

Н. С. Пурышева, Н. Е. Важеевская, В. М. Чаругин



ФИЗИКА



9

Н. С. Пурышева,
Н. Е. Важеевская, В. М. Чаругин

 | российский
учебник

ФИЗИКА

Учебник

Рекомендовано
Министерством просвещения
Российской Федерации

7-е издание, переработанное

Москва

 дрофа

2019

9

Введение

Как вы уже знаете, физика изучает физические явления и физические свойства тел. Вы познакомились с механическими, тепловыми, звуковыми, световыми, электрическими явлениями.

При их изучении вы так же, как и учёные-физики, использовали различные методы. Основными для вас пока являлись экспериментальные методы: наблюдение, измерение, эксперимент. В то же время в ряде случаев вы применяли и теоретические методы изучения явлений и свойств тел. Например, при получении формулы для расчёта давления жидкости на дно и стенки сосуда и формулы выталкивающей силы вы создавали модель явления.

При введении понятия силы тока и объяснении зависимости сопротивления от характеристик проводника вы проводили аналогию направленного движения заряженных частиц с течением жидкости по трубе. Выполняя эксперимент по выявлению зависимостей между физическими величинами, вы сначала анализировали имеющиеся факты и выдвигали гипотезы, а затем осуществляли их экспериментальную проверку.

Экспериментальные и теоретические методы изучения физических явлений тесно связаны между собой. Преобладание того или иного метода в научных исследованиях зависит от проблемы исследования, уровня развития науки и техники. Метод изучения физики в школе зависит от вашей подготовки, в частности по математике. Поскольку у вас уже есть определённые знания по математике, вы приобрели некоторые знания о теоретических методах познания, то в этом году при изучении явлений и свойств

тел значительно шире будут применяться теоретические методы познания.

Изучая физические явления и свойства тел, вводят **физические величины**, которые их количественно характеризуют. Экспериментальное или теоретическое исследование явлений и свойств тел позволяет установить связи между величинами. Если связи устойчивы и повторяются в различных экспериментах, то их называют **физическими законами**. Физические законы, часто записываемые в виде математических формул, являются выражением законов природы.

Объяснить, почему то или иное физическое явление протекает так, а не иначе, выяснить причину явления и предсказать его ход позволяет **физическая теория**. Физика-наука имеет в своём арсенале целый ряд развитых теорий. Вы уже познакомились с элементами молекулярно-кинетической теории строения вещества, которую использовали для объяснения тепловых явлений, механических и тепловых свойств газов, жидкостей и твёрдых тел. Некоторые представления о строении атома помогли вам понять такие явления, как электризация, электрическая проводимость металлов, жидкостей, газов.

Первой физической теорией, сложившейся в XVII в., является классическая механика, которую вы будете изучать в этом году. Вы также познакомитесь с элементами электродинамики — теорией, которая объясняет электромагнитные явления, и с элементами квантовой теории, объясняющей строение атома, атомного ядра и элементарных частиц. В последней теме вы познакомитесь с астрономией — наукой, объясняющей строение мегамира.

Каждая физическая теория описывает и объясняет определённый круг явлений природы и потому имеет границы применимости. Так, классическая механика, обобщившая существовавшие к середине XVII в. экспериментальные и теоретические сведения о механическом движении, справедлива для тел, размеры которых не меньше размеров молекул (10^{-10} м) и которые движутся со скоростями, много меньшими скорости света (300 000 км/с).



Законы механики

В курсе физики 7 класса вы познакомились с некоторыми понятиями механики, простейшими видами механического движения и уравнениями, которые их описывают. При этом основу изучения механических явлений составлял эксперимент.

Возникает вопрос, почему необходимо вернуться к изучению механики. Причин по крайней мере три.

Во-первых, механическое движение является самым простым видом движения и лежит в основе других форм движения материальных объектов. Соответственно величины, характеризующие механическое движение, используются при описании не только механических явлений.

Во-вторых, при описании механического движения вы использовали скалярные величины. Но такие механические величины, как скорость, ускорение, сила, имеют направление, т. е. являются векторными. Соответственно и уравнения, которые связывают эти величины, записываются в векторной форме, что позволяет существенно расширить круг изучаемых видов движения.

В-третьих, классическая механика — стройная физическая теория. Изучение её позволяет показать роль теории не только в объяснении тех или иных явлений, но и в предсказании явлений и законов, а также в целом показать роль теории в научном познании.

§ 1. Основные понятия механики

- ✓ Что значит «механическое движение относительно»?
- ✓ Что называют траекторией движения; пройденным путём?

1. Механическое движение — один из самых распространённых и легко наблюдаемых видов движения. Примерами механического движения могут служить: движение транспорта, деталей машин и механизмов, маятника и стрелок часов, небесных тел и молекул, перемещение животных и рост растений и т. д.

Механическим движением называют изменение положения тела в пространстве относительно других тел с течением времени.

2. Одно и то же тело может, оставаясь неподвижным относительно одних тел, двигаться относительно других. Например, сидящие в автобусе пассажиры неподвижны относительно корпуса автобуса и движутся вместе с ним относительно людей на улице, домов, деревьев (рис. 1). Таким образом, когда говорят о движении какого-либо тела, необходимо указывать тело, относительно которого это движение рассматривается.

Тело, относительно которого рассматривается движение тел, называют телом отсчёта.

3. Положение тела в пространстве можно определить с помощью координат. Если тело движется вдоль прямой линии, например бегун на короткой дистанции, то его положение на этой линии можно характеризовать только одной координатой x .



Рис. 1

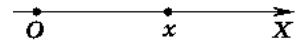


Рис. 2

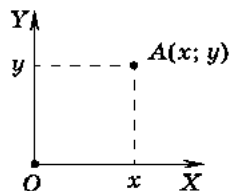


Рис. 3

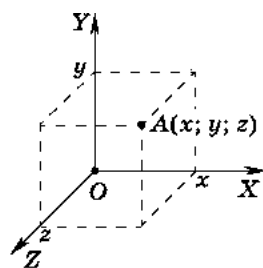


Рис. 4

Для этого с телом отсчёта связывают систему координат, состоящую из одной координатной оси OX (рис. 2).

Если тело совершает движение в пределах некоторой плоскости, например футболист на поле, то его положение определяют с помощью двух координат x и y , а система координат в этом случае состоит из двух взаимно перпендикулярных осей: OX и OY (рис. 3).

Когда рассматривается движение тела в пространстве, например движение летящего самолёта, то система координат, связанная с телом отсчёта, будет состоять из трёх взаимно перпендикулярных координатных осей: OX , OY и OZ (рис. 4).

При движении тела его координаты изменяются с течением времени, поэтому необходимо иметь прибор для измерения времени — часы.

Тело отсчёта, связанная с ним система координат и прибор для измерения времени образуют систему отсчёта.

Любое движение рассматривается относительно выбранной системы отсчёта.

4. Изучить движение тела — значит определить, как изменяется его положение, т. е. его координаты с течением времени. Если известно, как изменяются координаты тела со временем, можно определить его положение (координаты) в любой момент времени.

Основная задача механики состоит в определении положения (координат) тела в любой момент времени.

Чтобы указать, как изменяется положение тела с течением времени, нужно установить связь между величинами, характеризующими это движение.

Раздел механики, изучающий способы описания движения тел, называют **кинематикой**.

5. Любое тело имеет определённые размеры. При движении тела его части, например пол и потолок лифта, занимают различные положения в пространстве. Возникает вопрос: как же определить координаты тела? В целом ряде случаев можно не указывать положение каждой точки тела.

Например, все точки лифта (рис. 5) движутся **поступательно** и при движении описывают одинаковые траектории. Поэтому при поступательном движении тела нет необходимости описывать движение каждой его точки в отдельности. Напомним, что *траектория* — это линия, вдоль которой движется тело.

При решении многих задач размерами тела можно пренебречь. Например, чтобы определить, с какой скоростью влетает в ворота футбольный мяч, не нужно рассматривать движение каждой точки мяча. Если же решается задача о том, как обвести соперника, то пренебрегать размерами мяча нельзя. Другой пример. Вычисляя время движения космического корабля от Земли до космической станции, можно не учитывать размеры корабля. Если же рассчитывается режим стыковки корабля со станцией, то размерами корабля пренебречь нельзя.

Таким образом, для решения ряда задач, связанных с движением тел, вводят понятие **материальной точки**.

Рис. 5

Материальной точкой называют тело, размерами которого в данной задаче можно пренебречь.

В приведённых выше примерах материальной точкой можно считать футбольный мяч при расчёте скорости, с которой он влетает в ворота, космический корабль при определении времени его движения.

Материальная точка — это физическая модель реального объекта, реального тела. Полагая, что тело является материальной точкой, мы пренебрегаем несущественными для решения конкретной задачи признаками, в частности размерами и формой тела.





6. Понятие пути вам хорошо известно. Напомним, что *путь* — это длина траектории, пройденной телом.

Путь обозначают буквой l , единицей пути в СИ является метр (1 м).

Положение тела через некоторый промежуток времени можно определить, зная траекторию движения, начальное положение тела на траектории и пройденный им за этот промежуток времени путь.

Если же траектория движения тела неизвестна, то его положение в некоторый момент времени определить нельзя, поскольку один и тот же путь тело может пройти в разных направлениях. В этом случае необходимо знать направление движения тела и расстояние, пройденное в этом направлении.

Пусть в начальный момент времени $t_0 = 0$ тело находилось в точке A (рис. 6), а в момент времени t — в точке B . Соединим эти точки и на конце отрезка в точке B поставим стрелку. Стрелка указывает направление движения тела.

Перемещением тела называют направленный отрезок (вектор), соединяющий начальное положение тела с его конечным положением.

В данном случае — это вектор $\overrightarrow{AB}$.

Перемещение — величина векторная, имеет направление и числовое значение (модуль). Обозначается перемещение буквой $\vec{s}$, а его модуль — s . Единица перемещения в СИ, как и пути, — метр (1 м).

Зная начальное положение тела и его перемещение за некоторый промежуток времени, можно определить положение тела в конце этого промежутка времени.

Следует иметь в виду, что перемещение в общем случае не совпадает с траекторией движения тела, а модуль перемещения — с пройденным путём. Например, поезд отправился из Москвы в Санкт-Петербург и вернулся обратно. Расстояние между этими городами равно 634 км. Поэтому путь, который проехал поезд, составляет 1268 км, а перемещение равно нулю. Совпадение модуля перемещения и пройденного пути имеет место лишь при движении тела по прямолинейной траектории в одну сторону.

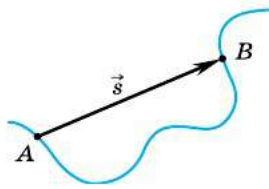


Рис. 6

Вопросы для самопроверки

1. Что называют механическим движением?
2. Что называют системой отсчёта? Зачем вводят систему отсчёта?
3. В чём состоит основная задача механики?
4. Что называют материальной точкой? Зачем вводят модель — материальная точка?
5. Можно ли, зная начальное положение тела и путь, пройденный им за некоторый промежуток времени, определить положение тела в конце этого промежутка времени?
6. Что называют перемещением?

Задание 1

1. Автомобиль, движущийся по прямолинейному участку дороги, остановился в точке A (рис. 7). Каковы координаты точки A в системе отсчёта, связанной: а) с деревом (точка O) на обочине дороги; б) с домом (точка B)?
2. При решении каких из приведённых задач изучаемые тела можно принять за материальные точки:
 - рассчитать расстояние между Землёй и Луной;
 - рассчитать расстояние, которое проедет автомобиль за 2 ч;
 - рассчитать скорость вращения вала электродвигателя;
 - рассчитать время обгона автомобилем колонны грузовых автомобилей;
 - рассчитать время движения спортсмена, пробегающего дистанцию 400 м?
3. Сравните физические величины: перемещение и пройденный путь.
4. Человек обходит по периметру квадратный участок, сторона которого 10 м. Чему равны путь, пройденный человеком, и модуль его перемещения?
5. Мяч падает с высоты 2 м и после удара о пол поднимается на высоту 1,5 м. Чему равны путь мяча за всё время движения и модуль его перемещения?

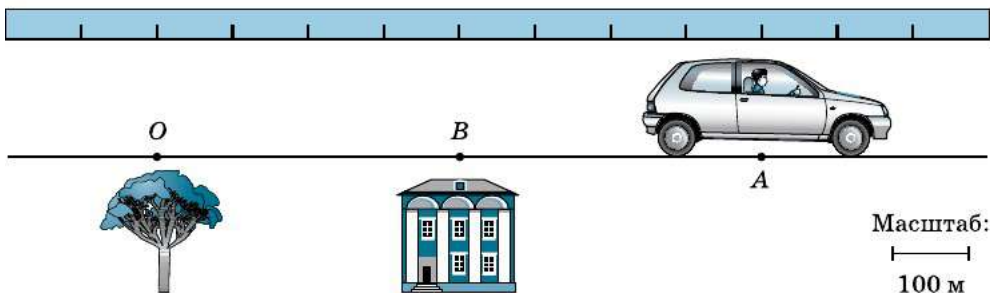


Рис. 7



В электронной форме учебника к каждому параграфу даны дополнительные материалы и задания. Рекомендуем по мере изучения материала параграфов обращаться к электронной форме учебника.

§ 2. Равномерное прямолинейное движение

- ✓ Какое движение называют равномерным?
- ✓ Что называют скоростью равномерного движения?
- ✓ Как найти проекцию вектора на координатную ось?

1. Существуют различные виды механического движения. В зависимости от формы траектории движение может быть прямолинейным или криволинейным. При движении скорость тела может оставаться постоянной или с течением времени изменяться. В зависимости от характера изменения скорости движение будет равномерным или неравномерным.

Рассмотрим движение, происходящее с постоянной скоростью, траекторией которого является прямая линия, т. е. равномерное прямолинейное движение.

Равномерным прямолинейным называют движение, при котором тело за любые равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения.

Слова за «любые равные промежутки времени» означают, что, какие бы равные промежутки времени (1 с, 2 с, 5 мин, 10 мин и т. д.) мы ни выбрали, перемещение тела за эти равные промежутки времени будет одинаковым. Например, если автомобиль за каждые 2 мин проезжает 1800 м, за каждую 1 мин — 900 м, за каждую 1 с — 15 м, то можно считать, что он движется равномерно.

Понятно, что практически невозможно создать такие условия, чтобы движение тела было равномерным в течение достаточно большого промежутка времени. Поэтому равномерное движение является моделью реального движения.

2. Если сравнивать равномерное движение нескольких тел, можно отметить, что быстрота изменения их положения в пространстве может быть различной. «Быстрота» движения характеризуется физической величиной, называемой **скоростью**.

Скоростью равномерного прямолинейного движения называют векторную физическую величину, равную отношению перемещения тела ко времени, за которое это перемещение произошло.

Если за время t тело совершило перемещение $\vec{s}$, то скорость его движения $\vec{v}$ равна

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

Единица скорости в СИ — метр в секунду (1 м/с). Эту единицу можно получить, разделив единицу перемещения на единицу времени:

$$[v] = \frac{[s]}{[t]} = \frac{1 \text{ м}}{1 \text{ с}} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

За единицу скорости принимают скорость такого равномерного движения, при котором тело за 1 с совершает перемещение 1 м.

Зная скорость равномерного движения, можно найти перемещение тела за любой промежуток времени:

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

Векторы скорости и перемещения при равномерном прямолинейном движении направлены в сторону движения тела.

3. Как мы уже сказали, основной задачей механики является определение в любой момент времени положения тела, т. е. его координаты. Запишем уравнение зависимости координаты тела от времени при равномерном прямолинейном движении. Это уравнение называют **уравнением движения**.

Пусть тело совершило перемещение $\vec{s}$. Направим координатную ось X по направлению перемещения тела (рис. 8, а). Запишем уравнение для проекции перемещения s_x на ось X . На рисунке x_0 — начальная координата тела, x — конечная координата тела. Проекция перемещения равна разности конечной и начальной координат тела:

$$s_x = x - x_0.$$

С другой стороны, проекция перемещения на ось X равна произведению проекции скорости на эту ось и времени:

$$s_x = v_x t.$$

Приравняв правые части выражений, можно записать:

$$x - x_0 = v_x t.$$

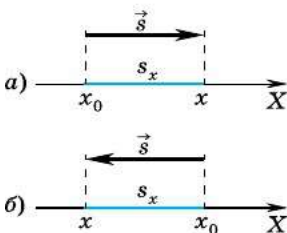


Рис. 8

Отсюда координата тела x в любой момент времени t :

$$x = x_0 + v_x t.$$

Если начальная координата тела $x_0 = 0$, то $x = v_x t$.

Таким образом, координату тела при равномерном прямолинейном движении в любой момент времени можно определить, если известны его начальная координата и проекция скорости движения на ось X .

Проекция скорости и перемещения могут быть как положительными, так и отрицательными. Проекция скорости положительна, если направление движения совпадает с направлением оси X (см. рис. 8, а). В этом случае $x > x_0$. Проекция скорости отрицательна, если тело движется против направления оси X (рис. 8, б). В этом случае $x < x_0$.

4. Зависимость координаты тела от времени можно представить графически.

Предположим, что тело движется из начала координат в направлении оси X с постоянной скоростью. Проекция скорости тела на эту ось равна 2 м/с. Уравнение движения в этом случае имеет вид: $x = 2t$ (м). Зависимость координаты тела от времени — линейная. Графиком такой зависимости является прямая, проходящая через начало координат (рис. 9).

Если в начальный момент времени координата тела $x_0 = 6$ м, а проекция его скорости $v_x = 2$ м/с, то уравнение движения имеет вид: $x = 6 + 2t$ (м). Это тоже линейная зависимость координаты тела от времени, и её графиком является прямая, проходящая через точку, для которой при $t = 0$ $x = 6$ м (рис. 10).

В том случае, если проекция скорости отрицательна, уравнение движения имеет вид: $x = 6 - 2t$ (м). График этой зависимости представлен на рисунке 11.

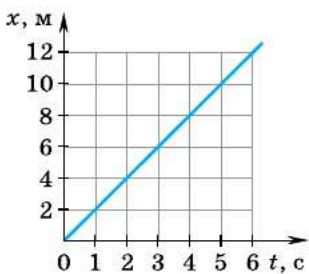


Рис. 9

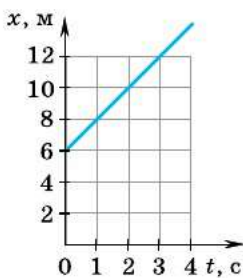


Рис. 10

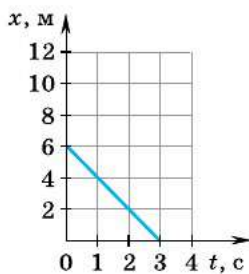


Рис. 11

Таким образом, движение тела может быть описано аналитически, т. е. с помощью уравнения движения, и графически, т. е. с помощью графика зависимости координаты тела от времени.

5. Пример решения задачи

При решении задач необходимо выполнять следующую последовательность действий.

1. Кратко записать условие задачи.

2. Проанализировать ситуацию, описанную в условии задачи:

— выяснить, можно ли принять движущиеся тела за материальные точки;

— сделать рисунок, изобразив на нём векторы скорости;

— выбрать систему отсчёта — тело отсчёта, направления координатных осей, начало отсчёта координат, начало отсчёта времени; записать начальные условия (значения координат в начальный момент времени) для каждого тела.

3. Записать уравнение движения для каждого тела с учётом начальных условий и знаков проекций скорости на координатные оси.

4. Решить задачу в общем виде.

5. Подставить в формулу значения величин и выполнить вычисления.

6. Проанализировать ответ.

Два автомобиля движутся навстречу друг другу равномерно и прямолинейно: один — со скоростью 10 м/с, другой — со скоростью 20 м/с. Определите время и координату места встречи автомобилей, если в начальный момент времени расстояние между ними равно 120 м.

Дано:

$$v_1 = 10 \text{ м/с}$$

$$v_2 = 20 \text{ м/с}$$

$$l = 120 \text{ м}$$

$$t - ?$$

$$x - ?$$

Решение:

Автомобили можно считать материальными точками, поскольку расстояние между ними много больше их размеров.

Задачу можно решить двумя способами: аналитически и графически.

1-й способ. Свяжем систему отсчёта с Землёй, ось Ox направим в сторону движения первого автомобиля, за начало отсчёта





Рис. 12

координаты выберем точку O — положение первого автомобиля в начальный момент времени (рис. 12).

В начальный момент времени координаты каждого тела равны: $x_{01} = 0$; $x_{02} = l$.

Запишем уравнение движения: $x = x_0 + v_x t$.

Уравнения движения для каждого тела с учётом начальных условий имеют вид:

$$x_1 = v_1 t; \quad x_2 = l - v_2 t.$$

В момент встречи тел $x_1 = x_2$, следовательно:

$$v_1 t = l - v_2 t.$$

Отсюда

$$t = \frac{l}{v_1 + v_2};$$

$$t = \frac{120 \text{ м}}{10 \text{ м/с} + 20 \text{ м/с}} = 4 \text{ с}.$$

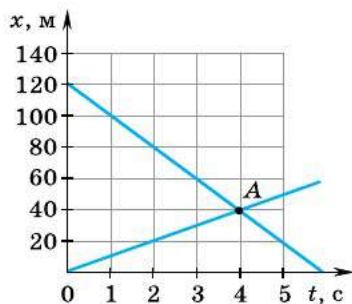


Рис. 13

Подставив значение времени в уравнение для координаты первого автомобиля, получим значение координаты места встречи автомобилей:

$$x = 10 \text{ м/с} \cdot 4 \text{ с} = 40 \text{ м}.$$

2-й способ. Построим графики зависимости координаты автомобилей от времени, соответствующие уравнениям $x_1 = 10t$ (м) и $x_2 = 120 - 20t$ (м) (рис. 13). Точка A пересечения графиков соответствует времени и координате места встречи автомобилей: $t = 4 \text{ с}$, $x = 40 \text{ м}$.

