван? Действительно ли явление рефракции в воздухе влияет на слышимость в приведённом примере?

Пётр не согласился с Иваном и привёл другие данные из этой же книги:

1. Скорость звука в воздухе при температуре 0 °C — 330 м/с.
2. При температуре –30 °C скорость звука — 312 м/с.
3. При температуре 30 °C скорость звука уже составляет 350 м/с.

Что мог предполагать Пётр для объяснения плохой слышимости при сильном ветре?

Приведите свои рассуждения по этому эффекту.

ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

1. «Определение качественной зависимости периода колебаний пружинного маятника от массы груза и жёсткости пружины» (возможная форма: презентация, опыт).
2. «Ультразвук и инфразвук в природе, технике и медицине» (возможная форма: презентация, реферат, макет).

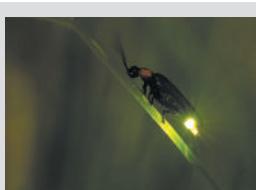
Глава 3

СВЕТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

§ 40

ИСТОЧНИКИ СВЕТА. РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА

Всё живое на Земле возникло и существует благодаря Солнцу. Его воздействие на нашу планету разнообразно, при этом очень важную роль в жизни Земли играет солнечный свет. Свет не только делает возможным существование жизни, но и позволяет нам познавать природу. Это связано с тем, что основную часть информации об окружающем мире мы получаем с помощью зрения (до 90%), воспринимая свет, который излучают или отражают окружающие нас предметы.



Естественные
источники света:
а — светлячок;
б — медуза;
в — звёзды

Источники света — это тела, которые излучают свет.

Вам известно, что свет излучают Солнце, звёзды, молния, раскалённые метеориты, полярные сияния, различные светящиеся насекомые и др. Подобные природные источники света называют *естественнymi*. Искусственные источники света — лампы, свечи, электрическая дуга, зажжённая спичка и т. д. — созданы человеком.

Источники света мы видим потому, что свет, идущий от них, попадает к нам в глаза и действует на нашу нервную систему. Но мы ведь видим не только источники света. Тела, которые не являются источниками света, мы видим из-за того, что они отражают падающий свет. Планеты, их спутники, искусственные



а)



б)

Искусственные источники света:
а — свеча;
б — люминесцентная лампа

спутники Земли, космические станции освещаются Солнцем и светят отражённым светом.

В зависимости от температуры источников света их можно разделить на *тепловые* и *люминесцентные*.

Тепловые источники света испускают свет благодаря тому, что они нагреты до достаточно высоких температур. Тела при температуре около 800 °С уже начинают излучать свет. Пламя свечи имеет температуру 1500 °С, светящаяся вольфрамовая нить электрической лампочки — 2700 °С, температура поверхности Солнца близка к 6000 °С, температура поверхности некоторых звёзд достигает 150 000 °С.

Люминесцентные источники света (люминесценция — холодное свечение) отличаются от тепловых тем, что их свечение не связано с нагреванием. Вызвать люминесценцию может излучение, электрический ток, механическое воздействие и др. Люминесценция возникает в веществах и во время различных химических реакций. В тёплые летние ночи на лесной поляне можно увидеть светящийся гниющий пень — это светятся бактерии, вызывающие гниение дерева. В лесной траве встречаются светлячки — маленькие насекомые, у которых есть особые органы свечения.

Явление люминесценции используется в люминесцентных лампах, которые в настоящее время широко применяются для освещения аудиторий, заводских зданий, вокзалов, метро, улиц, площадей и т. п. Их свет близок к дневному.

Источники света бывают различного размера. При изучении многих световых явлений размерами источника можно пренебречь и считать его светящейся точкой.

Источник света, размерами которого в данных условиях можно пренебречь, называют **точечным источником света**.

Точечный источник — это физическая модель. Источник света можно считать точечным, если его размеры малы по сравнению с расстоянием до наблюдателя.

При изучении световых явлений будем пользоваться одной моделью — *световой луч*.

Световой луч — это линия, вдоль которой распространяется свет.

Чтобы выяснить, как распространяется свет, проделаем опыт. В затемнённой комнате пусть пучок света от карманного фонарика. Световой луч можно рассматривать как ось светового пучка. Направление распространения пучка света задаётся световым лучом.

Чтобы увидеть пучок света, на его пути можно поставить аквариум с подкрашенной водой или потрясти меловую тряпку («подкрасить» воздух мелом). Мы увидим, что свет распространяется вдоль прямой линии до тех пор, пока не попадёт на стену, потолок или какой-либо другой предмет.

Этот опыт иллюстрирует одну из закономерностей распространения света: в однородной и прозрачной среде¹ световые лучи являются прямыми линиями.

Свет в однородной и прозрачной среде распространяется прямолинейно.

Это утверждение называют *законом прямолинейного распространения света*. Он был известен с древнейших времён. Так, люди обращали внимание на веерообразно расходящиеся прямолинейные солнечные лучи, пронизывающие облака. Использовать знания о прямолинейном распространении света стали древние египтяне при строительстве различных соору-

¹ Среду называют однородной, если её свойства не меняются от точки к точке, и прозрачной — если в ней может распространяться свет.

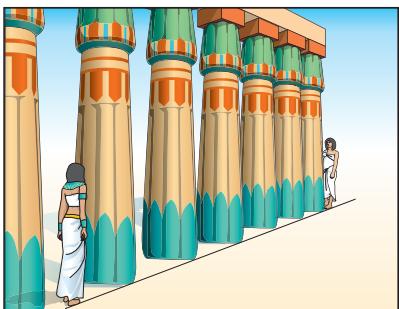


Рис. 131. Применение закона прямолинейного распространения света

жений, в частности при установке колонн и столбов. Они располагали колонны таким образом, чтобы из-за ближайшей колонны не были видны все остальные (рис. 131).

Вам хорошо известно, что различные тела отбрасывают тени. Рассмотрим тень BC , возникшую на экране (рис. 132) от непрозрачного шара AD , освещённого точечным источником света S .

Те лучи, что на своём пути встретят шар, будут отражаться им, попадут нам в глаза, и поэтому мы шар увидим. Остальные лучи, продолжая распространяться прямолинейно, упадут на экран и осветят его. Но часть экрана BC останется неосвещённой, на нём образуется тень.

Тень — это область пространства, в которую не попадает свет от источника.

Построенная на рисунке 132 тень BC совпадает с экспериментально наблюдаемой, поэтому образование тени является доказательством прямолинейного распространения света.

Осветим теперь шар большой лампой, размеры которой сравнимы с расстоянием от неё до экрана. Мы увидим, что тень на экране (рис. 133)

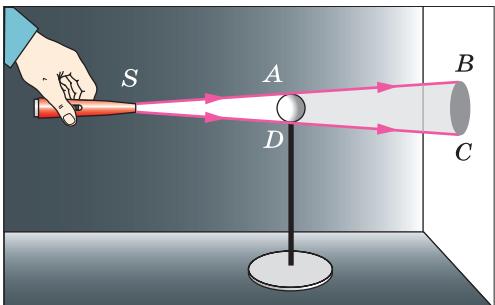


Рис. 132. Получение тени

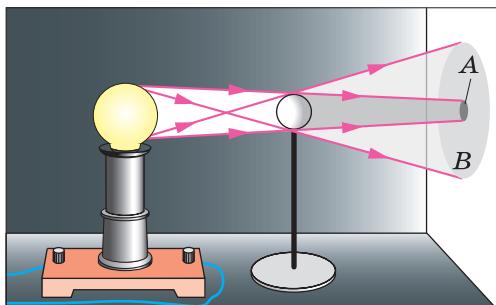


Рис. 133. Получение полутени

изменится. Область экрана *A* окажется полностью затемнённой, а область *B* — частично освещённой. Эту частично освещённую область называют *полутенью*.

Объясним, как образуются тень и полутень. Источник, размерами которого нельзя пренебречь (в нашем случае большая лампа), называют *протяжённым*. Протяжённый источник света состоит из множества точек, испускающих световые лучи. Если поместить глаз в то место, где находилась самая тёмная часть экрана (тень *A*), то мы не увидим ни одной светящейся точки протяжённого источника, сюда свет не проникает. Если поместить глаз в менее тёмную часть экрана (полутень *B*), то можно увидеть некоторое количество светящихся точек. В эту область свет попадает только от части точечных источников. Остальная часть экрана освещается всеми точечными источниками, из которых состоит большая лампа.

Из приведённых рассуждений ясно, что если освещать предмет точечным источником света, то на экране образуется тень, а если используется реальный, протяжённый источник света, то, кроме тени, на экране образуется ещё и полутень.

Полутень — это область пространства, в которую попадает свет от части источника света.

Зная, как образуется тень при падении света на непрозрачный предмет, можно объяснить такие явления, как солнечное и лунное затмения.

Во время солнечного затмения Луна полностью или частично закрывает Солнце от наблюдателя на Земле. Поскольку Луна намного меньше Земли, то в области *A* полной лунной тени (рис. 134) может находиться лишь малая часть земной поверхности (диаметром не более 270 км) и очень недолго (примерно 2,5 мин) наблюдается явление, называемое *полным солнечным затмением*.

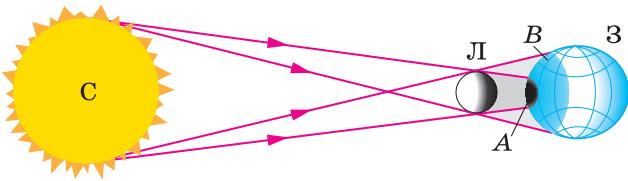


Рис. 134. Солнечное затмение

нечным затмением. В тех местах Земли, которые находятся в области полутени *B*, наблюдается *частное солнечное затмение*. Оно охватывает значительно большую часть Земли и поэтому длится дольше.

Во время *лунного затмения* Луна попадает в тень, отбрасываемую Землёй. Земля намного больше Луны, и Луна может быть затенена целиком (рис. 135). Если Луна полностью находится в конусе тени от Земли, говорят о *полном лунном затмении*, если Луна погружена в тень не вся — о *частном лунном затмении*.

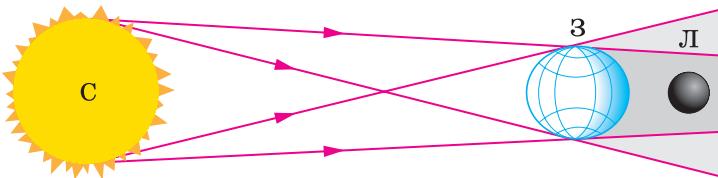


Рис. 135. Лунное затмение



1. Что такое источник света? Приведите примеры источников света.
2. Что такое точечный источник света; световой луч? 3. Сформулируйте закон прямолинейного распространения света. 4. Приведите примеры, доказывающие прямолинейное распространение света.
5. Объясните, как образуется тень. 6. Объясните, почему в некоторых областях экрана (см. рис. 133) образуется полутень. 7. Как происходит солнечное затмение; лунное затмение?



1. Солнце, Луна, нагретый элемент электрической плиты, светлячок — источники света. Чем различаются излучения этих тел?
2. При каких условиях от предмета получается только полутень?
3. Во время хирургических операций тень от рук хирурга не должна закрывать операционное поле. Как этого добиться?
4. Почему в одном и том же месте Земли солнечные затмения наблюдаются гораздо реже лунных?



УПРАЖНЕНИЕ 37

1. В солнечный день длина тени на земле от вертикально стоящего шеста высотой 0,8 м равна 0,4 м. Чему равна высота дерева, длина тени от которого в 5 раз больше высоты шеста?
2. Может ли человек бежать впереди своей тени?



ЗАДАНИЕ 14

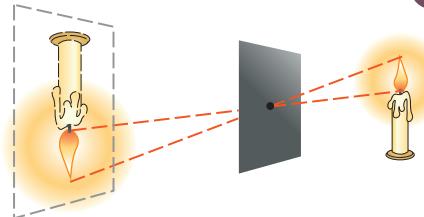


Рис. 136



- Возьмите прямоугольный лист чёрной бумаги или плотного картона (размером не менее 10×10 см). Проделайте в самом центре листа круглое отверстие диаметром около 2 мм так, чтобы края отверстия были ровными. В тёмной комнате зажгите свечу, поставьте на расстоянии 0,5 м от стенки и перемещайте между стенкой и свечой приготовленный лист бумаги с отверстием. Наблюдайте изображение пламени свечи (рис. 136). Объясните наблюдаемое явление.

Это любопытно...

Солнечные затмения

Солнечное затмение — интереснейшее явление природы, знакомое человеку с глубокой древности. Оно происходит сравнительно часто, но многие считают затмение Солнца очень редким, потому что оно видно не из всех точек земной поверхности.

Солнечные затмения происходят в новолуния, когда Луна, двигаясь вокруг Земли, оказывается между Солнцем и Землёй и полностью или частично заслоняет Солнце. Луна имеет размеры примерно в 400 раз меньшие, чем Солнце, но находится примерно в 400 раз ближе к Земле. Поэтому видимые размеры Солнца и Луны почти одинаковы. Вот почему Луна может закрыть собой Солнце (см. рис. 134).

Промежуток времени между двумя последовательными новолуниями составляет в среднем 29,53 суток. Почему же солнечные затмения не происходят каждое новолуние? Дело в том, что плоскость орбиты Луны не совпадает с плоскостью, в которой находятся центры Земли и Солнца (плоскость эклиптики). В астрономии принято называть точки пересечения лунной орбиты с плоскостью эклиптики лунными узлами. Когда в новолуние Луна находится в лунном узле, центры Солнца, Земли и Луны располагаются на одной прямой, и Луна полностью закрывает Солнце. Если в новолуние Луна находится далеко от узла (рис. 137), то диск Луны располагается

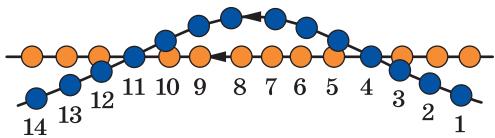


Рис. 137. Положение Луны (●) по отношению к Солнцу (○) в новолуние в течение года

цифрами 3, 4, 5, 10, 11, 12, солнечные затмения наступают.

За границей лунной полути (см. рис. 134) затмение вообще не происходит. Таким образом, солнечное затмение видно не на всей поверхности Земли, а только там, где пробегает тень и полути Луны. Можно рассчитать ширину полосы затмения и его продолжительность. Они зависят от взаимного расположения Луны, Солнца и Земли во время затмения. Чаще всего ширина полосы бывает от 40 до 100 км, а продолжительность полного солнечного затмения для неподвижного наблюдателя около 2—3 мин.



1. Может ли за год не произойти ни одного солнечного затмения?

2*. Почему максимально возможная продолжительность полного солнечного затмения (7,5 мин) достигается вблизи экватора?

§ 41

ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА. ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА

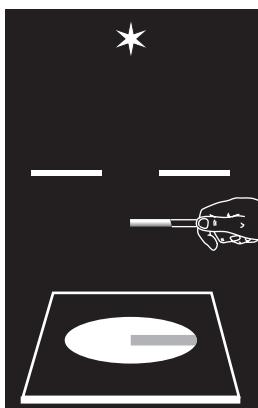


Рис. 138. Падение лучей света на экран

Как вы уже знаете, в однородной среде свет распространяется прямолинейно. Если же на пути распространения пучка света встречаются какие-либо тела, то прямолинейность распространения света нарушается.

Направим через щель пучок света от источника на экран. Он будет освещён, но между источником и экраном мы ничего не увидим. Разместим теперь между источником и экраном какой-либо предмет (рис. 138). В этом случае свет, достигнув поверхности предмета, отражается, изменяет своё направление и попадает в наши глаза, т. е. предмет становится виден. Рассмотрим более подробно явление **отражения света**.

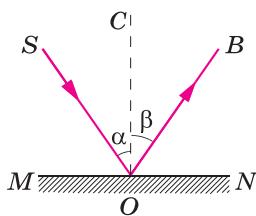


Рис. 139. Отражение света от зеркальной поверхности

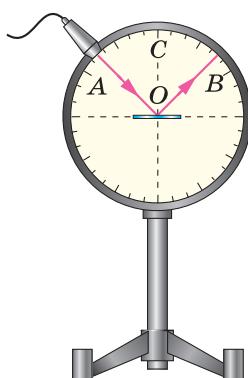


Рис. 140. Демонстрация отражения света на оптическом диске

Отражают свет все тела, как прозрачные, так и непрозрачные. Посмотрите вокруг себя. Какие из окружающих вас тел прозрачны? Видите ли вы их? А непрозрачные? Непрозрачные тела мы видим лучше. Это происходит потому, что они отражают большую часть падающего на них света.

Рассмотрим отражение света от зеркальной поверхности. На поверхность MN падает пучок света. Его направление задано лучом SO (рис. 139). Направление отражённого пучка показано лучом OB . Луч SO — *падающий луч*, луч OB — *отражённый луч*, OC — перпендикуляр к поверхности MN . Угол SOC , образованный падающим лучом SO и перпендикуляром, называют *углом падения* (α), угол COB — *углом отражения* (β).

Отражение света можно наблюдать на приборе, который называют *оптическим диском* (рис. 140). Он состоит из белого круга, по окружности которого нанесены деления для измерения углов. На краю диска находится подвижный осветитель, дающий узкий пучок света. Поместим в центр диска плоское зеркало и направим на него луч света AO , скользящий по поверхности диска. Отражённый от зеркала луч OB также виден в плоскости диска. При изменении направления падающего луча направление отражённого луча также изменяется. Как показывает опыт,

луч падающий, луч отражённый и перпендикуляр, проведённый к границе раздела двух сред из точки падения луча, лежат в одной плоскости; угол отражения β равен углу падения α светового луча.

$$\alpha = \beta.$$

$$\alpha = \beta$$

В этом состоит **закон отражения света**.

Если луч света будет падать на зеркало в направлении BO (см. рис. 140), то отражённый луч пойдёт в направлении OA . Следовательно,

падающий и отражённый лучи могут меняться местами. Это свойство лучей (падающего и отражённого) называют **обратимостью световых лучей**.



- Что происходит с пучком света на границе раздела двух сред?
- Пользуясь рисунком 140, расскажите об опыте, на основании которого можно установить закон отражения света.
- Что называют углом падения; углом отражения?
- Сформулируйте закон отражения света.
- Что называют обратимостью световых лучей?



УПРАЖНЕНИЕ 38

- Угол падения луча света на зеркало равен 30° . Чему равен угол отражения? Постройте ход луча света.
- Угол отражения луча света от зеркала равен 45° . Как изменится угол между падающим и отражённым лучами при увеличении угла падения на 15° ? На одном чертеже покажите падающий и отражённый лучи для каждого случая.

§ 42

ПЛОСКОЕ ЗЕРКАЛО

Закон отражения света позволяет объяснить множество явлений, связанных с отражением света. Например, то, что, глядя в зеркало, мы видим своё отражение за ним. Построим, пользуясь законом отражения, изображение точечного источника света S в **плоском зеркале**.

Рассмотрим лучи SO и SO_1 , падающие из точки S на зеркало MN (рис. 141). Луч SO падает перпендикулярно плоскости зеркала ($\alpha = 0^\circ$) и отражается под углом 0° . Построим отражённый луч для падающего луча SO_1 . Для этого из точки O_1 падения луча SO_1 восставим перпендикуляр к плоскости зеркала, найдём угол падения α_1 и построим угол отражения β_1 , равный α_1 по закону отражения света. O_1B_1 — отражённый луч. Докажем, что продолжения всех отражённых от зеркала лучей пересекаются в точке S_1 , симметричной точке S относительно плоскости зеркала.

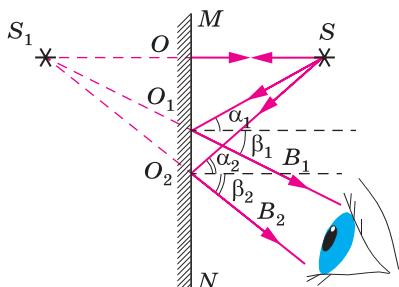


Рис. 141. Изображение точечного источника света в плоском зеркале

Из равенства углов α_1 и β_1 (см. рис. 141) следует равенство углов SO_1O и S_1O_1O . Значит, прямоугольные треугольники SO_1O и S_1O_1O равны (по катету и прилежащему углу) и $SO = S_1O$. Таким образом, продолжение луча O_1B_1 проходит через точку S_1 . Аналогично можно доказать, что продолжение и любого другого отражённого луча, например O_2B_2 , проходит через точку S_1 .

В глаз попадает расходящийся пучок лучей, продолжения которых пересекаются за зеркалом в точке S_1 . При этом нам кажется, что точка S_1 — источник света. На самом деле точка S_1 является изображением точки S в зеркале.

Поступает ли свет в точку S_1 ? Нет, световые лучи не проникают за зеркало. Именно поэтому такое изображение называют **мнимым**, оно образуется на пересечении не самих лучей, а их продолжений.

Точки S и S_1 расположены на одном перпендикуляре к плоскости зеркала (см. рис. 141) и $SO = S_1O$ — изображение точки симметрично самой точке относительно плоскости зеркала. Если перед плоским зеркалом находится протяжённый предмет, то его изображение также симметрично предмету относительно плоскости зеркала. Размеры мнимого изображения в плоском зеркале равны размерам предмета, поставленного перед зеркалом.

Проверим это на опыте, изображённом на рисунке 142. Если поставить перед стеклянной пластиной зажжённую свечу, то на стекле появится её изображение. Найдём такое положение второй, незажжённой свечи, чтобы она совпала с изображением зажжённой свечи. Измерив расстояния от свечей до стекла, убедимся, что они расположены симметрично.

Из рисунка 143 также видно, что вашей правой руке у изображения будет соответствовать левая рука, и наоборот, т. е. если бы вдруг ваше изображение «ожило», то оно, как это ни удивительно, не было бы вашим двойником.

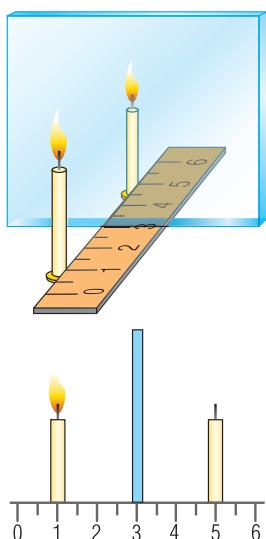
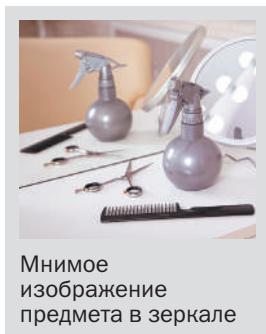


Рис. 142. Получение мнимого изображения

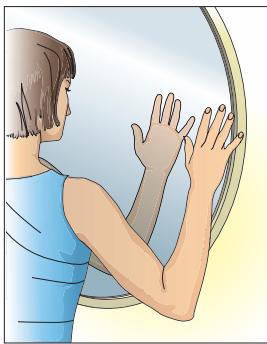


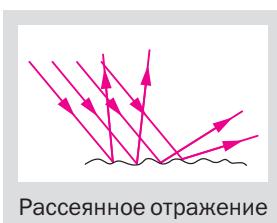
Рис. 143. Зеркальное изображение руки

Итак, изображение в плоском зеркале:

- мнимое;
- прямое (не перевёрнутое);
- равное по размерам предмету;
- расположено на том же расстоянии от зеркала, что и предмет;
- меняет правую и левую стороны предмета.

Примерами зеркальных поверхностей являются поверхности отполированного металла, гладкого стекла, спокойной воды. А почему даже при лёгком порыве ветра поверхность воды теряет свойства зеркала? Почему большинство предметов не зеркально? Как правило, предметы не бывают такими гладкими, как поверхность спокойной воды. Поверхность шероховатого тела можно представить как совокупность большого количества по-разному ориентированных маленьких зеркал. Каждое такое зеркало создаёт своё мнимое изображение. Эти изображения по-разному ориентированы в пространстве и находятся на различных расстояниях от поверхности. В результате наложения отдельных изображений глаз воспринимает лишь усреднённую равномерно освещённую картину. Именно поэтому при образовании раби на поверхности воды она теряет свои зеркальные свойства.

Если на шероховатую поверхность падает параллельный пучок света, то отражённый свет будет *рассеянным*. Мы видим предметы благодаря тому, что отражённый от них свет рассеян. Именно поэтому, например, классные доски, сделанные из стекла, специально обрабатывают так, чтобы они стали шероховатыми. В противном случае записи на них, особенно сбоку, видны очень плохо.



Рассеянное отражение



1. Как построить изображение точечного источника света в плоском зеркале? Для ответа используйте рисунок 141. 2. Какое изображение называют мнимым? Докажите, что плоское зеркало даёт мнимое изображение. 3. Почему на верхнем рисунке (см. рис. 142) горят обе свечи, а на нижнем только одна? Как проводится этот опыт и что он доказывает? 4. Охарактеризуйте изображение, полученное с помощью плоского зеркала. 5. Почему возникает рассеянное отражение света?



Как с помощью двух зеркал увидеть свой затылок или профиль?



УПРАЖНЕНИЕ 39

1. Постройте изображение точки в плоском зеркале.
2. Можно ли в воде глубокого колодца увидеть солнце?
3. Какую роль играют зеркала, помещённые справа и слева от водителя автобуса?
4. Как изменится расстояние от предмета до его изображения, если предмет удалить от зеркала на 0,5 м?
5. Постройте изображение предмета — стрелки CD , расположенной параллельно плоскости зеркала AB . Найдите построением область, в которой глаз будет видеть изображение всего предмета.
6. Чтобы увидеть своё изображение во весь рост в плоском вертикальном зеркале, высота зеркала должна быть не меньше половины высоты роста человека. Докажите это с помощью построений.



ЗАДАНИЕ 15



- Для наблюдения из укрытия используют прибор перископ (рис. 144). Сделайте зеркальный перископ. Изготовьте четырёхгранный трубы из картона. Внутренние стенки трубы оклейте чёрной бумагой, с обоих концов сделайте вырезы и укрепите два плоских зеркала параллельно друг другу под углом 45° к горизонту. С помощью своего перископа наблюдайте предметы, находящиеся за препятствием, например за забором.

Рис. 144

Это любопытно...

Получение изображений в нескольких зеркалах

Если встать между параллельными зеркалами, ваше изображение в одном из них отразится и в другом зеркале. Затем второе изображение вновь отразится в первом, и теоретически это должно происходить до бесконечности. Однако каждое следующее изображение будет казаться всё более и более далёким. (Объясните почему.) Кроме того, изображения будут становиться всё бледнее и бледнее, так как значительная часть света каждого предыдущего изображения поглощается в процессе отражения.

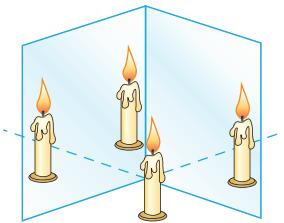


Рис. 145. Отражение в нескольких зеркалах

жения и не доходит до следующего зеркала. Поэтому изображения по мере их удаления постепенно исчезают. Всё это можно наблюдать, например, в парикмахерской.

Если зеркала расположить под углом друг к другу, а не параллельно (рис. 145), то отражений будет не так много. Чем больше угол между зеркалами, тем меньше число изображений. При уменьшении угла между зеркалами число наблюдаемых изображений растёт, пока не достигнет бесконечности, когда зеркала будут параллельными.



ЗАДАНИЕ 16

- Возьмите два небольших зеркала и расположите их на столе, как показано на рисунке 145. Между зеркалами расположите какой-либо предмет, например кубик или свечу. Если вы постепенно будете уменьшать угол между зеркалами, то заметите, что число изображений будет расти. Расположите зеркала под углом 45° , 60° , 90° и подсчитайте число изображений.

§ 43

ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА. ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА. ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ

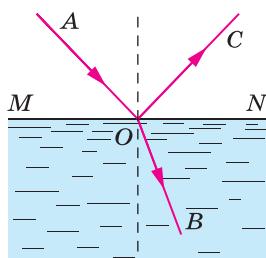


Рис. 146. Поведение луча света на границе раздела двух сред

Представьте ситуацию: летний жаркий день, вы входите в прохладную воду, бросаете взгляд на свои ноги, находящиеся в воде, — они кажутся вам укороченными. Это означает ещё и то, что глубина водоёма, в котором вы находитесь, кажется вам меньше, чем на самом деле. Аналогичное явление мы наблюдаем, когда ложка, опущенная в стакан с водой, кажется нам преломлённой на границе между воздухом и водой. Подобных примеров можно привести немало, и все они говорят о том, что на границе раздела двух сред происходит изменение направления распространения света.

Перейдём от наблюдения к эксперименту. Проследим за поведением световых лучей при переходе их из первой среды (воздух) во вторую среду (вода). Пусть луч света AO (рис. 146) падает на поверхность воды, находящейся

в прозрачном сосуде. Опыт показывает, что на границе MN раздела воды и воздуха световой луч частично отражается от поверхности воды (луч OC), частично преломляется (луч OB) и проходит в воду.

Преломление света — это изменение направления распространения света на границе раздела двух прозрачных сред при переходе света из одной среды в другую.

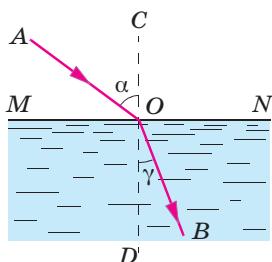


Рис. 147. Схема преломления луча света при переходе из воздуха в воду

Угол γ (греческая буква «гамма») между преломлённым лучом OB и перпендикуляром OD (рис. 147), проведённым к границе MN раздела двух сред (в нашем случае воздуха и воды) из точки O падения луча, называют **углом преломления**.

При изменении угла падения меняется и угол преломления. Чем больше угол падения, тем больше угол преломления (рис. 148). При этом отношение между углами не сохраняется. Однако для данных двух сред остаётся неизменным отношение синусов углов падения и преломления. Так, для случая перехода луча из воздуха в воду

$$\frac{\sin 30^\circ}{\sin 23^\circ} = \frac{\sin 45^\circ}{\sin 33^\circ} = \frac{\sin 60^\circ}{\sin 42^\circ} \approx 1,3.$$

Следовательно,

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21},$$

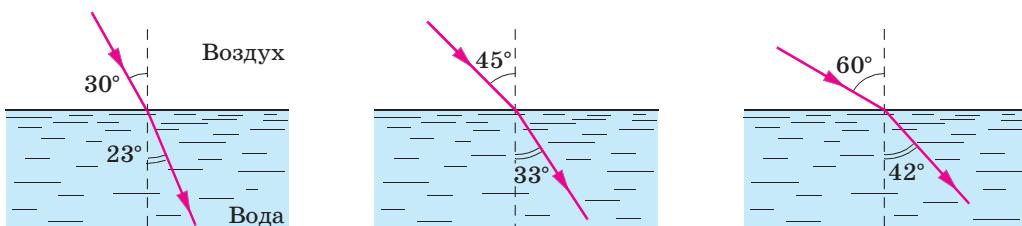


Рис. 148. Зависимость угла преломления от угла падения

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}$$

где n_{21} — постоянная величина, не зависящая от угла падения. Она определяется свойствами этих двух сред. Эту величину называют **относительным показателем преломления** второй среды относительно первой.

Закон преломления света формулируется следующим образом:

луч падающий, луч преломлённый и перпендикуляр, проведённый к границе раздела двух сред из точки падения луча, лежат в одной плоскости;

отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для двух данных сред есть величина постоянная.

Если свет переходит в какую-либо среду из вакуума, то отношение синуса угла падения к синусу угла преломления называют **абсолютным показателем преломления** (или просто **показателем преломления**) этой среды. Его обозначают буквой n , которую при необходимости снабжают индексами. Например, n_1 и n_2 — абсолютные показатели преломления первой и второй сред.

Опыты показывают, что относительный показатель преломления двух сред равен отношению их абсолютных показателей преломления:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Для любой среды абсолютный показатель преломления больше единицы (только для вакуума $n = 1$). Так, для воды $n_{\text{вод}} = 1,33$, для стекла $n_{\text{ст}} = 1,5$. Абсолютный показатель преломления воздуха очень мало отличается от единицы ($n_{\text{возд}} = 1,0003$ при нормальном атмосферном давлении и температуре 0°C), поэтому при решении задач можно считать $n_{\text{возд}} = 1$.

Ту из двух сред, которая имеет больший абсолютный показатель преломления, называют **оптически более плотной**. Если свет идёт из среды оптически менее плотной в среду оп-

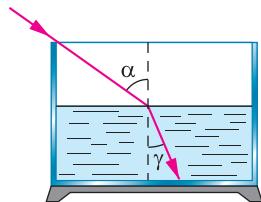


Рис. 149. Преломление света при переходе луча из воздуха в воду

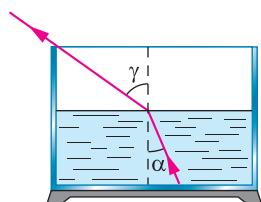


Рис. 150. Преломление света при переходе луча из воды в воздух

тически более плотную, то угол преломления меньше угла падения (рис. 149). И наоборот, если свет идёт из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную, то угол преломления больше угла падения (рис. 150). Рассмотрим этот случай подробнее.

Пусть внутри оптически более плотной среды находится точечный источник света, испускающий лучи во все стороны. При увеличении угла падения лучей на границу раздела сред угол преломления будет также увеличиваться и при некотором угле падения α_0 , который называют *пределальным углом*, окажется равным 90° (рис. 151). В этом случае преломлённый луч пойдёт вдоль границы раздела двух сред. Если же угол падения будет ещё большим, т. е. $\alpha > \alpha_0$, то преломлённого луча не будет (см. рис. 151). Весь свет отражается от границы раздела обратно в первую среду. Именно поэтому описанное явление и называют *полным внутренним отражением*.

Найдём предельный угол α_0 для случая перехода света из среды с абсолютным показателем преломления n в воздух (см. рис. 151). Согласно закону преломления,

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{n_{\text{возд}}}{n} \approx \frac{1}{n},$$

откуда

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}.$$

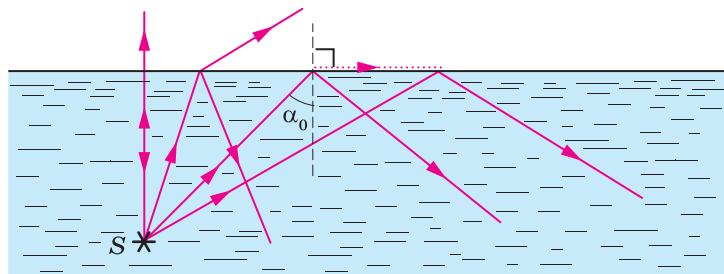


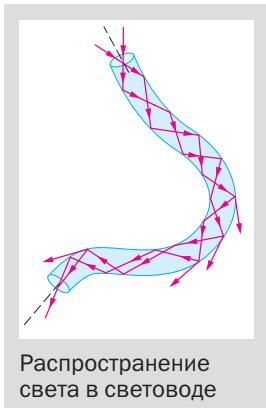
Рис. 151. Полное внутреннее отражение света

Для границы «вода — воздух» ($n = 1,33$) $\alpha_0 = 48,7^\circ$.

Явление полного внутреннего отражения вы можете легко наблюдать дома. Налейте в стакан воду и поднимите его несколько выше уровня глаз. Поверхность воды при рассматривании её снизу сквозь стенку кажется блестящей, словно посеребрённой. Это вследствие полного внутреннего отражения вода ведёт себя подобно зеркалу.