Ответ: $t = 4 \text{ с}$; $x = 40 \text{ м}$.

Вопросы для самопроверки

1. Какое движение называют равномерным прямолинейным?
2. Что называют скоростью равномерного прямолинейного движения? Какова единица скорости в СИ?
3. Каково уравнение зависимости координаты равномерно движущегося тела от времени?

4. Что представляет собой график зависимости координаты тела от времени при равномерном прямолинейном движении?

5. Почему равномерное движение является моделью реального движения?

Задание 2

1. На рисунке 14 представлен график зависимости координаты тела от времени. Чему равны: начальная координата тела, координата тела в момент времени $t = 4$ с, проекция скорости движения тела? Запишите уравнение движения тела, соответствующее представленному графику.

2. На рисунке 15 представлены графики зависимости координаты от времени для трёх тел. Сравните модули скорости движения тел 1 и 2. Каковы знаки проекций скорости движущихся тел? Что означает точка пересечения графиков 1 и 3, 2 и 3? Что означает точка пересечения графика 3 с осью абсцисс? Каково направление движения тела 3? Вычислите скорость движения каждого тела. Запишите уравнение движения каждого тела.

3. На рисунке 16 приведены графики зависимости от времени проекций скорости движения двух тел. Каковы знаки проекций скорости? Каковы значения проекций скорости? Чему равны проекции перемещения тел за 3 с?

4. Автомобиль, подъезжая к пункту А, набрал скорость 72 км/ч и дальше двигался равномерно по прямому участку дороги. Доехав за 5 мин до пункта В, он повернул обратно и двигался равномерно с той же скоростью ещё 3 мин. Чему равны путь автомобиля и модуль его перемещения? Будем считать, что промежутки времени торможения при подъезде к пункту В, времени разво-

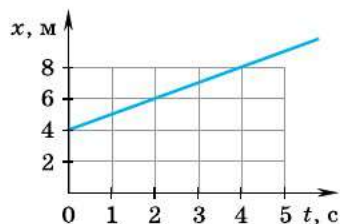


Рис. 14

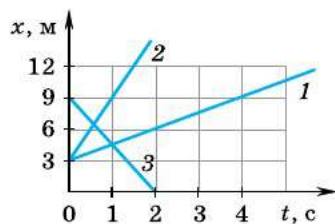


Рис. 15

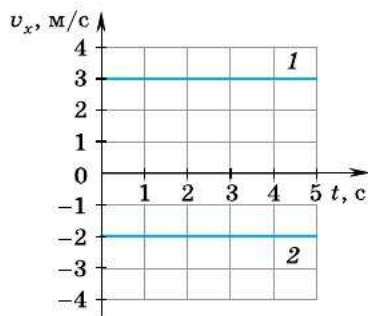


Рис. 16

рота и времени, в течение которого автомобиль набирал скорость, малы так же, как и расстояния, на которых это происходило.

5. Скоростной поезд, отходя от станции, разгоняется и, находясь на расстоянии 2 км от станции, начинает двигаться равномерно и прямолинейно со скоростью 108 км/ч. Чему равно время равномерного движения поезда, если на расстоянии 11 км от станции его скорость стала уменьшаться?

6. Два поезда движутся равномерно навстречу друг другу: один со скоростью 72 км/ч, другой — 90 км/ч. Определите время и координату места встречи поездов, если расстояние между ними в момент начала равномерного движения составляло 270 м. За начало координат примите положение первого поезда в начальный момент времени. Решите задачу аналитически и графически.

§ 3. Относительность механического движения

- ✓ Что называют системой отсчёта?
- ✓ Какие величины, характеризующие движение тела, зависят от выбора системы отсчёта (являются относительными), а какие — не зависят (являются инвариантными)?

1. Ранее мы уже говорили о том, что механическое движение относительно: тело может покоиться в одной системе отсчёта и в это же время двигаться в другой; его положение (координата) различно в разных системах отсчёта. Относительна и траектория движения тела. Например, точка на пропеллере винтового самолёта, летящего над землёй, описывает окружность в системе отсчёта, связанной с самолётом, и винтовую линию в системе отсчёта, связанной с Землёй.

Перемещение тела, пройденный им путь и скорость тела также изменяются при переходе от одной системы отсчёта к другой. Так, водитель неподвижен относительно корпуса автомобиля, движущегося по шоссе, перемещение, путь и скорость водителя относительно автомобиля равны нулю, но, например, относительно деревьев вдоль шоссе они имеют некоторые значения.

При решении ряда практических задач бывает необходимо вычислить перемещение или скорость тела в некоторой системе отсчёта, если значения этих величин известны в другой системе отсчёта. Например, для того чтобы составить расписание движения теплохода, необходимо знать его скорость в системе отсчёта, связанной с берегом. Предположим, что теплоход, плывущий по реке, имеет постоянную собственную скорость v . Тогда в системе





отсчёта, связанной с берегом, при движении теплохода по течению реки модуль его скорости будет больше v , а при движении против течения — меньше v .

2. Получим формулы, которые позволяют рассчитать перемещение и скорость тела при переходе от одной системы отсчёта к другой.

Пусть вниз по течению реки движется плот, а по плоту от одного конца к другому идёт человек (рис. 17). Будем рассматривать движение человека относительно системы отсчёта, связанной с берегом (неподвижная система отсчёта), и системы отсчёта, связанной с плотом (подвижная система отсчёта). В подвижной системе отсчёта перемещение человека равно $\vec{s}_1$, за это же время перемещение плота равно $\vec{s}_2$. Из рисунка 17 видно, что $\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$, т. е. вектор перемещения человека относительно берега равен геометрической сумме векторов его перемещения относительно плота и перемещения плота относительно берега.

Для модуля перемещения человека формула принимает вид:

$$s = s_1 + s_2.$$

3. Предположим, что теперь человек движется по плоту против направления движения плота по реке (рис. 18). В этом случае перемещение $\vec{s}$ человека относительно берега (неподвижной системы отсчёта) также равно геометрической сумме перемещения $\vec{s}_1$ человека относительно плота (подвижной системы отсчёта) и перемещения $\vec{s}_2$ плота относительно берега (подвижной системы отсчёта относительно неподвижной):

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

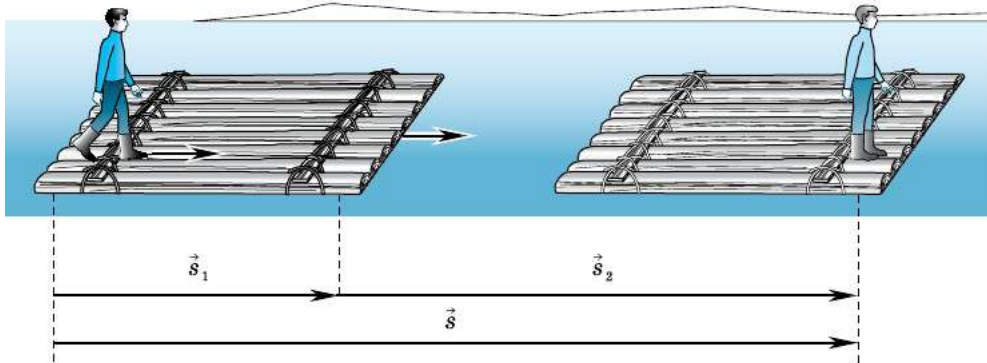


Рис. 17

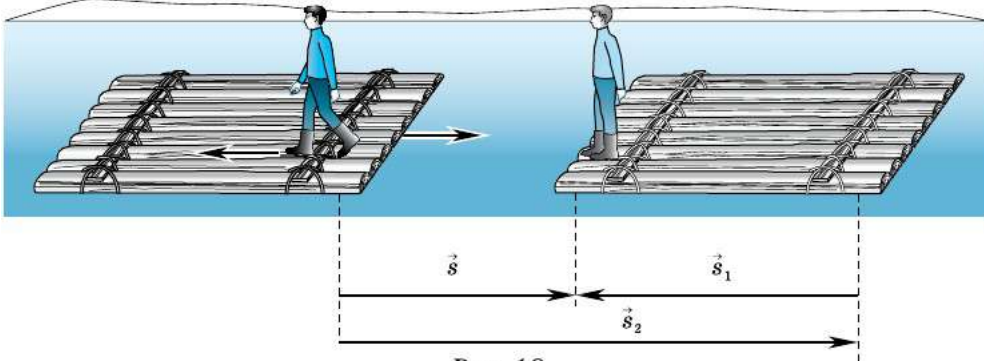


Рис. 18

Для модуля перемещения человека формула имеет вид:

$$s = s_2 - s_1.$$

4. Пусть теперь человек идёт по плоту из точки A в точку B (рис. 19). И в этом случае перемещение $\vec{s}$ человека относительно берега равно сумме $\vec{s}_1$ и $\vec{s}_2$. Вектор перемещения $\vec{s}$, как видно из рисунка 19, в данном случае является гипотенузой прямоугольного треугольника, поэтому модуль перемещения человека относительно берега можно найти по теореме Пифагора:

$$s = \sqrt{s_1^2 + s_2^2}.$$

Таким образом,

перемещение тела $\vec{s}$ в неподвижной системе отсчёта равно сумме его перемещения $\vec{s}_1$ в подвижной системе отсчёта и пере-

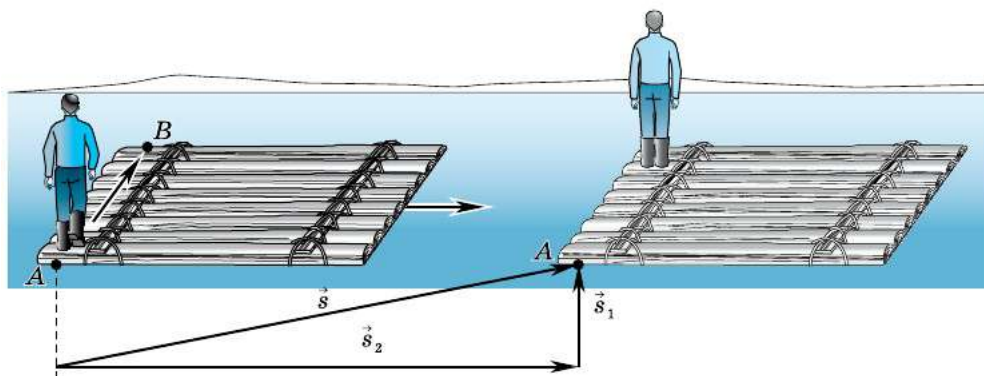


Рис. 19



мещения $\vec{s}_2$ подвижной системы отсчёта относительно неподвижной:

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

Это выражение называют **правилом сложения перемещений**.

5. Чтобы определить скорость тела в неподвижной системе отсчёта, разделим почленно выражение для перемещения $\vec{s}$ на время t :

$$\frac{\vec{s}}{t} = \frac{\vec{s}_1}{t} + \frac{\vec{s}_2}{t}, \text{ или}$$

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

где $\vec{v}$ — скорость тела в неподвижной системе отсчёта, $\vec{v}_1$ — скорость тела в подвижной системе отсчёта, $\vec{v}_2$ — скорость подвижной системы отсчёта относительно неподвижной.

Это выражение называют **правилом сложения скоростей**.

Скорость тела $\vec{v}$ в неподвижной системе отсчёта равна сумме скорости $\vec{v}_1$ в подвижной системе отсчёта и скорости $\vec{v}_2$ подвижной системы отсчёта относительно неподвижной.

6. В рассмотренных выше примерах в качестве неподвижной системы отсчёта выбиралась система отсчёта, связанная с берегом. За неподвижную систему отсчёта можно принять и систему отсчёта, связанную с плотом. Тогда система отсчёта, связанная с берегом, по отношению к системе отсчёта, связанной с плотом, будет являться подвижной системой отсчёта. При этом правила сложения перемещений и скоростей будут записываться в том же виде.

7. Пример решения задачи

Теплоход движется вниз по течению реки со скоростью $u_1 = 21$ км/ч относительно берега, а вверх по реке — со скоростью $u_2 = 17$ км/ч. Чему равны скорость v_1 теплохода в стоячей воде и скорость v_2 течения реки?

Дано:

$$u_1 = 21 \text{ км/ч}$$

$$u_2 = 17 \text{ км/ч}$$

$$v_1 = ?$$

$$v_2 = ?$$

Решение:

Свяжем систему отсчёта с берегом реки (например, с деревом на берегу реки) и будем считать её неподвижной. Именно в этой системе отсчёта заданы скорости движения теплохода по течению и против течения реки.



Тогда v_1 — скорость теплохода в подвижной системе отсчёта, v_2 — скорость подвижной системы отсчёта относительно неподвижной.

Запишем правило сложения скоростей в векторной форме:

$$\vec{u}_1 = \vec{v}_1 + \vec{v}_2; \quad \vec{u}_2 = \vec{v}_1 + \vec{v}_2.$$

Для проекций скоростей на ось X можно записать:

$$u_1 = v_1 + v_2 \text{ (рис. 20, а);}$$

$$-u_2 = -v_1 + v_2 \text{ (рис. 20, б), или } u_2 = v_1 - v_2.$$

Сложим почленно выражения для u_1 и u_2 . Получим:

$$u_1 + u_2 = 2v_1,$$

откуда

$$v_1 = \frac{u_1 + u_2}{2}.$$

Вычтем почленно из выражения для u_1 выражение для u_2 :

$$u_1 - u_2 = 2v_2.$$

Отсюда

$$v_2 = \frac{u_1 - u_2}{2}.$$

$$v_1 = \frac{21 \text{ км/ч} + 17 \text{ км/ч}}{2} = 19 \text{ км/ч};$$

$$v_2 = \frac{21 \text{ км/ч} - 17 \text{ км/ч}}{2} = 2 \text{ км/ч}.$$

Ответ: $v_1 = 19 \text{ км/ч}$; $v_2 = 2 \text{ км/ч}$.

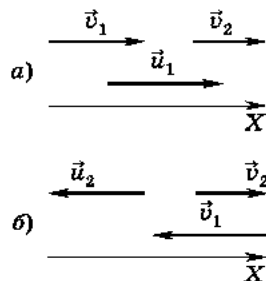


Рис. 20

Вопросы для самопроверки

1. Приведите примеры, позволяющие обосновать необходимость вычисления перемещения и скорости тела в разных системах отсчёта.
2. Сформулируйте правило сложения перемещений.
3. Чему равен модуль перемещения тела относительно неподвижной системы отсчёта, если: а) направления движения тела и подвижной системы отсчёта совпадают; б) тело и подвижная система отсчёта движутся в противоположные стороны; в) тело и подвижная система отсчёта движутся под прямым углом друг к другу?
4. Сформулируйте правило сложения скоростей.

1. Велосипедист движется по прямолинейному гладкому участку дороги. Каковы траектории движения относительно велосипедиста и относительно стоящего на обочине человека рамы велосипеда; точки на ободе колеса; руля; точки на конце педали? Опишите их.

2. Одинаковое или разное время потребуется теплоходу для прохождения расстояния между двумя населёнными пунктами при движении по течению реки и против него, если скорость теплохода в стоячей воде постоянна? Ответ обоспуйте.

3. Человек идёт по плоту, движущемуся по течению реки. Длина плота 4 м, а его ширина 3 м. За время движения человека от одного конца плота к другому плот совершает перемещение 4 м относительно берега. Чему равно перемещение человека относительно берега при его движении, соответствующем рисункам 17—19?

4. Два автомобиля движутся навстречу друг другу со скоростями 20 и 25 м/с. Чему равна скорость движения второго автомобиля в системе отсчёта, связанной с первым автомобилем? Чему равна скорость движения второго автомобиля в этой же системе отсчёта, если автомобили движутся в одном направлении?

§ 4. Скорость тела при неравномерном движении

- ✓ Какое движение называют неравномерным?
- ✓ Какие величины характеризуют неравномерное движение?

1. Равномерное движение встречается нечасто. Обычно механическое движение — это движение с изменяющейся скоростью. Движение, при котором скорость тела с течением времени изменяется, называют **неравномерным**.

Например, неравномерно движется транспорт. Автобус, начиная движение, увеличивает свою скорость; при торможении его скорость уменьшается. Падающие на поверхность Земли тела также движутся неравномерно: их скорость с течением времени возрастает.

При неравномерном движении координату тела уже нельзя определить по формуле $x = x_0 + v_x t$, так как скорость движения не является постоянной. Возникает вопрос: какая же величина характеризует быстроту изменения положения тела с течением

времени при неравномерном движении? Такой величиной является **средняя скорость**.

Средней скоростью $\vec{v}_{\text{ср}}$ неравномерного движения называют физическую величину, равную отношению перемещения $\vec{s}$ тела ко времени t , за которое оно совершено.

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

Средняя скорость является *векторной величиной*. Для определения модуля средней скорости этой формулой можно воспользоваться лишь в том случае, когда тело движется вдоль прямой в одну сторону. Во всех остальных случаях эта формула непригодна.

Рассмотрим пример. Необходимо рассчитать время прибытия электрички на каждую станцию по пути следования. При этом её движение не является прямолинейным. Если рассчитывать модуль средней скорости на участке между двумя станциями, пользуясь приведённой формулой, то полученное значение будет отличаться от значения средней скорости, с которым двигалась электричка, поскольку модуль вектора перемещения меньше пройденного электричкой пути. А средняя скорость движения этой электрички из начального пункта до конечного пункта и обратно в соответствии с приведённой формулой и вовсе равна нулю.

На практике при определении средней скорости пользуются величиной, равной **отношению пути l ко времени t , за которое этот путь пройден**:

$$v_{\text{ср}} = \frac{l}{t}.$$

Её часто называют **средней путевой скоростью**.

2. Зная среднюю скорость тела на каком-либо участке траектории, нельзя определить его положение в любой момент времени. Предположим, что автомобиль проехал путь 300 км за 6 ч. Средняя скорость его движения будет 50 км/ч, т. е. в среднем за каждый час автомобиль проезжал по 50 км. Однако при этом он мог какое-то время стоять, какое-то время двигаться со скоростью 70 км/ч, какое-то время — со скоростью 20 км/ч и т. п.

Очевидно, что, зная среднюю скорость движения автомобиля за 6 ч, мы не можем определить его положение через 1 ч, через 2 ч, через 3 ч и т. п.

3. При движении тело проходит последовательно все точки траектории. В каждой точке оно находится в определённые моменты времени и имеет какую-то скорость.

Мгновенной скоростью называют скорость тела в данный момент времени или в данной точке траектории.

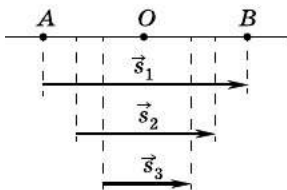


Рис. 21

Предположим, что тело совершает неравномерное прямолинейное движение. Определим скорость движения этого тела в точке O его траектории (рис. 21). Выделим на траектории участок AB , внутри которого находится точка O . Перемещение $\vec{s}_1$ на этом участке тело совершило за время t_1 . Средняя скорость движения на этом участке — $\vec{v}_{\text{ср}1} = \frac{\vec{s}_1}{t_1}$.

Уменьшим перемещение тела. Пусть оно равно $\vec{s}_2$, а время движения — t_2 . Тогда средняя скорость тела за это время: $\vec{v}_{\text{ср}2} = \frac{\vec{s}_2}{t_2}$. Ещё уменьшим перемещение, средняя скорость на этом участке: $\vec{v}_{\text{ср}3} = \frac{\vec{s}_3}{t_3}$.

Будем и дальше уменьшать время движения тела и соответственно его перемещение. В конце концов перемещение и время станут такими маленькими, что прибор, например спидометр в машине, перестанет фиксировать изменение скорости и движение за этот малый промежуток времени можно будет считать равномерным. Средняя скорость на этом участке и есть мгновенная скорость тела в точке O .

Таким образом, мгновенная скорость — векторная физическая величина, равная отношению малого перемещения $\Delta\vec{s}$ к малому промежутку времени Δt , за которое это перемещение совершено.

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

Вопросы для самопроверки

1. Какое движение называют неравномерным?
2. Что называют средней скоростью?

3. Что показывает средняя путевая скорость?
4. Можно ли, зная траекторию движения тела и его среднюю скорость за определённый промежуток времени, определить положение тела в любой момент времени?
5. Что называют мгновенной скоростью?
6. Как вы понимаете выражения «малое перемещение» и «малый промежуток времени»?

Задание 4

1. Автомобиль проехал по московским улицам 20 км за 0,5 ч, при выезде из Москвы он стоял в течение 15 мин, а за следующие 1 ч 15 мин проехал по Подмосковию 100 км. С какой средней скоростью двигался автомобиль на каждом участке и на всём пути?
2. Чему равна средняя скорость движения поезда на перегоне между двумя станциями, если первую половину расстояния между станциями он прошёл со средней скоростью 50 км/ч, а вторую — со средней скоростью 70 км/ч?
3. Чему равна средняя скорость движения поезда на перегоне между двумя станциями, если первую половину времени он прошёл со средней скоростью 50 км/ч, а вторую — со средней скоростью 70 км/ч?
4. Можно ли считать среднюю скорость как среднее арифметическое скоростей на отдельных участках пути?

§ 5. Ускорение.

Равноускоренное прямолинейное движение

- ✓ Какое движение называют равноускоренным?
- ✓ Что характеризует ускорение тела?

1. При неравномерном движении скорость тела с течением времени изменяется. Рассмотрим самый простой случай неравномерного движения.

Движение, при котором скорость тела за любые равные промежутки времени изменяется на одно и то же значение, называют равноускоренным.

Например, если скорость тела за каждые 2 с изменялась на 4 м/с, то движение тела является равноускоренным. Модуль скорости при таком движении может как увеличиваться, так и уменьшаться.





2. Пусть в начальный момент времени $t_0 = 0$ скорость тела равна $\vec{v}_0$. В некоторый момент времени t она стала равной $\vec{v}$. Тогда изменение скорости за промежуток времени $t - t_0 = t$ равно $\vec{v} - \vec{v}_0$, а за единицу времени — $\frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$. Это отношение и называют **ускорением**. Ускорение характеризует быстроту изменения скорости.

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

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

Единица ускорения в СИ — метр на секунду в квадрате (1 м/с^2):

$$[a] = \frac{[v]}{[t]} = \frac{1 \text{ м/с}}{1 \text{ с}} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

За единицу ускорения принимают ускорение такого равноускоренного движения, при котором скорость тела за 1 с изменяется на 1 м/с.

3. Поскольку ускорение — величина векторная, необходимо выяснить, как оно направлено.

Пусть автомобиль движется прямолинейно, имея начальную скорость $\vec{v}_0$ (скорость в момент времени $t = 0$) и скорость $\vec{v}$ в некоторый момент времени t . Модуль скорости автомобиля возрастает. На рисунке 22, а изображены векторы скорости автомобиля. Из определения ускорения следует, что вектор ускорения направлен в ту же сторону, что и разность векторов $\vec{v} - \vec{v}_0$. Следовательно, в данном случае направление вектора ускорения совпадает с направлением движения тела (с направлением вектора скорости).

Пусть теперь модуль скорости автомобиля уменьшается (рис. 22, б).

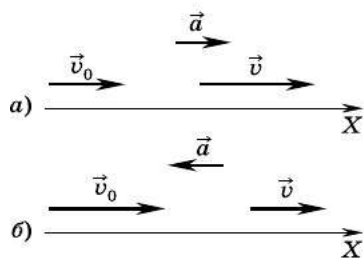


Рис. 22

В этом случае направление вектора ускорения противоположно направлению движения тела.

4. Преобразовав формулу ускорения при равноускоренном прямолинейном движении, можно получить формулу для нахождения скорости тела в любой момент времени:

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

Если начальная скорость тела равна нулю, т. е. в начальный момент времени оно покоилось, то эта формула принимает вид

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

5. При вычислении скорости или ускорения пользуются формулами, в которые входят не векторные величины, а проекции этих величин на координатную ось. Поскольку проекция суммы векторов равна сумме их проекций, то формула для проекции скорости на ось X имеет вид:

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

где v_x — проекция скорости в момент времени t , v_{0x} — проекция начальной скорости, a_x — проекция ускорения.

При решении задач необходимо учитывать знаки проекций. Так, в случае, изображённом на рисунке 22, *а*, проекции скоростей и ускорения на ось X положительны; модуль скорости с течением времени возрастает. В случае, изображённом на рисунке 22, *б*, проекции на ось X скоростей положительны, а проекция ускорения — отрицательна; модуль скорости с течением времени уменьшается.

6. Пример решения задачи

Скорость автомобиля при торможении уменьшилась от 23 до 15 м/с. Каково ускорение тела, если торможение длилось 5 с?

Дано:

$$v_0 = 23 \text{ м/с}$$

$$v = 15 \text{ м/с}$$

$$t = 5 \text{ с}$$

$$a = ?$$

Решение:

Автомобиль движется равноускоренно и прямолинейно; модуль его скорости уменьшается. Систему отсчёта свяжем с Землёй, ось X направим в сторону движения автомобиля (рис. 23), за начало отсчёта времени примем начало торможения.



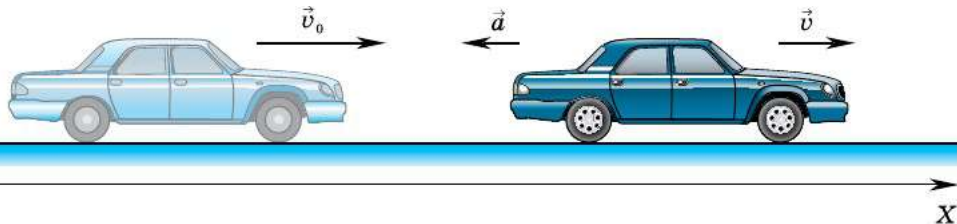


Рис. 23

Запишем формулу для нахождения скорости при равноускоренном прямолинейном движении:

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

В проекциях на ось X получим

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

Учитывая, что проекция ускорения тела на ось X отрицательна, а проекции скоростей на эту ось положительны, запишем:

$$v = v_0 - at.$$

Отсюда

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

$$a = \frac{23 \text{ м/с} - 15 \text{ м/с}}{5 \text{ с}} = 1,6 \text{ м/с}^2.$$

Ответ: $a = 1,6 \text{ м/с}^2$.

Вопросы для самопроверки

1. Какое движение называют равноускоренным?
2. Что называют ускорением равноускоренного движения? Какова единица ускорения в СИ?
3. По какой формуле вычисляется ускорение при равноускоренном движении?
4. По какой формуле вычисляется скорость тела при равноускоренном прямолинейном движении?
5. Каков знак проекции ускорения на ось X по отношению к проекции скорости тела на эту же ось, если модуль его скорости увеличивается; уменьшается?



1. Чему равно ускорение автомобиля, если через 2 мин после начала движения из состояния покоя он приобрёл скорость 72 км/ч?
2. Поезд, начальная скорость которого равна 36 км/ч, разгоняется с ускорением $0,5 \text{ м/с}^2$. Какую скорость приобретёт поезд через 20 с?
3. Автомобиль, движущийся со скоростью 54 км/ч, останавливается у светофора в течение 15 с. Чему равно ускорение автомобиля?
4. Какую скорость приобретёт велосипедист через 5 с после начала торможения, если его начальная скорость равна 10 м/с, а ускорение при торможении составляет $1,2 \text{ м/с}^2$?

§ 6. Графики зависимости скорости от времени при равноускоренном движении

- ✓ Какую зависимость между величинами называют прямой пропорциональной зависимостью?
- ✓ Какую функцию называют линейной?
- ✓ Что является графиком линейной функции?

1. Как вы уже знаете, описать механическое движение тела можно аналитически и графически. Рассмотрим графический способ описания равноускоренного прямолинейного движения.

Построим график зависимости проекции скорости на ось X от времени для такого движения. Предположим, что тело, начальная скорость которого 4 м/с, движется прямолинейно вдоль оси X с ускорением 1 м/с^2 . Формула для проекции скорости на ось X в этом случае имеет вид: $v_x = 4 + t$ (м/с).

Поскольку зависимость $v_x(t)$ линейная, то её графиком является прямая, проходящая через точку, для которой при $t = 0$ $v_x = 4 \text{ м/с}$ (рис. 24).

Если начальная скорость тела $v_0 = 0$, то график зависимости проекции скоро-

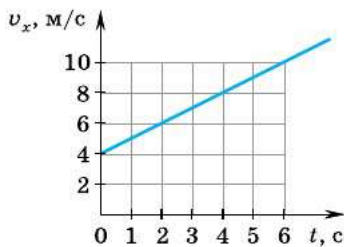


Рис. 24

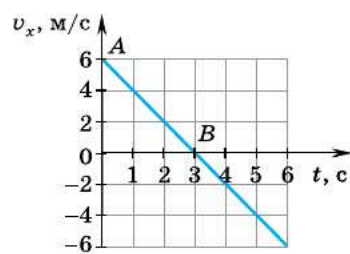


Рис. 25

сти на ось X от времени пройдёт через начало координат.

2. Предположим, что график зависимости проекции скорости на ось X от времени имеет вид, представленный на рисунке 25 (участок графика AB). В данном случае направление скорости тела совпадает с направлением оси X , но модуль скорости уменьшается. Поэтому проекция ускорения на ось X отрицательна.

В момент времени $t = 3$ с (точка B) скорость тела стала равной нулю. Тело в этот момент времени останавливается, а затем движется к началу координат. При этом проекция его скорости на ось X отрицательна, а модуль скорости возрастает. Проекция ускорения на эту ось также отрицательна.

3. По графику зависимости проекции скорости на ось X от времени можно определить проекцию ускорения тела на эту ось. Выберем на графике два произвольных момента времени и найдём изменение скорости за этот промежуток времени.

Например, проекция начальной скорости тела (см. рис. 25) $v_{0x} = 6$ м/с, а в момент времени $t = 2$ с проекция скорости $v_x = 2$ м/с. Следовательно, скорость тела изменилась на -4 м/с (2 м/с $- 6$ м/с) за 2 с и проекция ускорения тела: $a_x = \frac{2 \text{ м/с} - 6 \text{ м/с}}{2 \text{ с}} = -2 \text{ м/с}^2$.

Формула для проекции скорости тела на ось X в этом случае имеет вид: $v_x = 6 - 2t$ (м/с).

4. На рисунке 26 представлены графики зависимости проекции ускорения тела на ось X от времени. Поскольку при равноускоренном прямолинейном движении значение ускорения постоянно, то графиком ускорения является прямая, параллельная оси абсцисс. При этом график располагается выше оси абсцисс, если проекция ускорения на ось X положительна, и ниже оси абсцисс, если проекция ускорения на ось X отрицательна.

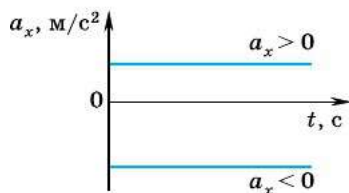


Рис. 26

Вопросы для самопроверки

1. Что является графиком зависимости от времени проекции на ось X скорости равноускоренного прямолинейного движения?
2. Какому значению проекции на ось X скорости равноускоренного прямолинейного движения соответствует точка графика в момент времени $t = 0$?
3. Что представляет собой график зависимости от времени проекции скорости тела на ось X , если модуль скорости возрастает, а направление скорости: а) совпадает с направлением оси X ; б) противоположно направлению оси X ?
4. Что является графиком зависимости от времени проекции ускорения на ось X при равноускоренном прямолинейном движении?

Задание 6

1. На рисунке 27 представлены графики зависимости от времени проекции на ось X скорости трёх тел. Опишите эти движения.
2. Постройте график зависимости модуля скорости от времени, соответствующий графику, приведённому на рисунке 25.

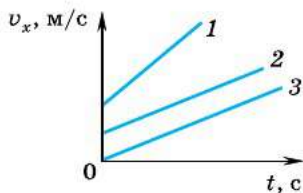


Рис. 27

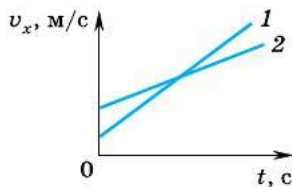


Рис. 28

3. На рисунке 28 представлены графики зависимости от времени проекции на ось X скорости двух тел. Опишите характер этих движений. Что означает точка пересечения графиков? Сравните модули ускорения тел 1 и 2.
4. На рисунке 29 приведены графики зависимости от времени проекции на ось X скорости двух тел. Чему равны проекции ускорения на ось X этих тел? Постройте графики зависимости проекции ускорения от времени для каждого тела.

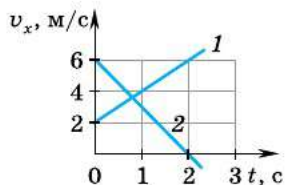


Рис. 29



§ 7. Перемещение при равноускоренном прямолинейном движении

- ✓ Какой вид имеет график зависимости проекции скорости равномерного движения от времени?
- ✓ Какой вид имеет график зависимости проекции скорости равноускоренного движения от времени?

1. Используя график зависимости скорости от времени, можно определить перемещение тела при равномерном прямолинейном движении.

На рисунке 30 приведён график зависимости проекции скорости равномерного движения на ось X от времени. Если восставить перпендикуляр к оси времени в некоторой точке C , то получим прямоугольник $OABC$. Площадь этого прямоугольника равна произведению сторон OA и OC . Но длина стороны OA равна v_x , а длина стороны OC — t , откуда $S = v_x t$. Произведение проекции скорости на ось X и времени равно проекции перемещения, т. е. $s_x = v_x t$.

Таким образом, *проекция перемещения при равномерном прямолинейном движении численно равна площади прямоугольника, ограниченного осями координат, графиком скорости и перпендикуляром, восставленным к оси времени.*

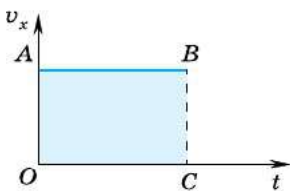


Рис. 30

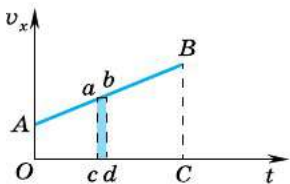


Рис. 31

2. Получим аналогичным образом формулу проекции перемещения при прямолинейном равноускоренном движении. Для этого воспользуемся графиком зависимости проекции скорости на ось X от времени (рис. 31). Выделим на графике малый участок ab и опустим перпендикуляры из точек a и b на ось времени. Если промежуток времени Δt , соответствующий участку cd на оси времени, мал, то можно считать, что скорость в течение этого промежутка времени не изменяется и тело движется равномерно. В этом случае фигура $cabd$ мало отличается от прямоугольника и её площадь численно равна проекции перемещения тела за время, соответствующее отрезку cd .

На такие полоски можно разбить всю фигуру $OABC$, и её площадь будет равна сумме площадей всех полосок. Следовательно, проекция перемещения тела за время t численно равна площади трапеции $OABC$. Из курса геометрии вы знаете, что площадь трапеции равна произведению полусуммы её оснований и высоты:

$$S = \frac{1}{2}(OA + BC) \cdot OC.$$

Как видно из рисунка 31, $OA = v_{0x}$, $BC = v_x$, $OC = t$. Следовательно, проекция перемещения, равная площади фигуры $OABC$, выражается формулой:

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

При равноускоренном прямолинейном движении скорость тела в любой момент времени равна $v_x = v_{0x} + a_x t$, следовательно,

$$s_x = \frac{1}{2}(2v_{0x} + a_x t)t.$$

Отсюда

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

Если начальная скорость тела равна нулю, то формула проекции перемещения тела имеет вид:

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

Чтобы получить уравнение движения тела, подставим в формулу проекции перемещения её выражение через разность координат $s_x = x - x_0$.

Тогда

$$x - x_0 = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}, \text{ или}$$

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



По уравнению движения можно определить координату тела в любой момент времени, если известны начальная координата, начальная скорость и ускорение тела.

3. На практике часто встречаются задачи, в которых нужно найти перемещение тела при равноускоренном прямолинейном движении, но время движения при этом неизвестно. В этих случаях используют другую формулу проекции перемещения. Получим её.

Из формулы проекции скорости равноускоренного прямолинейного движения $v_x = v_{0x} + a_x t$ выразим время:

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

Подставив это выражение в формулу проекции перемещения, получим:

$$s_x = v_{0x} \frac{v_x - v_{0x}}{a_x} + \frac{a_x}{2} \left(\frac{v_x - v_{0x}}{a_x} \right)^2.$$

Отсюда

$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x},$$

или

$$v_x^2 - v_{0x}^2 = 2a_x s_x.$$

Если начальная скорость тела равна нулю, то:

$$v_x^2 = 2a_x s_x.$$

Полученная формула позволяет рассчитать тормозной путь транспортных средств, т. е. путь, который проезжает, например, автомобиль до полной остановки:

$$s_x = \frac{-v_{0x}^2}{2a_x}.$$

4. Пример решения задачи

Лыжник съехал со склона горы из состояния покоя с ускорением $0,5 \text{ м/с}^2$ за 20 с и дальше двигался по горизонтальному участку, проехав до остановки 40 м . Сколько времени двигался лыжник по горизонтальной поверхности? Какова длина склона горы?

Дано:

$$v_{01} = 0$$

$$a_1 = 0,5 \text{ м/с}^2$$

$$t_1 = 20 \text{ с}$$

$$s_2 = 40 \text{ м}$$

$$v_2 = 0$$

$$t_2 = ?$$

$$s_1 = ?$$

Решение:

Движение лыжника состоит из двух этапов: на первом этапе, спускаясь со склона горы, лыжник двигался с возрастающей по модулю скоростью; на втором этапе при движении по горизонтальной поверхности его скорость уменьшалась. Величины, относящиеся к первому этапу движения, запишем с индексом 1, а ко второму этапу — с индексом 2.

Систему отсчёта свяжем с Землёй, ось X направим по направлению скорости лыжника на каждом этапе его движения (рис. 32).

Запишем уравнение для скорости лыжника в конце спуска с горы:

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_{01} + \vec{a}_1 t_1.$$

В проекциях на ось X получим: $v_{1x} = a_{1x} t_1$. Поскольку проекции скорости и ускорения на ось X положительны, модуль скорости лыжника равен: $v_1 = a_1 t_1$.

Запишем уравнение для перемещения лыжника на втором этапе движения:

$$s_{2x} = v_{02x} t_2 + \frac{a_{2x} t_2^2}{2}.$$

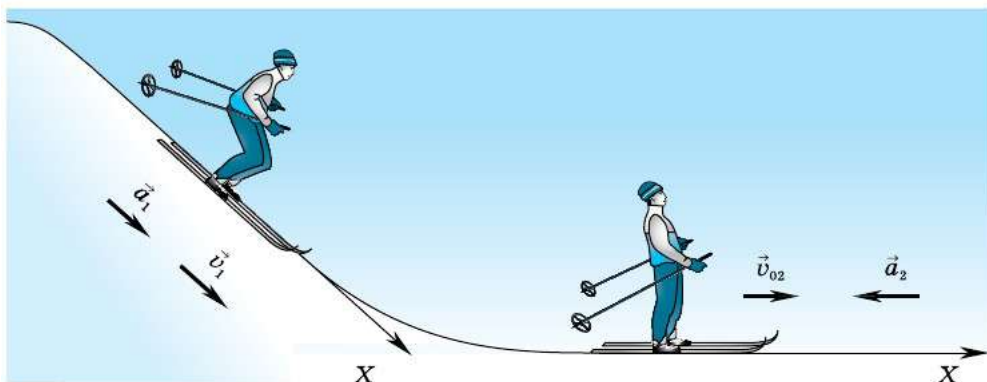


Рис. 32

Учитывая, что начальная скорость лыжника на этом этапе движения равна его конечной скорости на первом этапе $v_{02} = v_1$, а $v_{2x} = v_{02x} + a_{2x}t_2 = 0$, $a_{2x} = -a_2$, получим

$$v_{02} = a_2 t_2; \quad a_2 = \frac{v_1}{t_2};$$

$$s_2 = v_1 t_2 - \frac{v_1 t_2^2}{t_2 \cdot 2} = \frac{v_1 t_2}{2} = \frac{a_1 t_1 t_2}{2}.$$

Отсюда $t_2 = \frac{2s_2}{a_1 t_1};$

$$t_2 = \frac{2 \cdot 40 \text{ м}}{0,5 \text{ м/с}^2 \cdot 20 \text{ с}} = 8 \text{ с}.$$

Модуль перемещения лыжника на первом этапе движения равен длине склона горы. Запишем уравнение для перемещения:

$$s_{1x} = v_{01x} t_1 + \frac{a_{1x} t_1^2}{2}.$$

Отсюда длина склона горы $s_1 = \frac{a_1 t_1^2}{2};$

$$s_1 = \frac{0,5 \text{ м/с}^2 \cdot (20 \text{ с})^2}{2} = 100 \text{ м}.$$

Ответ: $t_2 = 8 \text{ с}; s_1 = 100 \text{ м}.$

Вопросы для самопроверки

1. Как по графику зависимости проекции скорости равноускоренного прямолинейного движения на ось X от времени определить проекцию перемещения тела?
2. По какой формуле рассчитывается проекция перемещения тела при равноускоренном прямолинейном движении?
3. По какой формуле рассчитывается координата тела, движущегося равноускоренно и прямолинейно, если начальная скорость тела равна нулю?

Задание 7

1. Чему равен модуль перемещения автомобиля за 2 мин, если за это время его скорость изменилась от 0 до 72 км/ч? Какова координата автомобиля в момент времени $t = 2$ мин? Начальную координату считать равной нулю.
2. Поезд движется с начальной скоростью 36 км/ч и ускорением $0,5 \text{ м/с}^2$. Чему равны перемещение поезда за 20 с и его координата в момент времени $t = 20 \text{ с}$, если начальная координата поезда 20 м?
3. Каково перемещение велосипедиста за 5 с после начала торможения, если его начальная скорость при торможении равна



10 м/с, а ускорение составляет $1,2 \text{ м/с}^2$? Чему равна координата велосипедиста в момент времени $t = 5 \text{ с}$, если в начальный момент времени он находился в начале координат?

4. Автомобиль, движущийся со скоростью 54 км/ч , останавливается при торможении перед светофором в течение 15 с . Чему равен модуль перемещения автомобиля при торможении?

5. Два автомобиля движутся навстречу друг другу из двух населённых пунктов A и B , находящихся на расстоянии 1 км друг от друга. Начальная скорость одного автомобиля 10 м/с и ускорение $0,2 \text{ м/с}^2$. Другой автомобиль, имея начальную скорость 15 м/с , движется с ускорением $0,2 \text{ м/с}^2$. При этом его скорость уменьшается. Определите время и координату места встречи автомобилей относительно пункта A .

6*. По условию задачи 1 постройте график зависимости координаты автомобиля от времени.

Лабораторная работа № 1

Исследование равноускоренного прямолинейного движения

Цель работы:

научиться измерять ускорение при равноускоренном прямолинейном движении; экспериментально установить отношение путей, проходимых телом при равноускоренном прямолинейном движении за последовательные равные промежутки времени.

Приборы и материалы:

жёлоб, штатив, металлический шарик, секундомер, измерительная лента, металлический цилиндр.

Порядок выполнения работы

1. Движение шарика по наклонному жёлобу можно считать близким к равноускоренному. Укрепите в лапке штатива один конец жёлоба так, чтобы он составлял небольшой угол с поверхностью стола (при этом ускорение тела будет небольшим). У другого конца положите в жёлоб металлический цилиндр.