Полное внутреннее отражение используют в волоконной оптике для передачи света по пучкам прозрачных гибких волокон — *световодам*. Световые лучи, запущенные внутрь световода почти параллельно его оси, падают на боковую поверхность под большими углами, вследствие чего испытывают полное внутреннее отражение. Многократно отражаясь, лучи идут всё дальше, перенося энергию на значительные расстояния. Сегодня волоконно-оптические кабели широко используют для осуществления высокоскоростного доступа в Интернет.

Теперь объясним кажущееся уменьшение глубины водоёма, о котором мы говорили в начале параграфа. Предположим, что мы наблюдаем тело A на дне водоёма (рис. 152). Лучи света, идущие из точки A , преломляются на границе «вода — воздух». Угол преломления больше угла падения, поскольку вода оптически более плотная среда, чем воздух. Поэтому пересечение продолжений преломлённых лучей (точка A') будет находиться выше точки A , и тело A покажется наблюдателю приподнятым. Этим и объясняется укорачивание ног в воде и уменьшение глубины водоёма. Причём это уменьшение довольно значительно и составляет примерно третью глубины. Вот почему опасно купаться в незнакомом месте, так как, неверно оценивая глубину водоёма, люди нередко попадают в опасное положение.



Распространение света в световоде

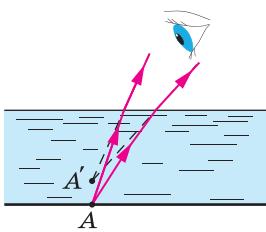


Рис. 152. Кажущееся уменьшение глубины водоёма



1. В чём состоит явление преломления света? Приведите примеры.
2. Сформулируйте закон преломления света.
3. Как преломление света на границе раздела двух сред зависит от относительного показателя преломления?
4. В чём состоит явление полного внутреннего отражения?
5. Что такое предельный угол полного внутреннего отражения? Чему он равен?
6. Где используют световоды?



1. Как будет вести себя световой луч при нормальном падении на границу раздела двух сред?
2. Когда поверхность воды не совсем спокойна, предметы, лежащие на дне, кажутся колеблющимися. Объясните явление.



УПРАЖНЕНИЕ 40

1. Световые лучи падают под одним и тем же углом на границу «воздух — стекло» и «воздух — алмаз». В каком случае угол преломления больше? Показатели преломления стекла и алмаза равны соответственно 1,5 и 2,4.
2. Луч света падает под углом 30° на границу: а) «воздух — вода»; б) «воздух — стекло». Вычислите для каждого случая синус угла преломления.
- 3*. Начертите ход световых лучей, которые падают на границу «вода — воздух» под углом 30° и 60° .
- 4*. Определите предельный угол падения светового луча на границу раздела стекла и воды.

Это любопытно...

Миражи

В спокойном воздухе в ясные дни, особенно в утреннее и предвечернее время, над горизонтом на фоне неба или под линией горизонта иногда

возникает изображение наземных предметов. Эти мнимые изображения в атмосфере называют **миражами**. Миражи бывают нескольких видов: верхние (рис. 153), нижние (рис. 154), боковые и др. Образование миражей связано с аномальным изменением плотности воздуха в нижних слоях атмосферы (что происходит из-за изменения температуры).



Рис. 153. Верхний мирож корабля

Наблюдениями установлено, что рано утром или после жаркого дня и безветренной ночи слой

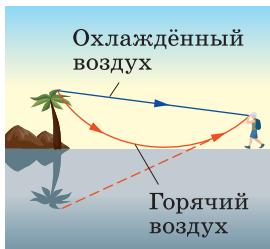


Рис. 154. Нижний мираж

воздуха вблизи поверхности почвы или моря холоднее вышележащих слоёв воздуха. В таких случаях солнечный свет, отражённый от какого-нибудь предмета, находящегося в нижнем холодном слое воздуха, распространяется в области тёплых, менее плотных слоёв, постепенно преломляясь. Луч света перестаёт быть прямым и изгибаются в сторону тёплых, менее плотных слоёв, т. е. кверху.

На рисунке 153 показано, как в земной атмосфере искривляется направление солнечного света, отражённого от корабля в океане. Если в тихую погоду наблюдатель окажется в области отражённого от корабля света, то он будет видеть изображение этого корабля над линией горизонта на фоне неба — это и есть верхний мираж. Сам же корабль скрыт от взора наблюдателя выпуклостью водной поверхности.

В жарких странах, особенно в раскалённых песках пустыни, а в жаркие дни и в средних широтах в степях, на широких лугах, на морском плоском берегу, покрытом плотным песком, на асфальтовых дорогах иногда наблюдают под линией горизонта перевёрнутые изображения отдельных предметов. Такие миражи объясняются тем, что в тихую погоду, когда воздух почти неподвижен, нижний слой воздуха вблизи горячей поверхности почвы сильнее нагревается. Чем выше расположены слои воздуха, тем они холоднее. Вследствие этого плотность (и оптическая плотность тоже) нижнего слоя воздуха оказывается меньше плотности верхних слоёв, поэтому, если предмет отстоит от наблюдателя на большом расстоянии и находится в зоне знойного слоя воздуха, отражённый от него солнечный свет распространяется по кривой выпуклостью вниз и попадает в глаз наблюдателя. В результате наблюдатель видит ниже линии горизонта мираж, например пальму (см. рис. 154). Подобные миражи иногда видят пассажиры, едущие на автомобиле в жаркий и безветренный день по асфальтовой дороге. Им кажется, что вдали дорога как будто полита водой или даже уходит в озеро, в котором отражаются деревья.

Чтобы представить себе, как велика может быть зрительная иллюзия миража, достаточно привести следующий пример: 11 марта 1917 г. в Месопотамии было прекращено сражение между турками и английскими частями, так как противники стреляли не друг в друга, а по мнимым целям, т. е. по миражам.



Почему истинная продолжительность дня больше промежутка времени между восходом и заходом Солнца?

В предыдущем параграфе мы рассматривали преломление света для случая, когда граница двух сред была плоской. На практике широкое применение имеет случай преломления света на сферической границе раздела сред.

Прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями, называют линзой.

Линзы бывают выпуклыми (рис. 155, а) и вогнутыми (рис. 155, б).

Прямую, проходящую через центры C_1 и C_2 (рис. 155) сферических поверхностей, ограничивающих линзу, называют **главной оптической осью линзы**.

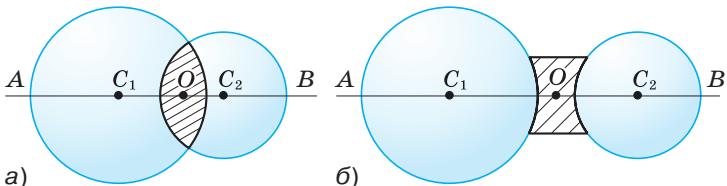


Рис. 155. Оптическая ось линзы

Линзы, толщина которых мала по сравнению с радиусами поверхностей, называют **тонкими**. Мы будем рассматривать только такие линзы. Точку O на главной оптической оси в центре линзы называют **оптическим центром линзы**.

Возможен случай, когда одна из поверхностей линзы плоская. На рисунке 156 изображены сечения шести видов линз.

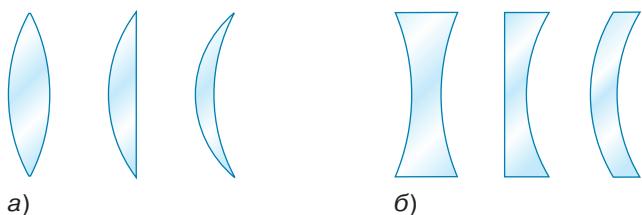
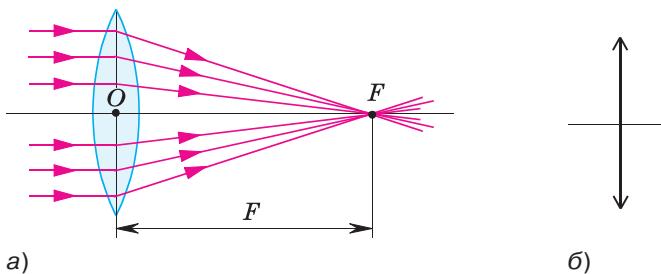


Рис. 156. Виды линз:
а — выпуклые;
б — вогнутые

Рис. 157. Собирающая линза:
 а — прохождение лучей света через фокус;
 б — изображение на схемах



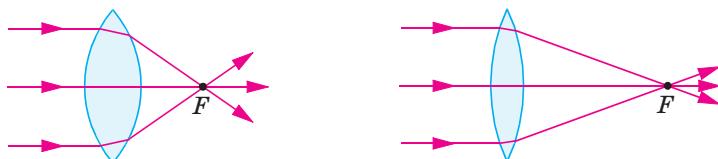
Если направить на двояковыпуклую линзу пучок световых лучей, параллельных её главной оптической оси, то лучи после прохождения линзы собираются в одной точке F (рис. 157). Поэтому такую линзу называют *собирающей*. Точку F называют *фокусом линзы*.

Расстояние от оптического центра линзы до фокуса называют *фокусным расстоянием* и также обозначают буквой F (см. рис. 157).

Если направить параллельный пучок света на линзу с другой стороны, то он тоже собирается в одной точке на таком же расстоянии от линзы, что и в первом случае, т. е. у линзы два фокуса, по одному с каждой стороны.

Проделаем такой же опыт с двумя двояковыпуклыми линзами, одна из которых более выпуклая, другая — менее выпуклая (рис. 158). Опыт показывает, что более выпуклая линза сильнее преломляет лучи, чем менее выпуклая, поэтому фокусное расстояние первой линзы меньше, чем второй. Говорят, что более выпуклая линза оптически более сильная. У оптически более сильной линзы величина, обратная фокусному расстоянию $\frac{1}{F}$, имеет

Рис. 158. Преломление лучей линзами различной кривизны



большее значение, чем у оптически менее сильной. Эту величину называют **оптической силой линзы** и обозначают буквой D .

Оптическая сила линзы — это величина, обратная её фокусному расстоянию.

$$D = \frac{1}{F}.$$

$$D = \frac{1}{F}$$

За единицу оптической силы принята оптическая сила линзы, фокусное расстояние которой равно 1 м.

Называют эту единицу **диоптрия (дптр)**.

$$1 \text{ дптр} = \frac{1}{\text{м}}.$$

Обратите внимание на то, что фокусное расстояние, как и любое другое расстояние, можно измерять в метрах, сантиметрах, миллиметрах. Но для вычисления оптической силы линзы фокусное расстояние должно быть выражено только в метрах. Например, если фокусное расстояние линзы 50 см, то её оптическая сила

$$D = \frac{1}{0,5 \text{ м}} = 2 \text{ дптр}.$$

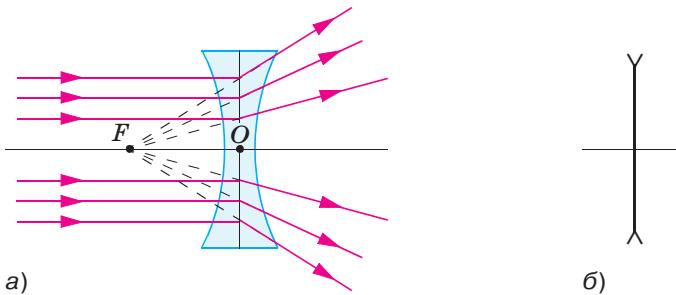
Для собирающей линзы оптическую силу принято записывать со знаком «+» (в нашем примере оптическая сила линзы равна +2 дптр).

Если направить параллельный пучок световых лучей на двояковогнутую линзу, то из линзы лучи выйдут расходящимся пучком (рис. 159). Поэтому такую линзу называют **рассеивающей**. Если продолжить расходящиеся лучи в противоположную сторону, то они пересекутся в точке, лежащей на оптической оси линзы с той же стороны, откуда падает свет. Эту точку называют фокусом линзы и



Собирающая линза

Рис. 159. Рассеивающая линза:
а — прохождение
лучей света
через фокус;
б — изображение
на схемах



обозначают буквой F . У рассеивающей линзы также два фокуса, в чём можно убедиться, направив лучи на линзу с другой стороны. Фокус рассеивающей линзы называют *мнимым*, так как в нём собираются не сами лучи, преломлённые линзой, а их продолжения. Оптическую силу рассеивающей линзы принято записывать со знаком « $-$ ».

Собирающими линзами, созданными природой, являются хрусталик и роговица глаза человека. Благодаря им человек видит окружающий мир. Техническое использование линзы получили в таких приборах, как очки, лупа, микроскоп, телескоп, фотоаппарат, проекционный аппарат и многие другие.



1. Расскажите, используя рисунки 155 и 157, об основных линиях и точках линзы.
2. Какие виды линз вы знаете? Чем они отличаются друг от друга?
3. Что характеризует оптическая сила линзы?
4. Как определить оптическую силу линзы? В чём она измеряется?



Как, используя в качестве источника света Солнце, оценить фокусное расстояние собирающей линзы?



УПРАЖНЕНИЕ 41

1. Какой вред в солнечный день могут принести листьям растений попавшие на них капли воды?
2. Найдите оптическую силу собирающих линз, фокусные расстояния которых 5 см, 20 см, 2 м.
3. Даны две линзы с оптическими силами +5 и -2 дптр. Определите фокусное расстояние каждой линзы. Какая из них рассеивающая?



ЗАДАНИЕ 17

- Докажите построением, что линзы, показанные на рисунке 156, а, — собирающие, на рисунке 156, б — рассеивающие.

§ 45

ИЗОБРАЖЕНИЯ, ДАВАЕМЫЕ ЛИНЗОЙ

С помощью линзы можно получать различные изображения предмета. Собирающая линза позволяет получить уменьшенное или увеличенное, прямое или перевёрнутое изображение (рис. 160).

Пусть нам требуется построить изображение некоторого предмета. Если мы научимся строить изображение одной точки предмета, то сможем построить изображение и всего предмета.

Рассмотрим произвольную точку S предмета. Можно доказать, что после преломления в линзе все лучи, исходящие из точки S (или их продолжения), будут пересекаться в одной точке S_1 — изображении точки S . Значит, для построения изображения точки достаточно взять два любых луча, исходящих из неё. Но какие из лучей наиболее удобны?

Выберем луч 1, идущий параллельно главной оптической оси линзы. Этот луч, преломившись в линзе, пройдёт через фокус (рис. 161). Вторым возьмём луч 2, проходящий через оптический центр линзы. Как показывает опыт, он проходит линзу без преломления. На пересечении этих двух лучей находим положение точки S_1 (см. рис. 161). Аналогично строятся изображения остальных точек предмета.

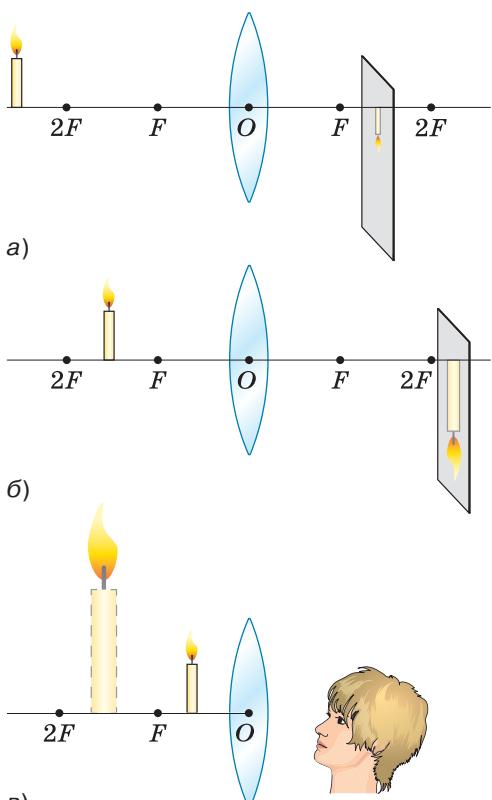


Рис. 160. Изображение свечи в собирающей линзе

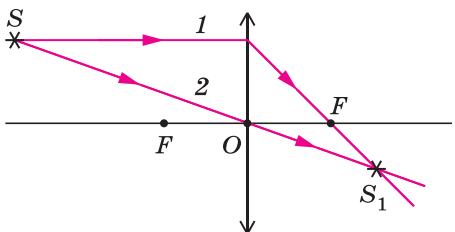


Рис. 161. Построение изображения светящейся точки в собирающей линзе

лизы. На пересечении этих лучей получим **действительное** (пересекаются сами лучи, а не их продолжения) изображение точки A — точку A_1 . Опыт, изображённый на рисунке 160, показывает, что изображение предмета, перпендикулярного главной оптической оси линзы, также перпендикулярно этой оси. Следовательно, для построения изображения B_1 точки B нужно из точки A_1 опустить перпендикуляр на главную оптическую ось линзы.

Когда предмет AB расположен между точками F и $2F$, его **действительное, увеличенное и перевёрнутое** изображение A_1B_1 находится за двойным фокусом линзы (см. рис. 162):

$$f > 2F,$$

где f — расстояние от линзы до изображения.

Расположим предмет AB на расстоянии $d > 2F$ от линзы (рис. 163). Его изображение A_1B_1 является **действительным, уменьшенным и перевёрнутым**. Относительно линзы

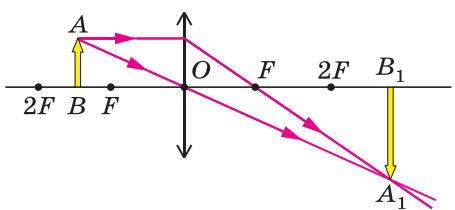
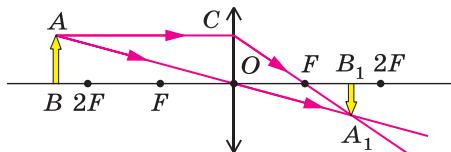


Рис. 162. Изображение, даваемое линзой, когда предмет находится между фокусом и двойным фокусом

расположим предмет между фокусом и двойным фокусом. В этом случае расстояние d от предмета AB до линзы меньше $2F$, но больше F : $F < d < 2F$. На рисунке 162 для построения изображения предмета использовали два луча, исходящие из точки A предмета: луч, проходящий через оптический центр линзы, и луч, идущий параллельно главной оптической оси

Рис. 163. Изображение, даваемое линзой, когда предмет находится за двойным фокусом



изображение находится между фокусом и двойным фокусом, т. е.

$$F < f < 2F.$$

Такое изображение можно получить с помощью фотоаппарата. Более подробно о нём будет рассказано в § 47.

Если предмет AB расположен между фокусом и линзой, т. е. $d < F$, то его изображение A_1B_1 является *мнимым, увеличенным и прямым* (рис. 164). Оно находится между фокусом и двойным фокусом, т. е.

$$F < f < 2F.$$

В данном случае линза «работает» как лупа (см. § 47). Лупы используют для рассмотрения мелких предметов: при чтении, сборке часов, в криминалистике и т. д.

Итак, размеры и расположение изображения предмета в собирающей линзе зависят от положения предмета относительно линзы.

На рисунке 165 показано построение изображения предмета в рассеивающей линзе. Рассеивающая линза даёт *мнимое, уменьшенное, прямое изображение*, которое находится по ту же сторону от линзы, что и предмет. Характер изображения не зависит от положения предмета относительно рассеивающей линзы.

Если изображение, даваемое линзой, действительное, то его можно увидеть на экране, установленном в месте получения изображения. Изображение же, даваемое лупой, на экране увидеть невозможно, так как оно мнимое.

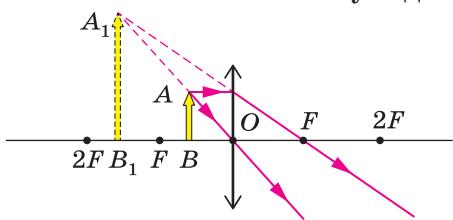


Рис. 164. Изображение, даваемое линзой, когда предмет находится между фокусом и линзой

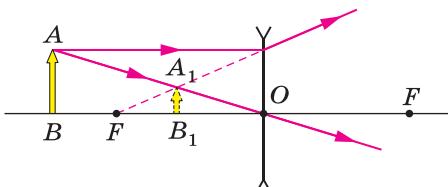


Рис. 165. Построение изображения предмета в рассеивающей линзе

Все вы имеете представление о фотоаппарате. С его помощью решается задача получения на светочувствительной поверхности, которая играет роль экрана, действительного уменьшенного изображения. В фотоаппарате в зависимости от расстояния между линзой и предметом положение линзы подбирается таким (наводка на резкость), чтобы на светочувствительной поверхности, находящейся между точками F и $2F$, возникло бы чёткое изображение предмета. Конечно, это возможно лишь в том случае, если расстояние между линзой и предметом больше двойного фокусного расстояния. На практике расстояние между линзой и предметом значительно больше двойного фокусного расстояния. При этом изображение предмета находится почти в фокусе линзы.



1. От чего зависит характер изображения, даваемого собирающей линзой?
2. Какие лучи используют для построения изображения предмета в линзах?
3. Как меняется характер изображения предмета при увеличении расстояния между предметом и собирающей линзой; рассеивающей линзой?
4. В каких оптических приборах используются линзы?
5. Может ли вогнутая линза дать действительное изображение? Почему?



1. По рисунку 160 определите, в каких случаях изображение свечи получается действительное; мнимое. Чем различаются мнимое изображение и действительное?
2. Можно ли с помощью собирающей линзы получить изображение предмета, расположенного в фокусе линзы? Ответ поясните.



УПРАЖНЕНИЕ 42

1. Постройте изображения предмета в собирающей линзе и опишите их. Рассмотрите следующие случаи: а) предмет находится за двойным фокусом; б) предмет находится в точке двойного фокуса; в) предмет находится между фокусом и двойным фокусом; г) предмет находится между линзой и фокусом.
2. При каком условии изображение предмета, даваемое собирающей линзой, получается мнимым? Можно ли видеть это изображение? Можно ли получить его на экране? Ответ проиллюстрируйте чертежом.
- 3*. С помощью собирающей линзы получено изображение предмета. Как изменится изображение, если половину линзы закрыть непрозрачным экраном?

Это любопытно...

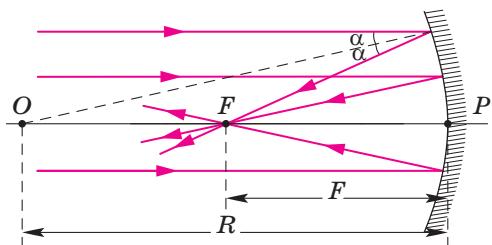


Рис. 166. Основные линии и точки сферического зеркала

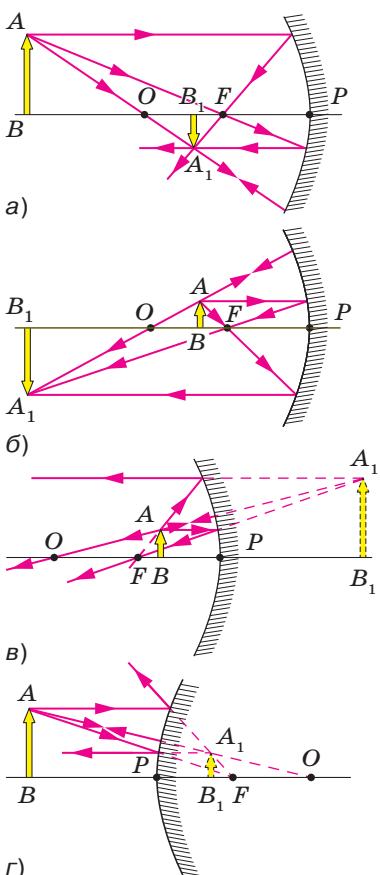


Рис. 167. Изображение предмета в вогнутом (а—в) и выпуклом (г) зеркалах

Сферические зеркала

Способностью собирать световую энергию в точке обладают не только линзы, но и зеркала, только не плоские, а сферические.

Сферическое зеркало представляет собой зеркально отражающую свет часть сферы. Такое зеркало может быть **вогнутым**, если отражает свет внутренняя поверхность сферы, или **выпуклым**, если отражающей является наружная поверхность сферы.

Основные линии и точки сферического зеркала (рис. 166) схожи с линиями и точками линзы. Так, у зеркала есть оптический центр (точка O) — центр сферы, из которой вырезано зеркало. Через оптический центр O и вершину сферической поверхности (полюс зеркала P) проходит главная оптическая ось OP . Как и у линзы, у сферического зеркала есть фокус F — точка, в которой собирается пучок света, идущий параллельно главной оптической оси зеркала. Расстояние от полюса зеркала до фокуса равно половине радиуса сферы.

Сферические зеркала могут давать как действительное, так и мнимое изображение. Действительное изображение предмета можно получить только в вогнутом зеркале. Для этого предмет нужно поместить дальше фокуса зеркала. Действительное изображение предмета всегда перевёрнутое. Оно может быть уменьшенным (рис. 167, а), равным или увеличенным (рис. 167, б).

Если предмет находится ближе к вогнутому зеркалу, чем фокус, то его изображение мнимое, прямое, увеличенное (рис. 167, в).

Выпуклое зеркало при любом расстоянии от предмета до зеркала даёт мнимое, прямое, уменьшенное изображение (рис. 167, г).



Дорожное обзорное зеркало

Вогнутые зеркала бывают не только сферическими, но и другой формы, например параболическими. Если источник света поместить в фокус вогнутого зеркала, то после отражения от него сформируется параллельный пучок света, который можно направить в нужном направлении. Так устроены карманные фонари, прожекторы, в том числе на маяках. Вогнутые зеркала используют в телескопах для наблюдения далёких небесных тел. Свойство вогнутых зеркал — концентрировать в небольшом объёме световую энергию — используют для получения высоких температур в гелиоустановках.

Выпуклые зеркала используют как обзорные в помещениях и на улицах, на дорогах с ограниченной видимостью, чтобы сделать движение безопасным.



Как располагается лампа относительно вогнутого зеркала в автомобильной фаре?

§ 46

ГЛАЗ И ЗРЕНИЕ

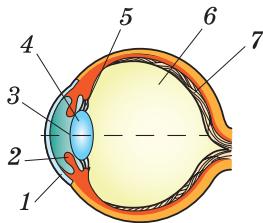


Рис. 168. Глаз человека

Рассмотрим устройство и работу такого замечательного прибора, созданного природой, как наш глаз. Его можно считать природным фотоаппаратом. Основными элементами оптической системы глаза человека (рис. 168) являются две «линзы» — *роговица* 1 (роговая оболочка) и *хрусталик* 4. Хрусталик — прозрачное линзообразное тело, абсолютный показатель преломления которого почти такой же, как у стекла. Роль светочувствительной поверхности выполняет *сетчатка* 7 — соединение нервных клеток и волокон, воспринимающих и проводящих световые воздействия.

В фотоаппарате имеется устройство (диафрагма), с помощью которого регулируется диаметр сечения светового пучка, проходящего через линзу. Достигается это за счёт изменения размера отверстия диафрагмы, находящейся между линзой и источником световых лучей. В глазу роль диафрагмы выполняет от-

верстие в радужной оболочке 2, которая за счёт красящего пигмента может иметь различные цвета: голубой, зелёный, карий и т. п.

Отверстие в радужной оболочке называют зрачком 3. За счёт кольцевых и радиальных мышиц 5 радужной оболочки диаметр зрачка может меняться от 1 мм до 8 мм. Это происходит рефлекторно в зависимости от количества света, попадающего в глаз.

В целом глаз выглядит как почти шарообразное тело. Его диаметр у новорождённого человека составляет примерно 16 мм, а у взрослого — 24 мм. Снаружи глаз окружён толстой (0,5—1 мм) белой прозрачной оболочкой, называемой склерой. Спереди она прозрачная и несколько выпуклая (роговая оболочка), а сзади — белая и непрозрачная. Роговица действует как собирающая линза и обеспечивает примерно 75% фокусирующей способности глаза.

За склерой располагается сосудистая оболочка, представляющая собой переплетение кровеносных сосудов, питающих глаз. В передней части глаза сосудистая оболочка постепенно переходит в радужную оболочку. Пространство между хрусталиком и роговицей — передняя камера — заполнено водянистой влагой. За хрусталиком до задней стенки глазного дна находится прозрачная студенистая масса, называемая стекловидным телом 6.

Как же «работает» наш глаз? Световые лучи, преломляясь в роговице, передней камере, хрусталике и стекловидном теле, попадают на сетчатку. Вследствие этого от нервных клеток сетчатки по волокнам зрительного нерва в мозг поступают электрические импульсы. В результате возникает зрительное ощущение: человек видит предметы.

Обратите внимание на характер изображения на сетчатке (рис. 169): оно перевёрнутое, как и в фотоаппарате. Тогда почему же мы вос-

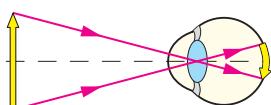


Рис. 169. Формирование изображения на сетчатке глаза

принимаем предметы прямыми? Дело в том, что мозг вносит корректировку в процесс зрения и автоматически «переворачивает» изображение, возникающее на сетчатке.

Особенностью глаза является то, что расстояние от его частей, выполняющих роль собирающихся линз (роговица, передняя камера, хрусталик, стекловидное тело), до сетчатки неизменно, т. е. расстояние от линзы до изображения остаётся постоянным. В то же время расстояние от глаза (линзы) до предмета может быть разным. Почему же тогда человек видит чёткие изображения предметов? Оказывается, преломляющая способность глаза может меняться за счёт изменения кривизны хрусталика.

Что произойдёт, если хрусталик сожмётся и станет более выпуклым? Вспомните, какая линза преломляет лучи сильнее. Более выпуклая. Следовательно, более выпуклый хрусталик будет преломлять лучи сильнее.

Как уже говорилось выше, лучи преломляются в основном роговицей. Хрусталик только помогает ей в фокусировке света. Изменяя свою кривизну, он осуществляет настройку глаза на чёткое видение предмета, когда изображение попадает точно на сетчатку. Хрусталик сокращается за счёт мышц, которые прикрепляют его к склере. Настройку глаза на наилучшее видение называют *аккомодацией* (от лат. *accommodatio* — приспособление). По напряжению мышц, вызывающих аккомодацию хрусталика, человек способен судить о расстоянии до предметов, смотря даже одним глазом. Предел аккомодации наступает при расстоянии между предметами и глазом, равном примерно 12 см. Расстояние от предмета до глаза, при котором можно рассматривать детали предмета практически без напряжения, называют *расстоянием наилучшего зрения*. Для людей с нормальным зрением оно равно примерно 25 см.

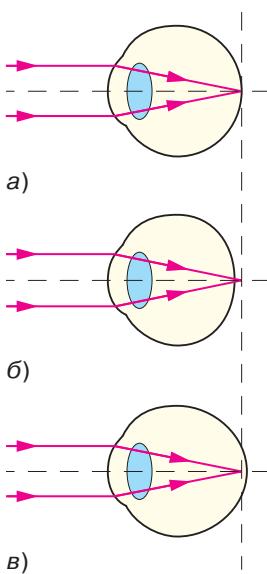


Рис. 170. Формирование изображения при: а — нормальном зрении; б — дальнозоркости; в — близорукости

У человека с нормальным зрением фокус глаза в ненапряжённом состоянии находится на сетчатке (рис. 170, а). Нередко встречаются два дефекта зрения: **дальнозоркость** и **близорукость**.

Фокус **дальнозоркого** глаза в ненапряжённом состоянии находится не на сетчатке, а за ней (рис. 170, б). Расстояние наилучшего зрения в данном случае больше 25 см. Рассматривая предмет, человеку приходится отодвигать его от глаз. С возрастом у большинства людей появляется старческая дальнозоркость. Это происходит из-за того, что мышцы, связанные с хрусталиком, ослабевают, сам хрусталик уплотняется, и его способность сжиматься ухудшается. Как исправить дальнозоркость? Для усиления преломляющих свойств к глазу надо добавить ещё одну собирающую линзу, что и делают с помощью очков.

Фокус **близорукого** глаза в ненапряжённом состоянии находится перед сетчаткой (рис. 170, в). Расстояние наилучшего зрения в данном случае меньше 25 см. Рассматривая предмет, близорукий человек подносит его ближе к глазам. Для исправления близорукости нужно уменьшить преломляющую способность глаза с помощью рассеивающей линзы. В очках для близоруких глаз используют именно рассеивающие линзы.

От рождения человеку даны два глаза. Поле (или угол) зрения двух глаз значительно больше, чем одного. Кроме того, изображения предметов на сетчатке левого и правого глаза несколько различны. Благодаря этому наш глаз воспринимает изображения предметов объёмными, а не плоскими.



1. Каково строение глаза человека?
2. Как формируется изображение на сетчатке глаза? Охарактеризуйте это изображение.
3. Почему при разных расстояниях до предмета изображение всегда получается на сетчатке?
4. Чему равно расстояние наилучшего зрения для человека

с нормальным зрением? **5.** Почему близоруким людям нужны очки с рассеивающими линзами, а дальнозорким — с собирающими? **6.** Какое преимущество даёт зрение двумя глазами?



- 1.** Почему нелегко вдеть нитку в иголку, если смотреть одним глазом?
- 2.** Два наблюдателя — один близорукий, другой дальнозоркий — рассматривают предмет при помощи одинаковых луп. Какому из наблюдателей приходится помещать предмет ближе к лупе, если расстояние от лупы до глаза у обоих наблюдателей одинаковое?



ЗАДАНИЕ 18



- 1.** Проверьте зависимость размера зрачка от освещённости. Для этого с помощью зеркала понаблюдайте, что будет происходить со зрачками ваших глаз, если на них направить солнечный зайчик или свет от электрической лампочки.
- 2.** Измерьте расстояние наилучшего зрения для вашего глаза.



§ 47

ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Как вам уже известно, удивительным природным оптическим «прибором» является глаз человека. Изображение в нём образуется на сетчатке. Бывают ситуации, когда предмет невозможно рассмотреть или когда необходимо получить его изображение на экране. В таких случаях используют *оптические приборы*. Комбинирование различных линз позволяет сконструировать приборы для рассматривания мелких предметов (лупа, микроскоп), удалённых (бинокль, телескоп), для воспроизведения изображений на большом экране (проектор) и т. д.

Чем крупнее изображение предмета на сетчатке, тем больше его деталей можно различить. Размер изображения тем больше, чем больше *угол зрения*. Это угол, образованный прямыми, проведёнными от краёв предмета в оптический центр глаза (см. рис. 169).

Известно, что глаз различает две точки раздельно, если угол зрения, под которым они



а)



б)



в)

Оптические приборы:
а — бинокль;
б — лупа;
в — микроскоп

видны, не меньше одной минуты. Если угол зрения меньше, то эти две точки сольются в одну. Для того чтобы помочь нашему глазу рассмотреть очень отдалённые или очень мелкие предметы, применяются различные оптические приборы, вооружающие глаз. Их задача — увеличение угла зрения.

Лупа является одним из таких приборов. В качестве лупы применяются собирающие линзы с фокусным расстоянием от 1 до 10 см. Линзы с фокусным расстоянием меньше 1 см не применяются, так как они по размерам должны быть столь мелкими, что на практике ими невозможно пользоваться. Линзы с фокусным расстоянием больше 10 см также не применяются, так как они увеличивают угол зрения незначительно, а при расстоянии 25 см он и вовсе не меняется.