2. Измерьте пути, проходимые шариком за три последовательных промежутка времени t , равных 1 с каждый. Сделайте это двумя способами. Поставьте мелом на жёлобе метки, фиксирующие положения шарика в моменты времени, равные 1 с , 2 с , 3 с , и измерьте расстояния s' между этими метками. Затем, отпуская каждый раз шарик с одной и той же высоты, измерьте путь s , пройденный им сначала за 1 с , затем за 2 с и за 3 с , а потом рассчитайте путь s' , пройденный шариком за вторую и третью секунды. Результаты измерений запишите в таблицу 1.

Таблица 1

№ опыта	Экспериментальные данные					Теоретические результаты	
	Время t , с	Путь s' , см	Время t , с	Путь s , см	Ускорение a , см/с ²	Время t , с	Путь s' , см
1	1		1			1	
2	1		2			1	
3	1		3			1	

3. Найдите отношения пути, пройденного за вторую секунду, к пути, пройденному за первую секунду, и пути, пройденного за третью секунду, к пути, пройденному за первую секунду. Сделайте вывод.

4. Измерьте время движения шарика по желобу и пройденный им путь. Вычислите ускорение его движения, используя формулу

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

5. Используя экспериментально полученное значение ускорения, вычислите пути, которые должен пройти шарик за первую, вторую и третью секунды своего движения. Сделайте вывод о соотношении этих путей.

6. Рассчитайте пути, пройденные шариком за последовательные равные промежутки времени, используя полученное в эксперименте значение ускорения движения. Найдите их отношение. Сравните результаты, полученные в эксперименте, с результатами теоретических расчётов.

§ 8. Свободное падение

✓ Какое движение называют равноускоренным?

✓ Чему равно ускорение свободного падения?

1. Вам хорошо известно, что тела падают на землю, если они не удерживаются опорой, нитью подвеса, рукой и т. п. При падении тела его скорость увеличивается, т. е. падение тел является ускоренным движением.

Если одновременно выпустить из рук с некоторой высоты одинакового размера металлический и бумажный кружки и наблюдать за их движением, то мы заметим, что металлический кружок упадёт на землю раньше бумажного. Можно предположить, что время падения тел зависит от их массы. Чтобы в этом убедиться, возьмём два одинаковых листа бумаги, один из них

скомкаем и одновременно отпустим их из рук. Скомканный лист бумаги упадёт на землю раньше. Следовательно, разное время падения не связано с массой тел.

Очевидно, что скомканный лист бумаги и гладкий испытывают при падении разное сопротивление воздуха. Подтвердить это предположение можно экспериментально.

Возьмём толстостенную трубку, один конец которой запаян, а другой снабжён краном. В трубку вложены дробинка, кусочек пробки и птичье пёрышко (рис. 33). Если быстро перевернуть трубку, то эти тела упадут на её дно. Можно заметить, что дробинка упадёт раньше всех, а пёрышко — позже всех тел. Если теперь откачать из трубки воздух и, закрыв кран, вновь её перевернуть, то все три тела достигнут дна трубки одновременно, несмотря на то что они имеют разную форму и массу. Следовательно, все тела в безвоздушном пространстве (в вакууме) падают с одинаковым ускорением, которое называют **ускорением свободного падения**.



Рис. 33

Падение тел в безвоздушном пространстве под действием силы тяжести называют свободным падением.

2. Свободное падение тел — движение равноускоренное. Ускорение свободного падения направлено всегда к центру Земли и имеет одинаковое для всех тел значение при их одинаковом начальном положении относительно поверхности Земли.

Действительно, как вам уже известно, модуль перемещения тела при равноускоренном движении без начальной скорости вычисляется по формуле: $s = \frac{at^2}{2}$. Из описанного выше опыта следует, что дробинка, кусочек пробки и птичье пёрышко за одинаковые промежутки времени совершают одинаковые перемещения, поэтому все они движутся с одинаковым ускорением.

Тело, брошенное вертикально вверх, тоже движется равноускоренно с ускорением свободного падения. В этом случае векторы скорости и ускорения тела направлены в противоположные стороны, а модуль скорости с течением времени уменьшается.

3. Ускорение свободного падения обозначают буквой g . Как вам известно из курса физики 7 класса, ускорение свободного падения зависит от географической широты местности. На



широте Москвы вблизи поверхности Земли оно равно $9,81 \text{ м/с}^2$. При решении задач, если не требуется высокая точность результата, принимают $g = 10 \text{ м/с}^2$.

Ускорение свободного падения зависит от высоты тела над поверхностью Земли. Чем выше поднято тело, тем слабее оно притягивается к Земле и тем меньше ускорение свободного падения. Например, на высоте 10 км — максимальной высоте полёта пассажирских самолётов — ускорение свободного падения равно $9,78 \text{ м/с}^2$. Для высот, на которых летают современные истребители, ускорение свободного падения ещё меньше. Так, на высоте 18 км оно равно $9,72 \text{ м/с}^2$.

Ещё меньшее значение ускорения свободного падения имеет на высотах, где расположены орбиты искусственных спутников Земли и космических станций. Так, максимальная высота первого искусственного спутника Земли относительно уровня моря составляла 947 км. Ускорение свободного падения на этой высоте равно $7,41 \text{ м/с}^2$.

4*. Свободное падение изучал итальянский учёный, один из основоположников классической механики, *Галилео Галилей* (1564—1642) в конце XVI в. Существует легенда, что он ронял с Пизанской башни шары, масса которых существенно различалась. Вопреки существовавшему в то время мнению, тела достигали поверхности Земли почти одновременно. У Галилея не было точных приборов, для измерения времени он использовал песочные часы, поэтому значение ускорения свободного падения было измерено им с большой погрешностью. В частности, в своей работе «Диалог о двух главнейших системах мира — Птолемеевой и Коперниковой» Галилей утверждал, что тела падали с высоты 60 м в течение 5 с, и, исходя из этих данных, получил значение ускорения свободного падения почти в 2 раза меньше истинного.

Чтобы повысить точность эксперимента по изучению равноускоренного движения, и свободного падения в частности, Галилей исследовал скольжение шаров по наклонной плоскости. Он экспериментально установил пропорциональность пройденного шаром пути квадрату времени и закон отношения путей, пройденных им за последовательные равные промежутки времени.

5. Пример решения задачи

Два тела одновременно начинают двигаться: одно вертикально вверх со скоростью 20 м/с, другое вертикально вниз с высоты

60 м без начальной скорости. Определите время и координату места встречи тел.

Дано:

$$v_{01} = 20 \text{ м/с}$$

$$v_{02} = 0$$

$$h = 60 \text{ м}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$t = ?$$

$$y = ?$$

Решение:

Систему отсчёта свяжем с Землёй. За начало отсчёта координаты примем точку, из которой с поверхности Земли бросили первое тело, ось OY направим вертикально вверх, за начало отсчёта времени примем момент бросания тел (рис. 34).

Запишем уравнение движения в проекциях на ось OY :

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

Для первого тела это уравнение имеет вид:

$$y_1 = y_{01} + v_{01y}t + \frac{g_y t^2}{2}.$$

Учитывая, что $y_{01} = 0$, $v_{01y} = v_{01}$, $g_y = -g$, получим

$$y_1 = v_{01}t - \frac{gt^2}{2}.$$

Уравнение движения второго тела:

$$y_2 = y_{02} + v_{02y}t + \frac{g_y t^2}{2}.$$

Поскольку $y_{02} = h$, $v_{02y} = 0$, $g_y = -g$, то

$$y_2 = h - \frac{gt^2}{2}.$$

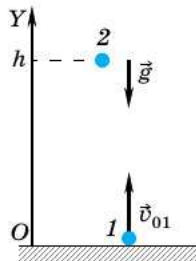


Рис. 34

В момент встречи тел их координата будет одинаковой: $y_1 = y_2 = y$. Тогда

$$v_{01}t - \frac{gt^2}{2} = h - \frac{gt^2}{2}; v_{01}t = h.$$

Отсюда время встречи тел

$$t = \frac{h}{v_{01}}; t = \frac{60 \text{ м}}{20 \text{ м/с}} = 3 \text{ с}.$$

Координату места встречи тел найдём из уравнения движения первого тела.

$$y = 20 \text{ м/с} \cdot 3 \text{ с} - \frac{10 \text{ м/с}^2 \cdot 9 \text{ с}^2}{2} = 15 \text{ м}.$$

Ответ: $t = 3 \text{ с}$; $y = 15 \text{ м}$.

Обратим внимание, что время встречи в данном случае можно найти проще, если систему отсчёта связать с одним из тел. При этом движение второго тела будет равномерным. Решите задачу вторым способом самостоятельно.

Вопросы для самопроверки

1. Какое движение называют свободным падением?
2. К какому виду механического движения относится свободное падение?
3. Как экспериментально доказать, что ускорение свободного падения одинаково для всех тел в данной точке пространства?
4. От чего зависит ускорение свободного падения?

Задание 8

1. Мяч падает на землю с высоты 20 м с начальной скоростью, равной нулю. Через какое время он достигнет поверхности земли? Какую скорость приобретёт мяч к моменту удара о поверхность земли? На какой высоте относительно земли будет находиться мяч через 1 с после начала падения? Какую скорость он будет иметь в этот момент времени? Сопротивлением воздуха пренебречь.
2. По данным задачи 1 постройте графики зависимости проекции скорости на ось Y и модуля скорости мяча от времени, если ось Y направлена: а) вертикально вниз; б) вертикально вверх.
3. На какой высоте относительно поверхности земли встретятся два мяча, если один брошен вертикально вверх со скоростью 10 м/с, а другой падает с высоты 10 м без начальной скорости? Мячи начинают движение одновременно. Какую скорость относительно земли будут иметь мячи на этой высоте? Сопротивлением воздуха пренебречь. *Постройте графики зависимости координаты каждого мяча от времени и определите по графику время и координату места их встречи.
- 4*. Вычислите ускорение свободного падения, используя данные, полученные Галилеем.
- 5*. Постройте графики зависимости проекции скорости тел от времени по данным задачи, рассмотренной в § 8. Постройте по этим данным графики зависимости координаты каждого тела от времени и графически определите время и координату места встречи тел.

§ 9. Перемещение и скорость при криволинейном движении

- ✓ Что называют перемещением?
- ✓ Что называют мгновенной скоростью?

1. Прямолинейное движение достаточно редко встречается в повседневной жизни, значительно чаще можно наблюдать криволинейное движение. Так, по криволинейной траектории движется мяч, брошенный под некоторым углом к горизонту, автомобиль на повороте, фигурист по льду.

Криволинейное движение — более сложный вид движения, чем прямолинейное, поскольку даже если движение происходит на плоскости, то изменяются две координаты, характеризующие положение тела. Скорость и ускорение тела также постоянно изменяются по направлению, а в общем случае и по модулю.

2. Выясним, как направлены векторы перемещения и скорости при криволинейном движении.

Предположим, что тело, которое можно считать материальной точкой, движется по криволинейной траектории AB . Путь, пройденный телом при перемещении из точки A в точку B (рис. 35), равен длине дуги $\overline{AB}$; его перемещение — вектор $\overrightarrow{AB}$, направленный по хорде. Модуль перемещения s в данном случае не равен пройденному пути l .

3. Проведём между точками A и B ряд хорд и представим, что тело движется по этим хордам. Тогда на каждом участке траектории тело движется прямолинейно и вектор скорости направлен вдоль хорды (рис. 36, *а*). Если уменьшать длину прямолинейных участков, то они, в конце концов, как бы стянутся в точки, а ломаная линия превратится в плавную кривую. Скорость тела в каждой точке будет направлена по касательной к кривой в этой точке (рис. 36, *б*).

Мгновенная скорость тела при криволинейном движении направлена в любой точке траектории по касательной к траектории в этой точке.

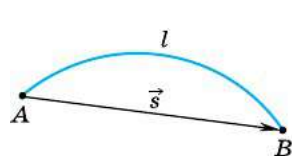


Рис. 35

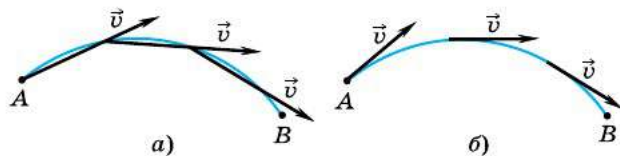


Рис. 36

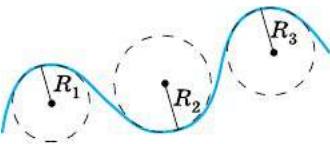


Рис. 37

Вывод о направлении мгновенной скорости можно подтвердить, наблюдая, как движутся брызги из-под колёс буксующего автомобиля или искры при заточке деталей на вращающемся точильном камне.

При криволинейном движении направление скорости тела меняется, поэтому такое движение является ускоренным, даже если модуль скорости остаётся постоянным.

Наиболее простым случаем криволинейного движения является движение тела по окружности. К этому движению можно свести любое криволинейное движение. На рисунке 37 показано, что криволинейную траекторию можно представить состоящей из дуг окружностей разных радиусов; по этим дугам и движется тело.

Вопросы для самопроверки

1. Какое движение называют криволинейным?
2. Что можно сказать о скорости тела при криволинейном движении?
3. Как направлена мгновенная скорость тела при криволинейном движении?

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

- ✓ Какое движение называют равномерным; равноускоренным?
- ✓ Какие характеристики движения являются векторными величинами; скалярными?
- ✓ Чему равна длина окружности?

1. Достаточно часто можно наблюдать движение тела по окружности. Например, по окружности движется точка обода колеса при его вращении, точки вращающихся деталей станков, конец стрелки часов, ребёнок, сидящий на какой-либо фигуре вращающейся карусели.

При движении по окружности может изменяться не только направление скорости тела, но и её модуль. Рассмотрим наиболее простое движение по окружности, при котором изменяется только направление скорости, а её модуль остаётся постоянным. Такое движение называют **движением тела по окружности с посто-**

янной по модулю скоростью. Введём характеристики этого движения.

2. Движение тела по окружности повторяется через определённые промежутки времени, равные периоду обращения.

Периодом обращения называют время, в течение которого тело совершает один полный оборот.

Период обращения обозначают буквой T . За единицу периода обращения, как и любого промежутка времени, в СИ принята *секунда* (1 с).

Если за время t тело совершило N полных оборотов, то период обращения равен

$$T = \frac{t}{N}.$$

Частотой обращения называют число полных оборотов тела за одну секунду.

Частоту обращения обозначают буквой ν .

$$\nu = \frac{N}{t}.$$

Единица частоты обращения в СИ — *герц* (1 Гц): $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$.

Частота и период обращения связаны следующим соотношением:

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

3. Рассмотрим величину, характеризующую положение тела на окружности. Пусть в начальный момент времени тело находилось в точке A , а за время t оно переместилось в точку B (рис. 38).

Проведём *радиус-вектор* (вектор, соединяющий центр окружности с какой-либо её точкой) из центра окружности в точку A и радиус-вектор из центра окружности в точку B . При движении тела по окружности радиус-вектор повернётся за время t на угол φ . Зная угол поворота радиуса-вектора, можно определить положение тела на окружности.

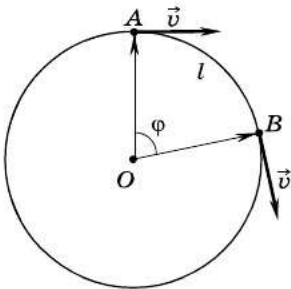


Рис. 38

Единица угла поворота радиуса-вектора в СИ — *радиан* (1 рад).

4. При движении тела по окружности мгновенную скорость называют **линейной скоростью**.

Линейная скорость тела, движущегося по окружности, оставаясь постоянной по модулю, меняется по направлению и в любой точке направлена по касательной к траектории.

Модуль линейной скорости можно определить по формуле:

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

Пусть тело, двигаясь по окружности радиусом R , совершило один полный оборот. Тогда пройденный им путь равен длине окружности: $l = 2\pi R$, а время равно периоду обращения T . Следовательно, линейная скорость тела:

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

Поскольку $T = \frac{1}{\nu}$, то можно записать

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

Быстроту обращения тела характеризуют **угловой скоростью**.

Угловой скоростью называют физическую величину, равную отношению угла поворота радиуса-вектора к промежутку времени, за который этот поворот произошёл.

Угловая скорость обозначается буквой ω .

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

За единицу угловой скорости в СИ принимают *радиан в секунду* (1 рад/с):

$$[\omega] = \frac{[\varphi]}{[t]} = \frac{1 \text{ рад}}{1 \text{ с}} = 1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

За время, равное периоду обращения T , тело совершает полный оборот и угол поворота радиуса-вектора $\varphi = 2\pi$. Поэтому угловая скорость тела:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{или} \quad \omega = 2\pi\nu.$$



Линейная и угловая скорости связаны между собой. Запишем отношение линейной скорости к угловой:

$$\frac{v}{\omega} = \frac{2\pi Rv}{2\pi v} = R.$$

Таким образом,

$$v = \omega R.$$

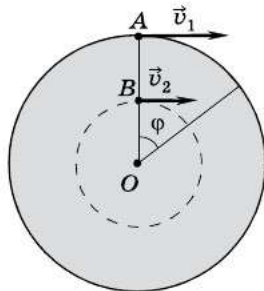


Рис. 39

При одинаковой угловой скорости точек A и B , расположенных на равномерно вращающемся диске (рис. 39), линейная скорость точки A больше линейной скорости точки B : $v_1 > v_2$.

5. При движении тела по окружности с постоянной по модулю скоростью направление линейной скорости меняется. Поскольку скорость — величина векторная, то изменение направления скорости означает, что тело движется по окружности с ускорением.

Выясним, как направлено и чему равно это ускорение.

Напомним, что ускорение тела определяется по формуле:

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

где $\Delta \vec{v}$ — вектор изменения скорости тела.

Направление вектора $\vec{a}$ совпадает с направлением вектора $\Delta \vec{v}$.

Пусть тело, движущееся по окружности радиусом R , за малый промежуток времени t переместилось из точки A в точку B (рис. 40). Чтобы найти изменение скорости тела $\Delta \vec{v}$, в точку A перенесём параллельно самому себе вектор $\vec{v}_0$ и вычтем из него $\vec{v}_0$, что равноценно сложению вектора $\vec{v}$ с вектором $-\vec{v}_0$. Вектор, направленный от $\vec{v}_0$ к $\vec{v}$, и есть вектор $\Delta \vec{v}$.

Рассмотрим треугольники AOB и ACD . Оба они равнобедренные ($AO = OB$ и $AC = AD$, поскольку $v_0 = v$) и имеют равные углы: $\angle AOB = \angle CAD$ (как углы со взаимно перпендикулярными сторонами: $AO \perp \vec{v}_0$, $OB \perp \vec{v}$).

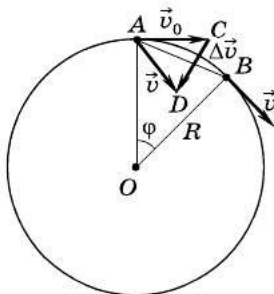


Рис. 40

Следовательно, эти треугольники подобны и можно записать отношение соответствующих сторон:

$$\frac{AB}{AO} = \frac{DC}{AD}.$$

В том случае, когда точки A и B расположены близко друг к другу, хорда AB мала и её можно заменить дугой $\widehat{AB}$. Длина дуги $\widehat{AB}$ — путь, пройденный телом за время t с постоянной скоростью v : $AB = vt$.

Кроме того, $AO = R$, $DC = \Delta v$, $AD = v$. Следовательно,

$$\frac{vt}{R} = \frac{\Delta v}{v}; \quad \frac{\Delta v}{t} = \frac{v^2}{R}; \quad \frac{\Delta v}{t} = a.$$

Откуда ускорение тела

$$a = \frac{v^2}{R}.$$

Из рисунка 40 видно, что чем меньше хорда AB , тем точнее направление вектора $\Delta \vec{v}$ совпадает с радиусом окружности. Следовательно, вектор изменения скорости $\Delta \vec{v}$ и вектор ускорения $\vec{a}$ направлены по радиусу к центру окружности. Поэтому ускорение при движении тела по окружности с постоянной по модулю скоростью называют **центростремительным**.

Таким образом,

при движении тела по окружности с постоянной по модулю скоростью его ускорение постоянно по модулю и в любой точке направлено по радиусу окружности к её центру.

Учитывая, что $v = \omega R$, можно записать другую формулу центростремительного ускорения:

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

6. Пример решения задачи

Частота обращения карусели 0,05 Гц. Человек, вращающийся на карусели, находится на расстоянии 4 м от оси вращения. Определите центростремительное ускорение человека, период обращения и угловую скорость карусели.



Дано:

$$v = 0,05 \text{ Гц}$$

$$R = 4 \text{ м}$$

$$a - ?$$

$$T - ?$$

$$\omega - ?$$

Решение:

Центростремительное ускорение равно:

$$a = \omega^2 R = (2\pi v)^2 R = 4\pi^2 v^2 R.$$

Период обращения: $T = \frac{1}{v}$.

Угловая скорость карусели: $\omega = 2\pi v$.

$$a = 4 \cdot (3,14)^2 \cdot (0,05 \text{ Гц})^2 \cdot 4 \text{ м} \approx 0,4 \text{ м/с}^2;$$

$$T = \frac{1}{0,05 \text{ Гц}} = 20 \text{ с};$$

$$\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,05 \text{ рад/с} \approx 0,3 \text{ рад/с}.$$

Ответ: $a \approx 0,4 \text{ м/с}^2$; $T = 20 \text{ с}$; $\omega \approx 0,3 \text{ рад/с}$.

Вопросы для самопроверки

1. Какое движение называют движением тела по окружности с постоянной по модулю скоростью?
2. Что называют периодом обращения?
3. Что называют частотой обращения? Как связаны между собой период и частота обращения?
4. Что называют линейной скоростью? Как она направлена?
5. Что называют угловой скоростью? Что является единицей угловой скорости?
6. Как изменится линейная скорость тела, если угловая скорость увеличится в 2 раза при неизменном радиусе?
7. Как направлено центростремительное ускорение? По какой формуле оно рассчитывается?