Лупу помещают перед глазом по возможности ближе к нему, а рассматриваемый предмет — на расстоянии немного меньше фокусного расстояния лупы (см. рис. 164). Угол зрения, под которым мы видим предмет, увеличивается. И тогда глаз сможет без напряжения чётко рассмотреть многие детали этого предмета. Лупа даёт увеличение в 2—25 раз.

Для получения больших увеличений применяется **микроскоп**. На уроках биологии вы пользовались этим прибором и знаете, что он состоит из окуляра, объектива, тубуса, предметного столика, зеркала и винтов для наводки на резкость. Оптическая система микроскопа состоит из двух частей: объектива и окуляра (рис. 171). В простейшем случае в качестве объектива и окуляра используют по одной собирающей линзе, в более сложном — систему линз. Объектив (он обращён к предмету) — это короткофокусная линза; окуляр (он обращён к глазу) — длиннофокусная линза.

Предмет *AB* помещают перед объективом на расстоянии немного большем фокусного. Объ-

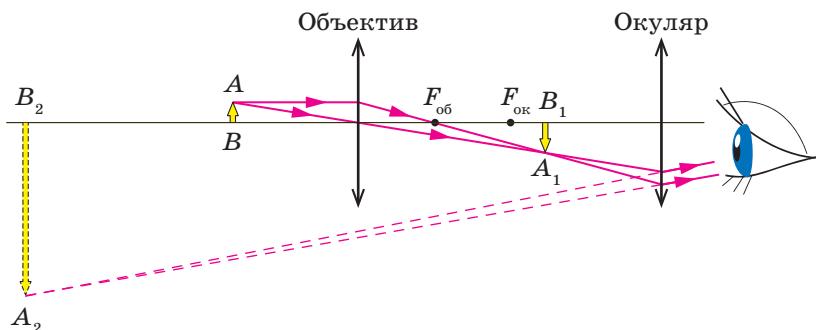


Рис. 171. Ход лучей в микроскопе

ектив даёт действительное, увеличенное, перевёрнутое изображение A_1B_1 . Передвигая окуляр в тубусе, добиваются того, чтобы изображение оказалось между фокусом и линзой окуляра (как можно ближе к фокусу), т. е. окуляр играет роль лупы. Окуляр даёт мнимое, увеличенное, прямое изображение A_2B_2 .

В современных микроскопах, дающих увеличение до 1000 раз, в качестве окуляра и объектива используется система линз. С помощью микроскопа мы можем отчётливо видеть кровяные шарики, многие виды микробов. Например, чтобы увидеть кровяные шарики, достаточно увеличение микроскопа в 200 раз.

Невооружённый глаз не может рассмотреть не только мелкие, но и далёкие предметы. Для наблюдения удалённых объектов, таких как планеты, звёзды и др., применяют **телескопы**. В оптических схемах телескопов используют либо линзы (такие телескопы называют *рефракторами*), либо зеркала (тогда телескопы называют *рефлекторами*).

Наиболее распространённой оптической схемой рефрактора является схема, предложенная Кеплером в начале XVII в. Труба Кеплера состоит из двух собирающих линз: длиннофокусной (объектива) и короткофокусной (окуляра). Объектив даёт уменьшенное, перевёрнутое, действительное изображение A_1B_1 , которое располагается

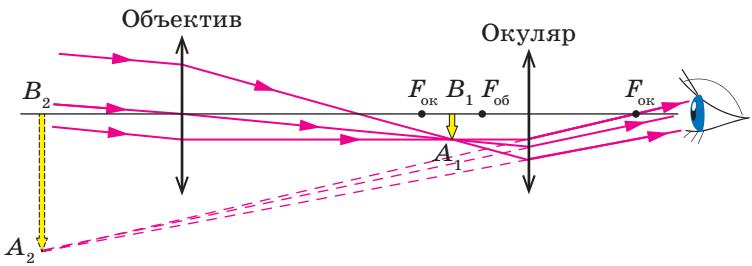


Рис. 172. Ход лучей в телескопе-рефракторе

гается вблизи фокуса объектива (рис. 172). Хотя изображение A_1B_1 меньше самого объекта, оно расположено очень близко к окуляру, действующему как лупа. В результате возникает сильно увеличенное мнимое изображение A_2B_2 . Таким образом, телескоп даёт мнимое изображение, которое после прохождения через оптическую систему глаза формирует действительное изображение на сетчатке. Объектив телескопа должен иметь не только большое фокусное расстояние, но и большой радиус, чтобы в глаз попадало как можно больше света.

В телескопе-рефлекторе в качестве объектива используется параболическое зеркало большого диаметра. В его фокусе сходится практически параллельный пучок света от далёкого объекта. Этот сходящийся пучок с помощью плоского зеркала направляется в окуляр, через который рассматривают изображение объекта (рис. 173). Первый пригодный вариант телескопа-рефлектора был предложен Ньютоном в 1668 г.

Рассмотрим теперь оптический прибор, изображение в котором получается действительным, — **фотоаппарат**. Он состоит из непрозрачной камеры и объектива — системы собирающих линз. Объектив даёт действительное, уменьшенное, перевёрнутое изо-

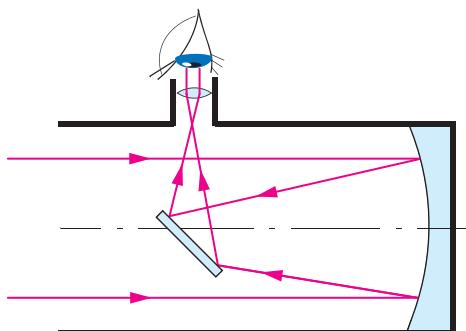


Рис. 173. Ход лучей в телескопе-рефлекторе

брожение предмета на задней стенке камеры (см. рис. 163), где находится приёмное устройство — пластинка со световыми датчиками. Фотографируемый предмет может находиться на разном расстоянии от объектива, поэтому расстояние между объективом и светочувствительной пластинкой нужно менять. Это осуществляют путём перемещения объектива.

Отметим, что устройство всех рассмотренных оптических приборов основано на законах *геометрической оптики*, в которой распространение света изучается на основе представления о световом луче.



1. Что такое оптические приборы? Приведите примеры оптических приборов. **2.** Что означают слова «вооружить глаз»? Какие приборы, вооружающие глаз, вам известны? **3.** Что такое угол зрения? **4.** Почему с помощью лупы удается увеличить угол зрения при рассмотрении мелких предметов? **5.** Как устроен микроскоп? Объясните, используя рисунок 171, ход лучей в микроскопе. **6.** Для чего служат телескопы? Объясните, используя рисунок 172, ход лучей в телескопе-рефракторе. **7.** Как устроен телескоп-рефлектор? **8.** Охарактеризуйте изображения, получаемые с помощью микроскопа, телескопа и фотоаппарата.



1. Какая из двух луп, изображённых на рисунке 174, имеет большее фокусное расстояние?

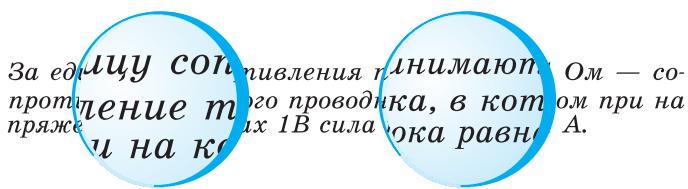


Рис. 174

2. Зеркала телескопов-рефлекторов шлифуют с очень высокой точностью: до долей микрометров. Подумайте и объясните, зачем нужна такая высокая точность шлифовки.



ЗАДАНИЕ 19

- Первая зрительная труба (телескоп) — труба Галилея — состояла из собирающей и рассеивающей линз. Начертите принципиальную оптическую схему трубы Галилея, постройте ход лучей в ней. Охарактеризуйте изображение, получаемое с помощью трубы Галилея.

Изучая распространение, отражение и преломление света, мы до сих пор не ставили вопрос о том, что такое свет, какова его природа. Ответ на этот вопрос интересовал людей с давних времён. К концу XVII в. представления о природе света оформились в две различные теории — корпускулярную и волновую. Ньютона был сторонником корпускулярной теории, в которой свет от источника света рассматривался как поток частиц (корпускул). Он считал, что движение световых корпускул подчиняется законам механики. Так, отражение света Ньютон рассматривал аналогично отражению упругого шарика от плоскости. Волновая теория была развита Гюйгенсом. Согласно этой теории, свет представляет собой волну, которая распространяется в особой среде (эфире), заполняющей всё вокруг.

Обе теории успешно объясняли закон прямолинейного распространения света, законы отражения и преломления. В течение всего XVIII в. они существовали одновременно, каждая имела своих сторонников. Однако в начале XIX в. ситуация изменилась — были поставлены эксперименты, доказывающие, что свет обладает волновыми свойствами. Прежде чем рассмотреть эти доказательства, необходимо познакомиться с важным явлением, характерным для любых волновых процессов, — **интерференцией волн** (от лат. *inter* — взаимно и *ferio* — ударяю). Знакомство с интерференцией начнём с наблюдения за волнами на поверхности жидкости.

Над поверхностью воды установим стержень с насадкой, состоящей из пластинки с прикреплёнными к ней двумя проволочками. При вертикальных колебаниях стержня концы проволочек будут периодически погружаться в воду и возбуждать колебания, распространяющиеся по её поверхности в виде волн одинаковой частоты. Каждая из проволочек возбуждает свою систему волн. Две системы волн, налагаясь од-

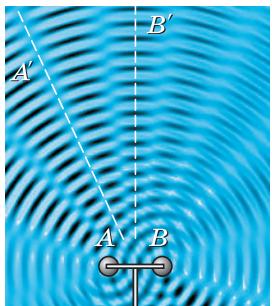


Рис. 175. Интерференционная картина на поверхности воды

на на другую, образуют на поверхности воды картину, показанную на рисунке 175.

Некоторые точки поверхности воды (например, точки, принадлежащие линии AA' на рисунке 175) остаются почти неподвижными. В то же время существуют точки, которые колеблются с большой амплитудой (например, точки, принадлежащие линии BB' на рисунке 175). Такую не меняющуюся со временем картину чередующихся максимумов и минимумов амплитуд колебаний называют *интерференционной картиной*. Рассмотрим механизм её образования.

Точка поверхности воды, находящаяся на пути двух волн, участвует одновременно в колебаниях обеих волн. Пусть в некоторый момент времени в некоторую точку обе волны, имеющие одинаковую частоту, приходят в противоположных фазах (гребень одной волны сходится с впадиной другой). Колебания при этом взаимно ослабляются (рис. 176, а), т. е. амплитуда результирующей волны в такой точке будет меньше, чем амплитуда каждой из исходных волн. Если разность фаз этих волн не будет меняться со временем, то ослабление будет происходить в каждый момент времени. Мы увидим, что волнение воды в данном месте почти отсутствует. Наоборот, в том месте, куда обе волны приходят в одинаковой фазе, будут всё время происходить усиленные колебания поверхности воды (рис. 176, б).

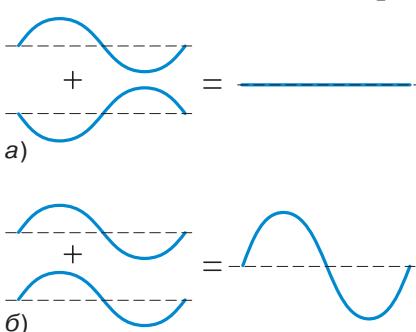


Рис. 176. Сложение колебаний

Интерференционная картина возникает в том случае, когда налагающиеся волны имеют одинаковую частоту и постоянную во времени разность фаз в каждой точке. В рассмотренном опыте это условие выполнено, поскольку обе проволочки прикреплены к одной и той же колеблющейся пластинке (разность фаз двух волн определяется разностью расстояний от точки до источников волн).

Явление наложения волн, при котором образуется постоянное во времени распределение амплитуд результирующих колебаний, называют интерференцией.

Явление интерференции волн присуще не только волнам на поверхности жидкости, но и любым другим видам волн. Так, если установить в комнате два громкоговорителя, подключённых к общему звуковому генератору, то, перемещаясь по комнате на небольшие расстояния, можно обнаружить, что в одних точках пространства звучание громкое (звуковые волны усиливают друг друга), а в других — тихое (звуковые волны друг друга ослабляют).

Если свет обладает волновыми свойствами, то в результате наложения двух световых пучков может произойти не только усиление, но и ослабление света. А это значит, что совместное действие световых пучков может привести к возникновению темноты. Повседневный опыт показывает, что две лампы вместе дают больше света, чем каждая в отдельности. Однако при выполнении определённых условий (они будут обсуждаться в курсе физики старших классов) возможна обратная ситуация.

В 1802 г. английский учёный **Томас Юнг** (1773—1829) провёл опыт по сложению световых пучков, ставший доказательством того, что свет обладает волновыми свойствами. В опыте Юнга пучок света от ярко освещённой щели S направлялся на непрозрачный экран с

двумя узкими параллельными прорезями S_1 и S_2 (рис. 177). При этом на удалённом экране возникал ряд чередующихся светлых и тёмных полос. Когда одну из щелей S_1 или S_2 закрывали, тёмные полосы ис��али и на экране оставалась лишь светлая полоса. Если бы свет, падающий на щели S_1 и S_2 , представлял собой поток частиц, то в слу-

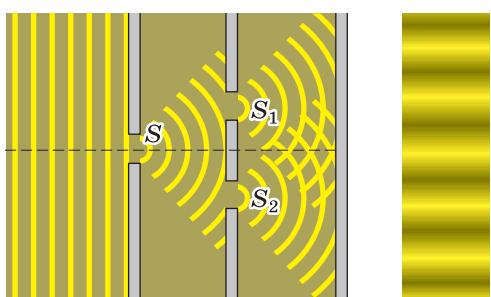


Рис. 177. Опыт Юнга

чае открытия обеих щелей на экране можно было бы увидеть только две светлые полосы, пространство между которыми оставалось бы почти неосвещённым. Юнг смог дать правильное толкование результатов опыта, объяснив возникновение чередующихся светлых и тёмных полос интерференцией света.

Измерив ширину интерференционных полос, Юнг впервые в истории науки определил длины световых волн.

Оказалось, что свету разных цветов соответствуют разные интервалы длин волн. Самые большие значения длин волн у красного света: от $7,6 \cdot 10^{-7}$ 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: $4,0 \cdot 10^{14}$ — $4,8 \cdot 10^{14}$ Гц.

Длины волн убывают (а частоты возрастают) в следующей последовательности: *красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий, фиолетовый*. Из этого ряда следует, что фиолетовый свет — самый коротковолновый, его длины волн лежат в интервале $4,5 \cdot 10^{-7}$ — $3,8 \cdot 10^{-7}$ м, им соответствует интервал частот $6,7 \cdot 10^{14}$ — $8,0 \cdot 10^{14}$ Гц.

Итак, полученные Юнгом световые интерференционные картины свидетельствовали о том, что свет обладает волновыми свойствами.

Повседневный опыт показывает, что в некоторых случаях механические волны способны огибать препятствия, встречающиеся на их пути. Так, волна от брошенного в пруд камня огибает торчащее из воды бревно, а сигнал машины за углом дома мы можем слышать, даже когда самой машины не видно.

Явление огибания волнами препятствий называют дифракцией.

Дифракция — от лат. *diffractus* — разломанный.

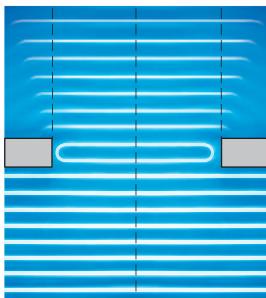


Рис. 178. Проходя через широкое отверстие, волны почти не испытывают отклонения от прямолинейного распространения

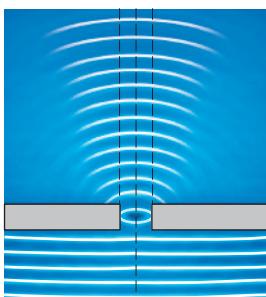


Рис. 179. Когда ширина отверстия становится сравнимой с длиной волны, наблюдается дифракция

Получим на поверхности воды систему прямолинейных волн (для этого к стержню следует прикрепить плоскую насадку и расположить её параллельно поверхности воды) и ограничим их дальнейшее распространение отверстием, ширина которого существенно больше длины волны. Мы увидим, что отверстие пропускает волну, почти не изменяя её формы (рис. 178). Сузим ограничивающее отверстие до размера, меньшего длины волны. Область за отверстием окажется заполненной круговыми волнами, центром которых служит малое отверстие (рис. 179), — наблюдается дифракция.

Таким образом, наиболее отчётливо дифракция проявляется при встрече волны с препятствием (или отверстием), имеющим размеры, близкие к длине волны. Именно по этой причине трудно наблюдать явление «звуковой тени». Длины звуковых волн обычно сравнимы с размерами препятствий, поэтому волны ихгибают (мы слышим звук из-за угла дома или стоя за деревом и т. п.).

Наблюдается ли явление дифракции для света? Пучок света, выходящий в опыте Юнга из первичной щели S , расплывается, расходится «веером». Это и есть дифракция. Если мы посмотрим на фонарь или лампу сощурившись, то увидим вертикальную полосу света — результат дифракционной расходимости.

В § 40 образование теней от непрозрачных предметов мы объясняли прямолинейным распространением света. Размеры тел, с которыми мы встречаемся в повседневной жизни, очень велики по сравнению с длинами световых волн, огибать такие тела световые волны не могут. В этих случаях можно сказать, что свет распространяется прямолинейно.

В 1818 г. французский физик **Огюстен Френель** (1788—1827) представил в Парижскую академию наук «Записку о теории дифракции», в которой дал объяснение многочисленным опытам по дифракции с волновой точки зрения.

Рассматривая эту работу, известный французский учёный **Симеон Пуассон** (1781—1840) обратил внимание на то, что из теории Френеля следует «нелепый» вывод: в центре тени, отбрасываемой маленьким круглым диском, должно находиться светлое пятнышко.

Каково же было удивление учёных, когда французский физик **Доминик Араго** (1786—1853) экспериментально подтвердил, что такое пятнышко действительно существует! Опыт Араго стал одним из веских доказательств правильности волновой теории света.



1. Какие два взгляда на природу света существовали среди учёных с давних времён?
2. Какое явление называют интерференцией волн?
3. При каких условиях можно наблюдать интерференционную картину?
4. В чём заключалась суть опыта Юнга, что этот опыт доказывал и когда был поставлен?
5. Что можно сказать о частоте (или длине волн) световых волн разных цветов?
6. Что называют дифракцией?
7. При каких условиях дифракция проявляется наиболее отчётливо?
8. В каких опытах обнаруживается дифракция световых волн?



Каким образом картина чередующихся светлых и тёмных полос на экране могла помочь Юнгу определить длины световых волн?

Пусть интерференционная картина наблюдается в красном свете. Расстояние между щелями в опыте Юнга — 1,4 мм, расстояние до экрана — 2 м, а расстояние между красной полосой в центре экрана и ближайшей к ней красной полосой — 1 мм. Можете ли вы, опираясь на эти данные, оценить длину волны используемого света?



ЗАДАНИЕ 20



1. На полоске чёрного картона с помощью швейной иглы диаметром 0,6—0,8 мм сделайте отверстия всё уменьшающихся диаметров, начиная с диаметра иглы. Чтобы отверстия получились круглыми, полоску картона при прокалывании поворачивайте вокруг иглы. Посмотрите на точечный источник света (можно использовать фонарик мобильного телефона, проводя наблюдения на расстоянии 2—3 м от него) последовательно через каждое отверстие, помещая его перед глазом. Как изменяется наблюдаемая картина при уменьшении диаметра отверстия? С каким явлением это связано?
2. На полоске чёрного картона с помощью швейной иглы сделайте двойное отверстие (два маленьких отверстия, расположенных на расстоянии долей миллиметра друг от друга). Хорошо, если диаметры отвер-

стий получается около 0,2—0,3 мм, а расстояние между ними — 0,4—0,6 мм. Посмотрите через двойное отверстие на точечный источник света. Вы увидите, что центральное светлое пятно разбито тёмными полосами на ряд светлых полос. Объясните, с какими явлениями связана наблюдаемая картина.

Это любопытно...

Измерение скорости света

Когда мы нажимаем на кнопку выключателя, комната сразу озаряется светом. Кажется, что свету совсем не требуется времени, чтобы достигнуть стен. Как измерить скорость света?

Самая простая идея заключается в том, чтобы измерить время, за которое свет проходит определённый путь. Разделив путь на время, найдём скорость света. Поскольку скорость света очень велика, для её измерения в земных условиях нужна установка, позволяющая регистрировать очень маленькие промежутки времени. Впервые скорость света в земных условиях удалось измерить французскому физику **Ипполиту Физо** (1819—1896) в 1849 г.

Схема опыта Физо изображена на рисунке 180. Свет от источника проходит через линзу и фокусируется на зубчатом колесе, предварительно отразившись от полупрозрачной пластины. Если на пути света оказывается прорезь колеса, то свет проходит через неё, достигает зеркала, находящегося на расстоянии 8,6 км, и возвращается обратно. При медленно вращающемся колесе на обратном пути света оказывается та же прорезь, и он, пройдя через неё и полупрозрачную пластину, попадает в глаз наблюдателя. При увеличении скорости вращения колеса наступает момент, когда наблюдатель перестаёт видеть свет. Дело в том, что пока свет идёт до зеркала и обратно, колесо успевает повернуться так, что на место прорези встаёт соседний с ней зубец. Происходит, как говорят, первое затме-

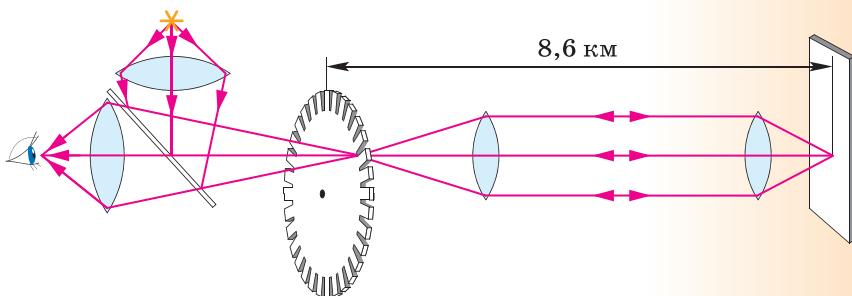


Рис. 180. Схема опыта Физо

ние. Если скорость вращения колеса удвоить, наблюдатель увидит максимально яркий отражённый свет, если утроить — свет вновь пропадёт.

Зная скорость вращения колеса, расстояние от него до зеркала, можно определить скорость света. Физо получил значение скорости света, равное 313 000 км/с. Для того времени это был хороший результат. Знание скорости света сыграло впоследствии важную роль в выяснении физической природы световых волн.



При какой частоте вращения зубчатого колеса в опыте Физо наступало первое затмение, если колесо имело 720 зубцов?

§ 49

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Как вам уже известно, переход луча света из одной среды в другую подчиняется закону преломления (см. § 43):

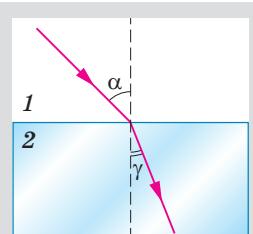
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21},$$

где n_{21} — относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

Закон преломления света был открыт опытным путём нидерландским учёным **Виллебордом Снеллиусом** (1580—1626) около 1620 г. Закон был сформулирован в трактате по оптике, который нашли в бумагах учёного после его смерти.

Попытка объяснения закона преломления света была предпринята ещё Ньютона на основе корпускулярной теории. Ньютон объяснял преломление силами, действующими на световые частицы в тонком слое около границы раздела двух сред. При этом из корпускулярной теории следовало, что скорость света больше в оптически более плотных средах, чем в оптически менее плотных средах.

С волновой точки зрения преломление света рассмотрел Гюйгенс. Он получил результат, противоположный результату Ньютона: ско-



Преломление луча света при переходе из воздуха в стекло

рость света в оптически более плотных средах меньше, чем в оптически менее плотных средах.

Разрешить спор двух теорий смогли эксперименты, выполненные в 1850 г. французским физиком **Леоном Фуко** (1819—1868). Он установил, что скорость света в воде меньше скорости света в воздухе и составляет $\frac{3}{4}$ от скорости света в воздухе. Этот результат окончательно доказал справедливость волновой теории света.

Таким образом, было доказано, что **отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред, равная отношению скоростей света в этих средах.**

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21} = \frac{v_1}{v_2}, \quad (1)$$

где v_1 и v_2 — скорости распространения световых волн в двух средах.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$$

Если угол преломления γ меньше угла падения α (вторая среда является оптически более плотной), то свет данной частоты во второй среде распространяется медленнее, чем в первой, т. е. $v_2 < v_1$.

Взаимосвязь величин, входящих в уравнение (1), позволяет сформулировать определение относительного показателя преломления:

относительным показателем преломления второй среды относительно первой называют физическую величину, равную отношению скоростей света в этих средах.

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (2)$$

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$$

Пусть луч света переходит из вакуума в какую-либо среду. Заменив в уравнении (2) v_1 на скорость света в вакууме c , а v_2 на скорость све-

та в среде v , получим уравнение (3), являющееся определением абсолютного показателя преломления:

абсолютным показателем преломления среды называют физическую величину, равную отношению скорости света в вакууме к скорости света в данной среде.

$$n = \frac{c}{v}. \quad (3)$$

$$n = \frac{c}{v}$$

Согласно уравнениям (2) и (3), 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.

Как вы уже знаете, значение абсолютного показателя преломления n любого вещества больше единицы. Тогда, согласно уравнению (3), $c/v > 1$ и $c > v$, т. е. *скорость света в любом веществе меньше скорости света в вакууме*¹.

Итак, абсолютный показатель преломления связан со скоростью распространения света в данной среде. Скорость света в среде и абсолютный показатель преломления зависят от свойств этой среды.

Обратимся к рисунку 181, с помощью которого можно пояснить, почему на границе раздела двух сред с изменением скорости меняется и направление распространения световой волны.

¹ По современным представлениям, скорость, превышающую скорость света в вакууме, не может иметь ни один материальный объект. Наиболее точное её измерение $299\,792\,458 \pm 1,2$ м/с было выполнено в 1975 г. В настоящее время скорость света в вакууме принимают равной в точности $299\,792\,458$ м/с и через это значение определяют единицу длины метр.

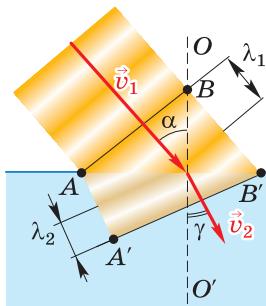


Рис. 181. При переходе световых волн из воздуха в воду скорость света уменьшается, фронт волны, а вместе с ним и её скорость меняют направление

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 .

При распространении волны она постепенно захватывает всё большую область пространства. Её от свободной от волнового процесса области отделяет граница, которую называют *фронтом волны*. То есть фронт волны — это множество точек пространства, которых достигла волна в данный момент времени. Фронт волны перпендикулярен её скорости.

Первой до границы доходит точка A волны. В этот момент фронтом волны будет поверхность AB . За промежуток времени Δt точка B , перемещаясь в воздухе с прежней скоростью v_1 , достигнет точки B' на поверхности воды. За то же время точка A , перемещаясь в воде с меньшей скоростью v_2 , пройдёт меньшее расстояние, достигнув только точки A' . При этом фронт волны $A'B'$ в воде окажется повёрнутым на некоторый угол по отношению к фронту волны AB в воздухе. А вектор скорости поворачивается, приближаясь к прямой OO' , перпендикулярной к границе раздела сред. При этом угол преломления γ оказывается меньше угла падения α . Так происходит преломление света.

Опыт показывает, что при переходе в другую среду и повороте фронта волны меняется и длина волны: при переходе в оптически более плотную среду уменьшается и скорость, и длина волны ($\lambda_2 < \lambda_1$). Это согласуется и с известной вам формулой $\lambda = v/\nu$. Так как частота волны определяется только частотой колебаний источника, то она остаётся неизменной в разных средах. Скорость же распространения волны зависит от свойств среды, в которой распространяется свет. Из-за этого уменьшение скорости распространения волны сопровождается пропорциональным уменьшением длины волны.



- В какой из двух сред — оптически более плотной или менее плотной — свет распространяется с большей скоростью? **2.** Как определяются относительный и абсолютный показатели преломления через скорость света в средах? **3.** В какой среде свет распространяется с наибольшей скоростью? **4.** Расскажите, что иллюстрирует рисунок 181. **5.** Какие характеристики световой волны меняются при её переходе из одной среды в другую?



- Какая из двух сред (рис. 182) является оптически более плотной? В какой из них луч света распространяется с большей скоростью? Ответ обоснуйте.

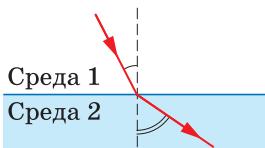


Рис. 182

- Луч света падает на границу раздела двух прозрачных сред под углом 30° . При этом отражённый и преломлённый лучи перпендикулярны друг другу. В какой из этих сред свет распространяется с большей скоростью?



УПРАЖНЕНИЕ 43

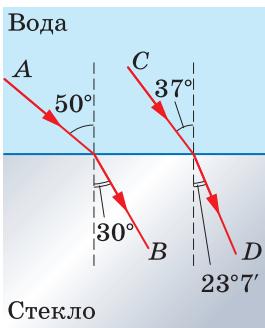


Рис. 183

- Используя рисунок 183, докажите, что относительный показатель преломления n_{21} для данных двух сред не зависит от угла падения луча света. В какой из этих сред скорость распространения света больше и во сколько раз?
- Показатель преломления стекла равен 1,5, а показатель преломления алмаза — 2,4. В какой из этих сред скорость распространения света больше и во сколько раз?
- Луч света падает на границу раздела двух прозрачных сред под углом 30° . При этом отражённый и преломлённый лучи перпендикулярны друг другу. Определите скорость света во второй среде, если скорость света в первой среде $1,5 \cdot 10^8$ м/с.

- Используя уравнения (2) и (3), докажите, что $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$, где n_1 — абсолютный показатель преломления первой среды, а n_2 — второй.
- Как изменяются длина волны, частота и скорость распространения световой волны при её переходе из вакуума в алмаз?

Вы уже знаете, что абсолютный показатель преломления среды зависит от её свойств. Являются ли свойства среды единственным фактором, определяющим показатель преломления, или существуют какие-либо другие причины, от которых он зависит?

Для ответа на этот вопрос проделаем опыт, изображённый на рисунке 184. Разместим около объектива осветителя О диафрагму Д с горизонтальной щелью (расположенной перпендикулярно плоскости чертежа) и синий светофильтр Φ (т. е. синее стекло). На экране напротив щели диафрагмы получится её изображение C_1 синего цвета (рис. 184, а).

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 NEM (рис. 184, б; объёмное изображение призмы —

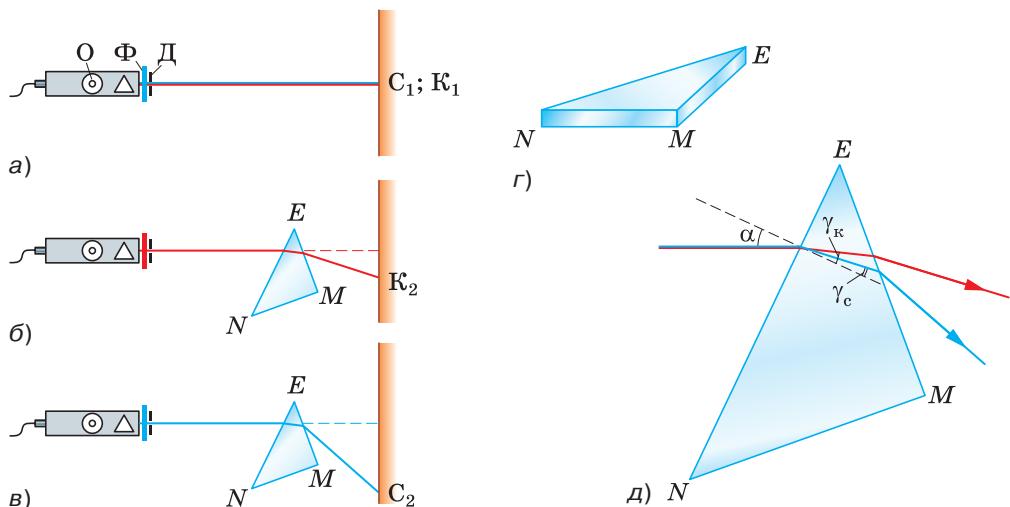


Рис. 184. Наблюдение дисперсии света при преломлении в призме световых лучей разной частоты

на рис. 184, *г*). Проходя через призму, луч отклоняется в сторону более широкой её части *NM*, в результате чего красное изображение щели смещается вниз в положение *K₂*.

Проделаем тот же опыт, предварительно заменив красный светофильтр на синий (рис. 184, *в*). Мы обнаружим, что изображение щели *C₂*, полученное в синих лучах, окажется смещённым в том же направлении, что и красное, но на большее расстояние.

Проведённый 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, но и от частоты (от цвета) проходящего через него света*.

Преломление красных и синих лучей в призме показано на рисунке 184, *д*. На грани *NE* призмы при одном и том же угле падения α синий луч преломился сильнее красного: $\gamma_c < \gamma_k$, значит, $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma_c} > \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma_k}$, т. е.

$$n_c > n_k.$$

Следовательно, так как для синих лучей *показатель преломления стекла больше, чем для красных, то 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 нём от частоты световой волны называют дисперсией света.

Слово «дисперсия» происходит от латинского *dispersio* и означает «рассеяние, разведение».

Теперь, убрав с осветителя фильтр, пропустим через призму пучок белого света

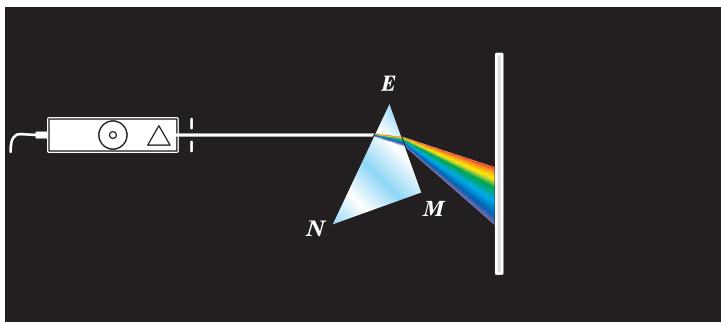


Рис. 185. Разложение пучка белого света в спектр

(рис. 185). Мы увидим, что этот пучок не только отклонился к более широкой части призмы, но и разложился в радужную полоску, которую называют *спектром*¹. В нём семь цветов — красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, 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. Такие цветные лучи являются *простыми*, или, как их ещё называют, *монохроматическими* (от греч. *монос* — один, единственный и *хроматикос* — цветной, окрашенный). Свет каждого цвета представлен волнами настолько узкого интервала частот, что обычно его характеризуют одной определённой частотой.

Чтобы удостовериться, что призма не окрашивает, а именно разлагает белый свет, поставим на пути вышедшего из призмы и разло-

¹ Термин «спектр» (от лат. *spectrum* — образ) был введён Ньютона для обозначения радужной полосы, получающейся при прохождении пучка солнечного света через треугольную стеклянную призму.

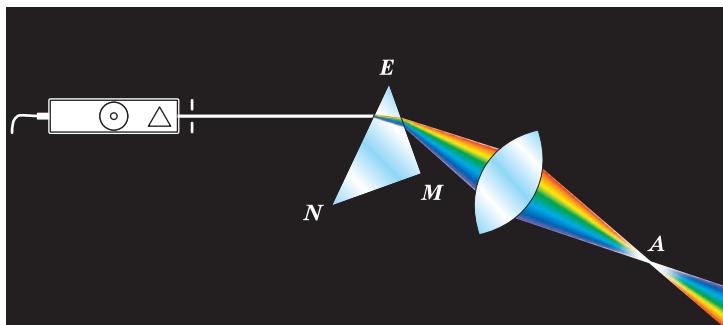


Рис. 186. Сложение спектральных цветов с помощью линзы

жившегося в спектр пучка собирающую линзу (рис. 186). Мы увидим, что после преломления в линзе разноцветные лучи, пересекаясь в точке *A*, «складываются», приобретая белый цвет.

Сложить спектральные цвета и получить белый цвет можно и на более простом опыте. Возьмём картонный диск с изображёнными на нём секторами разных цветов и укрепим его на валу центробежной машины (рис. 187). При быстром вращении диска создаётся впечатление, что он белый.

Если направить на экран два монохроматических световых пучка, то при их наложении появятся новые цвета. Например, при наложении жёлтого и красного возникает оранжевый, оранжевого и зелёного — жёлтый. При сложении красного, синего и фиолетового цветов получим пурпурный цвет.

Существуют такие пары цветов, результат наложения которых человек воспринимает как белый цвет. Такие цвета называют *дополнительными*. Примерами дополнительных цветов являются синий и жёлтый, оранжевый и голубой, зелёный и пурпурный.

Зададимся вопросом, почему окружающие нас тела, освещённые одним и тем же солнечным светом, имеют разные цвета. В чём заключается физическая причина такого различия?

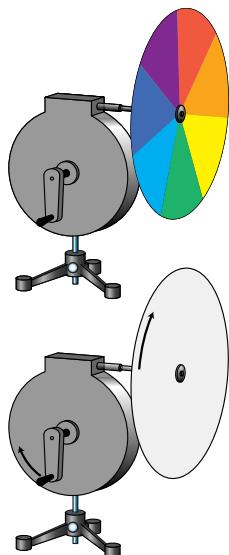


Рис. 187. Опыт по сложению спектральных цветов

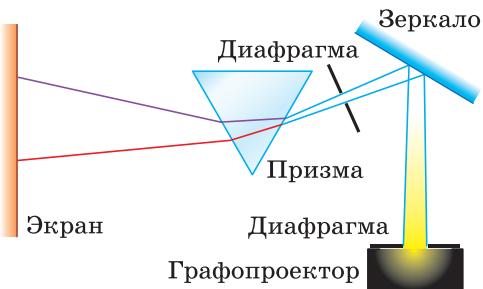


Рис. 188. Схема опыта для получения сплошного спектра

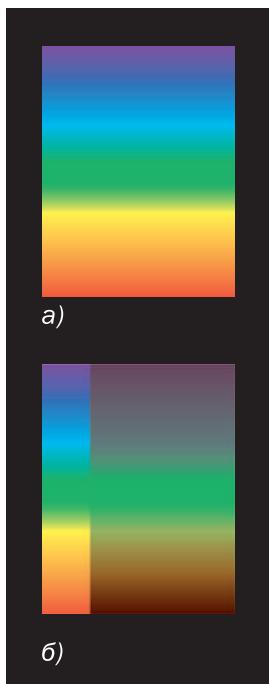


Рис. 189. Сплошной (непрерывный) спектр

Чтобы выяснить это, проделаем опыт, схема которого приведена на рисунке 188. Получим на белом экране спектр, изображённый на рисунке 189, а. Закроем правую часть спектра широкой бумажной полоской, например зелёного цвета. Мы увидим, что цвет полоски остаётся ярко-зелёным и не меняет оттенка только в той области, где на неё падают зелёные лучи. А при освещении лучами других цветов она либо меняет оттенок (в жёлтой части спектра), либо выглядит тёмной (рис. 189, б).

Значит, покрывающая полоску краска обладает способностью отражать только зелёный свет и поглощать свет всех остальных цветов. Итак, окраска *непрозрачного* тела определяется составом света, который данное тело отражает. Если тело весь падающий свет поглощает, то оно выглядит чёрным. Если тело отражает весь падающий солнечный свет, то оно выглядит белым.

В настоящее время для получения чётких и ярких спектров используют специальные оптические приборы.

На рисунке 190 показано устройство и внешний вид одного из таких приборов — двухтрубного *спектроскопа*.

Рассмотрим принцип действия спектроскопа. В трубе К (рис. 190, а), называемой *коллиматором*, имеется узкая щель *S*. Через эту щель исследуемый свет входит в прибор

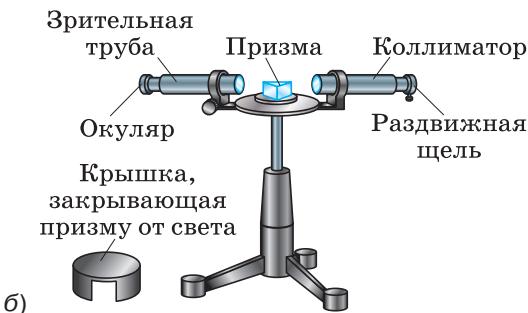
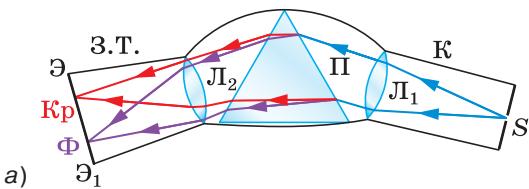


Рис. 190. Схема устройства (а) и внешний вид (б) двухтрубного спектроскопа

и расширяющимся пучком падает на линзу L_1 . Щель S расположена в фокальной плоскости линзы, поэтому свет выходит из линзы параллельным пучком, а затем падает на призму P .

Так как волны разных цветов (т. е. разных частот) отклоняются призмой на разные углы, то параллельные пучки разных цветов выходят из призмы в разных направлениях (на рисунке показаны крайние лучи только двух пучков — красного и фиолетового). Эти пучки, преломившись в линзе L_2 , образуют в её фокальной плоскости $\mathcal{E}\mathcal{E}_1$ изображения щели S . Причём изображения, соответствующие волнам разных частот, приходятся на разные места плоскости $\mathcal{E}\mathcal{E}_1$.

Если на щель падает белый свет, то все изображения щели сливаются в цветную полосу, в которой представлены все цвета.

Если же исследуемый свет представляет собой смесь нескольких монохроматических цветов, то спектр получится в виде узких линий соответствующих цветов, разделённых тёмными промежутками.

В спектроскопе в плоскости ЭЭ₁ находится матовое стекло, чтобы образующийся на нём спектр можно было наблюдать глазом, увеличив изображение с помощью линзы. Если же в плоскости ЭЭ₁ помещается фотопластинка, на которой получается фотография спектра, то прибор называют *спектрографом*.



- 1.** Что называют дисперсией света?
- 2.** Расскажите об опыте по преломлению белого света в призме (ход опыта, результаты, вывод).
- 3.** Расскажите об опыте, изображённом на рисунке 187.
- 4.** В чём заключается физическая причина различия цветов окружающих нас тел?
- 5.** Используя рисунок 190, расскажите об устройстве двухтрубного спектроскопа.
- 6.** Чем спектрограф отличается от спектроскопа?



Рассмотрите рисунок 191, а, на котором показана схема устройства однотрубного спектроскопа. Спектроскоп сконструировал в 1815 г. немецкий физик **Йозеф Фраунгофер** (1787—1826). Этот прибор был необходим учёному для исследования явления дисперсии, которым он занимался в то время. Объясните по рисунку 191, б, почему при входе в призму ADB лучи отклоняются в сторону более широкой её части (угол преломления меньше угла падения), а при входе в призму DBE — в сторону более узкой её части (угол преломления больше угла падения). Расскажите, как работает однотрубный спектроскоп.

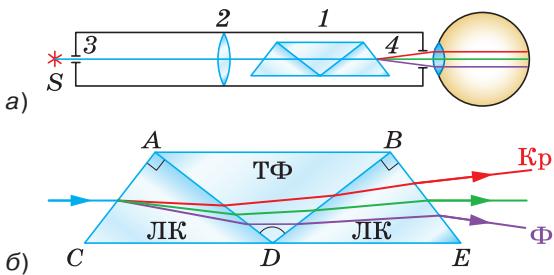


Рис. 191

ЛК — стекло «лёгкий крон»
ТФ — стекло «тяжёлый флинт»
Для лучей любого цвета $n_{\text{TФ}} > n_{\text{ЛК}}$



УПРАЖНЕНИЕ 44

- 1.** На столе в тёмной комнате лежат два листа бумаги — белый и чёрный. В центре каждого листа наклеен оранжевый круг. Что вы увидите, осветив эти листы белым светом; оранжевым светом такого же оттенка, как и круг?
- 2.** На белом фоне написан текст синими буквами. Через стекло какого цвета нельзя увидеть надпись?



ЗАДАНИЕ 21



- Напишите на белом листе бумаги первые буквы названий всех цветов спектра фломастерами соответствующих цветов: К — красным, О — оранжевым, Ж — жёлтым и т. д. Рассмотрите буквы через трёхсантиметровый 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 сироп, различные соки и т. п.
- Найдите в Интернете информацию о том, как образуется радуга. Благодаря каким оптическим явлениям она возникает? Можно ли видеть радугу, стоя лицом к солнцу?

§ 51

ТИПЫ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

Вам уже известно, что при пропускании солнечного света через призму получается спектр в виде сплошной полосы. В ней представлены все цвета (т. е. волны всех частот от $4,0 \cdot 10^{14}$ до $8,0 \cdot 10^{14}$ Гц), плавно переходящие один в другой. Такой спектр называют **сплошным** или **непрерывным** (см. рис. 189, а).

Сплошной спектр характерен для твёрдых и жидких излучающих тел, имеющих температуру порядка нескольких тысяч градусов Цельсия. Сплошной спектр дают также светящиеся газы и пары, если они находятся под высоким давлением (т. е. если силы взаимодействия между их молекулами достаточно велики).

Например, сплошной спектр можно увидеть, если направить спектроскоп на свет от раскалённой нити электрической лампы ($t_{\text{нити}} \approx 2300^{\circ}\text{C}$), пламя свечи.

Иной вид имеет спектр, наблюдающийся у газов малой плотности. Такие газы обычно состоят из **изолированных** атомов, т. е. атомов, взаимодействие между которыми пренебрежимо мало. Свечения газа можно добиться нагреванием.

Например, если внести в пламя спиртовки кусочек поваренной соли (рис. 192), то пла-



Рис. 192. При внесении в пламя спиртовки кусочка поваренной соли пламя окрасится в жёлтый цвет

мя окрасится в жёлтый цвет, а в спектре, наблюдаемом с помощью спектроскопа, будут видны две близко расположенные жёлтые линии, характерные для спектра паров натрия (рис. 193, *a*).

Это означает, что под действием высокой температуры молекулы NaCl распались на атомы натрия и хлора. Свечение атомов хлора возбудить гораздо труднее, чем атомов натрия, поэтому в данном опыте линии хлора не видны. Другие химические элементы дают другие наборы отдельных линий определённых длин волн (рис. 193, *б* и *в*).

Такие спектры называют *линейчатыми*. Линейчатые спектры получают от газов и паров малой плотности, при которой свет излучается изолированными атомами.

Рассмотренные спектры — сплошные и линейчатые — являются *спектрами испускания*.

Кроме спектров испускания существуют *спектры поглощения*. Мы будем рассматривать только линейчатые спектры поглощения.

Такие спектры 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 накала лампы. В этом случае в сплошном спектре света от лампы появится узкая чёрная линия как раз в том месте, где располагается жёлтая линия в спектре испускания натрия (сравните рис. 193, *а* и *г*). Это и будет линейчатый спектр поглощения натрия. Другими словами, линии поглощения атомов натрия точно соответствуют его линиям испускания.

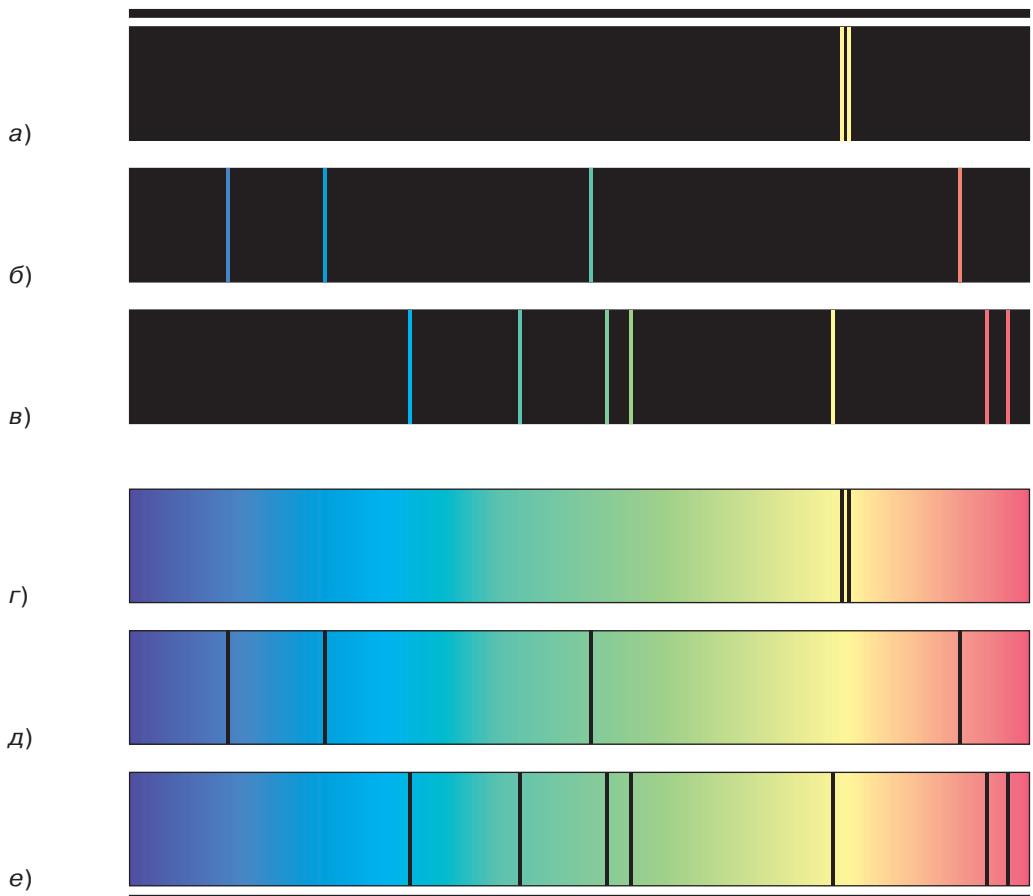


Рис. 193. Спектры испускания: *а* — натрия; *б* — водорода; *в* — гелия.
Спектры поглощения: *г* — натрия; *д* — водорода; *е* — гелия

Совпадение частот линий испускания и поглощения можно наблюдать и в спектрах других элементов, например водорода и гелия (рис. 193, *б*, *д* и *в*, *е*).

Общий для всех химических элементов закон, согласно которому

атомы данного элемента поглощают световые волны тех же самых частот, на которых они излучают,



Рис. 194. Идентификация по уникальным особенностям объекта



ГУСТАВ КИРХГОФ

(1824—1887)

Немецкий физик. Разработал метод спектрального анализа и открыл элементы — цезий и рубидий, установил закон теплового излучения

был открыт в середине XIX в. немецким физиком **Густавом Кирхгофом**.



Спектр атомов каждого химического элемента уникален. Как не бывает двух людей с одинаковым дактилоскопическим узором¹ или двух китов с одинаковой окраской хвостового плавника, так не существует и двух химических элементов, атомы которых излучали бы одинаковый набор спектральных линий (рис. 194).

Благодаря этому стало возможным появление *метода спектрального анализа*, разработанного в 1859 г. Кирхгофом и его соотечественником, немецким химиком Бунзеном.

Спектральным анализом называют метод определения химического состава вещества по его спектру.

Для проведения спектрального анализа по линейчатым спектрам (атомный спектральный анализ) исследуемое вещество приводят в состояние атомарного газа (атомизируют) и одновременно с этим возбуждают атомы, т. е. сообщают им дополнительную энергию.

Для атомизации и возбуждения обычно используют пламя или электрические разряды. В них помещают образец исследуемого вещества в виде порошка или аэрозоля раствора (т. е. мельчайших капелек раствора, распылённого 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 такие

¹ Расположение рельефных линий кожи на внутренних (ладонных) поверхностях ногтевых фаланг пальцев рук.

же спектры, какие были получены от исследуемого образца, узнают, какие химические элементы входят в его состав. Путём сравнения интенсивности линий определяют количество каждого элемента в образце.

Спектральный анализ 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 тел, например звёзд, дистанционно.

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 звёзд, температуру звёзд 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.



1. Как выглядят сплошной спектр? Какие тела дают сплошной спектр? Приведите примеры.
2. Как выглядят линейчатые спектры? От каких источников света получаются линейчатые спектры?
3. Каким образом можно получить линейчатый спектр испускания натрия?
4. Опишите механизм получения линейчатых спектров поглощения.
5. В чём заключается суть закона Кирхгофа, касающегося линейчатых спектров испускания и поглощения?
- 6*. Что такое спектральный анализ и как он проводится?
- 7*. Расскажите о применении спектрального анализа.



В 1885 г. швейцарский математик и физик И. Бальмер, анализируя линии атомного спектра водорода, лежащие в видимом диапазоне (см. рис. 193, б, д), заметил, что их длины волн можно выразить следую-

щим образом: $\lambda_\alpha = \frac{9k}{5}$, $\lambda_\beta = \frac{4k}{3}$, $\lambda_\gamma = \frac{25k}{21}$, $\lambda_\delta = \frac{9k}{8}$, где k — некоторая постоянная.

Бальмеру удалось записать одну общую формулу для этих четырёх длин волн и предсказать с её помощью существование других линий в спектре водорода. Попробуйте записать эту формулу.



Возникновение индукционного тока в кольце при изменении магнитного потока сквозь него



ДЖЕЙМС МАКСВЕЛЛ

(1831—1879)

Британский физик. Создал теорию электромагнитного поля. На её основе теоретически предсказал существование электромагнитных волн, определил, что в вакууме они должны распространяться со скоростью света

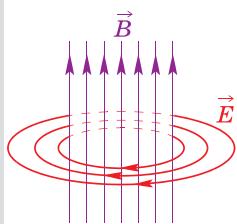
Из курса физики 8 класса вы знаете о существовании электрического и магнитного полей. Электрическое поле создаётся электрическими зарядами. Если заряды движутся, то помимо электрического поля они создают и магнитное поле. В отличие от электрического поля, магнитное поле действует только на движущиеся заряды.

В 1831 г. английским физиком Фарадеем было открыто явление *электромагнитной индукции*. Напомним, что оно заключается в возникновении электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении во времени магнитного потока, пронизывающего контур.

Пусть неподвижный замкнутый проводник помещён в изменяющееся во времени магнитное поле. Согласно явлению электромагнитной индукции в проводнике возникнет индукционный ток. Но какие силы заставляют электроны двигаться? Поскольку проводник неподвижен, магнитное поле сделать это не может. Остаётся предположить, что электроны приводятся в движение электрическим полем.

Какова причина появления этого поля? Возникла гипотеза о том, что это электрическое поле появляется в результате изменения магнитного поля. Данная идея вызвала у учёных ряд вопросов. Например: отличается ли такое поле от поля, созданного неподвижными электрическими зарядами? Возникает ли это поле только в проводнике или существует и в пространстве вокруг него?

Ответы на эти и другие вопросы были получены в 1865 г., когда **Джеймс Максвелл** создал теорию электромагнитного поля. Согласно этой теории, *всякое изменение со временем магнитного поля приводит*



Переменное магнитное поле порождает переменное электрическое поле

к возникновению переменного электрического поля, а всякое изменение со временем электрического поля порождает переменное магнитное поле. Теория Максвелла позже была подтверждена экспериментально.

Другими словами, источником электрического поля могут быть не только электрические заряды, но и переменные магнитные поля. В первом случае силовые линии¹ электрического поля начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных. Во втором случае силовые линии электрического поля замкнуты, подобно линиям индукции магнитного поля. Такое электрическое поле и является причиной возникновения индукционного тока в неподвижном проводнике. Проводник, замкнутый на гальванометр, играет лишь роль индикатора, обнаруживающего в данной области пространства электрическое поле.

У магнитного поля также могут быть два источника: электрический ток и переменное электрическое поле. В обоих случаях линии магнитной индукции замкнуты.

Электрическое и магнитное поля не являются обособленными физическими объектами, они тесно взаимосвязаны. Как известно, покоящийся заряд создаёт только электрическое поле. Но ведь заряд покоятся лишь относительно определённой системы отсчёта. Относительно других систем отсчёта он будет двигаться и, следовательно, создавать и магнитное поле. Точно так же лежащий на столе магнит создаёт только магнитное поле. Но движущийся относительно него наблюдатель обнаружит и электрическое поле в соответствии с явлением электромагнитной индукции.

Электрическое и магнитное поля являются двумя различными проявлениями одного

¹ С помощью силовых линий можно наглядно изобразить электрическое поле. Силовая линия проводится так, что в каждой точке вектор напряжённости \vec{E} электрического поля направлен по касательной к силовой линии.

физического объекта — электромагнитного поля.

Результат разделения единого электромагнитного поля на части, представляющие собой электрическое и магнитное поля, зависит от выбора системы отсчёта.

Среди бесчисленных, очень интересных и важных следствий теории Максвелла одно заслуживает особого внимания. Это вывод о конечности скорости распространения электромагнитных взаимодействий.

Долгое время считалось, что взаимодействие между электрическими зарядами осуществляется непосредственно через пустое пространство. При этом действие распространяется на любое расстояние мгновенно. По Максвеллу же дело обстоит иначе и много сложнее. Перемещение заряда меняет электрическое поле вблизи него. Это переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, порождает переменное электрическое поле уже на большем расстоянии от заряда и т. д. Таким образом, перемещение заряда вызывает «всплеск» электромагнитного поля, который, распространяясь, охватывает всё большие и большие области пространства (рис. 195). Лишь в тот момент, когда «всплеск» достигает второго заряда, действующая на него сила изменяется. Процесс распространения электромагнитного возмущения протекает с конечной, хотя и очень большой скоростью.

Согласно теории Максвелла, переменное электромагнитное поле должно распространяться в пространстве в виде поперечных волн. Причём 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. Именно с этой скоростью распространяется в вакууме свет.

Вы уже знаете, что в механических волнах, например в звуковых, энергия передаётся от

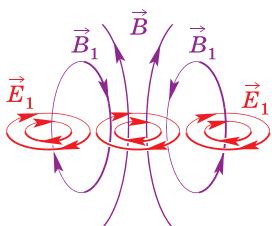


Рис. 195. Распространение в пространстве «всплеска» электромагнитного поля

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 среда.

В связи с тем что электромагнитные волны распространяются в веществе и в вакууме, возникает вопрос: что совершают колебания в электромагнитной волне, т. е. какие физические величины периодически меняются в ней?

Электромагнитная 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} , электрического поля — напряжённость электрического поля \vec{E} . Когда говорят, что магнитное и электрическое поля меняются, то это означает, что меняются их характеристики: вектор \vec{B} и вектор \vec{E} .

В электромагнитной волне именно векторы \vec{B} и \vec{E} периодически меняются по модулю и по направлению, т. е. колеблются.

Если электрические заряды неподвижны, то создаваемое ими электрическое поле остаётся постоянным во времени. Если заряды движутся равномерно (случай постоянного тока), то они создают постоянное магнитное поле. В обоих этих случаях электрическое и магнитное поля не изменяются с течением времени, а значит, и электромагнитная волна возникнуть не может. Электромагнитные волны могут возбуждаться только ускоренно движущимися электрическими зарядами.

Пусть заряд совершает гармонические колебания около начала координат вдоль оси X с частотой v . Рассмотрим распространение вдоль оси Z создаваемой им волны. На рисунке 196 изображены вектор напряжённости электриче-

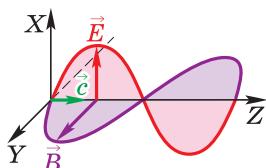


Рис. 196. Модель электромагнитной волны:
 \vec{E} — напряжённость электрического поля;
 \vec{B} — индукция магнитного поля;
 c — скорость волны

ского поля \vec{E} и вектор индукции магнитного поля \vec{B} электромагнитной волны в один и тот же момент времени. Это «моментальный снимок» волны, распространяющейся в направлении оси Z . Плоскость, проведённая через векторы \vec{B} и \vec{E} в любой точке, перпендикулярна направлению распространения волны, что говорит о поперечности волны.

$$\lambda = cT = \frac{c}{v}$$

За время, равное периоду колебаний, волна переместится вдоль оси Z на расстояние, равное длине волны. Для электромагнитных волн справедливы те же соотношения между длиной волны λ , её скоростью c , периодом T и частотой v колебаний, что и для механических волн:

$$\lambda = cT = \frac{c}{v}.$$

Максвелл не только научно обосновал возможность существования электромагнитных волн, но и указал, что *для излучения мощных электромагнитных волн необходимо, чтобы колебания векторов \vec{E} и \vec{B} происходили с достаточно высокой частотой*.

На основании того, что скорость распространения электромагнитных волн в вакууме получилась равной скорости света (скорость света была к тому времени измерена), Максвелл предположил, что *свет есть частный случай электромагнитных волн*. Дальнейшее развитие науки подтвердило это предположение.



1. Кем и когда была создана теория электромагнитного поля и в чём заключается её суть? 2. Что является источником электрического поля? 3. Что является источником магнитного поля? 4. Опишите механизм возникновения индукционного тока, опираясь на знание о существовании электромагнитного поля. 5. Какие выводы относительно электромагнитных волн можно сделать из теории Максвелла? 6. Какие физические величины периодически меняются в электромагнитной волне? 7. Какие соотношения между длиной волны, её скоростью, периодом и частотой колебаний справедливы для электромагнитных волн? 8. Как должна двигаться заряженная частица, чтобы она излучала электромагнитные волны?



ГЕНРИХ ГЕРЦ

(1857—1894)

Немецкий физик, один из основоположников электродинамики. Экспериментально доказал существование электромагнитных волн

К выводу о существовании электромагнитных волн Максвелл пришёл теоретическим путём. Теория требовала проверки на опыте. Как получить электромагнитные волны экспериментально?

Можно предположить, что электромагнитные волны должны излучаться электрической цепью, по которой течёт переменный ток. Действительно, переменный ток создаёт переменное магнитное поле, оно порождает переменное

электрическое поле и т. д. Чем выше частота переменного тока, тем более интенсивным должно быть излучение. Однако в обычной цепи, представляющей собой замкнутый контур, для каждого участка, где в данный момент времени ток течёт в одном направлении, можно указать другой участок, где направление тока противоположное. Излучённые такими участками волны будут гасить друг друга, и в результате цепь будет излучать плохо.

Из сказанного ясно, что для получения электромагнитных волн больше подходит не замкнутый контур, а просто прямой провод. Если каким-то образом возбудить в нём высокочастотные колебания электронов, можно ожидать появления достаточно интенсивных электромагнитных волн. Впервые это удалось осуществить Герцу — в 1888 г. он экспериментально получил и зарегистрировал электромагнитные волны.

Для получения электромагнитных волн Герц использовал простое устройство, называемое сегодня *вибратором Герца*. Вибратор представлял собой два металлических стержня с шарами на концах, раздвинутых на небольшое расстояние (рис. 197, а). Благодаря воздушному промежутку половинам вибратора можно сообщить значительные разноимённые

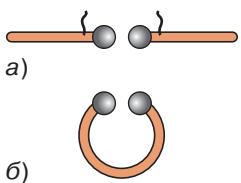


Рис. 197. Вибраторы Герца:
а — излучающий;
б — приёмный

заряды. Когда напряжение между шарами достигает определённого предельного значения, в воздушном промежутке проскакивает искра. Столбик ионизированного воздуха в канале искры — хороший проводник. Он замыкает половины вибратора, и свободные электроны в вибраторе приходят в направленное движение. Движение электронов по вибратору, например, направо вызывает появление положительного заряда слева и отрицательного заряда справа. Возникают электрические силы, возвращающие электроны налево. Таким образом, во время существования искры в вибраторе происходят колебания электронов, и он излучает электромагнитные волны.

Для обнаружения электромагнитных волн Герц использовал приёмный вибратор, представляющий собой проводящий виток, прерванный малым воздушным промежутком (рис. 197, б). Приёмный вибратор располагался на некотором расстоянии от излучающего. Переменное электрическое поле электромагнитной волны возбуждало в приёмном вибраторе колебания электронов, и в его воздушном промежутке проскакивали маленькие искорки.

В результате опытов Герца были обнаружены все свойства электромагнитных волн, теоретически предсказанные Максвеллом. Изучим некоторые из них на опыте, но не будем обращаться к старинной «искровой» технике возбуждения волн, а воспользуемся современным оборудованием. Обратим внимание, что и в современных антенах излучение электромагнитных волн происходит в результате высокочастотных колебаний свободных электронов относительно положительных ионов металла.

Будем использовать передатчик, генерирующий электромагнитные волны с длиной волны 3 см, и приёмник, регистрирующий эти волны. Передатчик имеет рупорную antennу, что позволяет получить направленное излуче-

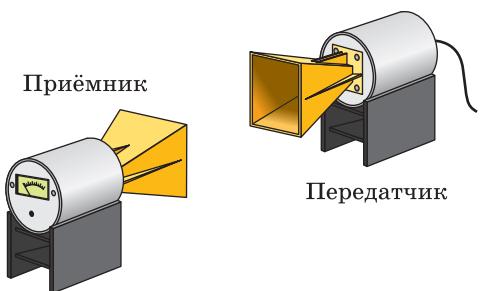


Рис. 198. Установка для проведения опытов по изучению свойств электромагнитных волн

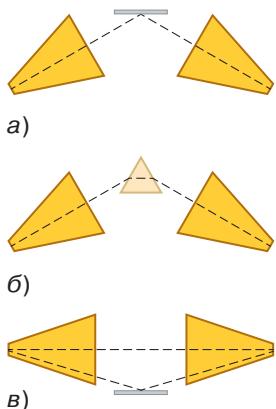


Рис. 199. Схемы опытов, демонстрирующих отражение, преломление и интерференцию электромагнитных волн

ние. Приёмник также имеет рупорную antennу, улавливающую волны, распространяющиеся вдоль её оси. О приёме волны свидетельствует отклонение стрелки индикатора на задней стороне приёмника. Чем больше интенсивность излучения, тем сильнее отклоняется стрелка. Общий вид экспериментальной установки изображён на рисунке 198.

Расположим рупоры напротив друга друга на некотором расстоянии, добившись отклонения стрелки почти на всю шкалу. Будем помещать между рупорами различные диэлектрические тела. Заметим, что отклонение стрелки лишь немногого уменьшается. Значит, *электромагнитные волны проходят через диэлектрик*. Поместим теперь между рупорами металлический лист — стрелка установится на нуле. Значит, *электромагнитные волны не проходят через проводник*.

Оказывается, в последнем опыте волны не достигли приёмника вследствие отражения от металла. Расположим рупоры под одинаковыми углами к металлическому листу (рис. 199, а). Волна будет принята. Если убрать лист или повернуть его, стрелка приёмника установится на нуле. Итак, *электромагнитные волны отражаются от проводника, причём угол отражения равен углу падения*.

Расположим рупоры под углом друг к другу, как и в предыдущем опыте, а металлический лист заменим треугольной призмой из парафина (диэлектрик). Волна будет принята. Это означает, что *электромагнитные волны преломляются на границе диэлектрика* (рис. 199, б).

Наша установка позволяет наблюдать и такое важное волновое явление, как интерферен-

ция. Расположим рупоры под небольшим углом друг к другу, чтобы стрелка приёмника была лишь немногого отклонена от нуля. Поднесём снизу металлический лист в горизонтальном положении (рис. 199, в). Поднимая лист, обнаружим, что стрелка колеблется. Дело в том, что в приёмник приходят две волны: одна непосредственно от передатчика, а другая после отражения от металлического листа. Меняя положение листа, мы делаем так, что волны либо усиливают, либо ослабляют друг друга.

Таким образом, опыты показывают, что электромагнитные волны отражаются, преломляются и им свойственна интерференция. Отметим, что можно наблюдать также дифракцию электромагнитных волн. Как вы знаете, эти же свойства обнаруживает при распространении и свет.

- 
1. Когда и кем были впервые получены электромагнитные волны?
 2. Как продемонстрировать отражение электромагнитных волн?
 3. Как продемонстрировать преломление электромагнитных волн?
 4. Какой опыт позволяет наблюдать интерференцию электромагнитных волн?



Казалось бы, получить электромагнитные волны можно было проще, чем это делал Герц. Подвесим заряженное тело на пружине и заставим его совершать колебания. Тело будет двигаться с ускорением и должно излучать электромагнитные волны. Как вы думаете, в чём причина того, что при такой постановке опыта обнаружить волны не удаётся?

§ 54

ДИАПАЗОНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Всё окружающее нас пространство буквально пронизано электромагнитными волнами различных частот. В настоящее время электромагнитные волны разделены по длинам волн (и соответственно по частотам) на шесть основных диапазонов: радиоволны, инфракрасное излучение, видимое излучение, ультрафиоле-

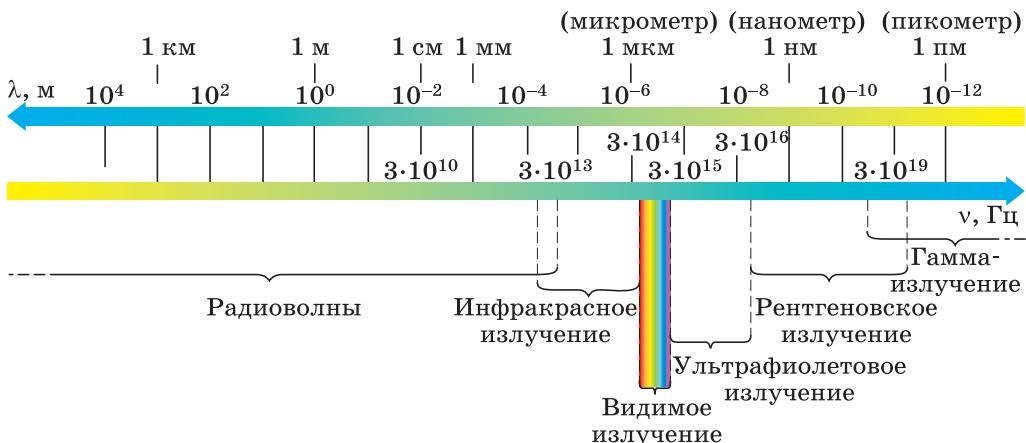


Рис. 200. Шкала электромагнитных волн

товое излучение, рентгеновское излучение, гамма-излучение (рис. 200). Обратим внимание, что диапазоны плавно переходят друг в друга, поэтому граничные значения длин волн весьма условны.