Задание 9

1. Чему равна линейная скорость точки обода колеса, если радиус колеса 30 см и один оборот она совершает за 2 с? Чему равна угловая скорость колеса?
2. Скорость автомобиля 72 км/ч. Каковы угловая скорость, частота и период обращения колеса автомобиля, если диаметр колеса 70 см? Сколько оборотов совершит колесо за 10 мин?
3. Чему равен путь, пройденный концом минутной стрелки будильника за 10 мин, если её длина 2,4 см?
4. Каково центростремительное ускорение точки обода колеса автомобиля, если диаметр колеса 70 см? Скорость автомобиля 54 км/ч.

5. Точка обода колеса велосипеда совершает один оборот за 2 с. Радиус колеса 35 см. Чему равно центростремительное ускорение точки обода колеса?

Темы докладов и проектов



1. Графическое представление уравнений механического движения.
2. Скорости в природе и технике.
3. Периодические процессы в биологии.

§ 11. Первый закон Ньютона

- ✓ Что называют инерцией?
- ✓ В каком случае тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения?

1. При изучении равномерного и равноускоренного движений нас интересовало, как движется тело; мы не ставили задачу ответить на вопрос, почему тело движется с постоянной скоростью или с постоянным ускорением.

На вопрос о том, почему тело движется так, а не иначе, отвечает раздел механики, называемый **динамикой**.

В основе динамики лежат три закона Ньютона, которые были сформулированы им в конце XVII в. и явились обобщением результатов наблюдений и опытов.

2. Вы уже изучали в курсе физики 7 класса явление инерции и закон инерции, который открыл Галилей, а английский учёный **Исаак Ньютон** (1643—1727) обобщил и включил в систему законов динамики. Галилей проделал мысленный эксперимент, который заключался в следующем. Если гладкому массивному шару предоставить возможность самопроизвольно скатываться вниз по гладкой наклонной плоскости с возрастающей скоростью, то его движение будет продолжаться бесконечно долго. Если же шару сообщить некоторую скорость, направленную вверх вдоль наклонной плоскости, то он будет двигаться вверх с уменьшающейся скоростью и в конце концов остановится. Если положить шар на гладкую горизонтальную поверхность и толкнуть его, то шар будет двигаться по этой поверхности сколь угодно долго с неизменной скоростью, поскольку нет причин, которые заставили бы его замедлять или ускорять своё движение.

Можно проделать опыт, аналогичный мысленному эксперименту Галилея. Шарик, скатившись по жёлобу (рис. 41), движется по горизонтальной поверхности. Если на пути шарика на-



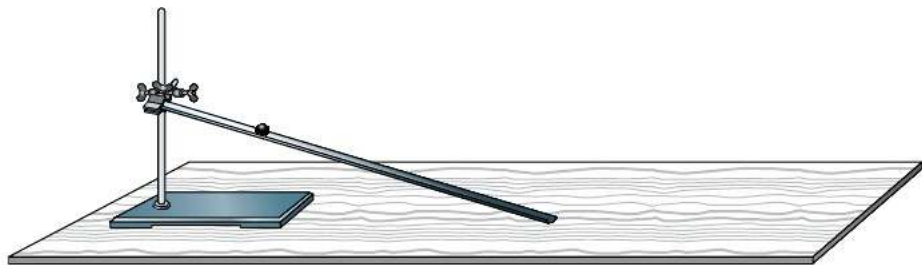


Рис. 41

сыпать песок, то шарик быстро остановится. Положив на поверхность кусок сукна или стекло, можно заметить, что шарик пройдёт по поверхности тем больший путь, чем меньше сопротивление его движению.

Если предположить, что трение отсутствует, то, очевидно, шарик будет сохранять свою скорость неизменной. Он будет двигаться равномерно и прямолинейно, пока на него не подействуют другие тела и не изменят его скорость.

Именно к такому выводу и пришёл Галилей. Он утверждал, что

если на тело не действуют другие тела, то оно либо находится в покое, либо движется равномерно и прямолинейно.

Это и есть закон инерции.

3. В природе не существует изолированных тел. Любое тело окружено другими телами. Вы уже знаете, что тела взаимодействуют друг с другом и в результате взаимодействия они изменяют свою скорость, т. е. приобретают ускорения.

Несмотря на то что тела взаимодействуют с другими телами, они могут находиться в покое. Например, подвешенный на нити груз (рис. 42) взаимодействует с Землёй и нитью. Другие тела, окружающие груз, заметного влияния на него не оказывают. При этом груз находится в покое относительно системы отсчёта, связанной с Землёй. Если перерезать нить, то груз будет взаимодействовать только с Землёй и начнёт падать вниз с ускорением.

Следовательно, груз покоился, когда действия Земли и нити компенсировали или уравновешивали друг друга. Когда же на груз действо-



Рис. 42

вала только Земля, он двигался с ускорением. Таким образом, можно сказать, что *тело сохраняет состояние покоя, если действия на него других тел скомпенсированы* (относительно Земли).

Представим себе, что автомобиль движется равномерно и прямолинейно по горизонтальному участку дороги. В этом случае действия покрытия дороги и тяги его двигателя будут скомпенсированы.

Следовательно, *при компенсации действия на тело других тел оно может не только покоиться, но и двигаться равномерно и прямолинейно.*

4. Возникает вопрос: во всех ли системах отсчёта тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если действия на него других тел скомпенсированы?

Чтобы на него ответить, рассмотрим пример. Предположим, что в поезде на полу лежит мяч. Пока поезд покоится или движется равномерно и прямолинейно, мяч остаётся в покое, поскольку действие пола вагона компенсирует действие Земли. Когда поезд начнёт набирать скорость, т. е. двигаться с ускорением, направленным в ту же сторону, что и скорость поезда, то мяч покатится в противоположную сторону. Несмотря на то что мяч по-прежнему взаимодействует только с Землёй и полом вагона и действия этих тел на него скомпенсированы, его поведение изменилось: в системе отсчёта, связанной с поездом, мяч приобрёл ускорение.

Таким образом, тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения только в определённых системах отсчёта, на существование которых указывает **первый закон Ньютона**.

Существуют такие системы отсчёта, относительно которых тело сохраняет свою скорость постоянной, если на него не действуют другие тела или действия других тел компенсируются.

Приведённая формулировка первого закона Ньютона отличается от формулировки, данной самим Ньютоном, которая звучит так: «**Всякое тело продолжает удерживаться в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние**».



5. Явление сохранения скорости тела (в том числе и равной нулю) называют явлением инерции. Системы отсчёта, относительно которых тела движутся с постоянной скоростью при компенсации внешних воздействий, называют инерциальными.

Значение первого закона Ньютона состоит в том, что он устанавливает существование инерциальных систем отсчёта. Именно для таких систем отсчёта справедливы второй и третий законы Ньютона.

В приведённых выше примерах инерциальными системами отсчёта были система отсчёта, связанная с Землёй, и системы отсчёта, движущиеся относительно Земли равномерно и прямолинейно.

Существуют также системы отсчёта, которые движутся с ускорением относительно инерциальной системы отсчёта. Такие системы отсчёта называют **неинерциальными**.

Например, неинерциальными являются системы отсчёта, связанные с ускоренно движущимися относительно Земли транспортными средствами (поезд, начавший движение), с вращающимся вокруг оси телом (карусель).

Вопросы для самопроверки

1. В чём состоял мысленный эксперимент Галилея?
2. Возможно ли в реальных ситуациях создать такие условия, при которых на тело не будут действовать никакие другие тела?
3. Что иллюстрирует опыт с желобом и движущимся по нему шариком, описанный в параграфе?
4. Сформулируйте первый закон Ньютона.
5. Какие системы отсчёта называют инерциальными?
6. В чём состоит значение первого закона Ньютона?

Задание 10

1. В каком из приведённых примеров тело движется по инерции:
 - равномерно движущийся по трассе автомобиль;
 - автомобиль, движущийся по горизонтальной дороге с выключенным двигателем;
 - опускающийся равномерно на землю парашютист с раскрытым куполом парашюта;
 - споткнувшийся на бегу человек?
2. Опишите ситуацию, в которой можно было бы наблюдать явление инерции.

§ 12. Взаимодействие тел.

Масса и сила

- ✓ Какое свойство тела называют инертностью?
- ✓ Какую физическую величину называют массой; силой?

1. Как вы уже знаете, скорость тела изменяется, если на него действуют другие тела. При этом важно, что действие тел друг на друга носит взаимный характер, т. е. имеет место **взаимодействие** тел.

Взаимодействие тел можно наблюдать на простом опыте. Поставим на стол две одинаковые тележки, к одной из которых прикреплена пружина. Сожмём пружину и свяжем её нитью. На одинаковых расстояниях от середины пружины поставим преграды — деревянные бруски (рис. 43). Пережжём нить. При этом пружина распрямится, а тележки разъедутся в разные стороны. В результате взаимодействия скорость обеих тележек изменяется от нуля до некоторого значения, т. е. они приобретают ускорение. Таким образом, причиной изменения скорости каждой тележки является их взаимодействие.

Тележки о бруски ударяются одновременно. Так как расстояния были одинаковые, следовательно, ускорения, которые тележки приобрели при взаимодействии, равны по модулю и направлены в противоположные стороны.

Повторим опыт с тележками, сжав пружину сильнее. После пережигания нити тележки, приобретая бóльшую скорость в результате взаимодействия, опять ударяются о бруски одновременно.

По результатам этих опытов можно сделать следующие выводы: *при взаимодействии одинаковых тележек их скорость изменяется на одну и ту же величину, т. е. они приобретают одинаковые ускорения; при изменении условий взаимодействия (в данном случае деформации пружины) значения ускорений взаимодействующих тел изменяются, но останутся равными.*

2. Положим на одну из тележек груз и повторим опыт (рис. 44). Мы заметим, что теперь тележки ударятся о преграды не одновременно: ненагруженная тележка доедет до преграды раньше, чем нагруженная, т. е. скорость ненагруженной тележки изменится сильнее. Следовательно, тележки при взаимодействии приобрели разные ускорения: ускорение нагруженной тележки меньше, чем ненагруженной.





Рис. 43

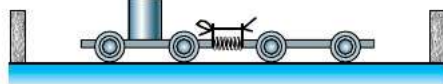


Рис. 44

Если повторить опыт, сжав пружину сильнее, то получим тот же результат: несмотря на то, что скорости тележек в результате взаимодействия изменятся сильнее, чем в первом случае, ненагруженная тележка опять доедет до преграды раньше, чем нагруженная. Точные измерения показывают, что отношение ускорений взаимодействующих тел не изменится. Таким образом, *разные тела при взаимодействии приобретают разные ускорения; при изменении условий взаимодействия (в данном случае деформации пружины) отношение ускорений взаимодействующих тел не изменяется.*

О теле, скорость которого при взаимодействии изменилась меньше, говорят, что оно *более инертно*, чем тело, скорость которого изменилась на большее значение.

Из двух тел, скорость которых изменяется на одну и ту же величину, более инертно то, которому для этого требуется большее время. Например, в рассмотренном опыте нагруженной тележке потребовалось бы большее время для изменения скорости на такую же величину, что ненагруженной, т. е. нагруженная тележка при взаимодействии приобрела меньшее ускорение, чем ненагруженная. Это значит, что нагруженная тележка более инертна.

Инертность — свойство тела, состоящее в том, что для изменения скорости ему необходимо определённое время.

3. Инертность характеризуется физической величиной, называемой **массой тела**. Более инертное тело имеет большую массу, менее инертное тело имеет меньшую массу. Если массы взаимодействующих тел m_1 и m_2 , то

$$\frac{a_2}{a_1} = \frac{m_1}{m_2}.$$

Ускорения, приобретаемые телами при взаимодействии, обратно пропорциональны их массам.

Чтобы измерить массу m некоторого тела, нужно привести его во взаимодействие с телом известной массы (с эталоном массы) $m_{\text{эт}}$ и измерить ускорения, которые приобретут данное тело и эталон. Тогда

$$\frac{a}{a_{\text{эт}}} = \frac{m_{\text{эт}}}{m}, \text{ или } m = m_{\text{эт}} \frac{a_{\text{эт}}}{a}.$$



Этот способ измерения массы используется на практике при определении масс очень больших тел — космических объектов и очень маленьких тел — молекул, атомов и частиц, из которых они состоят.

Другим способом измерения массы тел является взвешивание, именно им и пользуются в повседневной жизни.

За единицу массы в СИ принимается **масса эталона** — цилиндра, изготовленного из сплава платины и иридия¹. Масса этого эталона принята за **килограмм (1 кг)**. Массу 1 кг имеет 1 л чистой воды при температуре 15 °С.

Масса тела — величина *аддитивная*. Это означает, что масса тела складывается из масс отдельных его частей.

Масса тела не зависит от выбора системы отсчёта.

4. Как вы знаете из курса физики 7 класса, мерой взаимодействия тел является сила. Сила — векторная величина.

Силу обозначают буквой $\vec{F}$ и измеряют в **ньютонaх (Н)**.

Для измерения силы используют динамометр, принцип работы которого основан на законе Гука: $F_{\text{упр}} = -kx$, где k — жёсткость пружины. По удлинению пружины x можно судить о значении возникающей в ней силы упругости и соответственно о значении приложенной силы.

5. Обычно на тело действует несколько сил, и каждая из них сообщает телу ускорение. Например, на движущийся автомобиль действуют сила тяжести, сила упругости со стороны дороги, сила тяги, сила трения, сила сопротивления воздуха. При этом *действие каждой силы не зависит от действия других, т. е. каждая сила сообщает телу такое ускорение, какое она сообщила бы ему в отсутствие действия других сил*. В этом состоит **принцип независимости действия сил.**

При расчёте ускорения тела все действующие на него силы заменяют одной силой, называемой **равнодействующей**. *Равнодействующая сила — геометрическая сумма всех сил, действующих на тело*. Под геометрической суммой здесь и далее понимается сумма векторов.

В 7 классе вы изучали сложение сил, направленных вдоль одной прямой. Часто встречаются ситуации, когда действующие на

¹ Развитие технологий привело к созданию более точного, уже не материального, эталона. Это не скажется при бытовом применении, но значимо для современного развития науки.



тело силы направлены под углом друг к другу, например сила тяжести и сила трения. В этом случае силы складываются также геометрически, и равнодействующей силой будет диагональ параллелограмма (в частном случае — прямоугольника), сторонами которого являются действующие на тело силы (рис. 45). Модуль равнодействующей силы в этом случае вычисляется по теореме Пифагора:

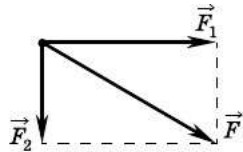


Рис. 45

$$F^2 = F_1^2 + F_2^2.$$

Вопросы для самопроверки

1. В чём состоит свойство инертности?
2. Какой величиной характеризуется инертность тела?
3. Как измерить массу тела? Что является единицей массы в СИ?
4. Что характеризует сила?
5. В чём состоит принцип независимости действия сил?

Задание 11

1. Две тележки массами 100 и 200 г соединили пружиной, которая удерживается нитью в сжатом состоянии. После того как нить перерезли, пружина распрямилась и тележки разъехались. Тележка меньшей массы приобрела скорость 0,5 м/с. Какую скорость приобрела вторая тележка?

2*. На металлическом стержне вращаются два связанных между собой цилиндра разной массы (рис. 46). Радиус вращения центра первого цилиндра массой 30 г равен 6 см, радиус вращения центра второго цилиндра — 2 см. Чему равна масса второго цилиндра?

3. Как измерить жёсткость пружины, резинки или какого-либо другого тела, используя грузы известной массы? Осуществите опыт.

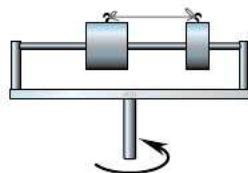


Рис. 46

§ 13. Второй закон Ньютона

✓ Каково соотношение между ускорением и массой тела при неизменной силе, действующей на тело?

1. Из повседневных наблюдений вы знаете, что чем больше сила, действующая на тело, тем больше ускорение, которое

оно приобретает. Так, например, чем больше сила, которую вы прикладываете к мячу при броске, тем дальше полетит мяч. Ещё пример. Чем сильнее водитель нажимает на педаль тормоза, тем больше сила трения, действующая на автомобиль. Соответственно скорость автомобиля быстрее уменьшается до нуля, и он быстрее останавливается. Значит, чем больше действующая на автомобиль сила трения, тем быстрее меняется его скорость и тем больше его ускорение.

Жизненный опыт убеждает нас в том, что ускорение, которое приобретают тела под действием одинаковой силы, зависит от массы тел. Например, грузовому автомобилю требуется большее время, чем легковому, для того, чтобы при той же скорости остановиться, выключив двигатель. Следовательно, чем больше масса тела, тем меньшее ускорение оно получает под действием некоторой постоянной силы.

2. Проверим на опыте выдвинутые нами гипотезы о том, как зависит ускорение, с которым движется тело, от его массы и от действующей на тело силы. Сначала будем менять действующую на тело силу, оставляя постоянной массу движущегося тела. Соби-

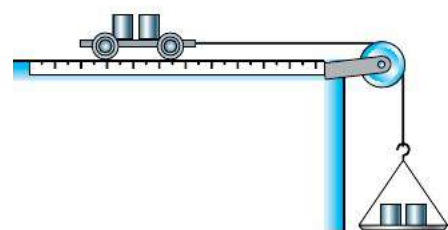


Рис. 47

рём установку, изображённую на рисунке 47. К тележке прикрепим один конец нити, перекинутой через неподвижный блок. Другой конец нити соединим с платформой, на которую поместим грузы. Под действием грузов на платформе тележка и платформа будут двигаться с ускорением по гладкой горизонтальной поверхности.

Поскольку в рассматриваемом опыте движутся тележка и платформа с грузами, то постоянной должна оставаться их суммарная масса. Для того чтобы масса движущихся тел сохранялась неизменной, поставим грузы на тележку и постепенно будем переставлять их на платформу, изменяя тем самым действующую силу.

Ускорение движения тележки и платформы с грузами вычислим, измеряя линейкой пройденный путь и секундомером время движения. Поскольку начальная скорость тел равна нулю,

$$\text{то } s = \frac{at^2}{2}, \text{ откуда } a = \frac{2s}{t^2}.$$



Опыт показывает, что при увеличении силы в 2 раза ускорение тоже увеличивается в 2 раза, увеличение силы в 3 раза приводит к увеличению ускорения в 3 раза и т. п.

Таким образом, *ускорение, с которым движется тело, прямо пропорционально действующей на него силе.*

3. Теперь будем изменять массу тел, оставляя силу постоянной. Для этого положим на платформу груз некоторой массы. При этом на тележку будет действовать сила F . Будем нагружать тележку, изменяя её массу. Увеличим массу тележки в 1,5 раза. Опыт покажет, что ускорение уменьшится в 1,5 раза. При увеличении массы тел в 2 раза ускорение уменьшится в 2 раза.

Следовательно, *ускорение, с которым движутся тела при действии на них одинаковой силы, обратно пропорционально их массе.* Сделанные на основе эксперимента выводы можно объединить и установить взаимосвязь между ускорением, силой и массой:

ускорение, с которым движется тело, прямо пропорционально действующей на тело силе и обратно пропорционально его массе:

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

Таким образом, мы подтвердили предположения о том, что ускорение, с которым движется тело, зависит от его массы и действующей на тело силы.

Данное выражение является математической записью **второго закона Ньютона.**

Направление ускорения тела всегда совпадает с направлением действующей на него силы. Если на тело действуют несколько сил, то вектор ускорения направлен так же, как и вектор равнодействующей силы.

Второй закон Ньютона имеет границы применимости: он справедлив в инерциальных системах отсчёта.

4. Из второго закона Ньютона можно найти равнодействующую всех сил, действующих на тело:

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

Единица силы в СИ:

$$[F] = [m][a] = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/с}^2 = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2 = 1 \text{ Н}.$$

За единицу силы принимают такую силу, которая сообщает телу массой 1 кг ускорение 1 м/с².

Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте второй закон Ньютона.
2. Как направлено ускорение, с которым движется тело?
3. В каких системах отсчёта выполняется второй закон Ньютона?

Задание 12

1. Чему равна сила, действующая на автомобиль массой 1000 кг, если он движется с ускорением 2 м/с²?
2. С каким ускорением начинает двигаться стартующая ракета массой 3000 т, если на неё действует сила тяги 39 000 кН?
3. Автомобиль массой 1 т разгоняется из состояния покоя до скорости 20 м/с. Чему равно время разгона автомобиля, если на него действуют сила тяги 2 кН и сила сопротивления движению 1 кН?
- 4*. С каким ускорением будет всплывать в воде парафиновый шарик массой 30 г? Плотность парафина 900 кг/м³.
5. На рисунке 48 указаны в некоторой системе отсчёта направления скорости тела и действующей на него силы. Как направлено ускорение, с которым движется тело? Опишите характер движения тела.
6. По данным задачи 2 из задания 11 определите силу, действующую на каждый из цилиндров (см. рис. 46), если угловая скорость вращения стержня 3 рад/с.

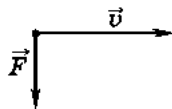


Рис. 48

§ 14. Третий закон Ньютона

- ✓ Что является причиной изменения скорости тела?
- ✓ Какая величина характеризует взаимодействие тел?

1. Вы уже знаете, что второй закон Ньютона устанавливает зависимость ускорения одного из взаимодействующих тел от его массы и действующей на него силы. Однако в результате взаимодействия каждое тело приобретает ускорение, и, следовательно, на каждое из взаимодействующих тел действует сила.

Например, в описанном в § 12 опыте (см. рис. 43) каждая тележка в результате взаимодействия приобретала ускорение и, следовательно, на каждую тележку действовала сила.



Взаимодействуют книга, лежащая на горизонтальном столе, и стол. Книга действует на стол с силой $\vec{P}$, приложенной к столу и направленной вертикально вниз, и деформирует его (рис. 49). В столе возникает сила упругости, и он действует на книгу с силой $\vec{F}_{\text{упр}}$, направленной вертикально вверх и приложенной к книге.

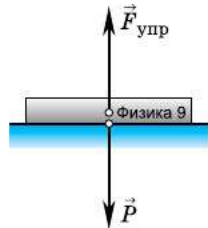


Рис. 49

Ударив по столу рукой, можно ощутить взаимодействие тел. При этом рука действует на стол с некоторой силой, а возникающее болезненное ощущение свидетельствует о том, что и со стороны стола на руку также действовала некоторая сила.

2. Выясним, как соотносятся между собой силы, с которыми действуют друг на друга взаимодействующие тела. Для этого закрепим в штативе один над другим два демонстрационных динамометра (рис. 50, а). К верхнему динамометру подвесим магнит, а на столик нижнего динамометра положим стальной брусок. Установим стрелки динамометров на нуль. Приблизим магнит к бруску (рис. 50, б). Мы увидим, что стрелки динамометров отклонятся от нуля.

Показания динамометров позволяют сделать следующие выводы: *при взаимодействии магнита и бруска сила действует как на брусок, так и на магнит; модуль силы, действующей на брусок, равен модулю силы, действующей на магнит; силы, действующие на магнит и на брусок, направлены в противоположные стороны.*

3. Эти же выводы можно получить, выполнив математические преобразования. Вы уже знаете, что при взаимодействии двух тел отношение модулей их ускорений равно обратному отношению масс:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}, \text{ или } m_1 a_1 = m_2 a_2.$$

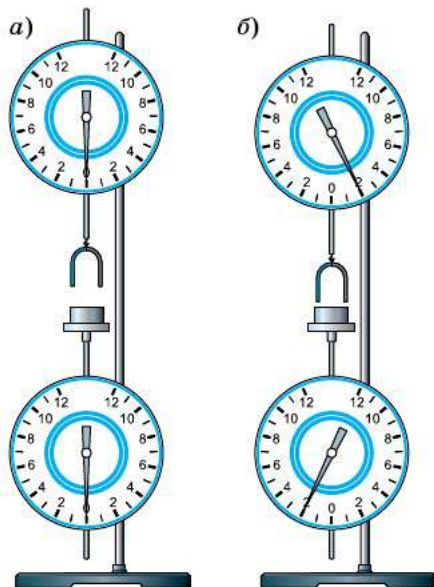


Рис. 50



Поскольку ускорения, которые получают тела при взаимодействии, направлены в противоположные стороны, то можно записать

$$m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2.$$

Но в соответствии со вторым законом Ньютона $m_1 \vec{a}_1 = \vec{F}_1$ — сила, действующая на первое тело, а $m_2 \vec{a}_2 = \vec{F}_2$ — сила, действующая на второе тело. Следовательно,

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

Это равенство выражает **третий закон Ньютона**:
тела действуют друг на друга с силами, равными по модулю и направленными в противоположные стороны.

Эти силы направлены вдоль прямой, соединяющей взаимодействующие тела (материальные точки).

4. Третий закон Ньютона говорит о том, что *силы всегда появляются парами*. Эти силы часто называют силами действия и противодействия. При этом безразлично, какую из двух сил назвать силой действия, а какую — силой противодействия.

Следует отметить, что силы действия и противодействия *приложены к разным телам* и поэтому не компенсируют друг друга. Так, в рассмотренном опыте (см. рис. 50) сила $\vec{F}_1$ приложена к магниту, а сила $\vec{F}_2$ — к бруску.

Силы, которые возникают при взаимодействии тел, являются *силами одной природы*. Например, если тело взаимодействует с Землёй, то Земля действует на него с силой тяготения и тело действует на Землю с силой тяготения. Лежащая на столе книга действует на стол с силой упругости, и стол действует на книгу также с силой упругости.

5. Третий закон Ньютона так же, как и второй закон, выполняется в инерциальных системах отсчёта.

В книге Галилео Галилея «Диалог о двух главнейших системах мира — Птолемеевой и Коперниковой» один из героев по имени Сальвиати рассуждает о явлениях, которые можно наблюдать в трюме корабля: падение капель воды, полёт бабочек, движение мяча и т. д. Он говорит: «Наблюдайте хорошенько за всем этим и заставьте привести в движение корабль с какой угодно быстротой. Если движение будет равномерным, то вы не заметите ни малейшей перемены во всех указанных действиях и ни по



одному из них не в состоянии будете судить, движется ли корабль». Таким образом, в этих словах содержится утверждение о том, что *никакими механическими опытами невозможно установить, покоится тело или движется равномерно и прямолинейно — механические явления в таких системах отсчёта протекают одинаково при одинаковых начальных условиях.*

При переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой не изменяются ни ускорение, ни масса тела, ни действующая на него сила. Следовательно, можно утверждать, что законы Ньютона имеют один и тот же вид в любой инерциальной системе отсчёта. Обобщим этот вывод и на другие законы механики:

законы механики одинаковы для всех инерциальных систем отсчёта, т. е. все механические явления протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчёта при одинаковых начальных условиях.

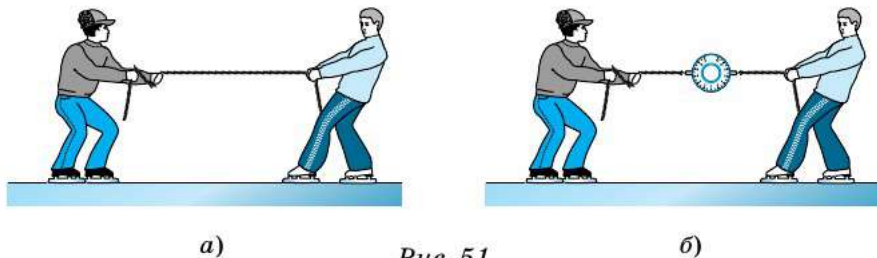
Это утверждение называют **принципом относительности Галилея.**

Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте третий закон Ньютона.
2. Можно ли найти равнодействующую сил действия и противодействия?
3. Что можно сказать о природе сил действия и противодействия?
4. В каких системах отсчёта выполняется третий закон Ньютона?
5. Сформулируйте принцип относительности Галилея.

Задание 13

1. Объясните, как осуществляется перемещение человека по земле. Нарисуйте идущего человека и изобразите все действующие на него при ходьбе силы.
2. Два мальчика стоят на коньках на льду и натягивают верёвку, держа её за концы (рис. 51, а). Сделайте рисунок и изобразите



действующие на мальчиков и на верёвку силы, которые равны по третьему закону Ньютона. Предположим, что верёвку разрезали посередине и соединили с динамометром (рис. 51, б). Что покажет динамометр, если сила, с которой натягивает верёвку один из мальчиков, равна 40 Н?

3. Вам известно, что Земля и Луна притягиваются друг к другу. Сравните силу, действующую со стороны Земли на Луну, с силой, действующей со стороны Луны на Землю.

§ 15. Движение искусственных спутников Земли

- ✓ Какие силы называют силами всемирного тяготения?
- ✓ Какую силу называют силой тяжести?

1. Вы уже знаете, что силы, с которыми все тела притягиваются друг к другу, называют **силами всемирного тяготения** или **гравитационными силами**.

Закон всемирного тяготения был установлен Ньютоном, и он утверждает, что

сила всемирного тяготения прямо пропорциональна произведению масс взаимодействующих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

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

где m_1 и m_2 — массы тел, r — расстояние между ними, G — гравитационная постоянная.

Гравитационная постоянная численно равна силе притяжения двух тел массой 1 кг каждое, находящихся на расстоянии 1 м друг от друга.

Значение гравитационной постоянной установлено опытным путём, оно равно $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$.

Закон всемирного тяготения справедлив для тел, которые можно считать материальными точками. Также закон применим к однородным шарам. В этом случае расстоянием между телами является расстояние между центрами шаров.



2. Все тела притягиваются к Земле. Силу, с которой Земля притягивает к себе тела, называют **силой тяжести**:

$$\mathbf{F}_{\text{тяж}} = m\mathbf{g}.$$

Считая Землю однородным шаром, а тело, находящееся на поверхности Земли, — материальной точкой (размер тела много меньше размеров Земли), можно вычислить силу тяжести из закона всемирного тяготения:

$$F_{\text{тяж}} = G \frac{M_3 m}{R_3^2},$$

где M_3 — масса Земли, m — масса тела, R_3 — радиус Земли. Приравняв правые части записанных равенств, получим:

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

Полученная формула позволяет вычислить ускорение свободного падения тела, находящегося на поверхности Земли и на любой планете. Из неё следует, что ускорение свободного падения зависит от расстояния тела до центра Земли (планеты) и её массы.

Если тело поднято на высоту h относительно поверхности Земли, то ускорение свободного падения вычисляется по формуле:

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

По этой же формуле можно вычислить ускорение свободного падения на любой планете, подставив вместо массы и радиуса Земли соответственно массу и радиус планеты.

3. Вы могли наблюдать, что любое тело, брошенное горизонтально с некоторой высоты над поверхностью Земли, через некоторое время падает на Землю. Чем больше скорость, с которой тело бросают, тем дальше от точки бросания оно упадёт. Если постепенно увеличивать скорость бросания тела, то при некотором её значении тело не упадёт на Землю, а будет двигаться вокруг неё по окружности. Причиной этого является то, что, с одной стороны, брошенное тело притягивается к Земле и падает на

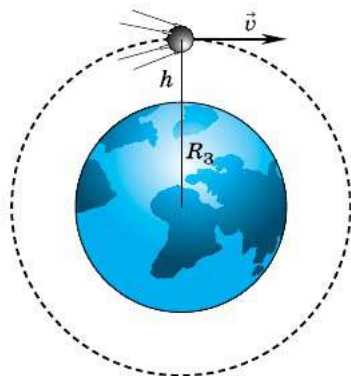


Рис. 52

неё, а с другой — поверхность Земли, из-за того что она имеет шарообразную форму, несколько удаляется от тела, уходит из-под него. В результате тело будет двигаться вокруг Земли на расстоянии h от её поверхности по окружности радиусом $R_3 + h$ (рис. 52).

4. Возникает вопрос: какую скорость следует сообщить телу в горизонтальном направлении для того, чтобы оно вращалось вокруг Земли, т. е. стало её искусственным спутником?

Скорость, которую нужно сообщить телу для того, чтобы оно стало искусственным спутником Земли, называют первой космической скоростью.

Выведем формулу для расчёта первой космической скорости.

Тело движется по окружности с постоянной по модулю скоростью $\vec{v}$, поэтому его ускорение — центростремительное и равно:

$$a = \frac{v^2}{R_3 + h}.$$

Это ускорение телу сообщает сила всемирного тяготения

$F = G \frac{M_3 m}{(R_3 + h)^2}$. По второму закону Ньютона

$$F = ma = m \frac{v^2}{R_3 + h}.$$

Тогда

$$m \frac{v^2}{R_3 + h} = G \frac{M_3 m}{(R_3 + h)^2}; v^2 = G \frac{M_3}{R_3 + h}.$$

Откуда

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

Если спутник запускается вблизи поверхности Земли, то высота h (300—500 км) над поверхностью Земли много меньше радиуса Земли $R_3 = 6,4 \cdot 10^6$ м.

Следовательно,

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

Поскольку вблизи поверхности Земли ускорение свободного падения $g = G \frac{M_3}{R_3^2}$, то

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



Подставив в эту формулу значения, получим:

$$v = \sqrt{9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}} \approx 7900 \text{ м/с} \approx 7,9 \text{ км/с}.$$

Это и есть **первая космическая скорость**. Получив такую скорость в горизонтальном направлении на небольшой высоте над поверхностью Земли, тело становится её искусственным спутником.

5. Первый в мире искусственный спутник Земли был запущен в Советском Союзе 4 октября 1957 г. Он имел форму шара диаметром 58 см, его масса составляла 83,6 кг. Этот спутник совершил около 1400 оборотов вокруг Земли, пролетев в общей сложности почти 60 млн км. Запуск первого искусственного спутника Земли явился огромным достижением нашей страны в освоении космического пространства.

В настоящее время в околоземном пространстве движутся тысячи спутников, запущенных учёными в научно-исследовательских (спутники серии «Космос», «Протон» и др.) и практических целях: для осуществления теле- и радиосвязи (спутники серии «Молния», «Радуга», «Горизонт» и др.); для исследования процессов, происходящих в земной атмосфере, и составления прогнозов погоды (серии «Метеор», «Прогноз» и др.) и т. д.

Вопросы для самопроверки



1. Сформулируйте закон всемирного тяготения.
2. Каковы границы применимости закона всемирного тяготения?
3. Каков физический смысл гравитационной постоянной?
4. Какую скорость называют первой космической? Чему она равна?
5. Когда был запущен первый искусственный спутник Земли?

Задание 14

1. Чему равна сила тяготения между Землёй и Луной, если масса Земли $6 \cdot 10^{24}$ кг, масса Луны $7,4 \cdot 10^{22}$ кг, среднее расстояние от Луны до Земли $3,8 \cdot 10^8$ м? Радиусами Луны и Земли пренебречь.
2. Чему равно ускорение свободного падения на Луне? Радиус Луны $1,7 \cdot 10^6$ м.
- 3*. На каком расстоянии от Земли сила притяжения тела к Земле равна силе притяжения этого тела к Луне?
4. Чему должна быть равна первая космическая скорость для того, чтобы запустить с поверхности Марса его искусственный спутник? Радиус Марса составляет 0,53 радиуса Земли, масса Марса — 0,11 массы Земли.

§ 16. Невесомость и перегрузки

- ✓ Какую силу называют силой упругости?
- ✓ Вспомните закон Гука.
- ✓ Какую силу называют весом тела?

1. Как вы уже знаете из курса физики 7 класса, силу, с которой тело, вследствие его притяжения к Земле, действует на опору или подвес, называют **весом тела**.

Если тело, подвешенное на нити или помещённое на опору, покоится или движется равномерно и прямолинейно, то его вес по модулю равен силе тяжести:

$$P = mg.$$

Вес тела приложен к опоре или подвесу, в отличие от силы тяжести, приложенной к телу. Вес и сила тяжести имеют не только разные точки приложения, но и разную природу: сила тяжести — гравитационная сила, а вес — сила упругости.

2. Предположим теперь, что тело вместе с опорой или подвесом движется относительно Земли с ускорением. Будут ли в этом случае равны вес тела и сила тяжести?

Рассмотрим движение человека в лифте. Пусть лифт с ускорением $\vec{a}$ движется вниз (рис. 53). В инерциальной системе отсчёта, связанной с Землёй, на человека действуют сила тяжести, направленная вниз, и сила упругости со стороны пола лифта, направленная вверх. Силу упругости в этом случае называют **силой реакции опоры** и обозначают буквой $\vec{N}$. Равнодействующая этих сил сообщает человеку ускорение.

Пользуясь вторым законом Ньютона, можно записать в векторной форме:

$$\begin{aligned}\vec{F} &= m\vec{a}, \\ \vec{F}_{\text{тяж}} + \vec{N} &= m\vec{a}.\end{aligned}$$

Направим ось Y вертикально вниз и запишем это уравнение в проекциях на ось, учитывая, что $F_{\text{тяж}} = mg$, проекции ускорения и силы тяжести на ось Y положительны, а проекция силы реакции опоры отрицательна. Получим:

$$mg - N = ma.$$

Выразим силу реакции опоры:

$$N = mg - ma = m(g - a).$$

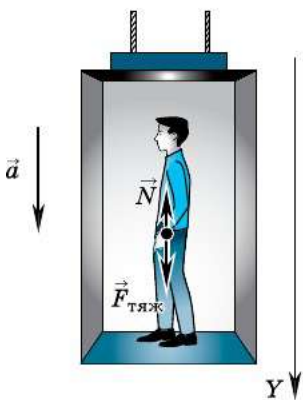


Рис. 53

По третьему закону Ньютона вес тела по модулю равен силе реакции опоры:

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

Таким образом, *если тело вместе с опорой или подвесом движется с ускорением, направленным так же, как и ускорение свободного падения, то его вес меньше силы тяжести, т. е. меньше веса покоящегося тела.*

Уменьшение веса вы испытываете, находясь в лифте, в момент начала его движения вниз.

Если ускорение тела равно ускорению свободного падения $a = g$, то вес тела $P = 0$. Такое состояние называют состоянием **невесомости**. В состоянии невесомости пребывают космонавты в космическом корабле во время полёта, поскольку они движутся вокруг Земли с центростремительным ускорением, равным ускорению свободного падения.

Но не только космонавты испытывают состояние невесомости. В таком состоянии может находиться бегун в короткие промежутки времени, когда обе ноги оторваны от земли; прыгун с трамплина во время полёта.

3. Рассмотрим ещё раз движение лифта и стоящего в нём человека. Но только теперь лифт с ускорением $\vec{a}$ движется вверх (рис. 54).

Пользуясь вторым законом Ньютона, можно записать:

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

Направив ось Y вертикально вниз, запишем это уравнение в проекциях на ось:

$$mg - N = -ma;$$

$$N = mg + ma = m(g + a).$$

Поскольку $P = N$, то

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

Таким образом, *если тело вместе с опорой или подвесом движется с ускорением, направленным противоположно ускорению свободного падения, то его вес больше силы тяжести, т. е. больше веса покоящегося тела.*

Увеличение веса тела, вызванное движением с ускорением, называют **перегрузкой**.

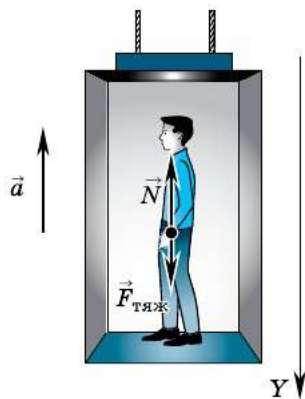


Рис. 54

Перегрузку вы испытываете в лифте, в момент начала его движения вверх. Огромные перегрузки испытывают космонавты и пилоты реактивных самолётов при взлёте и посадке; лётчики, выполняющие на самолёте фигуру высшего пилотажа «мёртвая петля» в нижней и верхней её точках. Для того чтобы уменьшить давление на скелет космонавтов при взлёте, сделаны специальные кресла, в которых космонавты находятся в полулежачем положении. При этом сила давления, которая действует на космонавта, распределяется на большую площадь, и давление на скелет становится меньше, чем в том случае, когда космонавт находится в сидячем положении.

4. Пример решения задачи

Каков вес лётчика массой 70 кг, выполняющего «мёртвую петлю», в нижней и верхней точках траектории, если радиус петли 200 м, а скорость самолёта при прохождении петли 100 м/с?

Дано:

$$m = 70 \text{ кг}$$

$$R = 200 \text{ м}$$

$$v = 100 \text{ м/с}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$P_1 - ?$$

$$P_2 - ?$$

Решение:

На лётчика в нижней и верхней точках траектории действуют сила тяжести $\vec{F}_{\text{тяж}}$ и сила реакции со стороны кресла $\vec{N}$ (рис. 55). Сила реакции опоры по третьему закону Ньютона равна по модулю весу лётчика: $P = N$.

В соответствии со вторым законом Ньютона можно записать:

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

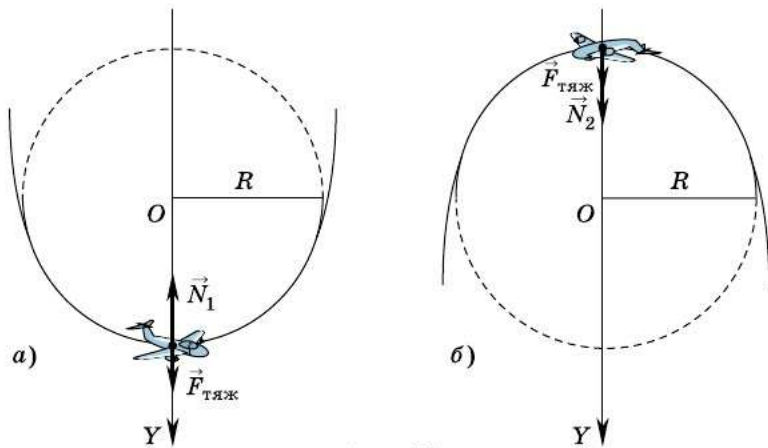


Рис. 55

Для нижней точки траектории это уравнение в проекциях на ось OY (рис. 55, a) будет иметь вид:

$$-N_1 + F_{\text{тяж}} = -ma, \text{ или } N_1 - mg = ma.$$

Следовательно,

$$P_1 = N_1 = ma + mg = m(a + g).$$

Для верхней точки траектории (рис. 55, b) можно записать:

$$N_2 + F_{\text{тяж}} = ma.$$

Следовательно,

$$P_2 = N_2 = ma - mg = m(a - g).$$

Поскольку $a = \frac{v^2}{R}$, то

$$P_1 = m\left(\frac{v^2}{R} + g\right); \quad P_2 = m\left(\frac{v^2}{R} - g\right).$$

$$P_1 = 70 \text{ кг} \cdot \left(\frac{(100 \text{ м/с})^2}{200 \text{ м}} + 10 \text{ м/с}^2\right) = 4200 \text{ Н};$$

$$P_2 = 70 \text{ кг} \cdot \left(\frac{(100 \text{ м/с})^2}{200 \text{ м}} - 10 \text{ м/с}^2\right) = 2800 \text{ Н}.$$

Если сила тяжести, действующая на лётчика,

$$F_{\text{тяж}} = 70 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 = 700 \text{ Н},$$

то его вес в нижней точке траектории в 6 раз больше, чем сила тяжести: $\frac{P_1}{F_{\text{тяж}}} = \frac{4200 \text{ Н}}{700 \text{ Н}} = 6$. Говорят, что лётчик испытывает шестикратную перегрузку.