Электромагнитные волны отдельного диапазона схожи между собой по свойствам и способам возбуждения. Познакомимся с особенностями каждого из диапазонов. Будем рассматривать шкалу электромагнитных волн в порядке убывания длины волны.

Наиболее длинноволновое электромагнитное излучение с длинами волн от десятков километров до десятых долей миллиметра называют *радиоволнами*. Естественными источниками радиоволн являются молнии, астрономические объекты. Искусственные источники — провода и антенны, в которых происходят колебания электронов. Именно радиоволны были получены в опытах Герца. Сегодня искусственно созданные радиоволны широко применяют для передачи информации на значительные расстояния (радиосвязь, телевидение, спутниковая связь и т. д.).

На возможность использования электромагнитных волн для установления связи без про-



АЛЕКСАНДР СТЕПАНОВИЧ ПОПОВ

(1859—1906)

Русский физик, электротехник, изобретатель радио. Сконструировал передатчик электромагнитных волн. Изобрёл приёмную антенну, построил первый в мире радиоприёмник

водов впервые указал **Александр Степанович Попов**. В 1896 г. при помощи сконструированного им передатчика и приёмника радиосигналов Попов передал первую в мире радиограмму, состоящую из двух слов «Генрих Герц», на расстояние 250 м.

Радиоволны, применяемые для радиосвязи, занимают диапазон от нескольких километров до нескольких метров. В наземном телевидении используют метровые ($1 \text{ м} < \lambda < 10 \text{ м}$) и дециметровые ($10 \text{ см} < \lambda < 1 \text{ м}$) волны.

Дециметровые волны также находят применение в беспроводной связи Wi-Fi, Bluetooth и сотовой связи, которой ежедневно пользуется каждый из вас. Рассмотрим кратко принцип действия сотовой связи.

Технология сотовой связи подразумевает деление географической зоны на ячейки (сотовы), в каждой из которых установлена базовая станция

со своим частотным интервалом. Во время разговора антенна вашего телефона излучает электромагнитную волну, несущую информацию о параметрах звуковой волны, воздействующей на мембрану микрофона. Базовая станция ячейки, в которой вы в данное время находитесь, принимает эту волну и передаёт сигнал (с помощью волоконно-оптического кабеля или специальной антенны) на базовую станцию ячейки, в которой находится ваш собеседник. Та, в свою очередь, излучает электромагнитную волну, которую принимает антенна его телефона.

Повышенный практический интерес в настоящее время вызывает наиболее коротковолновая ($0,1 \text{ мм} < \lambda < 1 \text{ мм}$) область радиодиапазона. Такое излучение называют *субмиллиметровым* или *терагерцевым*. Особенности взаимодействия терагерцевого излучения с различными веществами делают его перспективным для использования в современных радиолокацион-

ных приборах и установках, системах связи, системах безопасности, в медицинской диагностике.

Вода, например, обладает высокой поглощающей способностью в терагерцевой области. Это даёт возможность отследить даже небольшие изменения содержания воды в биологической системе, что может быть следствием серьёзных нарушений, возникших в организме человека. Высокой отражающей способностью на терагерцевых частотах обладают металлы, что можно использовать в системах безопасности для идентификации металлических предметов.

Электромагнитное излучение с длинами волн, меньшими 0,1 мм, но большими 780 нм ($780 \text{ нм} < \lambda < 0,1 \text{ мм}$), называют *инфракрасным*. Инфракрасное излучение было открыто в 1800 г. английским астрономом Уильямом Гершелем. Расщепив солнечный свет призмой, Гершель поместил термометр сразу за красной полосой спектра и обнаружил повышение температуры — на термометр воздействовало излучение, невидимое глазу.

Инфракрасное излучение играет определяющую роль в поддержании жизни на Земле, поскольку люди, животные и растения могут существовать только при определённых температурах. Инфракрасные волны испускает любое нагретое тело даже в том случае, когда оно не светится. Зависимость интенсивности инфракрасного излучения от температуры позволяет измерять температуру различных объектов. Оно имеет широкую область применения: обогреватели, пульты дистанционного управления, приборы ночного видения и др.

Электромагнитное излучение, которое способен воспринимать глаз человека, называют *видимым излучением или светом*. Свет занимает достаточно узкий диапазон: 380—780 нм, но значение его для жизни на Земле огромно. Видимое излучение даёт нам информацию об



Инфракрасный обогреватель

окружающем мире и возможность ориентироваться в пространстве. Свет необходим также для протекания процесса фотосинтеза в растениях, в результате чего выделяется кислород, необходимый для дыхания живых организмов.

Электромагнитное излучение с длинами волн, меньшими 380 нм, но большими 10 нм ($10 \text{ нм} < \lambda < 380 \text{ нм}$), называют *ультрафиолетовым*. Ультрафиолетовое излучение было открыто в 1801 г. немецким физиком **Иоганном Риттером** (1776—1810). При помощи призмы Риттер проводил опыты по исследованию химического действия различных участков спектра. Он обнаружил, что хлорид серебра, темнеющий на свету, под действием невидимого излучения за пределами фиолетовой области спектра темнеет быстрее.

Ультрафиолетовое излучение способно убивать болезнетворных бактерий, поэтому широко используется в медицине. Его влияние на человека в большой степени определяется интенсивностью и продолжительностью облучения. В допустимых дозах ультрафиолетовое излучение повышает сопротивляемость организма 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 тёмных, так и прозрачных), так как стекло поглощает значительную часть ультрафиолетовых волн.

Электромагнитное излучение с длинами волн, меньшими 10 нм, но большими 5 пм ($5 \text{ пм} < \lambda < 10 \text{ нм}$), называют *рентгеновским*. Рентгеновское излучение было открыто в 1895 г. немецким физиком **Вильгельмом Рентгеном**, изучавшим процессы в газоразрядных трубках. Излучение возникает в результате торможения быстрых электронов у анода и стенок трубки.



Ультрафиолетовый облучатель



ВИЛЬГЕЛЬМ КОНРАД РЕНТГЕН

(1845—1923)

Немецкий физик, первый в истории лауреат Нобелевской премии по физике. Занимался вопросами электромагнетизма и оптики, открыл рентгеновское излучение



Рентгеновский снимок

Вы знакомы с широким применением рентгеновского излучения в медицине — флюорографическое обследование или рентгеновский снимок наверняка делали каждому из вас. Возможность делать такие снимки обусловлена тем, что рентгеновские лучи проникают сквозь мягкие ткани человеческого тела, но поглощаются кальцием, входящим в состав костей. Но слишком большие дозы или частые обследования с помощью рентгеновских лучей опасны для человека, они могут вызывать онкологические заболевания и лучевую болезнь.

С высокой проникающей способностью рентгеновского излучения связано его применение в технике для контроля внутренней структуры различных изделий, обнаружения дефектов в образцах. Скорее всего, вы видели на вокзалах или в аэропортах интроскопы — эти приборы просвечивают багаж рентгеновскими лучами.

Самое коротковолновое электромагнитное излучение с длинами волн менее 5 пм называют *гамма-излучением*. Гамма-излучение обладает ещё большей проникающей способностью, чем рентгеновское. Оно проходит сквозь метровый слой бетона и слой свинца толщиной несколько сантиметров. В больших дозах гамма-излучение очень опасно для человека: оно вызывает лучевую болезнь и онкологические заболевания. Но в малых дозах гамма-излучение может подавлять рост злокачественных опухолей и потому применяется в лучевой терапии.



1. По каким критериям электромагнитные волны делят на диапазоны?
2. Перечислите основные диапазоны электромагнитных волн и укажите границы этих диапазонов.
3. Расскажите о каждом диапазоне электромагнитных волн. Приведите примеры применения и воздействия на живые организмы.
4. Объясните, как работает сотовая связь.



Что общего у электромагнитных волн различных диапазонов?



УПРАЖНЕНИЕ 45

1. Расположите в порядке увеличения частоты электромагнитные излучения: инфракрасное, ультрафиолетовое, рентгеновское, видимое.
2. Радиостанция вещает на частоте 98,5 МГц. Определите длину волны.
3. На какой частоте суда передают сигнал бедствия SOS, если по международному соглашению длина радиоволны должна быть 600 м?
4. Радиосигнал, посланный с Земли на Луну, может отразиться от поверхности Луны и вернуться на Землю. Предложите способ измерения расстояния между Землёй и Луной с помощью радиосигнала.
Указание: задача решается таким же методом, каким измеряется глубина моря с помощью эхолокации (см. § 36).

Это любопытно...

Открытие рентгеновского излучения

В 1901 г. была вручена первая Нобелевская премия по физике. «В знак признания необычайно высоких заслуг перед наукой, выразившихся в открытии замечательных лучей», она была присуждена немецкому учёному Рентгену. А лучи получили в его честь название рентгеновских.

Открытие рентгеновского излучения было сделано в 1895 г. Как и многие другие физики, Рентген занимался в то время изучением так называемых катодных лучей. Если из стеклянной трубки, в которую впаяны металлические электроды, присоединённые к источнику высокого напряжения, откачивать воздух, то можно наблюдать зеленоватое свечение стекла. Опыты показывали, что свечение вызывалось лучами, берущими начало на электроде, соединённом с отрицательным полюсом источника (на катоде).

Однажды по окончании опыта, закрыв катодную трубку чехлом из чёрного картона, выключив свет, но не отключив ещё источник питания, Рентген заметил удивительное явление. Находящийся вблизи трубы бумагный экран, смоченный платино-цианистым барием, ярко светился. Получалось, что непрозрачный для видимого и ультрафиолетового излучения картон пропускает неизвестное излучение, вызывающее свечение экрана. Рентген дал излучению название «икс-лучи». Эти лучи зрительно ощущения не вызывают, но они вызывают свечение некоторых веществ и действуют на фотопластинку.

Рентгеновское излучение обладает большой проникающей способностью. Без особого ослабления оно проходит сквозь бумагу, картон, дерево, человеческое тело. Когда Рентген держал руку между трубкой и экраном, то на экране были видны тёмные тени костей на фоне более светлых очертаний всей кисти руки. Чем больше плотность вещества, тем менее оно проницаемо для рентгеновских лучей. Рентгеновские лучи, сравнительно легко проходящие сквозь слой алюминия толщиной до 10 см, почти полностью задерживаются слоем свинца толщиной 1 см.

Эксперименты, последовавшие за открытием Рентгена, позволили установить физическую природу катодных и рентгеновских лучей. Катодные лучи являются в действительности потоками быстрых электронов, а рентгеновские лучи — это электромагнитные волны с очень малой длиной волны. При подаче на электроды высокого напряжения в трубке создаются условия, при которых катод начинает испускать электроны. Стремясь со стенкой трубки, электроны движутся с большими ускорениями, что и вызывает излучение электромагнитных волн.



Как вы думаете, почему рентгеновское излучение нашло широкое применение для исследования структуры атомов?

§ 55

РАЗВИТИЕ ВЗГЛЯДОВ НА ПРИРОДУ СВЕТА

В начале XIX в. опытным путём была подтверждена справедливость гипотезы о волновой природе света. В то время ни о каких волнах, кроме механических, учёные ещё не знали. Поэтому считали, что свет, подобно звуку, представляет собой механическую упругую волну.

Вы уже знаете, 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 звёзд 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 всё мировое пространство заполнено некой невидимой упругой средой, которую они назвали *светоносным эфиром* (идея о существовании эфира была высказана ещё 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 твёрдых телах. Получалось, что светоносный эфир представляет собой твёрдое тело.

В связи с этим возникал вопрос о том, как планеты и другие небесные тела могут двигаться сквозь твёрдый эфир, не испытывая при этом никакого сопротивления.

Во второй половине XIX в. Максвелл создал теорию электромагнитного поля, согласно которой электромагнитные волны, подобно световым, являются поперечными и распространяются в вакууме со скоростью света. Исходя из того что световые и электромагнитные волны обладают общими свойствами, 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 $3,8 \cdot 10^{-7}$ до $7,6 \cdot 10^{-7}$ м или с частотами от $4,0 \cdot 10^{14}$ до $8,0 \cdot 10^{14}$ Гц (см. рис. 200).

К началу XX в. выяснилось, что электродинамика Максвелла не позволяет объяснить ряд явлений, возникающих при взаимодействии света с веществом. Противоречия между теорией и экспериментальными данными удалось разрешить, предположив, что свет, помимо волновых, обладает и корпускулярными свойства-



МАКС ПЛАНК

(1858—1947)

Немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой физики. Закон излучения Планка явился основой нового этапа развития физики

$$E = h\nu$$

тос — 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 (см. рис. 200). Подробнее о гамма-квантах вы узнаете из следующей главы.



1. Каковы были представления учёных о природе света 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 называют частицу электромагнитного излучения?

$$E = h\nu,$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — коэффициент пропорциональности, получивший название **постоянной Планка**.

В 1905 г. немецкий физик **Альберт Эйнштейн** (1879—1955) 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. *фотос* — 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 (см. рис. 200). Подробнее о гамма-квантах вы узнаете из следующей главы.

Вы узнали, что электрическое и магнитное поля связаны друг с другом и составляют единый физический объект — электромагнитное поле.

Вы познакомились с различными электромагнитными волнами и их диапазонами. Можете назвать характеристики электромагнитных волн, знаете, каковы их свойства, где они применяются. Понимаете, что свет — это электромагнитная волна.

Знаете, как устроена линза, и умеете получать с её помощью изображение предметов, знаете, где линзы применяются. Можете объяснить, как получаются миражи.

Знаете законы распространения света и можете поставить эксперименты, их доказывающие. Умеете строить ход лучей в собирающей и рассеивающей линзах.

ОБСУДИМ? Иван и Арсений поспорили, кто из них сможет пройти под радугой, которая появилась сразу после шумной летней грозы. Арсений утверждал, что если идти вперёд к радуге, то через некоторое время она окажется прямо у тебя над головой. Иван же утверждал, что при перемещении наблюдателя радуга сама перемещается и наблюдатель никогда не увидит радугу над головой. Кто из ребят прав? Приведите схематический чертёж, на котором изображены наблюдатель, солнце, радуга и линия горизонта.

Иван, глядя на радугу, высказал предположение, что капли дождя висят в воздухе, ведь радуга неподвижна. Арсений же утверждал, что принципы наблюдения радуги и наблюдения изображения в кино идентичны.

Прав ли Иван и что пытался доказать Арсений?

ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

1. «Развитие средств и способов передачи информации на далёкие расстояния с давних времён и до наших дней. Принцип действия сотовой связи» (возможная форма: презентация, реферат, макет).
2. «Метод спектрального анализа и его применение в науке и технике» (возможная форма: презентация, опыт, реферат).

§ 56

РАДИОАКТИВНОСТЬ. МОДЕЛИ 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». Они считали, 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 внешних воздействий) излучает ранее неизвестные невидимые лучи, вызывающие почернение фотопластиинки. Позже они были названы *радиоактивным излучением*.

Поскольку радиоактивное излучение обладало необычными свойствами, многие учёные занялись его исследованием. Оказалось, что не только уран, но и некоторые другие

**АНРИ БЕККЕРЕЛЬ**

(1852—1908)

Французский физик.
Один из первооткрывателей
радиоактивности



ЭРНЕСТ РЕЗЕРФОРД

(1871—1935)

Британский физик. Обнаружил сложный состав радиоактивного излучения радия, предложил ядерную модель строения атома. Открыл протон

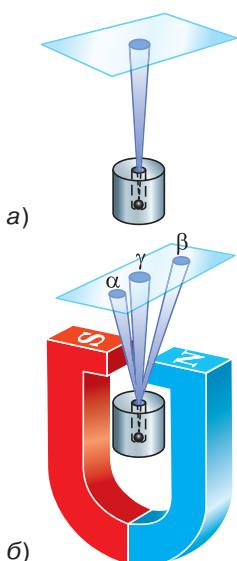


Рис. 201. Схема опыта Резерфорда по определению состава радиоактивного излучения

химические элементы (например, радий) тоже самопроизвольно испускают радиоактивные лучи. Способность атомов некоторых химических элементов к самопроизвольному излучению назвали **радиоактивностью** (от лат. *radio* — излучаю и *actus* — действенный).

В 1899 г. в результате опыта, проведённого под руководством британского физика **Эрнеста Резерфорда**, было обнаружено, что радиоактивное излучение радия неоднородно, т. е. имеет сложный состав. Рассмотрим, как проводился этот опыт.

На рисунке 201, *a* изображён толстостенный свинцовый сосуд с крупицей радия на дне. Пучок радиоактивного излучения радия выходит сквозь узкое отверстие и попадает на фотопластинку (излучение радия происходит во все стороны, но сквозь толстый слой свинца оно пройти не может). После проявления фотопластиинки на ней обнаруживалось одно тёмное пятно — как раз в том месте, куда попадал пучок.

Потом опыт изменяли (рис. 201, *б*): создавали сильное магнитное поле, действовавшее на пучок. В этом случае на проявленной пластиинке 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 называли **альфа-частицами**, отрицательно за-

ряженные — *бета-частицами*, а нейтральные — *гамма-частицами* (гамма-квантами).

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, потерявший оба электрона). Выяснилось также, что γ -излучение представляет собой один из видов, точнее диапазонов, электромагнитного излучения (см. рис. 200).

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. Поскольку было известно, что атом в целом нейтрален, это явление позволило сделать предположение, что в состав атома входят отрицательно и положительно заряженные частицы.

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 объёму которого равномерно распределён 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 распределён по всему объёму атома



ДЖОЗЕФ ДЖОН ТОМСОН

(1856—1940)

Английский физик. Открыл электрон. Предложил одну из первых моделей строения атома

с постоянной плотностью. Поэтому в 1911 г. Резерфорд совместно со своими сотрудниками провёл ряд опытов по исследованию состава и строения атомов.

Чтобы понять, как проводились эти опыты, рассмотрим рисунок 202. В опытах использовался свинцовый сосуд С с радиоактивным веществом Р, излучающим α -частицы. 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 называют **методом сцинтиляций** (т. е. вспышек).

Вся эта установка помещается в сосуд, из которого откачен воздух (чтобы устраниить рассе-

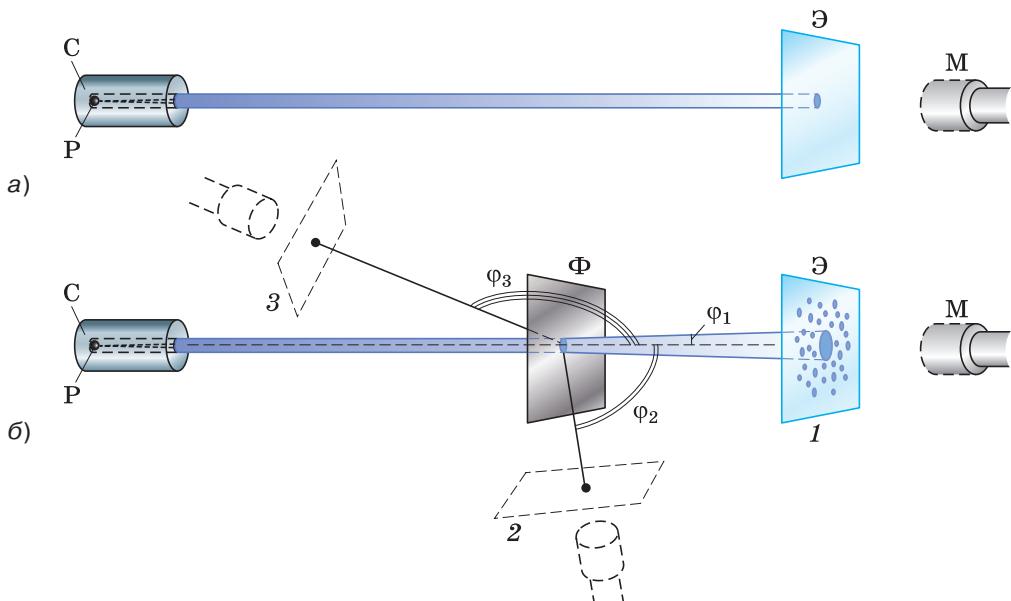


Рис. 202. Схема установки опыта Резерфорда по исследованию строения атома

жение α -частиц за счёт их столкновений с молекулами воздуха).

Если на пути α -частиц нет никаких препятствий, то они падают на экран узким, слегка расширяющимся пучком (рис. 202, *a*). 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 (рис. 202, *б*), то при взаимодействии с веществом α -частицы рассеиваются по всем направлениям на разные углы φ (на рисунке изображены только три угла: φ_1 , φ_2 и φ_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 изменяв первоначального направления (рассеялась на малые углы). При удалении от центра экрана количество вспышек становится меньше. Следовательно, с увеличением угла рассеяния φ 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 пришёл к выводу, что **столь сильное отклонение α -частиц возможно только в том случае, если внутри атома имеется чрезвычайно сильное электрическое поле**. Такое поле могло быть создано зарядом, сконцентрированным в очень малом объёме (по сравнению с объёмом 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.

Эти соображения привели Резерфорда к созданию ядерной (планетарной) модели 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 объём атома. Вокруг ядра движутся электроны, масса которых значительно меньше массы ядра. Атом электрически нейтрален, поскольку заряд ядра равен модулю суммарного заряда электронов.

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 (диаметр атома около 10^{-10} м).

На рисунке 203 показано, как меняется траектория полёта α -частиц в зависимости от того, на каком расстоянии от ядра атома они пролетают. Напряжённость создаваемого ядром электрического поля, а значит, и сила действия на α -частицу довольно быстро убывают с увеличением расстояния от ядра. Поэтому направление полёта частицы сильно меняется только в том случае, если она проходит очень близко к ядру.

Поскольку диаметр ядра значительно меньше диаметра атома, то большая часть 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 от первоначальной траектории.

няются на большие углы. Именно такие результаты и были получены в опыте Резерфорда.

Таким образом, в результате опытов по рассеянию α -частиц была доказана несостоительность модели атома Томсона, выдвинута ядерная (планетарная) модель строения атома и проведена оценка диаметров атомных ядер.



- 1.** В чём заключалось открытие, сделанное Беккерелем в 1896 г.?
- 2.** Расскажите, как проводился опыт, схема которого изображена на рисунке 201. Что выяснилось в результате этого опыта? **3.** О чём свидетельствовало явление радиоактивности? **4.** Что представлял собой атом согласно модели, предложенной Томсоном? **5.** Используя рисунок 202, расскажите, как проводился опыт по рассеянию α -частиц. **6.** Какой вывод был сделан Резерфордом на основании того, что некоторые α -частицы при взаимодействии с фольгой рассеялись на большие углы? **7.** Что представляет собой атом согласно ядерной модели?



- 1.** Как вы думаете, почему модель атома Томсона иногда называют «пудинг с изюмом»?
- 2.** Почему результаты опытов по рассеянию α -частиц находятся в противоречии с моделью Томсона? Что наблюдалось бы на опыте, если бы модель Томсона была верна?

Это любопытно...

Из истории открытия радиоактивности

Анри Беккерель помещал кристаллы соли урана на фотопластинку, заёрнутую плотной чёрной бумагой, и подвергал их в течение нескольких часов сильному воздействию солнечных лучей. После проявления фотопластинки на ней были обнаружены контуры кристаллов, прижатых к фотопластинке. Было очевидно, что урановая соль испускает какое-то излучение, проходящее через чёрную бумагу и засвечивающее фотопластинку. Беккерель думал, что излучение возникает под влиянием солнечных лучей. 26 и 27 февраля 1896 г. он подготовил опыт по наблюдению неизвестного излучения, испускаемого солями урана. Но этот день не был солнечным, и вся установка (на фотопластинке в рамке на чёрной ткани, прикрытой алюминиевой пластинкой, находился тонкий медный крест, над которым располагался препарат с двойным сульфатом калия и урана) была заперта в ящике стола. Проявив на всякий случай 1 марта эти пластиинки, Беккерель неожиданно обнаружил на них весьма чёткий контур креста. Это означало, что соли урана самопроизвольно, без влияния внешних факторов, создают какое-то излучение.

Около двух лет Беккерель был единственным физиком, который занимался этими исследованиями. Позднее, в 1898 г., к нему присоединились супруги **Мария Склодовская** (1867—1934) и **Пьер Кюри** (1859—1906), а после открытия радия к концу столетия число исследователей резко возросло. Эксперименты Беккереля послужили отправной точкой для последующих исследований. Один из основных фактов, установленных учёным, был следующий: все соли урана, независимо от своего происхождения, испускают лучи одной и той же природы, интенсивность которых зависит только от количества урана, содержащегося в соли. Таким образом, эта способность оказывается атомным свойством, присущим элементу урану.

(По книге: М. Льоцци. История физики)



ЗАДАНИЕ 22

- Используя Интернет, найдите имена нобелевских лауреатов, которым были присуждены премии за исследования в области радиоактивности. Расскажите об одном из них.

§ 57

ПОГЛОЩЕНИЕ И ИСПУСКАНИЕ СВЕТА АТОМАМИ. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЛИНЕЙЧАТЫХ СПЕКТРОВ



НИЛЬС БОР

(1885—1962)

Датский физик-теоретик, общественный деятель, один из создателей современной физики. Создал первую квантовую теорию водородоподобного атома

Модель атома Резерфорда прекрасно описала результаты опытов по рассеянию α -частиц. Однако она не смогла объяснить устойчивость (сколь угодно долгое существование) атомов и линейчатый характер их спектров. Действительно, согласно модели Резерфорда, электроны, вращающиеся вокруг ядра, движутся ускоренно, следовательно, должны излучать электромагнитную волну. При этом они будут терять энергию и в результате упадут на ядро. Атом перестанет существовать. При приближении к ядру частота вращения, а значит, и частота излучения должны непрерывно увеличиваться. Поэтому спектр излучения атома должен быть непрерывным. В действительности опыт показывает, что атомы устойчивы и их спектры линейчаты.

Преодолеть эти противоречия модели атома Резерфорда удалось в 1913 г. датскому физику **Нильсу Бору**.

Применив идею Планка о квантах, он сделал важный шаг в развитии представлений о строении атома. Бор сформулировал постулаты, которым должна удовлетворять новая теория строения атома.

1. Атом может находиться только в особых, стационарных состояниях. Каждому состоянию соответствует определённое 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 определённые дискретные значения. Первая орбита расположена ближе всех к ядру.

2. Излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией E_k в стационарное состояние с меньшей энергией E_n . Поглощение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией.

$$h\nu = E_k - E_n$$

Согласно закону сохранения энергии, энергия излучённого фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu = E_k - E_n.$$

Из этого уравнения следует, что атом может излучать свет только с частотами

$$\nu = \frac{E_k - E_n}{h}.$$

$$\nu = \frac{E_k - E_n}{h}$$

Поэтому спектр испускания атома линейчатый.

Атом может также поглощать光子ы при переходах между своими стационарными состо-

яниями. Поэтому частоты в спектрах поглощения атома равны частотам в их спектрах испускания, т. е. атомы могут поглощать свет только тех частот, которые они способны излучать.

Состояние атома, в котором все электроны находятся на стационарных орбитах с наименьшей возможной энергией, называют **основным**. В этом состоянии энергия атома наименьшая. Все другие состояния атома называют **возбуждёнными**.

Атомы различных химических элементов отличаются друг от друга количеством протонов в ядре и электронов в атоме, а следовательно, и энергиями взаимодействия электронов и ядер. Поэтому у атомов каждого химического элемента имеется свой набор энергетических уровней. И переходу с более высокого энергетического уровня на более низкий будут соответствовать характерные линии в спектре испускания, отличные от линий в спектре другого элемента.



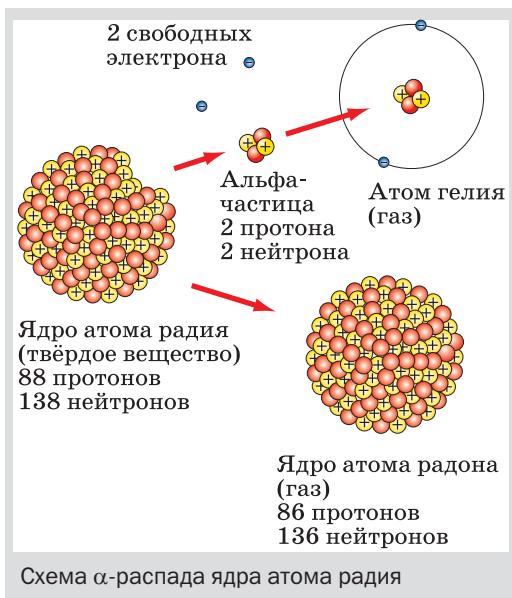
1. Сформулируйте постулаты Бора.
2. Запишите уравнения для определения энергии и частоты излучённого фотона.
3. Какое состояние атома называют основным; возбуждённым?
4. Как объясняется совпадение линий в спектрах испускания и поглощения данного химического элемента?

§ 58

РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ АТОМНЫХ ЯДЕР. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

В 1903 г. (т. е. ещё до обнаружения существования атомных ядер) Резерфорд и его сотрудник, английский химик **Фредерик Содди** (1877—1956) обнаружили, что радиоактивный элемент радий в процессе α -распада (т. е. самопроизвольного излучения α -частиц) превращается в другой химический элемент — радон.

Радий и радон отличаются по своим физическим и химическим свойствам. Радий — металл, при обычных условиях он находится в твёрдом состоянии, а радон — инертный газ. Атомы этих химических элементов отличаются



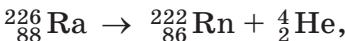
массой, зарядом ядра, числом электронов в электронной оболочке. Они по-разному вступают в химические реакции.

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, стало очевидно, 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 $^{226}_{88}\text{Ra}$ обозначено ядро атома радия, знаком $^{222}_{86}\text{Rn}$ — ядро атома радона и знаком ${}_2^4\text{He}$ — α -частица, или, что то же самое, ядро атома гелия (ядро атома обозначают с помощью химического символа атома, которому оно принадлежит).

Число, стоящее перед буквенным обозначением ядра сверху, называют **массовым числом**, а снизу — **зарядовым числом** (или атомным номером).

Массовое число ядра атома данного химического элемента с точностью до целых чисел равно числу атомных единиц массы, содержащихся в массе этого ядра. (Одна атомная единица массы (сокращённо 1 а. е. м.) равна $\frac{1}{12}$ 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 называют модуль заряда 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 размерности (т. е. единиц измерения), поскольку указывают, во сколько раз масса и заряд ядра больше единичных.

По уравнению реакции можно увидеть, 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.

В процессе радиоактивного распада выполняются законы сохранения массового числа и электрического заряда (зарядового числа), поэтому 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, открытия, сделанные Резерфордом и Содди, показали, 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.*

Интенсивность радиоактивного излучения зависит от количества ядер, способных распадаться. Их количество изменяется с течением времени из-за распада. Скорость распада, а значит, и скорость уменьшения количества радиоактивных атомов у разных веществ различна. Для характеристики этого существует физическая величина, которую называют *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 $t_1 = T$ число радиоактивных атомов будет

$$N_1 = \frac{1}{2} \cdot N_0 = \frac{N_0}{2^1};$$

$$\text{через } t_2 = 2T — N_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{N_0}{2^1} = \frac{N_0}{2^2};$$

$$\text{через } t_3 = 3T — N_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{N_0}{2^2} = \frac{N_0}{2^3} \text{ и т. д.,}$$

$$\text{а через } t = nT — N = \frac{N_0}{2^n}.$$

Формулу

$$N = \frac{N_0}{2^n}$$

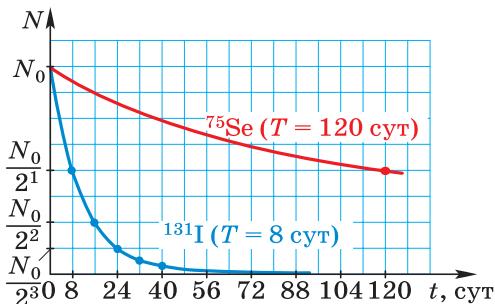


Рис. 204. График зависимости числа радиоактивных атомов от времени для изотопов иода и селена

ждают и представленные на рисунке 204 графики зависимости $N(t)$, построенные для изотопов иода (^{131}I , $T_{\text{I}} = 8$ сут) и селена (^{75}Se , $T_{\text{Se}} = 120$ сут).



- Что происходит с радиоактивными химическими элементами в результате α - и β -распада? Приведите примеры.
- Какая часть атома — ядро или электронная оболочка — претерпевает изменения при радиоактивном распаде? Почему вы так думаете?
- Чему равно массовое число; зарядовое число?
- На примере реакции α -распада радия объясните законы сохранения электрического заряда и массового числа.
- Какой вывод следовал из открытия, сделанного Резерфордом и Содди?
- Что такое радиоактивность?
- Что называют периодом полураспада? Что характеризует эта физическая величина?
- В чём состоит закон радиоактивного распада?



УПРАЖНЕНИЕ 46

- Определите массу (в а. е. м. с точностью до целых чисел) и заряд (в элементарных электрических зарядах) ядер атомов следующих химических элементов: углерода $^{12}_6\text{C}$; лития $^{+3}_3\text{Li}$; кальция $^{+20}_{+20}\text{Ca}$.
- Сколько электронов содержится в атомах каждого из химических элементов, перечисленных в предыдущей задаче?
- Определите (с точностью до целых чисел), во сколько раз масса ядра атома лития $^{+3}_3\text{Li}$ больше массы ядра атома водорода $^{+1}_1\text{H}$.
- Для атома бериллия $^{+9}_4\text{Be}$ определите: а) массу ядра в а. е. м. (с точностью до целых чисел); б) заряд ядра в элементарных электрических зарядах; в) число электронов в атоме.
- Пользуясь законами сохранения массового числа и электрического заряда, определите массовое число и заряд ядра химического элемента X, образующегося в результате следующей реакции β -распада:

$$^{14}_6\text{C} \rightarrow \text{X} + {}^{-1}_0e,$$
где ${}^{-1}_0e$ — β -частица (электрон).

называют **законом радиоактивного распада**. Её можно записать и в другом виде, например: $N = \frac{N_0}{2^{t/T}}$. Из этой 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 «живёт» и излучает. В этом убе-

Найдите этот элемент в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева. Как его называют?

6. Какой процент атомов радиоактивного вещества останется через 6 суток, если период его полураспада равен 2 суткам?

§ 59

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 известных вам методов регистрации частиц — метод сцинтилляций — не даёт необходимой точности, так как результат подсчёта 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 прибор, изобретённый в 1908 г. немецким физиком **Гансом Гейгером** (1882—1945), который называют *счётчиком Гейгера*.

Рассмотрим устройство и принцип действия этого прибора. Счётчик Гейгера (рис. 205) со-

стоит из металлического цилиндра, являющегося катодом (отрицательно заряженным электродом), и натянутой вдоль его оси тонкой проволочки — анода (положительного электрода). Катод и анод через резистор сопротивлением R присоединены к источнику высокого напряжения (порядка 200—1000 В), благодаря чему в пространстве между электродами возникает сильное электрическое поле. Оба электрода помещают в

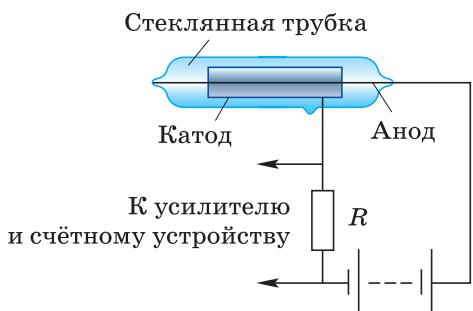


Рис. 205. Схема устройства счётчика Гейгера

герметичную стеклянную трубку, заполненную разреженным газом (обычно аргоном).

Пока газ не ионизирован, ток в электрической цепи источника напряжения отсутствует. Если же в трубку сквозь её стенки влетает какая-нибудь частица, способная ионизировать атомы газа, то в трубке образуется некоторое количество свободных зарядов — электронно-ионных пар. Электроны и ионы начинают двигаться к соответствующим электродам.

Если напряжённость электрического поля достаточно велика, то электроны при движении между соударениями с молекулами газа (т. е. на длине свободного пробега) ускоряются электрическим полем и приобретают достаточно большую энергию. Это позволяет им ионизировать атомы газа, образуя новое поколение ионов и электронов, которые тоже могут принять участие в ионизации, и т. д. В трубке образуется большое количество свободных электронов и ионов — электронно-ионная лавина. В результате этого происходит кратковременное и резкое возрастание силы тока в цепи и напряжения на резисторе R . Этот импульс напряжения, свидетельствующий о попадании в счётчик частицы, регистрируется специальным устройством.

Поскольку сопротивление R очень велико (порядка 10^9 Ом), то в момент протекания тока напряжение на нём очень большое, 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). Прибор готов к регистрации следующей частицы.

Счётчик Гейгера применяется в основном для регистрации электронов, но существуют модели, пригодные и для регистрации γ -квантов.

Счётчик позволяет только регистрировать тот факт, что через него пролетает частица. Гораздо большие возможности для изучения микромира даёт прибор, изобретённый шотланд-

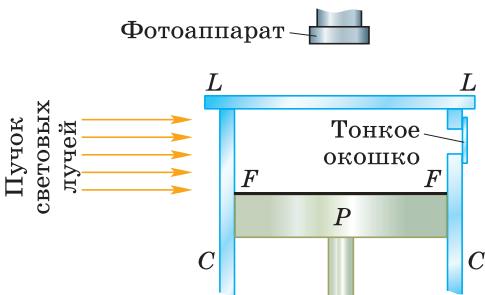


Рис. 206. Схема устройства камеры Вильсона

ским физиком **Чарлзом Вильсоном** (1869—1959) в 1912 г. и называемый **камера Вильсона**.

Камера Вильсона (рис. 206) 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 чёрная ткань *FF*. Благодаря тому что ткань увлажнена смесью воды с этиловым спиртом, воздух в камере насыщен парами этих жидкостей.

При быстром движении поршня вниз находящиеся в камере воздух и пары жидкостей расширяются, их внутренняя энергия уменьшается, температура понижается.

В обычных условиях это вызвало бы конденсацию паров (появление тумана). Однако в камере Вильсона этого не происходит, так как из неё предварительно удаляются так называемые *центры конденсации* (пылинки, ионы и пр.). Поэтому в данном случае при понижении температуры в камере пары жидкостей становятся *пересыщенными*, т. е. переходят в крайне неустойчивое состояние, при котором они будут легко конденсироваться на любых образующихся в камере центрах конденсации, например на ионах.

Излучаемые частицы влетают в камеру через тонкое окошко (иногда источник частиц помещают внутри камеры). Пролетая с большой скоростью через газ, частицы создают на своём пути ионы. Эти ионы становятся центрами конденсации, на которых пары жидкостей конденсируются в виде маленьких капелек (водяной пар конденсируется преимущественно на отрицательных ионах, пары этилового спирта — на положительных). Вдоль всей траектории частицы возникает тонкий след из капелек (*трек*), благодаря чему её 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 определить её массу, энергию, заряд.

Треки существуют в камере недолго, так как воздух нагревается, получая энергию от стенок камеры, и капельки испаряются. Чтобы получить новые следы, необходимо удалить имеющиеся ионы с помощью электрического поля, сжать воздух поршнем, выждать, пока воздух в камере, нагревшийся 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 206.

С помощью камеры Вильсона был сделан ряд важнейших открытий в области ядерной физики и физики элементарных частиц.

На похожем принципе основано действие изобретённой в 1952 г. *пузырьковой камеры*. Вместо пересыщенного пара в ней используется перегретая выше точки кипения жидкость (например, жидкий водород). Жидкость не кипит, поскольку из неё тщательно удалены посторонние тела. При движении в этой жидкости заряженной частицы вдоль её траектории образуется ряд пузырьков пара.

Пузырьковая камера обладает большим быстродействием по сравнению с камерой Вильсона. Размеры пузырьковых камер могут во много раз превышать размеры камер Вильсона (несколько кубических метров против нескольких кубических сантиметров) и, кроме того, жидкость плотнее пара — эти обстоятельства повышают вероятность обнаружения частиц.



1. По рисунку 205 расскажите об устройстве и принципе действия счётчика Гейгера.
2. Для регистрации каких частиц применяется счётчик Гейгера?
3. По рисунку 206 расскажите об устройстве и



принципе действия камеры Вильсона. 4. Какие характеристики частиц можно определить с помощью камеры Вильсона, помещённой в магнитное поле? 5. В чём преимущество пузырьковой камеры перед камерой Вильсона? Чем отличаются эти приборы?

Известно, что Резерфорд использовал счётчик своего ученика Гейгера для определения заряда α -частицы. Предложите вариант такого эксперимента.

§ 60

ОТКРЫТИЕ ПРОТОНА И НЕЙТРОНА

Когда выяснилось, что ядра атомов имеют сложное строение, встал вопрос о том, из каких именно частиц они состоят.

В 1913 г. 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 экспериментальных фактов. В частности, 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 греч. *protos* — первый). Но поскольку наблюдение этих частиц велось методом сцинтилляций, 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.

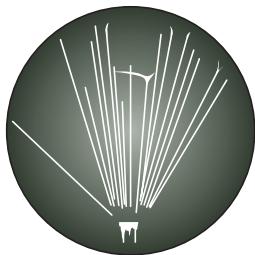
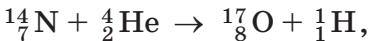


Рис. 207. Фотография треков заряженных частиц, полученных в камере Вильсона

Через прозрачное круглое окошко камеры Вильсона даже невооружённым глазом можно увидеть треки (т. е. траектории) частиц, быстро движущихся в ней (рис. 207).

На рисунке видны расходящиеся веером прямые. 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 две частицы. По характеру искривления их треков при помещении камеры Вильсона в магнитное поле определили, что в результате столкновения образовались ядра атомов кислорода и водорода.

Реакцию взаимодействия ядра атома азота с α -частицами с образованием ядер атомов кислорода и водорода записывают так:



где символом ^1_1H обозначен протон, т. е. ядро атома водорода, с массой, приблизительно равной 1 а. е. м. (точнее, 1,0072765 а. е. м.), и положительным зарядом, равным элементарному. Для обозначения протона используют также символ ${}_1^1p$. Это была первая в истории физики ядерная реакция.

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. На основании этих опытов был сделан вывод, что протоны входят в состав ядер атомов всех химических элементов.

Однако 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_4Be), в чём заключается это противоречие.

Допустим, что ядро ^9Be 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 четырём.

Но если бы ядро бериллия действительно состояло только из четырёх 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 ещё 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, которые назвали *бериллиевым излучением*, так как они возникали при бомбардировке α -частицами бериллия.

В 1932 г. английский учёный *Джеймс Чедвик* (ученик Резерфорда) с помощью опытов, проведённых 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*. Нейtron принят обозначать символом ${}_0^1n$. Точные изме-



ДЖЕЙМС ЧЕДВИК

(1891—1974)

Английский физик-экспериментатор. Выполнил исследования в области радиоактивности и ядерной физики. Открыл нейtron



рения 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.

1. Какой вывод был сделан на основании фотографии треков частиц в камере Вильсона (см. рис. 207)?
2. Как иначе называют и каким символом обозначают ядро атома водорода? Каковы его масса и электрический заряд?
3. Какое предположение (относительно состава ядер) позволяли сделать результаты опытов по взаимодействию α -частиц с ядрами атомов различных элементов?
4. К какому противоречию приводит предположение о том, что ядра атомов состоят только из протонов? Поясните это на примере.
5. Как было доказано отсутствие у нейтронов электрического заряда? Как была оценена их масса?
6. Как обозначается нейtron? Какова его масса по сравнению с массой протона?



УПРАЖНЕНИЕ 47

- Рассмотрите запись ядерной реакции взаимодействия ядер атомов азота и гелия, в результате чего образуются ядра атомов 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.

§ 61

СОСТАВ АТОМНОГО ЯДРА. ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Открытие нейтрона дало толчок к пониманию того, как устроены ядра атомов.

В том же 1932 г., когда был открыт нейtron, российский физик **Дмитрий Дмитриевич Иваненко** (1904—1994) и немецкий физик **Вернер Гейзенберг** (1901—1976) предложили **протонно-нейтронную модель ядер**, согласно которой ядро любого атома состоит из двух видов частиц — **протонов и нейтронов**. Справедливость этой модели была впоследствии подтверждена экспериментально.

Протоны и нейтроны, составляющие ядро атома, называют **нуклонами** (от лат. *nucleus* — ядро).

Общее число нуклонов в ядре называют массовым числом и обозначают буквой A .

Так, например, для азота $^{14}_7\text{N}$ массовое число $A = 14$, для железа $^{56}_{26}\text{Fe}$ $A = 56$, для урана $^{235}_{92}\text{U}$ $A = 235$.

Массовое число A численно равно массе ядра m , выраженной в атомных единицах массы и округлённой до целых чисел (поскольку масса каждого нуклона примерно равна 1 а. е. м.). Например, для азота $m \approx 14$ а. е. м., для железа $m \approx 56$ а. е. м. и т. д.

Число протонов в ядре называют зарядовым числом и обозначают буквой Z .

Например, для азота $^{14}_7\text{N}$ зарядовое число $Z = 7$, для железа $^{56}_{26}\text{Fe}$ $Z = 26$, для урана $^{235}_{92}\text{U}$ $Z = 92$ и т. д.

Заряд каждого протона равен элементарному электрическому заряду. Поэтому зарядовое число Z численно равно заряду ядра, выраженному в элементарных электрических зарядах. Для каждого химического элемента зарядовое число равно атомному (порядковому) номеру в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева.

Ядро любого химического элемента в общем виде обозначается так: ${}_Z^A\text{X}$ (под X подразумевается символ химического элемента).

Число нейтронов в ядре обычно обозначают буквой N . 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 некоторым 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.

Ядра с одинаковым электрическим зарядом имеют один и тот же порядковый номер в таблице Д. И. Менделеева, т. е. занимают в таблице одну и ту же клетку (место). Поэтому такие атомы называют *изотопами* (от греч. *изос* — одинаковый и *толос* — место).

Изотопы — это атомы одного и того же химического элемента, различающиеся массой атомных ядер.

Протонно-нейтронная модель ядра позволила объяснить (примерно через два десятилетия после открытия изотопов), почему атомные ядра с одним и тем же зарядом обладают различными массами. Очевидно, ядра изотопов содержат одинаковое число протонов, но различное число нейтронов.

Так, например, существует три изотопа водорода: ${}_1^1\text{H}$ (протий), ${}_1^2\text{H}$ (дейтерий) и ${}_1^3\text{H}$ (тритий). Ядро протия ${}_1^1\text{H}$ вообще не имеет нейтронов — оно представляет собой один протон. В состав ядра дейтерия ${}_1^2\text{H}$ входят две частицы: протон и нейтрон. Ядро трития ${}_1^3\text{H}$ состоит из трёх частиц: одного протона и двух нейтронов.

Итак, атомное ядро состоит из положительно заряженных протонов и нейтральных нейтронов.

В связи с этим возникает вопрос: почему ядра не распадаются на отдельные нуклоны под действием электрических сил отталкивания между положительно заряженными протонами?

Расчёты показывают, что нуклоны не могут удерживаться вместе за счёт сил притяжения гравитационной природы, поскольку эти силы существенно меньше электрических.

В поисках ответа на вопрос об устойчивости атомных ядер учёные предположили, что *между всеми нуклонами в ядрах* действуют какие-то особые силы притяжения, которые значительно превосходят электрические силы отталкивания между протонами. Эти силы называют **ядерными**.

Гипотеза о существовании ядерных сил оказалась правильной. Выяснилось, что ядерные силы являются короткодействующими: на расстоянии 10^{-15} м они примерно в 100 раз больше электрических сил, но уже на расстоянии 10^{-14} м они оказываются ничтожно малы. Другими словами, ядерные силы действуют на расстояниях, сравнимых с размерами самих ядер.



1. Как называют протоны и нейтроны вместе? 2. Что называют массовым числом? Что можно сказать о числовом значении массы атома (в а. е. м.) и его массовом числе? 3. 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? 4. Как связаны между собой массовое число, зарядовое число и число нейтронов в ядре? 5. Как на основе протонно-нейтронной модели ядра объяснить существование ядер с одинаковыми электрическими зарядами и различными массами? 6. Как объяснить устойчивость атомного ядра? Какое предположение пришлось сделать учёным для ответа на этот вопрос? 7. Как называют силы притяжения между нуклонами в ядре и каковы их характерные особенности?



Как вы думаете, действуют ли между нуклонами в ядре атома силы гравитационного притяжения (т. е. силы всемирного тяготения)? Ответ обоснуйте.

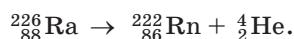


УПРАЖНЕНИЕ 48

1. Сколько нуклонов в ядре атома бериллия $^{9}_{4}\text{Be}$? Сколько в нём протонов; нейронов?
2. Для атома калия $^{39}_{19}\text{K}$ определите: а) зарядовое число; б) число протонов; в) порядковый номер в таблице Д. И. Менделеева; г) число нуклонов; д) число нейтронов.
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 атома, излучая α -частицу ${}^4_2\text{He}$, превращается в ядро атома другого химического элемента.

Например,

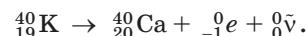


На сколько клеток и в какую сторону (к началу или к концу таблицы Д. И. Менделеева) смещён образовавшийся элемент по отношению к исходному?

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 её ..., чем исходный.

5. При β -распаде исходного ядра атома 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 остаётся в ядре, увеличивая его заряд на единицу. Например,



Перепишите данное ниже *правило смещения для β -распада*, заполнив пропуски:

при β -распаде одного химического элемента образуется другой элемент, который расположен в таблице Д. И. Менделеева на ... клетку ближе к ... таблицы, чем исходный.

§ 62

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ. ДЕФЕКТ МАССЫ

Для того чтобы разбить ядро на отдельные, не взаимодействующие между собой (свободные) нуклоны, необходимо произвести работу по преодолению ядерных сил, т. е. сообщить ядру определённую энергию. Наоборот, при соединении свободных нуклонов в ядро выделяется такая же энергия (по закону сохранения энергии).

Минимальную энергию, необходимую для расщепления ядра на отдельные нуклоны, называют **энергией связи ядра**.

Каким же образом можно определить величину энергии связи ядра?



АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН

(1879—1955)

Немецкий физик-теоретик, один из создателей современной физики. Открыл закон взаимосвязи массы и энергии, создал специальную и общую теории относительности

Наиболее простой путь нахождения этой энергии основан на применении *закона взаимосвязи массы и энергии*, открытого Эйнштейном в 1905 г.

Согласно этому закону между массой m системы частиц и её *энергией покоя*, т. е. внутренней энергией E_0 этой системы, существует прямая пропорциональная зависимость:

$$E_0 = mc^2,$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме.

Если энергия покоя системы частиц в результате каких-либо процессов изменится на величину ΔE_0 , то это повлечёт за собой соответствующее изменение массы этой системы на величину Δm , причём связь между этими величинами выразится равенством:

$$\Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2},$$

или

$$\Delta E_0 = \Delta m c^2.$$

$$E_0 = mc^2$$

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:

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - M_{\text{я}},$$

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - M_a$$

где M_a — масса ядра, Z и N — число протонов и нейтронов в ядре, m_p и m_n — массы свободных протона и нейтрона.

Величину Δm называют **дефектом массы**. Наличие дефекта массы подтверждается многочисленными опытами.

Рассчитаем, например, энергию связи ΔE_0 ядра атома дейтерия ${}_2^1\text{H}$ (тяжёлого водорода), состоящего из одного протона и одного нейтрана. Другими словами, рассчитаем энергию, необходимую для расщепления ядра на протон и нейtron.

Для этого определим сначала дефект массы Δm этого ядра, взяв приближённые значения масс нуклонов и массы ядра атома дейтерия из соответствующих таблиц. Согласно табличным данным, масса протона приблизительно равна 1,0073 а. е. м., масса нейтрана — 1,0087 а. е. м., масса ядра дейтерия — 2,0136 а. е. м. Значит, $\Delta m = (1,0073 \text{ а. е. м.} + 1,0087 \text{ а. е. м.}) - 2,0136 \text{ а. е. м.} = 0,0024 \text{ а. е. м.}$

Чтобы энергию связи получить в джоулях, дефект массы нужно выразить в килограммах.

Учитывая, что

$$1 \text{ а. е. м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг},$$

получим:

$$\begin{aligned}\Delta m &= 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 0,0024 \approx \\ &\approx 3,99 \cdot 10^{-30} \text{ кг}.\end{aligned}$$

Подставим это значение дефекта массы в формулу энергии связи:

$$\begin{aligned}\Delta E_0 &= 3,99 \cdot 10^{-30} \text{ кг} \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)^2 \approx \\ &\approx 3,59 \cdot 10^{-13} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м} = 3,59 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}.\end{aligned}$$

При ядерных реакциях выполняется закон сохранения энергии — полная энергия системы частиц остаётся постоянной. Однако кинетиче-

ская энергия продуктов реакции может быть больше (меньше) кинетической энергии исходных частиц. В таком случае говорят, что реакция идёт с выделением (поглощением) энергии. Как определить, происходит при данной реакции выделение или поглощение энергии?

Полная энергия E частицы складывается из её энергии покоя E_0 и кинетической энергии E_k :

$$E = E_0 + E_k.$$

Пусть в результате столкновения двух частиц с энергиями E_1 и E_2 образуются две частицы с энергиями E_3 и E_4 . Согласно закону сохранения энергии,

$$E_1 + E_2 = E_3 + E_4,$$

или

$$\begin{aligned} m_1 c^2 + E_{k1} + m_2 c^2 + E_{k2} &= \\ &= m_3 c^2 + E_{k3} + m_4 c^2 + E_{k4}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (E_{k3} + E_{k4}) - (E_{k1} + E_{k2}) &= \\ &= (m_1 + m_2 - m_3 - m_4)c^2. \end{aligned}$$

Проанализируем полученное равенство. В левой части равенства стоит разность кинетических энергий продуктов реакции и исходных частиц. Если эта величина окажется положительной, то это будет означать, что реакция идёт с выделением энергии, а если отрицательной — с поглощением. В правой части равенства стоит разность суммарной массы исходных частиц и суммарной массы продуктов реакции, умноженная на c^2 . Таким образом, *если сумма масс исходных частиц больше суммы масс продуктов реакции, то реакция идёт с выделением энергии, а если меньше — с поглощением*.

Энергию, выделяющуюся или поглощающуюся в процессе любых ядерных реакций, можно рассчитать, если известны массы взаимодействующих и образующихся в результате этого взаимодействия ядер и частиц.



- 1.** Что называют энергией связи ядра? **2.** Запишите формулу для определения дефекта массы любого ядра. **3.** Запишите формулу для расчёта энергии связи ядра. **4.** В каком случае говорят, что ядерная реакция идёт с выделением (поглощением) энергии?



УПРАЖНЕНИЕ 49

- Определите дефект массы ядра ${}^6_3\text{Li}$. Выделяется или поглощается энергия при бомбардировке таких ядер ядрами дейтерия: ${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$?

Массы ядер: ${}^6_3\text{Li} = 6,0135$ а. е. м., ${}^4_2\text{He} = 4,0015$ а. е. м.

§ 63

ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР УРАНА. ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ

Деление ядер урана при бомбардировке их нейтронами было открыто в 1939 г. немецкими учёными *Отто Ганом и Фрицем Штрасманом*.

Рассмотрим механизм этого явления. На рисунке 208, *a* условно изображено ядро атома урана ${}^{235}_{92}\text{U}$. Поглотив лишний нейtron, ядро возбуждается и деформируется, приобретая вытянутую форму (рис. 208, *б*).

Вы уже знаете, что в ядре действует два вида сил: *электрические 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 удалённые друг от друга части ядра. Под действием электрических сил отталкивания ядро разрывается на две части (рис. 208, *в*), которые разлетаются в разные стороны с огромной скоростью и излучают при этом 2—3 нейтрона.

Получается, что часть внутренней энергии ядра переходит в кинетическую энергию разлетающихся осколков и частиц. Осколки быст-

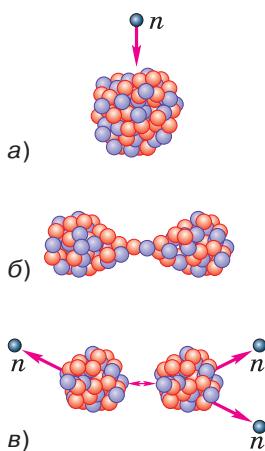


Рис. 208. Процесс деления ядра урана под воздействием попавшего в него нейтрона



ОТТО ГАН

(1879—1968)

Немецкий физик, учёный-новатор в области радиохимии. Открыл деление ядер урана под действием нейтронов, ряд радиоактивных изотопов



ФРИЦ ШТРАССМАН

(1902—1980)

Немецкий физик и химик. Работы относятся к ядерной химии, ядерному делению. Дал химическое доказательство процесса деления

ро тормозятся в окружающей среде, в результате чего их кинетическая энергия преобразуется во внутреннюю энергию среды (т. е. в энергию взаимодействия и теплового движения составляющих её частиц).

При одновременном делении большого числа ядер урана внутренняя энергия окружающей уран среды и соответственно её температура заметно возрастают (среда нагревается).

Таким образом, *реакция деления ядер урана идёт с выделением энергии в окружающую среду.*

Энергия, заключённая 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.

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 $^{235}_{92}\text{U}$. Ядро атома урана (см. рис. 208) в результате захвата нейтрона разделилось на две части, излучив при этом три нейтрона. Два из этих нейтронов вызвали реакцию деления ещё двух ядер, при этом образовалось уже четыре нейтрона. Эти, в свою очередь, вызвали деление четырёх 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 209 показана схема цепной реакции, при которой общее

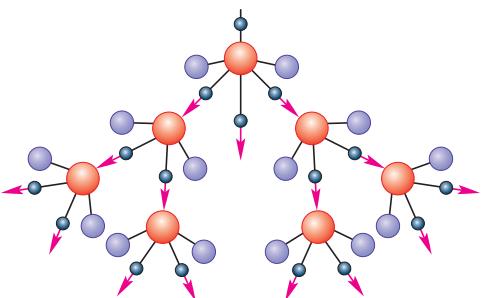


Рис. 209. Цепная реакция деления ядер изотопа урана $^{235}_{92}\text{U}$

число свободных нейтронов в куске урана лавинообразно 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), её нельзя использовать для производства электрической энергии.

Возможен и другой вариант реакции, при котором число свободных нейтронов уменьшается со временем.

В этом случае цепная реакция прекращается. Следовательно, такая реакция тоже не может использоваться для производства электрической энергии.

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 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 нейtron, излучённый при делении ядра (см. рис. 208), вызывает деление других ядер. Если масса (и соответственно размеры) куска урана слишком мала, то многие нейтроны вылетят за его пределы, не успев встретить на своём пути ядро, вызвать его деление и породить таким образом новое поколение нейтронов, необходимых для продолжения реакции. В этом случае цепная реакция протекать не сможет.

Итак, чтобы реакция была возможна, нужно увеличить массу урана до определённого значения, называемого *критическим*.

Почему при увеличении массы урана цепная реакция становится возможной? Чем больше масса куска, тем больше его размеры и тем длиннее путь, который проходят в нём нейтроны. При этом вероятность встречи нейтронов с ядрами возрастает. Соответственно увеличивается число делений ядер и число излучаемых нейтронов.

При 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 остаётся неизменным. При этом цепная реакция может идти длительное время, не прекращаясь и не приобретая взрывного характера.

Наименьшую массу делящегося вещества, при которой возможно протекание цепной реакции, называют 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 счёт 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.

Существует ещё несколько факторов, от которых зависит возможность протекания цепной реакции. Например, если кусок урана содержит слишком много примесей других хими-

ческих элементов, то они поглощают большую часть нейтронов и реакция прекращается.

Наличие в уране так называемого *замедлителя нейтронов* также влияет на ход реакции. 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*, *тяжёлая вода* (в состав которой входит дейтерий), и некоторые другие. Эти вещества только замедляют нейтроны, почти не поглощая их.

Таким образом, возможность протекания цепной реакции определяется *массой урана, количеством примесей в нём, наличием отражающей 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, удается снизить критическую массу урана до 0,8 кг.



1. Почему деление ядра может начаться только тогда, когда оно деформируется под действием поглощённого им нейтрона? 2. Что образуется в результате деления ядра? 3. В какую энергию переходит часть внутренней энергии ядра при его делении; кинетическая энергия осколков ядра урана при их торможении в окружающей среде?
4. Как идёт реакция деления ядер урана — с выделением энергии в окружающую среду или, наоборот, с поглощением энергии? 5. Расскажите о механизме протекания цепной реакции, используя рисунок 209. 6. Что называют критической массой урана? 7. Возможно ли протекание цепной реакции, если масса урана меньше критической; больше критической? Почему?



Почему более эффективным замедлителем нейтронов является вещество, состоящее из лёгких атомов (графит), а не из тяжёлых (свинец)?

Для осуществления управляемой ядерной реакции предназначено устройство — **ядерный реактор**.

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 ядерного 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 нём урана-235 (до 5%).

Реактор, работающий на этом изотопе урана, называется **реактором на медленных нейтронах**. Он назван так потому, что уран-235, как вы уже знаете, наиболее эффективно делится под действием медленных нейтронов. Поскольку при делении ядер образуются в основном быстрые нейтроны, то в реакторе предусмотрен замедлитель нейронов.

На рисунке 210, 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 происходит не мо-

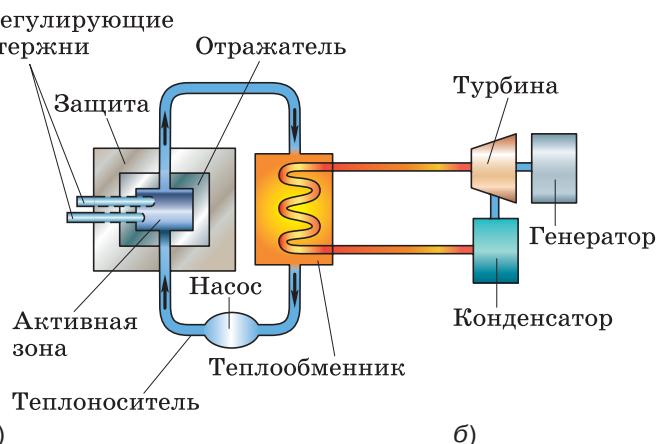


Рис. 210. Схема устройства ядерного реактора на медленных нейтронах

жет (это делается специально из соображений безопасности). Она начинается после погружения в активную зону всех урановых стержней, т. е. когда масса урана достигнет критического значения.

Активная зона окружена отражающей оболочкой (*отражатель*) и *защитной оболочкой* из бетона, задерживающей нейтроны и другие частицы.

Для управления реакцией служат *регулирующие стержни* (содержат кадмий или бор), 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 начнётся 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 счёт внутренней энергии атомных ядер, проходя через теплообменник, нагревает воду в змеевике второго контура, превращая её в пар. Таким образом, *вода в активной зоне реактора служит не только замедлителем нейтронов, но и теплоносителем, отводящим тепло*.

На рисунке 210, б схематично показаны устройства, в которых энергия пара, образовавшегося в змеевике, преобразуется в электрическую энергию. 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.



1. Что такое ядерный реактор? Назовите основные его части. Что находится в активной зоне реактора?
2. В чём заключается управление ядерной реакцией?
3. Для чего нужны регулирующие стержни? Какими пользуются?
4. Какую вторую функцию (помимо замедления нейтронов) выполняет вода в первом контуре реактора?
5. Какие процессы происходят во втором контуре реактора?
6. Какие преобразования энергии происходят при получении электрического тока на атомных электростанциях?

Одной из важнейших проблем, стоящих перед человечеством, является энергетическая проблема. Потребление энергии растёт столь быстро, что известные в настоящее время запасы топлива окажутся исчерпанными в сравнительно короткое время.

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. 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). Её мощность составляла 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. 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 электростанций (ТЭС) обходится дешевле, чем атомных. Поэтому на се-



Обнинская АЭС



ИГОРЬ ВАСИЛЬЕВИЧ КУРЧАТОВ

(1903—1960)

Российский физик, академик, создатель отечественной атомной промышленности, выдающийся организатор науки. Под его руководством в СССР проводились исследования в различных областях ядерной физики

годняшний день стоимость тепловых и атомных электростанций сопоставима.

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.

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, осаждаясь на прилегающей местности и накапливаясь на зольных полях возле ТЭС.

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 её 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), гибели рыбы в результате перекрытия рек и т. д.



а)



б)



в)

Атомные
электростанции:
а — Нововоронежская;
б — Белоярская;
в — Ростовская

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 серьёзных проблем.

В настоящее время квалифицированная критика ядерной энергетики концентрируется вокруг трёх принципиальных проблем: *содействие распространению ядерного оружия, радиоактивные отходы и возможность аварий*, особенно вызванных природными катаклизмами.

Первая проблема может быть решена только в рамках мирового сообщества. Большой вклад в её решение вносит, в частности, деятельность Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) при Организации Объединённых Наций, 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 трём 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 надёжной изоляции отходов от биосфера и человека за счёт создания могильников разных типов.

Для выполнения поставленных задач в проектах всех АЭС предусмотрены установки для отверждения жидких отходов. Кроме того, на заводах по переработке ядерного топлива производится остекловывание отходов. Газообразные отходы подвергаются очистке. Принимаются и многие другие меры, направленные на решение проблемы радиоактивных отходов.

И третья проблема — возможность аварий и их экологические последствия. За последнее время мир стал свидетелем двух крупных аварий на АЭС. Первая произошла на Чернобыльской АЭС в 1986 г., вторая — в 2011 г. на АЭС Фукусима-1. Экологические катастрофы, связанные с этими авариями, стали причиной сворачивания программ развития атомной энергетики в отдельных странах, а остальным ещё раз напомнили о важности проблем безопасности.



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.



ЗАДАНИЕ 23



- Подготовьте коллективный доклад-дискуссию на тему «Экологические последствия использования тепловых, атомных и гидроэлектростанций». При подготовке докладов допустимо взять за основу соответствующий материал, имеющийся в учебнике, дополнив его материалами, самостоятельно найденными содокладчиками.

§ 66

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ

Известно, что радиоактивное излучение при определённых условиях может представлять опасность для здоровья живых организмов. В чём 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. 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 серьёзным нарушениям в его организме это приведёт.

Энергию ионизирующего излучения, поглощённую облучаемым веществом (в частности, тканями организма) и рассчитанную на единицу массы, называют поглощённой дозой излучения.

Поглощённая доза излучения D равна отношению поглощённой телом энергии E к его массе m :

$$D = \frac{E}{m}.$$

В СИ единицей поглощённой дозы излучения является грэй (Гр).

$$1 \text{ Гр} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}}.$$

$$D = \frac{E}{m}$$

Это означает, что *поглощённая доза излучения будет равна 1 Гр, если веществу массой 1 кг передаётся энергия излучения 1 Дж*.

В определённых случаях (например, при облучении мягких тканей живых существ рентгеновским или γ -излучением) поглощённую дозу можно измерять в *рентгенах* (Р): 1 Гр соответствует приблизительно 100 Р.

Чем больше поглощённая 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 поглощённой 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 поглощённой дозе биологи-

ческий 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** α -излучения равен 20, быстрых нейтронов — 10, при том что коэффициент качества γ -излучения (так же как рентгеновского и β -излучения) считается равным единице. Таким образом,

коэффициент качества K показывает, во сколько раз радиационная опасность от воздействия на живой организм данного вида излучения больше, чем от воздействия γ -излучения (при одинаковых поглощённых дозах).

Для оценки биологических эффектов была введена величина, называемая **эквивалентной дозой**.

Эквивалентная доза H определяется как произведение поглощённой дозы D и коэффициента качества K :

$$H = DK$$

$$H = DK.$$

Эквивалентная доза может измеряться в тех же единицах, что и поглощённая, однако для её измерения существуют и специальные единицы.

В СИ единицей эквивалентной дозы является **зыверт (Зв)**. Применяются также дольные единицы: **миллизиверт (мЗв)**, **микрозиверт (мкЗв)** и др.

Из этой формулы следует, что для рентгеновского, γ - и β -излучений (для которых $K = 1$) 1 Зв соответствует поглощённой дозе 1 Гр, а для всех остальных видов излучения — дозе 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 лёгких более вероятно, чем рака щитовидной железы. Другими словами, каждый орган и ткань имеют определённый *коэффициент радиационного риска* (для лёгких, например, он равен 0,12, а для щитовидной железы — 0,03).

Поглощённая 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.

Космическое излучение, радиоактивное излучение Земли и пр. создают *естественный радиационный фон*, который действует на человека. В результате этого в год организм человека поглощает около $2 \cdot 10^{-3}$ Гр радиоактивного излучения. Эта доза не опасна для него. Предельно допустимая доза за год для человека равна $5 \cdot 10^{-3}$ Гр, а для людей, работающих с источниками радиоактивного излучения, — $5 \cdot 10^{-2}$ Гр. Полученная за короткое время доза излучения в 3—10 Гр является смертельной.

Следует знать способы защиты от радиации. Радиоактивные препараты ни в коем случае нельзя брать в руки — для этого нужно использовать специальные щипцы 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.

Гораздо большую проникающую способность имеет β -излучение, поэтому от его воз-

действия труднее защититься. Оно может проходить в воздухе расстояние до 5 м, способно проникать и в ткани организма (примерно на 1—2 см). Защитой от β -излучения может служить, например, слой алюминия толщиной в несколько миллиметров.

Ещё 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 -излучения и различных частиц (α -частиц, нейтронов, осколков деления ядер и пр.).



1. В чём причина негативного воздействия радиации на живые существа?
2. Что называют поглощённой дозой излучения? При большей или меньшей дозе излучение наносит организму человека больший вред, если все остальные условия одинаковы?
3. Одинаковый или различный по величине биологический эффект вызывают в живом организме разные виды ионизирующих излучений? Приведите примеры.
4. Что показывает коэффициент качества излучения? Какую величину называют эквивалентной дозой излучения?
5. Какой ещё фактор (помимо энергии, вида излучения и массы тела) следует учитывать при оценке воздействий ионизирующих излучений на живой организм?
6. Расскажите о способах защиты от воздействия радиоактивных частиц и излучений.