В верхней точке траектории лётчик испытывает четырёхкратную перегрузку: $\frac{P_2}{F_{\text{тяж}}} = \frac{2800 \text{ Н}}{700 \text{ Н}} = 4$.

Ответ: $P_1 = 4200 \text{ Н}$; $P_2 = 2800 \text{ Н}$.

Вопросы для самопроверки

1. Что называют весом тела? Какова природа веса тела?
2. В каком случае вес тела по модулю равен силе тяжести?

3. Как изменяется вес тела при его движении с ускорением, направленным вверх; вниз?
4. Какое состояние называют состоянием невесомости? Когда оно наступает?
5. Какое состояние называют перегрузкой? Когда испытывают перегрузки?

Задание 15

1. Лифт начинает движение вниз с ускорением 2 м/с^2 . Чему равен вес стоящего в этом лифте человека массой 60 кг ?
2. С какой силой автомобиль массой 1 т давит на середину выпуклого моста, имеющего радиус кривизны 50 м ? Скорость автомобиля 72 км/ч .
3. Камень массой 400 г вращают равномерно в вертикальной плоскости на верёвке длиной 1 м со скоростью 2 м/с (рис. 56). Чему равна сила натяжения верёвки при прохождении камнем верхней и нижней точек траектории?



Рис. 56

§ 17. Движение тела под действием нескольких сил

- ✓ Какую силу называют силой трения?
- ✓ Какие виды трения вам известны?

1. Обычно на тело действуют одновременно несколько сил. Наряду с силами тяжести и упругости почти всегда действует сила трения. Учитывать силу трения особенно необходимо в случаях, когда рассматривается движение транспорта.

Хорошо известно, что для избежания аварий следует сохранять определённую дистанцию между автомобилями; в дождливую погоду или в гололедицу она должна быть больше, чем в сухую погоду. Возникают вопросы: какой должна быть эта дистанция и как она зависит от скорости движения автомобиля? Чтобы на них ответить, рассмотрим задачу.

Пример решения задачи

Автомобиль, имея скорость 54 км/ч , начинает тормозить. Определите время торможения и тормозной путь, если коэффициент трения $\mu = 0,1$.



Дано:

$$v_0 = 54 \text{ км/ч}$$

$$v = 0$$

$$\mu = 0,1$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$t - ?$$

$$s - ?$$

СИ

$$15 \text{ м/с}$$

Решение:

На автомобиль действуют сила трения, направленная против его движения, сила тяжести и сила реакции опоры, направленные по вертикальной прямой.

Свяжем инерциальную систему отсчёта XOY с Землёй (рис. 57). Нача-

ло отсчёта координаты совместим с точкой, в которой автомобиль начал торможение, начало отсчёта времени — с моментом начала торможения.

Пользуясь вторым законом Ньютона, можно записать в векторной форме:

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

Найдём проекции величин, входящих в уравнение $(F_{\text{тяж}})_x = 0$, $(F_{\text{тяж}})_y = -F_{\text{тяж}} = -mg$; $N_x = 0$, $N_y = N$; $(F_{\text{тр}})_x = -F_{\text{тр}}$, $(F_{\text{тр}})_y = 0$; $a_x = -a$, $a_y = 0$.

Запишем это уравнение в проекциях на оси координат:

$$\text{ось } OX: -F_{\text{тр}} = -ma, \text{ или } F_{\text{тр}} = ma$$

$$\text{ось } OY: N - mg = 0, \text{ или } N = mg.$$

Из последнего выражения видно, что поскольку в вертикальной плоскости автомобиль не движется, то сила тяжести и сила реакции опоры компенсируют друг друга.

Ускорение автомобиля определяется по формуле: $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$.

В проекциях на ось OX можно записать:

$$-a = -\frac{v_0}{t}, \text{ или } a = \frac{v_0}{t}, \text{ поскольку } v = 0.$$

Запишем выражение для силы трения:

$$F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mg.$$

В уравнение $F_{\text{тр}} = ma$ подставим выражения для $F_{\text{тр}}$ и a , получим

$$\mu mg = m \frac{v_0}{t}.$$

Откуда

$$t = \frac{v_0}{\mu g};$$

$$t = \frac{15 \text{ м/с}}{0,1 \cdot 10 \text{ м/с}^2} = 15 \text{ с}.$$

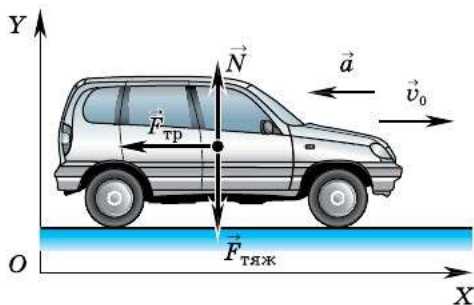


Рис. 57

Мы получили, что время торможения зависит от скорости, с которой едет автомобиль, и от коэффициента трения.

Путь, который автомобиль проходит до остановки, — тормозной путь — равен проекции на ось OX его перемещения и вычисляется по формуле:

$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}, \text{ или } s = \frac{-v_0^2}{-2a} = \frac{v_0^2}{2a}.$$

Ускорение $a = \mu g$ (получите это самостоятельно). Подставим его в формулу пути и получим

$$s = \frac{v_0^2}{2\mu g}.$$

Тормозной путь прямо пропорционален квадрату скорости, с которой едет автомобиль, и обратно пропорционален коэффициенту трения.

$$s = \frac{15^2 \text{ м}^2/\text{с}^2}{2 \cdot 0,1 \cdot 10 \text{ м}/\text{с}^2} = 112,5 \text{ м}.$$

Ответ: $t = 15 \text{ с}$; $s = 112,5 \text{ м}$.

Переходя улицу, помните, что для полной остановки автомобиля нужны определённое время и тормозной путь. При этом значения этих величин тем больше, чем больше скорость автомобиля. В гололедицу при малом коэффициенте трения время и тормозной путь увеличиваются, поскольку уменьшается коэффициент трения; поэтому важно строго соблюдать ограничения скорости.

2. Очень часто встречаются случаи, когда в движении участвуют несколько тел, связанных между собой. Примером такого движения может быть движение автомобиля при его буксировке, движение вагонов поезда.

Рассмотрим несколько задач на движение связанных тел.

Пример решения задачи

1. К концам нити, перекинутой через неподвижный блок, прикреплены два груза массами $0,4$ и $0,6$ кг. Определите ускорение грузов и силу натяжения нити. Считать, что масса нити равна нулю, нить нерастяжима и скользит по блоку без трения.



Дано:

$$m_1 = 0,4 \text{ кг}$$
$$m_2 = 0,6 \text{ кг}$$
$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

a — ?

T — ?

Решение:

Инерциальную систему отсчёта свяжем с Землёй. Тело массой m_1 взаимодействует с Землёй и с нитью, на него действуют сила тяжести $\vec{F}_{\text{тяж1}}$ и сила натяжения нити $\vec{T}_1$.

Тело массой m_2 также взаимодействует с Землёй и нитью. На него действуют сила тяжести

$\vec{F}_{\text{тяж2}}$ и сила натяжения нити $\vec{T}_2$. Если систему грузов предоставить самой себе, то груз массой m_1 станет двигаться вверх, а груз массой m_2 — вниз.

Для каждого тела в соответствии со вторым законом Ньютона запишем уравнение в векторной форме:

$$\vec{F}_{\text{тяж1}} + \vec{T}_1 = m_1 \vec{a}_1;$$

$$\vec{F}_{\text{тяж2}} + \vec{T}_2 = m_2 \vec{a}_2.$$

В проекциях на ось Y (рис. 58) эти уравнения можно записать:

$$F_{\text{тяж1}} - T_1 = -m_1 a_1;$$

$$F_{\text{тяж2}} - T_2 = m_2 a_2.$$

Поскольку нить скользит по блоку без трения и её масса пренебрежимо мала, она действует на грузы с одинаковыми силами $T_1 = T_2 = T$. Так как нить нерастяжима, то ускорения грузов по модулю одинаковы $a_1 = a_2 = a$.

Получим:

$$m_1 g - T = -m_1 a;$$

$$m_2 g - T = m_2 a.$$

Сложим записанные уравнения почленно, умножив первое на (-1) :

$$m_2 g - m_1 g = m_1 a + m_2 a.$$

Откуда

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

Выразим силу натяжения нити T из первого уравнения:

$$T = m_1 g + m_1 a.$$

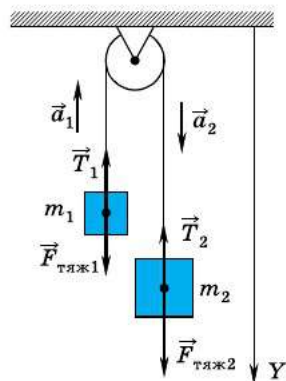


Рис. 58

Подставив выражение для ускорения, получим:

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

$$a = \frac{(0,6 \text{ кг} - 0,4 \text{ кг}) \cdot 10 \text{ м/с}^2}{0,4 \text{ кг} + 0,6 \text{ кг}} = 2 \text{ м/с}^2;$$

$$T = \frac{2 \cdot 0,4 \text{ кг} \cdot 0,6 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2}{0,4 \text{ кг} + 0,6 \text{ кг}} = 4,8 \text{ Н}.$$

Ответ: $a = 2 \text{ м/с}^2$; $T = 4,8 \text{ Н}$.

2. Чему равно удлинение троса при буксировке легкового автомобиля массой 1 т с ускорением 1 м/с^2 , если жёсткость троса 75 кН/м , а коэффициент трения $0,2$?

Дано:

$$m = 1 \text{ т}$$

$$a = 1 \text{ м/с}^2$$

$$k = 75 \text{ кН/м}$$

$$\mu = 0,2$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

x — ?

СИ

$$10^3 \text{ кг}$$

$$7,5 \cdot 10^4 \text{ Н/м}$$

Решение:

На легковой автомобиль действуют сила тяжести, сила реакции опоры, сила упругости со стороны троса и сила трения. Пользуясь вторым законом Ньютона, можно записать в векторной форме:

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

Запишем это уравнение в проекциях на ось OX (рис. 59). Учтём при этом, что проекция силы упругости положительна, проекция силы трения отрицательна, а сила тяжести и сила реакции опоры, действующие на автомобиль в вертикальной плоскости, компенсируют друг друга.

Получим:

$$F_{\text{упр}} - F_{\text{тр}} = ma.$$

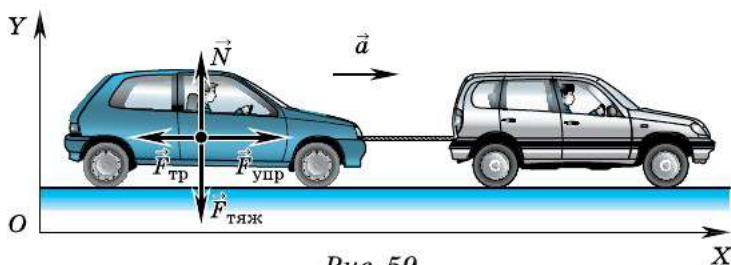


Рис. 59

Подставим в полученное равенство выражения для силы упругости $F_{\text{упр}} = kx$ и силы трения $F_{\text{тр}} = \mu mg$:

$$kx - \mu mg = ma.$$

Выразим удлинение троса: $x = \frac{m(a + \mu g)}{k}$;

$$x = \frac{10^3 \text{ кг} \cdot (1 \text{ м/с}^2 + 0,2 \cdot 10 \text{ м/с}^2)}{7,5 \cdot 10^4 \text{ Н}} = 0,04 \text{ м}.$$

Ответ: $x = 0,04 \text{ м}$.

Задание 16



1. Брусок массой 500 г скользит равномерно по деревянной площадке под действием силы тяги, равной 2,5 Н. Чему равен коэффициент трения бруска о дерево?
2. Ребёнок массой 20 кг, скатившись с горы на санках, проехал по горизонтальной поверхности до остановки 15 м за 10 с. Чему равен коэффициент трения полозьев санок о снег? Чему равна сила трения при движении санок?
3. К концам нити, перекинутой через неподвижный блок, прикреплены два груза массой 200 г каждый. На один из грузов положили перегрузок массой 50 г. Определите ускорение грузов и силу натяжения нити, считая, что массы нити и блока равны нулю и нить нерастяжима. *Чему равен вес перегрузка?
4. Два сцепленных вагона массой 2 т каждый соединены с локомотивом массой 3 т. Состав движется с ускорением 3 м/с². Чему равны сила тяги, развиваемая локомотивом, сила упругости, возникающая в сцепке между вагонами и в сцепке между вагоном и локомотивом? Силой трения пренебречь.

Темы докладов и проектов



1. Движение тел в неинерциальных системах отсчёта.
2. «Математические начала натуральной философии» Ньютона.
3. Искусственные спутники Земли и исследование околоземного пространства.

§ 18. Импульс тела. Закон сохранения импульса

- ✓ Что называют силой?
- ✓ От чего зависит результат действия силы?

1. Как вам известно, результат действия силы зависит от её модуля, точки приложения и направления. Действительно,

чем больше сила, действующая на тело, тем большее ускорение при прочих равных условиях оно приобретает. От направления силы зависит направление ускорения: оно всегда направлено так же, как и сила. Результат действия силы зависит и от точки её приложения: мы легко открываем дверь, приложив небольшую силу к ручке, а если ту же силу приложить около петель, на которых висит дверь, то её можно и не открыть.

Опыты и наблюдения свидетельствуют о том, что результат действия силы (взаимодействия) зависит не только от модуля силы, но и от времени её действия. Проведем опыт. К штативу на нити подвесим груз, к которому снизу привязана ещё одна нить (рис. 60). Если за нижнюю нить резко дернуть, то она оборвётся, а груз останется висеть на верхней нити. Если же теперь медленно потянуть за нижнюю нить, то оборвётся верхняя нить. Импульсом силы называют векторную физическую величину, равную произведению силы и времени её действия $\vec{F}t$.

Единица импульса силы в СИ — *ньютон-секунда* ($1 \text{ Н} \cdot \text{с}$):

$$[Ft] = [F][t] = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ с} = 1 \text{ Н} \cdot \text{с}.$$

Вектор импульса силы совпадает по направлению с вектором силы.

2. Вы также знаете, что результат действия силы зависит от массы тела, на которое эта сила действует. Так, чем больше масса тела, тем меньшее ускорение оно приобретает при действии одной и той же силы.

Рассмотрим пример. Представим себе, что на рельсах стоит гружёная платформа. С ней сталкивается движущийся с некоторой скоростью вагон. В результате столкновения платформа приобретёт ускорение и переместится на некоторое расстояние. Если же движущийся с той же скоростью вагон столкнётся с лёгкой вагонеткой, то она в результате взаимодействия переместится на существенно большее расстояние, чем гружёная платформа.

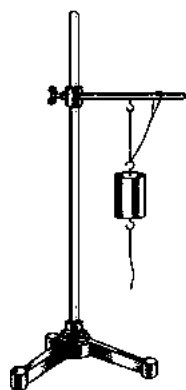


Рис. 60

Другой пример. Предположим, что к мишени подлетает пуля со скоростью 2 м/с . Пуля, вероятнее всего, отскочит от мишени, оставив на ней лишь небольшую вмятину. Если же пуля будет лететь со скоростью 100 м/с , то она пробьёт мишень.

Таким образом, результат взаимодействия тел зависит от их массы и скорости движения.

Импульсом тела называют векторную физическую величину, равную произведению массы тела и его скорости:

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

Единица импульса тела в СИ — *килограмм-метр в секунду* ($1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$):

$$[p] = [m][v] = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/с} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

Направление импульса тела совпадает с направлением его скорости.

Импульс — величина относительная, его значение зависит от выбора системы отсчёта. Это и понятно, поскольку относительной величиной является скорость.

3. Выясним, как связаны импульс силы и импульс тела.

По второму закону Ньютона:

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

Подставив в эту формулу выражение для ускорения $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$, получим:

$$\vec{F} = \frac{m(\vec{v} - \vec{v}_0)}{t}, \text{ или } \vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0.$$

В левой части равенства стоит импульс силы, в правой части равенства — разность конечного и начального импульсов тела, т. е. изменение импульса тела.

Таким образом,

импульс силы равен изменению импульса тела:

$$\vec{F}t = \Delta(m\vec{v}).$$

Это иная формулировка второго закона Ньютона. Именно так сформулировал его Ньютон.

4. Предположим, что сталкиваются два шарика, движущиеся по столу. Любые взаимодействующие тела, в данном случае шарики, образуют *систему*. Между телами системы действуют силы: сила действия $\vec{F}_1$ и сила противодействия $\vec{F}_2$. При этом сила действия $\vec{F}_1$ по третьему закону Ньютона равна силе противодействия $\vec{F}_2$ и направлена противоположно ей: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$.



Силы, с которыми тела системы взаимодействуют между собой, называют внутренними силами.

Помимо внутренних сил, на тела системы действуют внешние силы. Так, взаимодействующие шарики притягиваются к Земле, на них действует сила реакции опоры. Эти силы являются в данном случае внешними силами. Во время движения на шарики действуют сила сопротивления воздуха и сила трения. Они тоже являются внешними силами по отношению к системе, которая в данном случае состоит из двух шариков.

Внешними силами называют силы, которые действуют на тела системы со стороны других тел.

Будем рассматривать такую систему тел, на которую не действуют внешние силы.

Замкнутой системой называют систему тел, взаимодействующих между собой и не взаимодействующих с другими телами.

В замкнутой системе действуют только внутренние силы.

5. Рассмотрим взаимодействие двух тел, составляющих замкнутую систему. Масса первого тела m_1 , его скорость до взаимодействия $\vec{v}_{01}$, после взаимодействия $\vec{v}_1$. Масса второго тела m_2 , его скорость до взаимодействия $\vec{v}_{02}$, после взаимодействия $\vec{v}_2$.

Силы, с которыми взаимодействуют тела, по третьему закону Ньютона равны: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$. Время действия сил одно и то же, поэтому

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

Для каждого тела запишем второй закон Ньютона:

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

Поскольку левые части равенств равны, то равны и их правые части, т. е.

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

Преобразовав это равенство, получим:

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

В левой части равенства стоит сумма импульсов тел до взаимодействия, в правой — сумма импульсов тел после взаимодействия. Как видно из этого равенства, импульс каждого тела при



взаимодействии изменился, а сумма импульсов осталась неизменной.

Геометрическая сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, остаётся постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы.

В этом состоит закон сохранения импульса.

6. Замкнутая система тел — это модель реальной системы. В природе нет таких систем, на которые не действовали бы внешние силы. Однако в ряде случаев системы взаимодействующих тел можно рассматривать как замкнутые. Это возможно, когда время взаимодействия мало, а внешние силы ограничены (так что импульс внешних сил мал по сравнению с импульсами тел системы или изменениями этих импульсов), а также, если внешние силы компенсируют друг друга. Кроме того, может быть равна нулю проекция внешних сил на какое-либо направление, и тогда закон сохранения импульса выполняется для проекций импульсов взаимодействующих тел на это направление.

7. Пример решения задачи

Две железнодорожные платформы движутся навстречу друг другу со скоростями 0,3 и 0,2 м/с. Массы платформ соответственно равны 16 и 48 т. С какой скоростью и в каком направлении будут двигаться платформы после автосцепки?

Дано:	СИ	Решение:
$v_{01} = 0,3 \text{ м/с}$		Покажем на рисунке направление движения платформ до и после взаимодействия (рис. 61). Силы тяжести, действующие на платформы, и силы реакции опоры компенсируют друг друга. Систему из двух платформ
$v_{02} = 0,2 \text{ м/с}$		
$m_1 = 16 \text{ т}$	$1,6 \cdot 10^4 \text{ кг}$	
$m_2 = 48 \text{ т}$	$4,8 \cdot 10^4 \text{ кг}$	
$v_1 = v_2 = v$		
$v - ?$		

можно считать замкнутой и применить к ней закон сохранения импульса:

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

В проекциях на ось X можно записать:

$$m_1 v_{01x} + m_2 v_{02x} = (m_1 + m_2) v_x.$$

Так как $v_{01x} = v_{01}$, $v_{02x} = -v_{02}$, $v_x = -v$, то

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

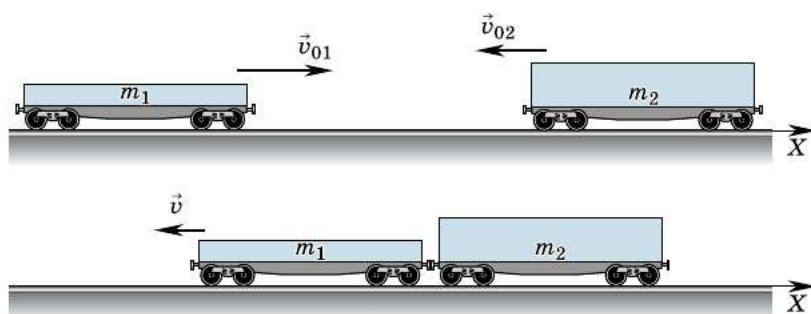


Рис. 61

Откуда

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

$$v = -\frac{1,6 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot 0,3 \text{ м/с} - 4,8 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot 0,2 \text{ м/с}}{1,6 \cdot 10^4 \text{ кг} + 4,8 \cdot 10^4 \text{ кг}} = 0,075 \text{ м/с}.$$

После сцепки платформы будут двигаться в ту сторону, в которую до взаимодействия двигалась платформа с большей массой.

Ответ: $v = 0,075 \text{ м/с}$; направлена в сторону движения платформы с большей массой.

Вопросы для самопроверки

1. Что называют импульсом силы?
2. Что называют импульсом тела?
3. Как связаны импульс силы и изменение импульса тела?
4. Какую систему тел называют замкнутой?
5. Сформулируйте закон сохранения импульса.
6. Каковы границы применимости закона сохранения импульса?