§ 67

ТЕРМОЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ

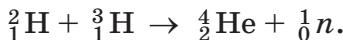
Вы уже знаете, что в середине XX в. возникла проблема поиска новых источников энергии. В связи с этим внимание учёных привлекли *термоядерные реакции*.

Термоядерной называют реакцию слияния лёгких ядер (таких как водород, гелий и др.), происходящую при температурах от десятков до сотен миллионов градусов.

Создание высокой температуры необходимо для сообщения 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 § 63 на примере урана было показано, что при делении тяжёлых ядер может выделяться энергия. В случае с лёгкими ядрами энергия может выделяться при обратном процессе — при их синтезе. Причём реакция синтеза лёгких ядер энергетически более выгодна, чем реакция деления тяжёлых (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 учёным 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 (почти полностью ионизированный газ), в которой и происходит синтез ядер. Плазма не должна со-

прикасаться 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 сложной конфигурации.

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.

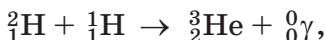
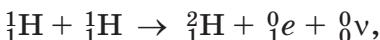
Наше Солнце излучает в пространство свет и тепло уже почти 4,6 млрд лет. Естественно, что во все времена учёных интересовал вопрос о том, что является «топливом», за счёт которого на Солнце вырабатывается огромное количество энергии в течение столь длительного времени.

На этот счёт 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 расчёты, Солнце могло бы просуществовать всего несколько 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 счёт 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 в его недрах термоядерных реакций, было высказано в 1939 г. американским физиком *Хансом Бете* (1906—2005).

Им же был предложен так называемый **внедородный цикл**, т. е. цепочка из трёх термоядерных реакций, приводящая к образованию гелия из водорода:



где ${}_0^0\nu$ — частица, называемая «нейтрино», что в переводе с итальянского означает «маленький нейтрон».

Чтобы получились два ядра ${}_{2}^3\text{He}$, необходимые для третьей реакции, первые две реакции должны произойти дважды.

Вы уже знаете, что в соответствии с формулой $E_0 = mc^2$ 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 ежесекундно уменьшается на несколько миллионов тонн. Но, несмотря на потери, запасов водорода на Солнце должно хватить ещё на 5—6 млрд лет.

Такие же реакции протекают в недрах других звёзд, масса и возраст которых сравнимы с массой и возрастом Солнца.



1. Какую реакцию называют термоядерной? Приведите пример реакции.
2. Почему протекание термоядерных реакций возможно только при очень высоких температурах?
3. Какая реакция энергетически более выгодна (в расчёте на один нуклон): синтез лёгких ядер или деление тяжёлых?
4. В чём заключается одна из основных трудностей при осуществлении управляемых термоядерных реакций?
5. Какова роль термоядерных реакций в существовании жизни на Земле?
6. Что является источником энергии Солнца по современным представлениям?
7. На какой период должно хватить запаса водорода на Солнце по подсчётом учёных?

Это любопытно...

Элементарные частицы. Античастицы

Частицы, из которых состоят атомы различных веществ — электрон, протон и нейтрон, — назвали **элементарными**. Слово «элементарный» подразумевало, что эти частицы являются первичными, простейшими, далее неделимыми и неизменяемыми. Но вскоре оказалось, что эти частицы вовсе не являются неизменяемыми. Все они обладают способностью превращаться друг в друга при взаимодействии.

Поэтому в современной физике термин «элементарные частицы» обычно употребляется не в своём точном значении, а для наименования большой группы мельчайших частиц материи, не являющихся атомами или ядрами атомов (исключение составляет протон).

В настоящее время известно более 350 элементарных частиц, различающихся массой, знаком и модулем электрического заряда, временем жизни (т. е. временем с момента образования частицы и до момента её превращения в какую-либо другую частицу), проникающей способностью и другими характеристиками. Большинство частиц являются «короткоживущими» — они живут не более двух миллионных долей секунды. Среднее время жизни нейтрона, находящегося вне атомного ядра, 15 мин. Электрон и протон — стабильные частицы.

Важное открытие в области исследования элементарных частиц было сделано в 1932 г., когда американский физик **Карл Дэвид Андерсон** (1905—1991) обнаружил в камере Вильсона, помещённой в магнитное поле, след неизвестной частицы. По характеру этого следа определили, что он оставлен частицей, представляющей собой 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** (1902—1984). Более того, он предсказал процессы **аннигиляции** (исчезновения) и **рождения электрон-позитронной пары**.

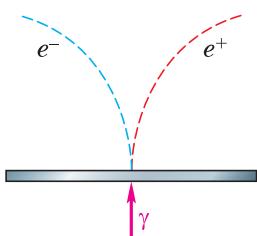


Рис. 211. Треки электрон-позитронной пары в магнитном поле

При аннигиляции электрон и позитрон при встрече исчезают, превращаясь в γ -кванты (фотоны). А при столкновении γ -кванта с массивным ядром происходит рождение электрон-позитронной пары.

Оба эти процесса впервые удалось про наблюдать на опыте в 1933 г. Опыт по наблюдению рождения электрон-позитронной пары проводился в камере Вильсона, помещённой в магнитное поле. На рисунке 211 показаны треки электрона и позитрона, образовавшихся в результате столкновения γ -кванта с атомом свинца при прохождении γ -излучения сквозь свинцовую пластинку.

В 1955 г. была обнаружена ещё одна античастица — **антипротон**, а несколько позже — **антинейтрон**. Антинейтрон не имеет электрического заряда и участвует в процессе аннигиляции и рождения пары нейtron — антинейтрон.

В настоящее время экспериментально обнаружены античастицы почти всех известных элементарных частиц.



Рассмотрите ситуацию, когда при аннигиляции электрона и позитрона рождаются два фотона. Попробуйте доказать, воспользовавшись законом сохранения энергии, что это фотоны именно гаммаизлучения (γ -кванты).

ИТОГИ ГЛАВЫ

Вы узнали, как устроен атом и его ядро. Понимаете, как происходит поглощение и излучение света атомами. Умеете применять закон радиоактивного распада и правила смещения.

Можете объяснить физические основы работы ядерного реактора, оценить опасность влияния радиации на живые организмы. Понимаете преимущества и экологические риски атомной энергетики.

ОБСУДИМ? Иван и Фёдор обсуждали, из каких веществ состоит организм человека. Иван утверждал, что в состав организма входит в том числе и множество металлов, причём отсутствие или недостаток того или иного металла приводит к тяжёлым поражениям различных органов. Информацию об этом он почерпнул из курса анатомии человека. Фёдор же заметил, что радиоактивные вещества, в том числе металлы, наносят организму большой урон.

Правы ли ребята? При ответе вы можете использовать следующую информацию (размещена в статье журнала «Квант»): «У мужчин и женщин есть присущая им естественная радиоактивность. Радиоактивный изотоп калия содержится в их организмах в разном количестве, поэтому уровень естественной радиоактивности различен в организме мужчины и женщины».

ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

«Негативное воздействие радиации (ионизирующих излучений) на живые организмы и способы защиты от неё» (возможная форма: презентация, реферат, макет).



№ 1

ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ БЕЗ НАЧАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

Цель работы Определить ускорение движения бруска по наклонной плоскости и его мгновенную скорость в конце заданного пути.

Приборы и материалы Прибор для изучения движения тел, штатив с муфтой и лапкой.

Описание устройства и действия прибора

Прибор для изучения движения тел (рис. 212) состоит из направляющей 1 длиной 60—70 см; бруска 2 с пусковым магнитом 3, закреплённым на торце алюминиевого стержня; электронного секундомера 4 с двумя датчиками 5.

Направляющая закрепляется в лапке штатива 6, под неё подкладывается коврик 7 из пористого пластика.

При прохождении пускового магнита мимо первого датчика отсчёт времени включается, а при прохождении второго — выключается, и на экране секундомера фиксируется значение промежутка времени t , за который брускок проходит расстояние s между датчиками.

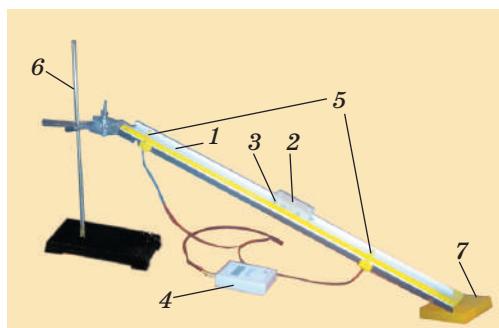


Рис. 212

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Соберите установку по рисунку 212. Направляющую закрепите в лапке штатива под углом $\approx 30—40^\circ$ к плоскости столешницы.

- Прочитайте инструкцию на тыльной стороне секундометра и включите его.
- Разместите брускок на направляющей так, чтобы его пусковой магнит находился на 1,5 см выше верхнего датчика времени.
- Отпустите брускок. Определите расстояние s между датчиками и промежуток времени t , за который брускок прошёл это расстояние.
- Обработка результатов измерений.** Результаты прямых измерений и вычислений записывайте в таблицу 3.

Таблица 3

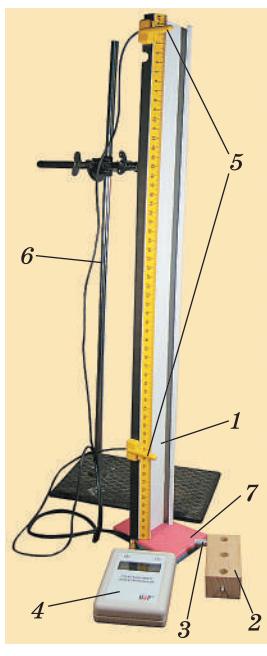
№ опыта	Время t прохождения бруском расстояния s между датчиками, с	Среднее время движения $t_{\text{ср}}$, с	Расстояние s , м	Ускорение бруска a , $\text{м}/\text{с}^2$	Мгновенная скорость бруска v , $\text{м}/\text{с}$

- Не меняя расположения датчиков, проведите опыт ещё 2 раза.
- По результатам трёх опытов рассчитайте среднее время движения бруска: $t_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}$.
- Вычислите ускорение движения бруска и его мгновенную скорость в конце пути s по формулам: $a = \frac{2s}{t_{\text{ср}}^2}$ и $v = at_{\text{ср}}$.

№ 2

ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

- Цель работы** Измерить ускорение свободного падения с помощью прибора для изучения движения тел.
- Приборы и материалы** Прибор для изучения движения тел, штатив с муфтой и лапкой.



а)

б)

Рис. 213

Описание устройства и действия прибора

Прибор для изучения движения тел (рис. 213) состоит из направляющей 1 длиной 60—70 см; бруска 2 с пусковым магнитом 3, закреплённым на торце алюминиевого стержня; электронного секундомера 4 с двумя датчиками 5. Направляющая укрепляется вертикально в лапке штатива 6. Под рейку подкладывается коврик 7 из пористого пластика. Магнитные датчики 5 могут быть установлены в любом месте направляющей на магнитной резине, расположенной вдоль направляющей рядом со шкалой с миллиметровыми делениями. В момент прохождения пускового магнита мимо первого датчика начинается отсчёт времени; при прохождении второго датчика



УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

- Соберите установку по рисунку 213, а.
- Прочтайте инструкцию на тыльной стороне секундометра и включите его.
- Приложите брусок к направляющей так, чтобы её пусковой магнит находился выше первого датчика времени (рис. 213, б).
- Отпустите брусок. Определите промежуток времени, за который брусок проходит расстояние s между датчиками.
- Обработка результатов измерений.** Результаты прямых измерений и вычислений записывайте в таблицу 4.

Таблица 4

№ опыта	Время t прохождения расстояния s между датчиками, с	Среднее время движения t_{cp} , с	Расстояние s , м	Ускорение свободного падения g , м/с ²

6. Не меняя расположения датчиков, проведите опыт ещё 4 раза. Рассчитайте среднее время движения бруска:
$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5}.$$
7. Вычислите ускорение свободного падения по формуле:
$$g = \frac{2s}{t_{cp}^2}.$$
8. Определите отклонение полученного вами значения g от действительного его значения $g_0 = 9,8$ м/с² (т. е. найдите разность между ними). Вычислите, какую часть (в %) составляет эта разность от значения g_0 .

Примечание При аккуратной работе с прибором можно добиться того, чтобы отклонение от табличного значения не превышало 10% .

№ 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЁСТКОСТИ ПРУЖИНЫ

Цель работы Определить жёсткость пружины по графику зависимости $F_{\text{упр}}(x)$.

Приборы и материалы Штатив с муфтой и лапкой, спиральная пружина, набор грузов массой 100 г каждый, линейка.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Закрепите в лапке штатива конец пружины и линейку так, чтобы пружина была параллельна линейке.

- Определите длину пружины l_0 в ненагруженном состоянии.
- Подвешивая к пружине последовательно один груз, два, три, четыре груза, определите длину пружины l и удлинение $x = l - l_0$ для каждого случая.
- Обработка результатов измерений.** Результаты прямых измерений запишите в таблицу 5 с учётом абсолютной погрешности, равной цене деления шкалы линейки. Учтите, что абсолютная погрешность удлинения пружины будет складываться из погрешности определения начальной длины пружины и погрешности определения длины пружины в нагруженном состоянии. Сила упругости пружины будет равна силе тяжести груза, подвешенного к пружине (тело находится в равновесии под действием двух сил, значит, эти силы равны по модулю и направлены в противоположные стороны).

Таблица 5

№ опыта	Длина ненагруженной пружины l_0 , см	Длина нагруженной пружины l , см	Удлинение x , см	Сила упругости $F_{\text{упр}}$, Н

- Используя результаты опытов, постройте график зависимости силы упругости пружины от её удлинения.

Примечание Для построения графика с учётом погрешности необходимо на координатной плоскости по оси x отметить не точки, а отрезки, соответствующие интервалу возможных значений удлинения. Прямую следует провести так, чтобы она проходила через начало координат и пересекала все построенные отрезки.

- Сделайте вывод, подтверждают ли ваши результаты справедливость закона Гука.
- Определите жёсткость пружины.

№ 4**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.

Приборы и материалы Штатив с муфтой и лапкой, шарик с прикреплённой к нему нитью длиной 130 см, протянутой сквозь кусочек резины¹, линейка, часы с секундной стрелкой или секундомер мобильного телефона.

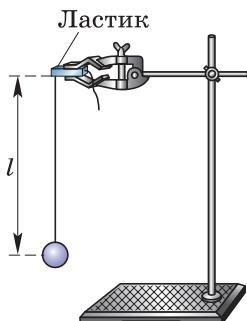
УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

Рис. 214

1. Соберите установку по рисунку 214. При этом длина маятника l (измеряйте от точки подвеса до середины шарика) должна быть равна 5 см, как указано в таблице 6 для первого опыта. Штатив следует ставить на край стола, чтобы колебания маятника происходили над полом.
2. Отклоните шарик от положения равновесия на 1—2 см (амплитуда колебаний) и отпустите. Измерьте промежуток времени t , за который маятник совершил 30 полных колебаний.
3. **Обработка результатов измерений.** Результаты прямых измерений с учётом абсолютной погрешности, равной цене деления шкалы прибора (линейки и секундомера²), и вычислений записывайте в таблицу 6.
4. Проведите ещё четыре опыта, каждый раз устанавливая длину l маятника в соответствии с её значением, указанным в таблице 6 для данного опыта.

¹ Кусочек резины (в данном случае 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.

² Погрешность электронного секундомера можно считать равной единице младшего разряда на дисплее. Однако имейте в виду, что точность измерения ограничена временем реакции человека, равным примерно 0,2 с.

Таблица 6

Физическая величина	№ опыта				
	1	2	3	4	5
l , см	5	20	45	80	125
N	30	30	30	30	30
t , с					
T , с					
v , Гц					

5. Для каждого опыта вычислите период T колебаний маятника.
6. Для каждого опыта рассчитайте частоту v колебаний маятника по формуле: $v = \frac{1}{T}$ или $v = \frac{N}{t}$.
7. Сделайте выводы о том, как зависят период и частота свободных колебаний маятника от его длины.

Дополнительное задание

Выясните, какая математическая зависимость существует между длиной маятника и периодом его колебаний.

1. Пользуясь данными таблицы 6, вычислите отношения периодов колебаний (округляйте результаты до целых чисел) и длин маятников.
2. **Обработка результатов измерений.** Результаты вычислений запишите в таблицу 7.

Таблица 7

$\frac{T_2}{T_1} =$	$\frac{T_3}{T_1} =$	$\frac{T_4}{T_1} =$	$\frac{T_5}{T_1} =$
$\frac{l_2}{l_1} =$	$\frac{l_3}{l_1} =$	$\frac{l_4}{l_1} =$	$\frac{l_5}{l_1} =$

3. Сравните результаты всех четырёх столбцов таблицы 7 и сделайте вывод о зависимости между периодом колебаний маятника T и его длиной l .

№ 5**ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ИЗОБРАЖЕНИЯ
В СОБИРАЮЩЕЙ ЛИНЗЕ.
ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИЛЫ ЛИНЗЫ****Цель работы**

Измерить фокусное расстояние и оптическую силу линзы. Изучить на опыте свойства изображения в собирающей линзе.

**Приборы
и материалы**

Лабораторный источник питания (ЛИП), лампа на подставке, собирающая линза на подставке, колпачок с прорезью (для лампы), экран, ключ, соединительные провода, измерительная лента.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Расположите линзу и экран так, чтобы на экране получилось чёткое изображение рамы окна. Начертите ход лучей.
2. Измерьте фокусное расстояние линзы.
3. **Обработка результатов измерений.** Результаты прямых измерений фокусного расстояния линзы с учётом абсолютной погрешности, равной цене деления шкалы измерительной ленты, и вычислений записывайте в таблицу 8.

Таблица 8

Фокусное расстояние F , м	Оптическая сила линзы D , дптр

4. Найдите оптическую силу линзы.
5. Соберите электрическую цепь, соединив последовательно лампу, источник тока и ключ.
6. Располагая лампу на разных расстояниях d от линзы:
1) $d > 2F$; 2) $d = 2F$; 3) $F < d < 2F$; 4) $d < F$, — добейтесь, перемещая экран, чёткого изображения нити накала лампы на нём в тех случаях, когда это возможно.
7. Начертите ход лучей для каждого случая.
8. Сделайте вывод об изменении характера изображения в зависимости от расстояния между лампой и линзой.

№ 6

НАБЛЮДЕНИЕ СПЛОШНОГО И ЛИНЕЙЧАТЫХ СПЕКТРОВ ИСПУСКАНИЯ

Цель работы Наблюдать сплошной спектр от источника света, линейчатые спектры от разряда в разреженных газах.

Приборы и материалы Проекционный аппарат, раздвижная щель, набор спектральных трубок (например, с водородом, кислородом и неоном) с источником питания (рис. 215), плоскопараллельная пластина со склоненными гранями или однотрубный спектроскоп.



Рис. 215

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Расположите стеклянную пластину горизонтально перед глазом. Сквозь склоненные грани пластины, образующие угол 45° , наблюдайте спектр света выбранного источника (лампа, солнечный свет).
2. Запишите, какой вид спектра вы наблюдаете, сколько в нём основных цветов и в какой последовательности они расположены.
3. Пронаблюдайте спектр того же источника, рассматривая свет сквозь склоненные грани пластины, образующие угол 60° . Запишите, чем этот спектр отличается от предыдущего. Сделайте вывод о зависимости протяжённости спектра от преломляющего угла призмы, в которой преломляется пучок белого света.
4. При наличии однотрубного спектроскопа пронаблюдайте спектр через него. Отличается ли спектр, полученный с помощью спектроскопа, от спектров, полученных с помощью плоскопараллельной пластины?
5. Пронаблюдайте через склоненные грани пластины или через однотрубный спектроскоп спектры, полученные от светящихся газоразрядных трубок. Какой вид спектров вы наблюдали? Нарисуйте примерный вид спектра от разряда в каждом из газов.

№ 7

ИЗМЕРЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО РАДИАЦИОННОГО ФОНА ДОЗИМЕТРОМ

(выполняется коллективно под руководством учителя)

Цель работы Измерить мощность дозы радиоактивного фона бытовым дозиметром.

Приборы и материалы Дозиметр «Сосна» (рис. 216).

Примечание В зависимости от высоты над уровнем моря и содержания естественных радионуклидов в окружающей среде радиационный фон колеблется в значительных пределах. Для его измерения используют счётчики Гейгера—Мюллера. В бытовых дозиметрах используется счётчик жёсткого (т. е. высокоэнергетического) β - и γ -излучения, способный регистрировать мощность дозы в диапазоне 0,004—40 мкР/с (микрорентген в секунду).



Рис. 216

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Положите дозиметр на стол и включите его.
2. Запустите отсчёт импульсов нажатием кнопки «Пуск».
3. Через 40 с подсчёт импульсов будет прекращён (перестанут мерцать точки), на экране высветится значение мощности дозы фонового излучения (в мкР/ч).

№ 8

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.

Приборы и материалы Фотография треков заряженных частиц (рис. 217), образовавшихся при делении ядра атома урана.

Примечание На данной фотографии вы видите треки двух осколков, образовавшихся при делении ядра атома урана, захватившего нейтрон. Ядро урана находилось в точке *g*, указанной стрелкой.

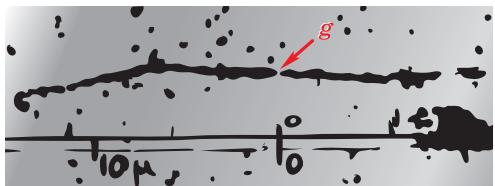


Рис. 217

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 атома 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 ядра атома урана может быть записана следующим образом:



Пользуясь законом сохранения электрического заряда и таблицей Д. И. Менделеева, определите, ядро атома какого элемента обозначено символом ${}_z^{\text{X}}$.

№ 9

ИЗУЧЕНИЕ ТРЕКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПО ГОТОВЫМ ФОТОГРАФИЯМ

Цель работы Объяснить характер движения заряженных частиц.

Приборы и материалы Фотографии треков заряженных частиц, полученных в камере Вильсона, пузырьковой камере и фотоэмulsionии.

Примечание При выполнении данной лабораторной работы следует помнить, что:

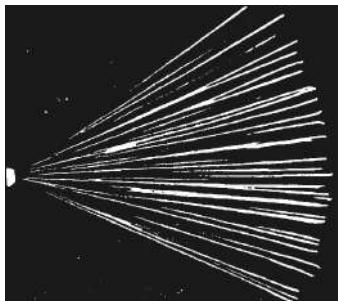
- длина трека тем больше, чем больше энергия частицы и чем меньше плотность среды;
- толщина трека тем больше, чем больше заряд частицы и чем меньше её скорость;
- при движении заряженной частицы в магнитном поле трек её получается искривлённым, причём радиус кривизны трека тем больше, чем больше масса и скорость частицы и чем меньше её заряд и модуль индукции магнитного поля;

По трекам видно, что осколки ядра урана разлетелись в противоположных направлениях (излом левого трека объясняется столкновением осколка с ядром одного из атомов фотоэмulsionии, в которой он двигался).

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

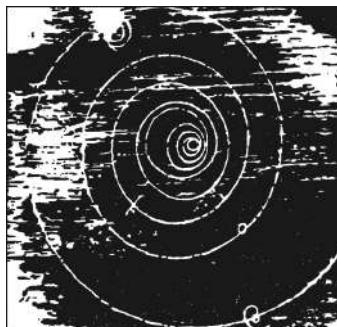
На двух из трёх представленных вам фотографий (рис. 218) изображены треки частиц, движущихся в магнитном поле. Укажите на каких. Ответ обоснуйте.



а)



б)



в)

Рис. 218

Задание 2

Рассмотрите фотографию треков α -частиц, двигавшихся в камере Вильсона (рис. 218, а), и ответьте на вопросы.

- В каком направлении двигались α -частицы?
- Длина треков α -частиц примерно одинакова. О чём это говорит?
- Как менялась толщина трека по мере движения частиц? Что из этого следует?

Задание 3

На рисунке 218, б дана фотография треков α -частиц в камере Вильсона, находившейся в магнитном поле. Определите по этой фотографии:

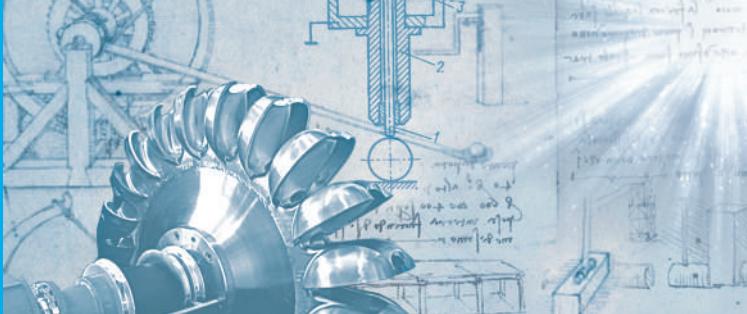
- почему менялись радиус кривизны и толщина треков по мере движения α -частиц;
- в какую сторону двигались частицы.

Задание 4

На рисунке 218, в дана фотография трека электрона в пузырьковой камере, находившейся в магнитном поле. Объясните, почему трек имеет форму спирали. Определите по этой фотографии:

- в каком направлении двигался электрон;
- что могло послужить причиной того, что трек электрона на рисунке 218, в гораздо длиннее треков α -частиц на рисунке 218, б.

ЗАДАЧИ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ



- 1.** Для каждого из векторов, изображённых на рисунке 219, определите:
- координаты начала и конца;
 - проекции на ось y ;
 - модули проекций на ось y ;
 - модули векторов.

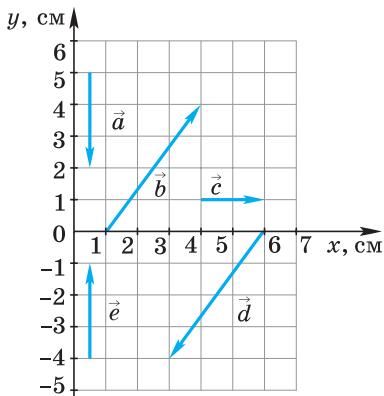


Рис. 219

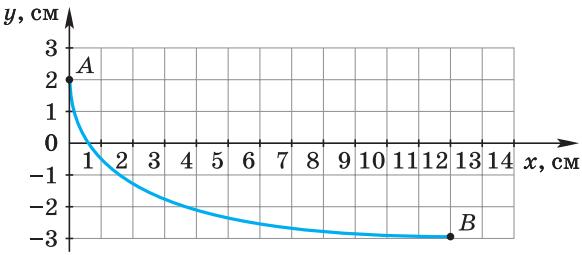


Рис. 220

- 2.** На рисунке 220 изображена траектория движения шарика, переместившегося из точки A в точку B . Определите:
- координаты начального и конечного положений шарика;
 - проекции s_x и s_y перемещения шарика;
 - модули $|s_x|$ и $|s_y|$ проекций перемещения;
 - модуль перемещения $|\vec{s}|$.
- 3.** Катер переместился относительно пристани из точки $A(-8 \text{ м}; -2 \text{ м})$ в точку $B(4 \text{ м}; 3 \text{ м})$. Сделайте чертёж, совместив начало координат с пристанью и указав на нём точки A и B . Определите перемещение катера AB . Мог ли путь, проделанный катером, быть больше совершенного им перемещения; меньше перемещения; равен перемещению? Ответы обоснуйте.
- 4.** Тело движется прямолинейно со скоростью 5 м/с в положительном направлении оси X . Запишите уравнение движения тела, если в момент начала наблюдения его координата равна 3 м .
- 5.** Два поезда — пассажирский и грузовой — движутся по параллельным путям. Относительно здания вокзала движение пассажирского локомотива описывается

уравнением $x_{\text{п}} = 260 - 10t$ (м), а грузового — уравнением $x_{\text{р}} = -100 + 8t$ (м). Через какой промежуток времени от начала наблюдения локомотивы встретились? Какова координата места их встречи?

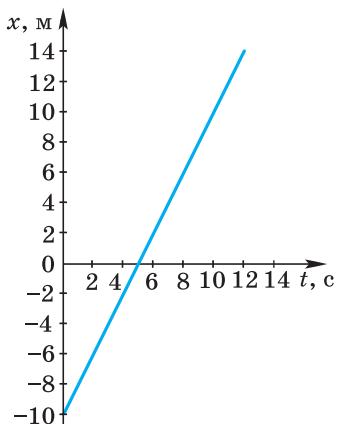


Рис. 221

6. Туристы сплавляются на плоту по реке. На рисунке 221 приведён график изменения со временем координаты плата относительно места стоянки туристов ($x = 0$). Начало наблюдения совпадает с моментом спуска плата на воду и началом движения. Где плот был спущен на воду: от места стоянки, выше по течению или ниже? Определите начальную координату и скорость плата, запишите его закон движения.

7. Мальчик съезжает с горы на санках, двигаясь из состояния покоя прямошлинейно 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 пройдёт за этот промежуток времени?

8. Приведите формулу $\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a} t^2}{2}$ к виду: $\vec{s} = \frac{\vec{v}_0 + \vec{v}}{2} \cdot t$.

9. 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 $a_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2s_x}$.

10. На рисунке 41 показаны положения шарика через каждую 0,1 с его равноускоренного падения из состояния покоя. Определите среднюю скорость шарика за первые 0,3 с от начала движения и его мгновенную скорость в конце этого промежутка времени.

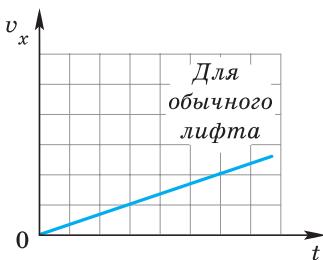


Рис. 222

11. На рисунке 222 приведён график зависимости проекции скорости лифта при разгоне от времени. Перечертите график в тетрадь и в тех же координатных осях постройте аналогичный график для скоростного лифта, ускорение которого в 3 раза больше, чем обычного.

12. Автомобиль движется прямошлинейно вдоль оси X . Закон изменения проекции вектора скорости автомобиля $v_x = 10 + 0,5t$ (м/с). Определите модуль и направление начальной скорости и ускорения автомобиля. Как меняется модуль вектора скорости автомобиля?

13. От удара клюшкой шайба приобрела начальную скорость 5 м/с и стала скользить по льду с ускорением 1 м/с². Запишите уравнение зависимости $v_x(t)$ для шайбы и постройте соответствующий этому уравнению график.

14. 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 пройдёт за это время скоростной лифт, больше пути, прой-

денного обычным лифтом, если его ускорение в 3 раза превышает ускорение обычного лифта? Во сколько раз большую скорость по сравнению с обычным лифтом приобретёт скоростной лифт к концу этого промежутка времени?

15. Лыжник скатывается с горы, двигаясь прямолинейно с постоянным ускорением $0,1 \text{ м/с}^2$. Напишите законы изменения координаты и проекции вектора скорости лыжника, если его начальные координата и скорость равны нулю.
16. 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 скорости автомобиля равен: а) 0; б) 10 км/ч ; в) 40 км/ч ; г) 60 км/ч ?
17. 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.
18. На тело действуют три силы: $F_1 = 2 \text{ Н}$, $F_2 = 5 \text{ Н}$ и $F_3 = 2 \text{ Н}$ (рис. 223, а). С направлением какого из векторов (рис. 223, б) совпадает направление равнодействующей сил; ускорения тела?

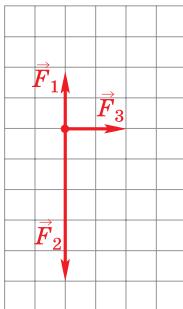
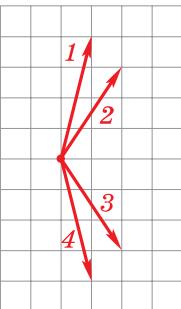


Рис. 223



б)

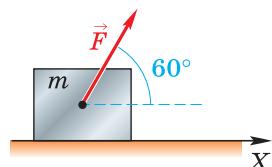


Рис. 224

19. Бруск массой $m = 200 \text{ г}$ движется по горизонтальной поверхности стола под действием силы $F = 2 \text{ Н}$, направленной под углом 60° к горизонту (рис. 224). Чему равно ускорение бруска? Трение пренебрежимо мало.
20. Мальчик держит в руках шарик массой $3,87 \text{ г}$ и объёмом $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Что произойдёт с этим шариком, если его выпустить из рук?
21. 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? Ответы обоснуйте.
22. 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 $g = \frac{g_0 R_3^2}{(R_3 + h)^2}$.

- 23.** Имеются две абсолютно упругие пружины. К первой пружине подвешен груз массой 500 г, а ко второй — 200 г. При этом удлинения пружин оказались равными. Жёсткость какой пружины больше? Во сколько раз?
- 24.** Тело массой $m_1 = 100$ г скользит без трения по горизонтальной плоскости под действием груза массой $m_2 = 300$ г, связанного с телом нерастяжимой и невесомой нитью, перекинутой через неподвижный блок (рис. 225). С каким ускорением движется тело массой m_1 ?

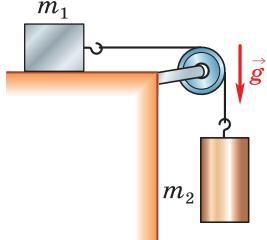


Рис. 225

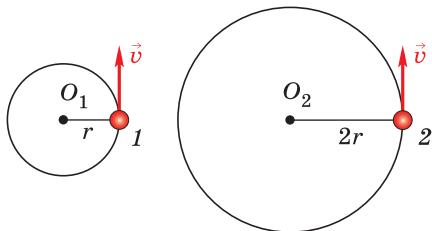


Рис. 226

- 25.** Мальчик стоит на напольных весах в лифте. Куда и с каким ускорением движется лифт, если весы показывают 33 кг? Известно, что в покоящемся лифте весы показывают 30 кг.
- 26.** Шайбе, находящейся на шероховатой горизонтальной плоскости, сообщают горизонтальную скорость $v_0 = 3$ м/с. Через какое время остановится шайба, если коэффициент трения шайбы о плоскость $\mu = 0,3$?
- 27.** На рисунке 226 изображены равные по массе шарики 1 и 2, привязанные к нитям длиной r и $2r$ соответственно и движущиеся по окружностям с одинаковой по модулю линейной скоростью \vec{v} . Сравните центростремительные ускорения, с которыми движутся шарики, их угловые скорости и силы натяжения нитей.
- 28.** Исходя из формулы $a_{\text{ц.с.}} = \frac{v^2}{r}$ для определения центростремительного ускорения при движении по окружности и формулы $g = \frac{g_0 R_3^2}{(R_3 + h)^2}$, выведенной вами при решении задачи 22, получите формулу для расчёта первой космической скорости на высоте h над поверхностью Земли: $v = \sqrt{\frac{g_0 R_3^2}{R_3 + h}}$.
- 29.** Среднее значение радиуса Земли равно 6400 км, а ускорение свободного падения у земной поверхности $9,8$ м/с 2 . Пользуясь только этими данными, вычислите первую космическую скорость на высоте 3600 км над поверхностью Земли.
- 30.** Постройте график зависимости проекции вектора скорости от времени для тела, свободно падающего в течение 4 с ($v_0 = 0$).
- 31.** Рейка длиной 70 см выдвинута на 25 см за край стола. При этом она не опрокидывается, если к её выступающему концу подвешен груз массой не более 80 г. Чему равна масса рейки?

- 32.** 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?
- 33.** С помощью графика, построенного вами при решении задачи 30, покажите, что импульс свободно падающего тела за равные промежутки времени меняется на одну и ту же величину.
- 34.** Алюминиевый и медный шарики одинакового объёма 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.
- 35.** Два одинаковых бильярдных шара, двигаясь вдоль одной прямой, сталкиваются друг с другом. Перед столкновением проекция вектора скорости первого шара на ось X была равна $v_{1x} = 0,2 \text{ м/с}$, а второго — $v_{2x} = 0,1 \text{ м/с}$. Определите проекцию вектора скорости второго шара после столкновения, если у первого она стала равна $v'_{1x} = 0,1 \text{ м/с}$.
- 36.** Решите предыдущую задачу для случая, при котором $v_{1x} = 0,2 \text{ м/с}$, $v_{2x} = -0,1 \text{ м/с}$, $v'_{1x} = -0,1 \text{ м/с}$.
- 37.** Чему равна работа силы трения при торможении с заблокированными колёсами автомобиля массой 2 т, если скорость автомобиля уменьшилась от 72 до 36 км/ч?
- 38.** Пружина жёсткостью 500 Н/м растянута на 2 см. Какую работу нужно совершить, чтобы растянуть эту пружину дополнительно ещё на 2 см?
- 39.** Бруск массой $m = 100 \text{ г}$ поднимают из состояния покоя вертикально вверх с ускорением $a = 1 \text{ м/с}^2$. Чему будет равна кинетическая энергия бруска через время $\Delta t = 4 \text{ с}$? Какая работа при этом будет совершена силой тяжести?
- 40.** Груз массой 10 кг падает с высоты 10 м и проникает в мягкий грунт на глубину 20 см. Определите силу сопротивления грунта, считая её постоянной. Сопротивление воздуха не учитывать.
- 41.** Используя данные и результат решения задачи 36, покажите, что при столкновении шаров полная механическая энергия системы не изменилась.
- 42.** Тело свободно падает без начальной скорости с высоты 30 м. На какой высоте его кинетическая энергия будет вдвое меньше потенциальной? За нулевой уровень отсчёта потенциальной энергии принять поверхность Земли. Сопротивлением воздуха пренебречь.

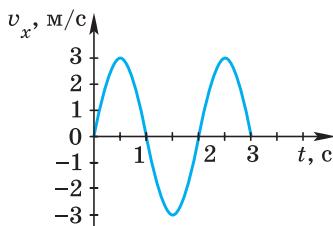


Рис. 227

Годится ли построенный вами график для других точек той же самой струны; для средних точек других струн арфы? Почему?

- 43.** На рисунке 227 приведён график изменения с течением времени проекции вектора скорости одной из точек сиденья качелей. С какой частотой происходит это изменение? Какова частота изменения скорости любой другой точки качелей, совершающей колебания?
- 44.** Струна арфы совершает гармонические колебания с частотой 40 Гц. Постройте график зависимости $x(t)$ для средней точки струны, амплитуда колебаний которой равна 3 мм.

- 45.** 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?
- 46.** Как изменится период колебаний маятника при увеличении длины его нити в 4 раза?
- 47.** 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 данного опыта?

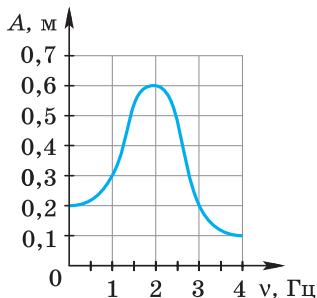


Рис. 228

- 49.** Сделайте чертёж и изобразите на нём тени и полутени от мяча, освещённого двумя точечными источниками света S_1 и S_2 .
- 50.** Тень от штанги футбольных ворот утром и вечером длиннее, чем днём. Меняется ли в течение дня длина тени от перекладины ворот?
- 51.** Девочка стоит перед плоским зеркалом на расстоянии 0,5 м от него. Чему будет равно расстояние между ней и её изображением, если девочка отступит на 1 м дальше от зеркала?

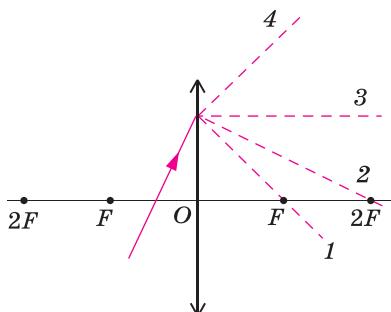


Рис. 229

- 48.** Качели периодически подталкивают рукой, т. е. действуют на них вынуждающей силой. На рисунке 228 приведён график зависимости амплитуды установившихся колебаний качелей от частоты вынуждающей силы.
- а) При какой частоте воздействия на качели — 1 Гц или 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?

- 52.** Как представляется точка, находящаяся над поверхностью воды, для глаза, смотрящего из воды, — приближённой к поверхности или удалённой? Ответ поясните чертежом.
- 53.** Может ли угол преломления быть равен углу падения?
- 54.** Рассеивающая тонкая линза даёт изображение предмета. Как изменится изображение, если половину линзы закрыть непрозрачным экраном?
- 55.** У какой линзы оптическая сила равна нулю?
- 56.** Укажите дальнейший ход луча света после прохождения собирающей линзы (рис. 229).

- 57.** Как следует расположить две собирающие линзы, чтобы параллельный пучок света после прохождения через обе линзы остался параллельным?
- 58.** Выполняя гимнастику для глаз, человек переводит взгляд с удалённого предмета на метку на оконном стекле. Как при этом меняются фокусное расстояние и оптическая сила хрусталика глаза человека?
- 59.** Чему равно фокусное расстояние линзы, оптическая сила которой $+2,5$ дптр?
- 60.** Какая линза имеет большее фокусное расстояние: оптическая сила которой $+1,5$ или -3 дптр?

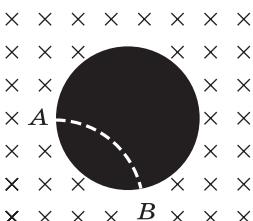


Рис. 230

- 61.** В камеру Вильсона, помещённую в однородное магнитное поле, влетает электрон и движется по дуге окружности (белая штриховая линия на рисунке 230). Под действием какой силы меняется направление скорости электрона? В какой точке он влетел в камеру?
- 62.** В результате какого радиоактивного распада углерод $^{14}_6\text{C}$ превращается в азот $^{14}_7\text{N}$?
- 63.** При бомбардировке ядер алюминия $^{27}_{13}\text{Al}$ нейtronами из образовавшегося ядра выбрасывается α -частица. Напишите уравнение этой реакции.
- 64.** Пользуясь законом сохранения массового и зарядового чисел, заполните пропуск в записи следующей ядерной реакции: $^{10}_5\text{B} + \dots \rightarrow ^7_3\text{Li} + ^4_2\text{He}$.
- 65.** Какой химический элемент образуется в результате α -распада изотопа урана $^{238}_{92}\text{U}$? Запишите эту реакцию.
- 66.** 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. 2. **3.** 7 км; 3 км.
Упр. 5. **3.** $1,5 \text{ м}/\text{с}^2$. **4.** $0,5 \text{ м}/\text{с}^2$. **5.** $2 \text{ м}/\text{с}^2$. **6.** 5 с.
Упр. 6. **1.** 1 м/с. **2.** 10 с. **5.** $a_1 = 0,5 \text{ м}/\text{с}^2$; $a_2 = 1 \text{ м}/\text{с}^2$.
Упр. 7. **1.** 31,25 м. **2.** 150 м. **3*.** Указания: замените в формуле $S = \frac{v_{0x} + v_x}{2} \cdot t$ время t его выражением, полученным из формулы для расчёта ускорения (§ 5), а площадь S — проекцией перемещения s_x ; проведите преобразования с учётом того, что $(a+b)(a-b) = a^2 - b^2$ и что $a+b = b+a$.
Упр. 8. **1.** 0,4 м; $0,8 \text{ м}/\text{с}^2$. **2.** $0,06 \text{ м}/\text{с}^2$. **3.** 21 с; 220 м. **4*.** 7 м/с.
Упр. 9. **2.** $3,14 \text{ м}/\text{с}$; $31,4 \text{ рад}/\text{с}$. **4.** $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}/\text{с}^2$. **6*.** 3600. Секундная.
Упр. 10. **2.** 35 сут. **3.** 5 ч 30 мин. **5*.** 248 м/с при движении на восток и 198 м/с при движении на запад.
Упр. 12. **2.** $36,8 \text{ кН}$. **3.** $9,6 \text{ Н}$. **4.** $6 \text{ м}/\text{с}^2$. **5.** $25 \text{ м}/\text{с}^2$.
Упр. 13. **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. 14. **1.** 78,4 м. **3.** 3 с; 5 м; 25 м. **4.** 25 м/с. **5.** 12,5 м. **6.** 1 с; 4,9 м. **8.** 15 м/с.
Упр. 15. **1.** Увеличится в 9 раз. **2.** $1,67 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$.
Упр. 16. **2.** Притягивается с такой же по модулю силой. **6*.** $h_1 = R_3$; $h_2 = 2R_3$.
Упр. 17. **3.** 480 г. **4.** $0,2 \text{ м}/\text{с}^2$. **5.** $a = g/5$.
Упр. 18. **1.** а) $\approx 150 \text{ Н}$; б) $\approx 150 \text{ Н}$; в) $\approx 156 \text{ Н}$; г) $\approx 144 \text{ Н}$; д) $\approx 147 \text{ Н}$; е) $\approx 155 \text{ Н}$; ж) 0.
Упр. 19. **2.** 0,5. **3.** 3 кг. **4.** 19 м.
Упр. 20. **3*.** На участках AB и CD . Могла.
Упр. 21*. **1.** $6,67 \text{ км}/\text{с}$. **2.** $1,7 \cdot 10^3 \text{ км}$. **3.** 4685 км. **4.** 2,2 м.
Упр. 22. **1.** 80 Н. **2.** На расстоянии 3,17 м от девочки массой 30 кг; 900 Н. **3.** 12,5 см. **4.** 5 Н.
Упр. 23. **1.** $0,02 \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{с}$; $-0,02 \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{с}$. **2.** $5 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{с}$. **4.** $0,9 \text{ м}/\text{с}$. **5.** 160 кг. **6.** $6 \cdot 10^6 \text{ м}/\text{с}$.
Упр. 24. **1.** 2,25 м/с. **2.** $\approx 33 \text{ м}/\text{с}$.
Упр. 25. **1.** 42 Дж. **2.** 180 кДж. **3.** $1000 \text{ Н}/\text{м}$.
Упр. 26. **3.** 24 мДж. **4.** 14 Дж. **5.** 20 м. **6.** -225 Дж .
Упр. 27. **2.** 10 м/с. **3.** 1,25 м. **5.** 2 кг · м/с.
Упр. 28. **1.** а) Под действием силы упругости шнуров.
Упр. 29. **4.** 2 с; 0,5 Гц. **6.** 40 см.
Упр. 30. **1.** 1 с; 1 Гц; 0,06 м.
Упр. 32. **3.** 2 с.
Упр. 33. **1.** 20 м/с.
Упр. 35. **2.** Понизится.
Упр. 36. **7.** 20 м/с.
Упр. 38. **1.** 30° . **2.** Увеличится на 30° .
Упр. 39. **4.** Увеличится на 1 м.
Упр. 41. **2.** 20 дптр; 5 дптр; 0,5 дптр. **3.** 0,2 м; 0,5 м. Вторая.
Упр. 42. **1.** б) Действительное, равное по размеру предмету, перевёрнутое. **3*.** Изображение станет менее ярким.

упр. 43. **2.** В стекле в 1,6 раза больше. **4.** Указание: выразите из уравнения (3) 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 (2); замените в уравнении (2) v_1 и v_2 на соответствующие им буквенные выражения и упростите полученную формулу.

упр. 45. **3.** $5 \cdot 10^5$ Гц.

упр. 46. **3.** В 6 раз.

упр. 48. **1.** Нуклонов — 9, протонов — 4, нейтронов — 5.

упр. 49. $\Delta t = 0,0345$ а. е. м. $\approx 5,73 \cdot 10^{-29}$ кг; выделяется.

К задачам для повторения

- 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.** г) $|\vec{s}| = 13.$ **3.** $|\vec{s}| = 13$ м. **4.** $x = 3 + 5t$ (м). **5.** $t = 20$ с; $x = 60$ м. **6.** $x = -10 + 2t$ (м). **7.** $t_2 = 3$ с; $s_{2x} = 6,75$ м. **10.** $v_{\text{ср. } x} \approx 1,4$ м/с; $v_x \approx 2,9$ м/с. **12.** $v_0 = 10$ м/с; $a = 0,5$ м/с². **13.** $v_x = 5 - t$ (м/с). **15.** $x = 0,05t^2$ (м); $v_x = 0,1t$ (м/с). **16.** 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, $\vec{v}_a \uparrow\downarrow \vec{v}_b.$ **17.** В 1,5 раза. **18.** С направлением вектора 3. **19.** $a = 5$ м/с². **20.** Шар будет покоиться на том месте, где его выпустили из рук. **21.** 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. **23.** $k_1/k_2 = 2,5.$ **24.** $a = 7,5$ м/с². **25.** Лифт движется вверх с ускорением $a = 1$ м/с². **26.** $\Delta t = 1$ с. **27.** $a_{\text{п. с. } 1}/a_{\text{п. с. } 2} = 2;$ $T_1/T_2 = 2.$ **29.** $v \approx 6,3$ км/с. **31.** $m = 200$ г. **32.** $\Delta p_I = 2,94$ кг·м/с; $\Delta p_{II} = 2,94$ кг·м/с. **34.** $p_{M1}/p_{a1} = p_{M2}/p_{a2} \approx 3,3.$ **35.** $v'_{2x} = 0,2$ м/с. **37.** $A = -300$ кДж. **38.** $A = 0,3$ Дж. **39.** $E_k = 0,8$ Дж; $A = -8$ Дж. **40.** $F = 5,1$ кН. **42.** $h = 20$ м. **43.** $v = 0,5$ Гц (для любой колеблющейся точки качелей). **44.** 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). **48.** а) $v = 1$ Гц. **51.** $s = 3$ м. **59.** $F = 40$ см. **62.** $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + ^{-1}_0e.$ **63.** $^{27}_{13}\text{Al} + ^1_0n \rightarrow ^{24}_{11}\text{Na} + ^4_2\text{He}.$

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Альфа-распад 280
Альфа-частицы 272
Амплитуда 147
Антинейтрино 296
Атом 271

Б

Бета-распад 281
Бета-частицы 273
Близорукость 222

В

Водородный цикл 318
Волна 164
— бегущая 164
— поперечная 166
— продольная 165
— упругая 165
— электромагнитная 255
Высота звука 177

Г

Гамма-частицы 273
Герц (единица частоты) 148
Глаз 219
Гравитационная постоянная 71
Громкость звука 178
Грэй (единица поглощённой дозы излучения) 312

Д

Дальнозоркость 222
Движение колебательное 141
— криволинейное 37
— неравномерное 21
— периодическое 142
— по окружности 39
— поступательное 6
— равномерное 15

— равноускоренное 23
— реактивное 121
Дейтерий 294
Деление ядер 300
Дефект массы 298
Джоуль (единица работы) 127
Диопtrия 212
Дисперсия света 241
Дифракция волн 231
Длина волны 169
— — световой 231
Доза излучения поглощённая 312
— — эквивалентная 313

Е

Единица
— импульса 115
— ускорения 24

З

Закон всемирного тяготения 71
— Ньютона второй 56
— — первый 51
— — третий 61
— отражения света 198
— преломления света 205
— радиоактивного распада 284
— сохранения заряда 282
— — импульса 116
— — массового числа 282
— — механической энергии 136
Затмение лунное 195
— солнечное 195

И

Излучение видимое 263
— инфракрасное 263
— рентгеновское 264
— ультрафиолетовое 264
Изолированные атомы 247
Изотопы 294

Источник света 190
— естественный 190
— искусственный 190
— люминесцентный 191
— тепловой 191
— точечный 191
Импульс тела 115

Интерференция волн 228

Искусственный спутник Земли 99

K

Камера Вильсона 287
— пузырьковая 288
Камертон 172
Квант 269
Колебания вынужденные 157
— гармонические 151
— затухающие 157
— звуковые 173
— инфразвуковые 174
— механические 142
— свободные 144
— ультразвуковые 174
Коэффициент качества (радиоактивного излучения) 313

L

Линза 210
— рассеивающая 212
— собирающая 211
Луч отражённый 198
— падающий 198
— преломлённый 204
— световой 192

M

Масса критическая 303
Маятник математический 153
— нитяной 145
— пружинный 145
Метод сцинтилляций 274
Мнимое изображение 200
Модель ядра протонно-нейтронная 292

H

Невесомость 85
Нейтрино 318
Нейтрон 291
Нуклон 292
Ньютон (единица силы) 57

O

Обратимость световых лучей 199
Обертон 177
Оптическая ось линзы 210
— сила линзы 212
Опыты Резерфорда (по рассеянию α -частиц) 274
Относительность движения 45

P

Падение свободное 64
Перемещение 10
Период колебаний 142, 147
— полураспада 283
Плоское зеркало 199
Показатель преломления абсолютный 205
— относительный 205
Поле электрическое 253
— электромагнитное 254
Полное внутреннее отражение 206
Полутень 194
Постоянная Планка 269
Постулаты Бора 279
Правило смещения
— для α -распада 296
— для β -распада 296
Преломление света 204
Протий 294
Протон 289

R

Работа силы 127
Радиоактивность 272
Разность фаз 149
Ракета 123
Реактор ядерный 305

Реакция термоядерная 315
— цепная 301
Резонанс 161
— звуковой (акустический) 186
Резонатор 187
Рентген (единица дозы излучения) 312

С

Сила всемирного тяготения 71
— вынуждающая 158
— консервативная 132
— трения покоя 88
— — скольжения 89
— упругости 77
Силы ядерные 295
Система единиц международная 10
— мира гелиоцентрическая 46
— — геоцентрическая 45
— отсчёта 7
— — инерциальная 51
— — неинерциальная 51
— тел замкнутая 116
— — колебательная 145
Скорость волны 170
— вторая космическая 102
— звука 182
— мгновенная 22
— первая космическая (круговая) 101
— равномерного прямолинейного движения 15
— света 237
— электромагнитных волн 254
Спектр 242
— испускания 248
— — линейчатый 248
— — непрерывный (сплошной) 247
— поглощения 248
Спектральный анализ 250
Спектроскоп 244
Счётчик Гейгера 285

Т

Тело отсчёта 4
Тембр 177

Тень 193
Теорема об изменении кинетической энергии 134
Тон основной 177
— чистый 177
Точка материальная 4
Тритий 294

У

Угол отражения 198
— падения 198
— преломления 204
Ускорение 23
— свободного падения 66
— центростремительное 41

Ф

Фокус линзы 211
Фокусное расстояние линзы 211
Формула Эйнштейна (взаимосвязи массы и энергии) 297
Фотон 269

Ч

Частное затмение 195
Частота колебаний 148
— — основная 177
— — собственная 148
Число зарядовое 281
— массовое 281

Э

Энергия кинетическая 134
— покоя 297
— потенциальная 132
— связи 296
— фотона (кванта электромагнитного излучения) 269
Эхолокация 174

Я

Ядро атомное 276

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ПЕРИОДЫ		Ряды																		Группы				
		А I В			А II В			А III В			А IV В			А V В			А VI В			А VII В				
1	1	H	1,0079 ¹	Водород	Be	9,01218 ⁴	Бериллий	Li	6,941	Литий	Mg	24,305	Магний	Na	22,9888	Натрий	K	39,0883	Калий	Rb	85,4678	Рубидий		
2	2	Be	9,01218 ⁴	Бор	C	10,81	Углерод	N	12,011	Азот	P	28,0855	Алミニумий	O	14,0067	Кислород	F	15,994	Фтор	Ne	20,179	Неон		
3	3	Mg	24,305	Алミニумий	Si	13,9815	Кремний	S	14,975	Фосфор	Cl	30,935	Хлорий	Cl	32,06	Сера	Ar	35,453	Аргон	Ar	38,948	Аргон		
4	4	Ca	40,08	Магний	Sc	21,988	Титан	Ti	22,988	Ванадий	V	51,9345	Хром	Cr	51,936	Хром	Fe	55,9332	Железо	Co	56,939	Никель		
5	5	Cu	63,546	Кальций	Zn	65,339	Стандий	Ge	72,59	Германий	Ge	74,9216	Ас	74,9216	Монибен	Se	78,96	Се	79,904	Kr	83,86	Криптон		
6	6	Rb	85,4678	Стронций	Sr	87,62	Иттрий	Zr	90,9122	Цирконий	Sn	114,82	Нийобий	Nb	92,9684	Маньбик	Mo	95,94	Молибден	Te	101,07	Ru	102,905	Родий
7	7	Ag	107,868	Родий	Cd	112,41	In	114,82	Галий	Sn	118,69	Сурьма	Sn	121,75	Титан	Te	127,80	Технеций	I	126,904	Рутений	131,29	Платина	
8	8	Cs	132,905	Кадмий	Ba	137,33	Индиий	La	138,605	Гафний	Tl	173,49	Лантан	La*	173,49	Сурьма	W	183,85	Талган	Re	190,2	Оs	192,22	Родий
9	9	Au	196,967	Цезий	Ag	80,59	Барий	Hg	88	Ртуть	Bi	204,385	Лантан	Hg	80,9479	Талган	W	186,207	Висмут	At	210	Os	212,22	Родий
10	10	Fr	223	Золото	Ra	226	Франций	Ra	227	Радий	Rf	104	Астийний	Ac**	104	Резерфордий	Db	106	Сиборгий	Po	234	Полоний	245	Радий
11	11	Rg	[280]	Рентгений	Cn	[285]	Коперниций	Nh	112	Франций	F1	113	Нюлоний	Fl	114	Флеровий	Mc	115	Ливерморий	Lv	238	Гассий	248	Мейтнерий
12	12	Ce	140,908	Протактиний	Pr	144,24	Лантаноиды	Pm	145	Прометий	Gd	150,36	Самарий	Eu	151,96	Европий	Tb	157,25	Гадолиний	Bk	158,925	Гольмий	164,930	Тимаков
13	13	Th	232,038	Торий	Pa	238,029	Актиноиды	Pu	244	Уран	Am	243	Америций	Am	247	Плутоний	Cf	251	Калифорний	Es	252	Эйштейний	260	Менделевий
14	14	U	238,029	Лоуренсиев	No	259	Лоуренсиев	Fm	260	Нобелевий	Md	262	Лоуренсиев	Md	260	Лоуренсиев	Yb	173,04	Лоуренсиев	Lu	174,967	Лоуренсиев	Lu	

*Актиноиды

**Актиноиды

ВЕКТОРНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И ДЕЙСТВИЯ НАД НИМИ

Для характеристики многих физических величин, например, таких как перемещение, скорость, ускорение, напряжённость электрического поля, кроме числового значения, необходимо знать ещё и их направление. Такие величины называют **векторными** или просто **векторами**.

Вектор изображают на рисунках направленным отрезком — стрелкой. Направление стрелки указывает направление данной векторной величины, а длина стрелки равна значению величины в выбранном масштабе. Обозначают векторы буквами со стрелками над ними: \vec{s} , \vec{F} , \vec{a} , \vec{b} и т. п. Число, выражающее длину направленного отрезка, называют **модулем вектора** и обозначают той же буквой, что и сам вектор, но без стрелки (s , F и т. п.), либо с помощью знака абсолютной величины ($|\vec{s}|$, $|\vec{F}|$ и т. п.).

Два вектора равны друг другу, если равны их модули и одинаковы направления.

С векторными величинами можно производить различные действия, в частности их можно умножать на число, складывать, вычитать.

Умножение вектора на число. Результатом умножения вектора \vec{a} на число k является вектор $\vec{b} = k\vec{a}$, модуль которого равен произведению модуля вектора \vec{a} на число k : $|\vec{b}| = k|\vec{a}|$. Направление вектора \vec{b} совпадает с направлением вектора \vec{a} , если $k > 0$, и противоположно направлению вектора \vec{a} , если $k < 0$.

Сложение и вычитание векторов. При сложении векторов \vec{a} и \vec{b} можно использовать *правило треугольника* (рис. 1, а) или *правило параллелограмма* (рис. 1, б).

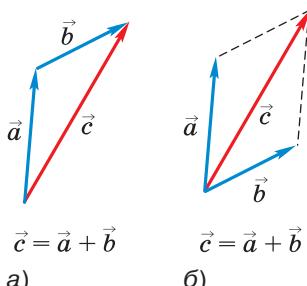
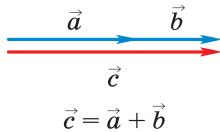
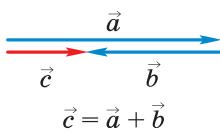


Рис. 1

Если векторы \vec{a} и \vec{b} сонаправлены (имеют одинаковые направления), то их сумма представляет собой вектор, направленный в ту же сторону и равный по модулю сумме модулей векторов-слагаемых (рис. 2, а). Если два вектора имеют противоположные направления, то их сумма представляет со-



а)



б)

Рис. 2

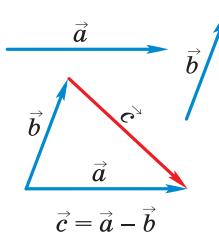


Рис. 3

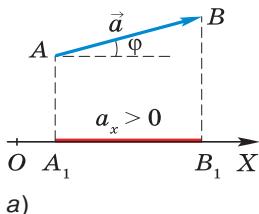
бой вектор, модуль которого равен разности модулей векторов-слагаемых, направленный в сторону того вектора, модуль которого больше (рис. 2, б).

Если из вектора \vec{a} необходимо вычесть вектор \vec{b} , то можно вектор \vec{a} сложить с вектором $(-\vec{b})$ или воспользоваться правилом, изображённым на рисунке 3.

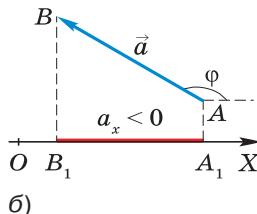
Проекция вектора на ось. При решении физических задач часто пользуются понятием проекции вектора на координатную ось. Пусть вектор \vec{a} образует с осью OX угол φ (угол между вектором и осью — это угол между их направлениями). Опустим из начала и конца вектора \vec{a} на ось OX перпендикуляры AA_1 и BB_1 (рис. 4, а).

Длину отрезка A_1B_1 , взятую со знаком «плюс» или «минус», называют *проекцией a_x вектора \vec{a} на ось OX* . Если $\varphi < 90^\circ$, то $a_x > 0$ (см. рис. 4, а), если $\varphi > 90^\circ$, то $a_x < 0$ (рис. 4, б). Если же $\varphi = 90^\circ$, то $a_x = 0$ (рис. 4, в).

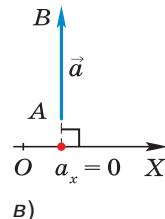
Имеют место следующие свойства: при умножении вектора на число его проекция умножается на то же число; проекция суммы векторов равна сумме их проекций.



а)



б)



в)

Рис. 4

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1

ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕЛ

§ 1	Материальная точка. Система отсчёта	3
§ 2	Перемещение	9
§ 3	Определение координаты движущегося тела	11
§ 4	Перемещение при прямолинейном равномерном движении	15
§ 5	Характеристики неравномерного движения.	
	Прямолинейное равноускоренное движение	21
§ 6	Скорость прямолинейного равноускоренного движения.	
	График скорости	28
§ 7	Перемещение тела при прямолинейном равноускоренном движении	31
§ 8	Перемещение тела при равноускоренном движении без начальной скорости	34
§ 9	Скорость при криволинейном движении.	
	Движение по окружности с постоянной по модулю скоростью..	37
§ 10	Относительность движения	43
§ 11	Инерциальные системы отсчёта. Первый закон Ньютона	49
§ 12	Второй закон Ньютона	53
§ 13	Третий закон Ньютона	60
§ 14	Свободное падение тел	64
§ 15	Закон всемирного тяготения	70
§ 16	Ускорение свободного падения на Земле и других небесных телах	73
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО...	
	Открытие планеты Нептун	76
§ 17	Сила упругости	77
§ 18	Вес тела, движущегося с ускорением	83
§ 19	Сила трения	
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО...	
	О жидком трении и прыжках с парашютом	92
§ 20	Динамика криволинейного движения	93
* § 21	Искусственные спутники Земли	98
§ 22	Условия равновесия тел. Центр тяжести тела	104
§ 23	Виды равновесия тел	111
§ 24	Импульс тела. Закон сохранения импульса	115
§ 25	Реактивное движение. Ракеты	121
§ 26	Работа силы. Мощность	126
§ 27	Потенциальная и кинетическая энергия	131
§ 28	Закон сохранения механической энергии	135
	ИТОГИ ГЛАВЫ	140

ГЛАВА 2**МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ. ЗВУК**

§ 29	Колебательное движение. Свободные колебания	141
§ 30	Величины, характеризующие колебательное движение	146
§ 31	Гармонические колебания	151
§ 32	Затухающие колебания. Вынужденные колебания	156
§ 33	Резонанс	160
§ 34	Распространение колебаний в среде. Волны	163
§ 35	Длина волны. Скорость распространения волн	167
§ 36	Источники звука. Звуковые колебания	171
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО ...	
	Инфразвук	175
§ 37	Высота, тембр и громкость звука	176
§ 38	Распространение звука. Звуковые волны	180
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО...	
	Измерение скорости звука	184
§ 39	Отражение звука. Звуковой резонанс	184
	ИТОГИ ГЛАВЫ	188

ГЛАВА 3**СВЕТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ**

§ 40	Источники света. Распространение света	190
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО...	
	Солнечные затмения	196
§ 41	Отражение света. Закон отражения света	197
§ 42	Плоское зеркало	199
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО...	
	Получение изображений в нескольких зеркалах	202
§ 43	Преломление света. Закон преломления света.	
	Полное внутреннее отражение	203
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО...	
	Миражи	208
§ 44	Линзы. Оптическая сила линзы	210
§ 45	Изображения, даваемые линзой	214
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО...	
	Сферические зеркала	218
§ 46	Глаз и зрение	219
§ 47	Оптические приборы	223
§ 48	Интерференция и дифракция света	228
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО...	
	Измерение скорости света	234
§ 49	Физический смысл показателя преломления	235
§ 50	Дисперсия света. Цвета тел	240
§ 51	Типы оптических спектров	247
§ 52	Электромагнитное поле. Электромагнитные волны	252
§ 53	Свойства электромагнитных волн	257
§ 54	Диапазоны электромагнитных волн	260
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО...	
	Открытие рентгеновского излучения	266

§ 55	Развитие взглядов на природу света	267
	ИТОГИ ГЛАВЫ	270

ГЛАВА 4

СТРОЕНИЕ АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ АТОМНЫХ ЯДЕР

§ 56	Радиоактивность. Модели атомов	271
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО...	
	Из истории открытия радиоактивности	277
§ 57	Поглощение и испускание света атомами.	
	Происхождение линейчатых спектров	278
§ 58	Радиоактивные превращения атомных ядер.	
	Закон радиоактивного распада	280
§ 59	Экспериментальные методы исследования частиц	285
§ 60	Открытие протона и нейтрона	289
§ 61	Состав атомного ядра. Ядерные силы	292
§ 62	Энергия связи. Дефект массы	296
§ 63	Деление ядер урана. Цепная реакция	300
§ 64	Ядерный реактор. Преобразование внутренней энергии атомных ядер в электрическую энергию	305
§ 65	Атомная энергетика	308
§ 66	Биологическое действие радиации	311
§ 67	Термоядерная реакция	315
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО...	
	Элементарные частицы. Античастицы	319
	ИТОГИ ГЛАВЫ	320

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

№ 1.	Исследование равноускоренного движения без начальной скорости	321
№ 2.	Измерение ускорения свободного падения	322
№ 3.	Определение жёсткости пружины	324
№ 4.	Исследование зависимости периода и частоты свободных колебаний нитяного маятника от его длины	326
№ 5.	Изучение свойств изображения в собирающей линзе. Измерение оптической силы линзы	328
№ 6.	Наблюдение сплошного и линейчатых спектров испускания ..	329
№ 7.	Измерение естественного радиационного фона дозиметром ..	330
№ 8.	Изучение деления ядра атома урана по фотографии треков ..	330
№ 9.	Изучение треков заряженных частиц по готовым фотографиям	331
	ЗАДАЧИ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ	333
	ОТВЕТЫ	340
	ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	342
	ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА	345
	ПРИЛОЖЕНИЕ. ВЕКТОРНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И ДЕЙСТВИЯ НАД НИМИ	346

Учебное издание

**Перышкин И. М.
Гутник Е. М.
Иванов А. И.
Петрова М. А.**

ФИЗИКА

9 класс

Базовый уровень

Учебник

Центр математики, физики и астрономии

Ответственный за выпуск *А. О. Тупикин*

Редактор *А. О. Тупикин*

Художественные редакторы *А. В. Шувалова, Ю. В. Христич*

Художники *О. А. Новотоцких, В. С. Давыдов, Ю. В. Христич*

Технические редакторы *И. В. Грибкова, В. Е. Якушкина*

Компьютерная вёрстка *О. В. Поповой*

Корректор *Е. Е. Никулина*

В издании использованы фотоматериалы фотобанка Shutterstock
(авторы фотографий: smspsy, c. 3; Nick N A, c. 6; Troidrone, c. 7;
Dejan Milinkovic, c. 9; Thiago B Trevisan, c. 23; Ivan Boryshchak, c. 45;
Everett — Art, c. 50; COLOMBO NICOLA, c. 53; Alizada Studios, c. 53;
Nadezda Murnakova, c. 62; sirtravelalot, c. 64; Visual Intermezzo, c. 112;
Mr.Samarn Plubkilang, c. 112; Mauseburg, c. 112; Alexandru Axon, c. 122;
Eitan Ben Zvi, c. 122; Konstantin Novikov, c. 122; Vera Larina, c. 123;
Erickson Stock, c. 157; maRRitch, c. 162; Natalia Kirsanova, c. 173;
Rudmer Zwerver, c. 173; John Orsbun, c. 173; criben, c. 178;
Pavel L Photo and Video, c. 185; OmiStudio, c. 188; anko70, c. 190;
H.Tanaka, c. 190; Design master top, c. 190; Greatboernf, c. 191; ETAP, c. 191;
Haoka, c. 192; galyakiss, c. 200; New Africa, c. 212, 263;
Marina Zezelina, c. 219; ppart, c. 224; PolinaPersikova, c. 224; artemiya, c. 250;
Erin Donalson, c. 250; GUDKOV ANDREY, c. 250; Anna Sadovskaya, c. 264;
itsmejust, c. 265; Everett Collection, c. 265; Vladimir Mulder, c. 309),
© «МИА «Россия сегодня» (авторы фотографий: Александр Моклецов, с. 103;
РИА Новости, с. 124, 125; Андрей Соломонов, с. 308), фотобанка Picvario,
фотобанка ООО «Легион-Медиа», фотобанка ООО «ФОТОДОМ»

Дата подписания к использованию 30.01.2024. Формат 70×90/16.
Усл. печ. л. 25,74. Уч.-изд. л. 16,04. Тираж ____ экз. Заказ № ____.

Акционерное общество «Издательство «Просвещение».
Российская Федерация,
127473, г. Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 3, помещение 1Н.

Адрес электронной почты «Горячей линии» — vopros@prosv.ru.