Задание 17

1. Чему равен импульс тела массой 5 кг, движущегося со скоростью 20 м/с?
2. Определите изменение импульса тела массой 3 кг за 5 с под действием силы 20 Н.
3. Определите импульс автомобиля массой 1,5 т, движущегося со скоростью 20 м/с в системе отсчёта, связанной: а) с неподвижным относительно Земли автомобилем; б) с автомобилем, движущимся в ту же сторону с такой же скоростью; в) с автомобилем, движущимся с такой же скоростью, но в противоположную сторону.
4. Мальчик массой 50 кг спрыгнул с неподвижной лодки массой 100 кг, расположенной в воде около берега. С какой скоростью



отъехала лодка от берега, если скорость мальчика направлена горизонтально и равна 1 м/с ?

5. Снаряд массой 5 кг , летевший горизонтально, разорвался на два осколка. Какова скорость снаряда, если осколок массой 2 кг при разрыве приобрёл скорость 50 м/с , а второй, массой 3 кг , — 40 м/с ? Скорости осколков направлены горизонтально.

§ 19. Реактивное движение

✓ Что называют импульсом тела?

✓ Вспомните закон сохранения импульса.

1. Вы, конечно, слышали такие слова, как «реактивный двигатель», «реактивное движение», «реактивный самолёт» и т. п. Выясним, что они означают. Представим, что на гладком льду на коньках стоит человек и бросает в горизонтальном направлении шары. Можно заметить, что при этом человек приходит в движение со скоростью, направленной противоположно скорости шаров.

Объяснить наблюдаемое явление можно, исходя из закона сохранения импульса. Пока человек не бросил шар, импульс системы тел «человек—шар» был равен нулю. После броска импульс этой системы в соответствии с законом сохранения импульса не изменился и остался равным нулю. Следовательно, модуль импульса шара равен модулю импульса человека, но направлены импульсы в противоположные стороны.

Значение скорости человека можно найти, если известна скорость шаров, а также масса человека и шаров.

Подобное движение можно наблюдать, если на водопроводный кран надеть резиновую трубку с изогнутым горизонтальным концом и открыть кран. Вода будет вытекать из трубки, а сама трубка отклоняться в сторону, противоположную направлению струи (рис. 62). Движение трубки при вытекании из неё воды является примером **реактивного движения**.

Реактивное движение можно продемонстрировать с помощью прибора, называемого *сегнеровым колесом* (рис. 63). Прибор состоит из конусообразного сосуда, насаженного на острие. Дно этого сосуда сделано в виде двух трубок, изогнутых под прямым углом. Вода, налитая в сосуд, выливается из трубок, а сосуд при этом начинает вращаться в сторону, про-



Рис. 62

тивоположную направлению вытекания воды.

Реактивное движение совершают головоногие моллюски, осьминоги, кальмары и каракатицы. Скорость движения некоторых кальмаров может превышать 50 км/ч.

2. Типичным примером реактивного движения является движение ракет. На рисунке 64 приведена схема ракеты. В головной части ракеты находится рабочий отсек, в котором располагается полезный груз. Большую часть ракеты занимают баки с горючим и окислителем. Топливо подаётся в камеру сгорания, где происходит химическая реакция. Газ, который при этом образуется, имеет высокую температуру и большое давление. Он вырывается наружу с очень большой скоростью через специальный канал — сопло.

Если пренебречь силой притяжения ракеты к Земле, которая много меньше, чем внутренние силы, возникающие при выбросе газа, то можно считать ракету и газ замкнутой системой. Поскольку до старта суммарный импульс ракеты и топлива равен нулю, то по закону сохранения импульса нулю должен быть равен суммарный импульс ракеты и выбрасываемого из неё газа. Следовательно, импульс ракеты и импульс выбрасываемого газа равны по модулю и направлены в противоположные стороны.

Пусть масса газа m_g , скорость истечения газа v_g , масса ракеты m_p , скорость ракеты v_p . Тогда

$$m_g v_g - m_p v_p = 0, \text{ или } m_g v_g = m_p v_p,$$

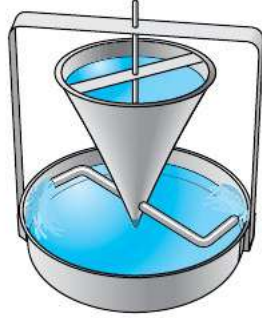


Рис. 63

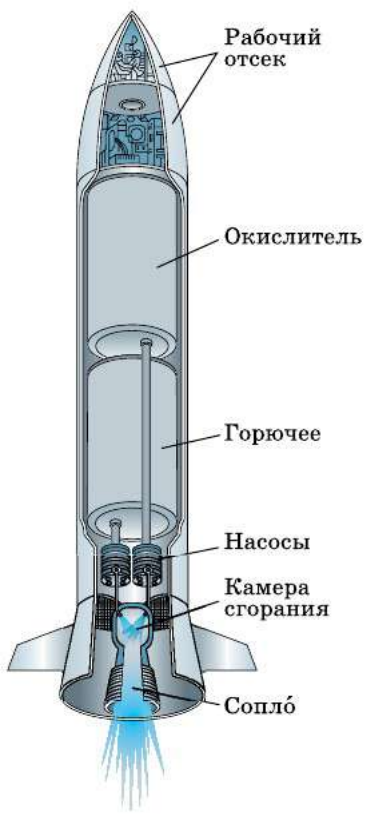


Рис. 64

откуда

$$v_p = \frac{m_r}{m_p} v_r.$$

Полученная формула позволяет рассчитать скорость ракеты, если известны масса ракеты и газов, а также скорость истечения газов.

3. Записывая формулу для скорости ракеты, мы считали, что весь газ выбрасывается из ракеты мгновенно. На самом деле газ вытекает постепенно, порциями. Это означает, что топливо какое-то время находится в ракете. Если учесть силу тяжести и силу сопротивления воздуха, действующие на ракету, то отношение массы топлива к массе ракеты будет значительно больше, чем получено из закона сохранения импульса. Расчёты показывают, что для достижения ракетой скорости, равной первой космической, масса топлива должна быть в 55 раз больше массы ракеты при скорости истечения газов 2000 м/с.

Поскольку бóльшую часть ракеты занимают баки с топливом, то по мере его выгорания баки становятся ненужным балластом, увеличивая общую массу ракеты, для сообщения им ускорения нужно расходовать топливо дополнительно. Для уменьшения массы ракеты и увеличения скорости движения ракеты делают многоступенчатыми. По мере выгорания топлива, находящегося в каждой ступени, эти ступени последовательно отделяются, и полёт продолжает оставшаяся часть ракеты.

4. Ракеты широко используются для запуска на орбиту искусственных спутников Земли, межпланетных космических станций и других аппаратов для исследования космического пространства. Идея использования ракет для этой цели была предложена в начале XX в. русским учёным **Константином Эдуардовичем Циолковским** (1875—1935). Она была практически реализована советскими учёными под руководством академика **Сергея Павловича Королёва** (1907—1966). С помощью ракеты 4 октября 1957 г. был выведен на орбиту первый искусственный спутник Земли. Эта ракета (её называют *ракетой-носителем*) имела массу 267 т, длину 29,2 м и состояла из двух ступеней.

12 апреля 1961 г. был совершён первый космический полёт с человеком на борту. **Юрий Алексеевич Гагарин** (1934—1968) облетел земной шар на космическом корабле «Восток», который был выведен на околоземную орбиту трёхступенчатой ра-

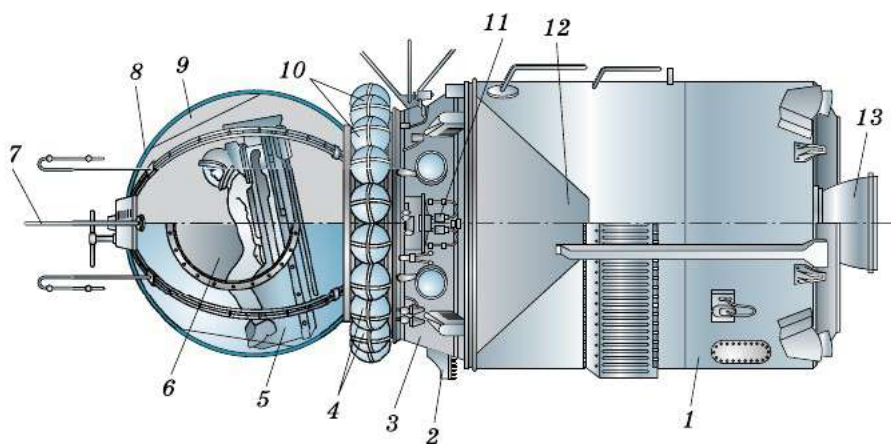


Рис. 65

1 — последняя ступень ракеты-носителя; 2 — сопла системы ориентации; 3 — приборный отсек; 4 — баллоны с кислородом и воздухом (предназначены для дыхания космонавта на случай разгерметизации спускаемого аппарата и для вентиляции скафандра); 5 — катапультируемое кресло; 6 — парашютный люк; 7 — антенна системы «Сигнал» (система служит для определения местонахождения корабля); 8 — спускаемый аппарат; 9 — входной люк; 10 — баллоны со сжатым газом для системы ориентации; 11 — узлы системы ориентации; 12 — тормозная двигательная установка; 13 — сопло двигателя последней ступени

кетой-носителем стартовой массой 287 т. Масса же космического корабля «Восток» составляла всего 4,73 т. На рисунке 65 приведена схема устройства одноместного космического корабля «Восток» с последней ступенью ракеты-носителя.

В настоящее время полёты человека в космос стали достаточно привычным явлением. На околоземных орбитах функционируют космические станции, на которых совершаются многодневные полёты со сменными экипажами, ведущими исследовательскую работу.

Вопросы для самопроверки

1. Приведите примеры реактивного движения.
2. Какой закон лежит в основе объяснения реактивного движения?
3. Почему в опыте с сегнеровым колесом оно вращается в сторону, противоположную направлению вытекания воды?

4. Каковы принцип действия и основные элементы конструкции ракеты?

5. Когда был совершён первый космический полёт с человеком на борту?

§ 20. Механическая работа и мощность

✓ Какую физическую величину называют работой?

✓ Что характеризует мощность?

1. Из курса физики 7 класса вы знаете, что если на тело действует сила и оно перемещается в направлении действия силы, то сила совершает механическую работу A , равную произведению модуля силы и модуля перемещения:

$$A = Fs.$$

Единица работы в СИ — *джоуль* (1 Дж):

$$[A] = [F][s] = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} = 1 \text{ Дж}.$$

За единицу работы принимают такую работу, которую совершает сила 1 Н на пути 1 м.

Из формулы следует, что механическая работа не совершается, если сила равна нулю (тело покоится или движется равномерно и прямолинейно) или перемещение равно нулю.

Предположим, что вектор силы, действующей на тело, составляет некоторый угол α с вектором перемещения (рис. 66). Так как в вертикальном направлении тело не перемещается, то проекция силы F_y на ось Y работу не совершает, а проекция силы F_x на ось X совершает работу, которая равна $A = F_x s_x$.

Поскольку $F_x = F \cos \alpha$, а $s_x = s$, то

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

Таким образом,

работа постоянной силы равна произведению модулей векторов силы и перемещения и косинуса угла между этими векторами.

2. Проанализируем полученную формулу работы.

Если угол $\alpha = 0^\circ$, то $\cos 0^\circ = 1$ и $A = Fs$. Совершённая работа положительна и её

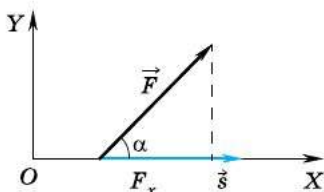


Рис. 66

значение максимально, если направление силы совпадает с направлением перемещения.

Если угол $\alpha = 90^\circ$, то $\cos 90^\circ = 0$ и $A = 0$. Сила не совершает работу, если она перпендикулярна направлению перемещения тела. Так, работа силы тяжести равна нулю при движении тела по горизонтальной плоскости. Нулю равна работа силы, сообщающей телу центростремительное ускорение при его движении по окружности с постоянной по модулю скоростью, так как эта сила в любой точке траектории перпендикулярна направлению движения тела.

Если угол $\alpha = 180^\circ$, то $\cos 180^\circ = -1$ и $A = -Fs$. Данный случай имеет место тогда, когда сила и перемещение направлены в противоположные стороны. Соответственно совершённая работа отрицательна и её значение максимально. Отрицательную работу совершает, например, сила трения скольжения, поскольку она направлена в сторону, противоположную направлению перемещения тела.

Если угол α между векторами силы и перемещения острый, то работа положительна; если угол α тупой, то работа отрицательна.

3. Получим формулу для расчёта работы силы тяжести. Пусть тело массой m свободно падает на Землю из точки A , находящейся на высоте h относительно поверхности Земли, и через некоторое время оказывается в точке B (рис. 67, а). Работа силы тяжести при этом равна

$$A = Fs = mgh.$$

В данном случае направление движения тела совпадает с направлением действующей на него силы, поэтому работа силы тяжести при свободном падении положительна.

Если тело движется вертикально вверх из точки B в точку A (рис. 67, б), то его перемещение направлено в сторону, противоположную силе тяжести, и работа силы тяжести отрицательна:

$$A = -mgh.$$

4. Работу силы можно вычислить, используя график зависимости силы от перемещения.

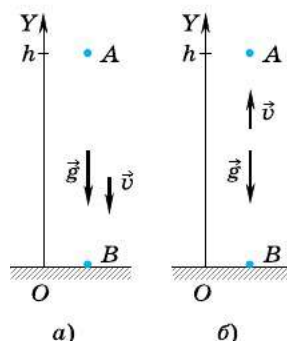


Рис. 67



Предположим, под действием постоянной силы тяжести тело совершает перемещение. Графиком зависимости модуля силы тяжести $F_{\text{тяж}}$ от модуля перемещения тела s является прямая, параллельная оси абсцисс (рис. 68). Найдём площадь выделенного прямоугольника. Она равна произведению длин двух его сторон: $S = F_{\text{тяж}} h = mgh$. С другой стороны, этой же величине равна работа силы тяжести $A = mgh$.

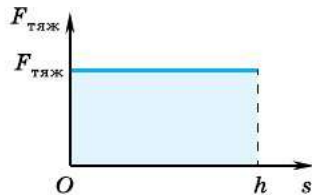


Рис. 68

Таким образом, *работа численно равна площади прямоугольника, ограниченного графиком, координатными осями и перпендикуляром, восстановленным к оси абсцисс в точке h.*

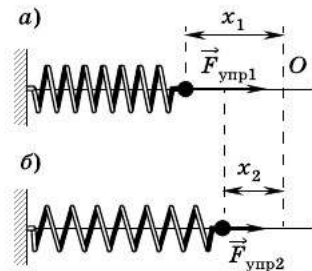


Рис. 69

Рассмотрим теперь случай, когда сила, действующая на тело, прямо пропорциональна перемещению. Такой силой, как известно, является сила упругости. Её модуль равен $F_{\text{упр}} = kx$, где x — удлинение тела.

Предположим, пружину, левый конец которой закреплён, сжали (рис. 69, а). При этом её правый конец сместился на x_1 . В пружине возникла сила упругости $F_{\text{упр1}}$, направленная вправо.

Если теперь предоставить пружину самой себе, то её свободный конец переместится вправо (рис. 69, б), удлинение пружины будет равно x_2 , а сила упругости $F_{\text{упр2}}$.

Вычислим работу силы упругости при перемещении конца пружины из точки с координатой x_1 в точку с координатой x_2 .

Используем для этого график зависимости $F_{\text{упр}}(x)$ (рис. 70). Работа силы упругости численно равна площади трапеции $ABCD$. Площадь трапеции равна произведению полусуммы оснований и высоты, т. е. $S = \frac{AB + CD}{2} \cdot AD$. В трапе-

ции $ABCD$ основания $AB = F_{\text{упр2}} = kx_2$, $CD = F_{\text{упр1}} = kx_1$, а высота $AD = x_1 - x_2$. Подставим в формулу площади трапеции эти величины:

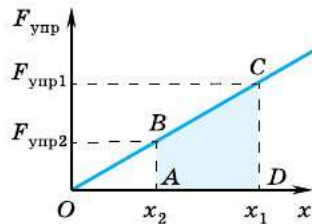


Рис. 70

$$S = \frac{kx_2 + kx_1}{2} (x_1 - x_2) = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}.$$

Таким образом, мы получили, что работа силы упругости равна:

$$A = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}.$$

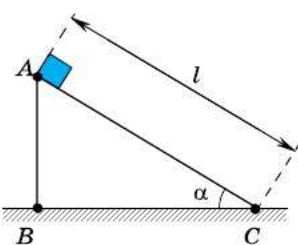


Рис. 71

5*. Предположим, что тело массой m перемещается из точки A в точку B (рис. 71), двигаясь сначала без трения по наклонной плоскости из точки A в точку C , а затем по траектории ABC : вертикально вниз из точки A в точку B и без трения горизонтально из точки B в точку C . При движении по наклонной плоскости работа силы тяжести равна: $A_{AC} = F_{\text{тяж}} l \sin \alpha$. Так как $l \sin \alpha = h$, то

$$A_{AC} = F_{\text{тяж}} h = mgh.$$

Работа силы тяжести при движении тела по траектории ABC равна $A_{ABC} = A_{AC} + A_{BC} = mgh + 0$. Работа силы тяжести на участке CB равна нулю, поскольку сила тяжести перпендикулярна перемещению. Таким образом,

$$A_{ABC} = mgh.$$

Работа силы тяжести при перемещении тела из точки A в точку C по разным траекториям равна: $A_{AC} = mgh$.

Полученный результат показывает, что *работа силы тяжести не зависит от формы траектории. Она зависит только от начального и конечного положений тела.*

Предположим теперь, что тело движется по замкнутой траектории $ABCA$ (см. рис. 71). При перемещении тела из точки A в точку B по траектории ACB работа силы тяжести равна $A_{ACB} = mgh$. При перемещении тела из точки B в точку A сила тяжести совершает отрицательную работу, которая равна $A_{BA} = -mgh$. Тогда работа силы тяжести на замкнутой траектории $A = A_{ACB} + A_{BA} = 0$.

Нулю равна и работа силы упругости на замкнутой траектории. Действительно, предположим, что недеформированную вначале пружину растянули и её длина увеличилась на x . Сила упругости при этом совершила работу $A_1 = \frac{kx^2}{2}$. При возвращении в состояние равновесия сила упругости совершает работу

$A_2 = -\frac{kx^2}{2}$. Суммарная работа силы упругости при растяжении пружины и её возвращении в недеформированное состояние равна нулю.

6. Работа силы тяжести и силы упругости на замкнутой траектории равна нулю.

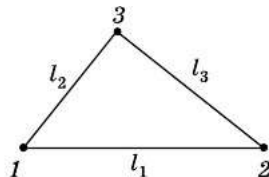


Рис. 72

Силы, работа которых на любой замкнутой траектории равна нулю (или не зависит от формы траектории), называют консервативными.

Силы, работа которых зависит от формы траектории, называют неконсервативными.

Неконсервативной является сила трения. Например, тело перемещается из точки 1 в точку 2 сначала по прямой 12 (рис. 72), а затем по ломаной линии 132. На каждом участке траектории сила трения одинакова. В первом случае работа силы трения

$$A_{12} = -F_{\text{тр}} l_1,$$

а во втором —

$$A_{132} = A_{13} + A_{32}, A_{132} = -F_{\text{тр}} l_2 - F_{\text{тр}} l_3.$$

Отсюда $A_{12} \neq A_{132}$.

7. Из курса физики 7 класса вы знаете, что важной характеристикой устройств, которые совершают работу, является мощность.

Мощностью называют физическую величину, равную отношению работы к промежутку времени, за который она совершена.

$$N = \frac{A}{t}.$$

Мощность характеризует быстроту выполнения работы.

Единица мощности в СИ — *ватт* (**1 Вт**):

$$[N] = \frac{[A]}{[t]} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ с}} = 1 \text{ Вт}.$$

За единицу мощности принимают такую мощность, при которой работа 1 Дж совершается за 1 с.

Вопросы для самопроверки

1. Что называют работой? Какова единица работы в СИ?
2. В каком случае сила совершает отрицательную работу; положительную работу?
3. По какой формуле вычисляют работу силы тяжести; силы упругости?
4. Как рассчитать работу, используя график зависимости $F(s)$?
5. Какие силы называют консервативными; неконсервативными?
6. Докажите, что работа силы тяжести и силы упругости не зависит от формы траектории.
7. Что называют мощностью? Какова единица мощности в СИ?

Задание 18

1. Мальчика везут на санках, прикладывая силу 20 Н. Верёвка, за которую тянут санки, составляет угол 30° с горизонтом. Чему равна работа силы упругости, возникающей в верёвке, если санки переместились на 100 м?
2. Спортсмен массой 65 кг прыгает в воду с вышки, находящейся на высоте 3 м над поверхностью воды. Какую работу совершает сила тяжести, действующая на спортсмена, при его движении до поверхности воды?
3. Под действием силы упругости длина деформированной пружины жёсткостью 200 Н/м уменьшилась на 4 см. Чему равна работа силы упругости?
- 4*. Докажите, что работа переменной силы численно равна площади фигуры, ограниченной графиком зависимости силы от координаты и координатными осями.
5. Чему равна сила тяги двигателя автомобиля, если при постоянной скорости 108 км/ч он развивает мощность 54 кВт?

§ 21. Работа и потенциальная энергия

- ✓ В каком случае можно говорить, что тело обладает потенциальной энергией?
- ✓ От чего зависит потенциальная энергия тела, поднятого над Землёй?

1. С понятием энергии вы познакомились в курсе физики 7 класса. Вспомним его. Предположим, что некоторое тело, например тележка, съезжает с наклонной плоскости и передвигает лежащий у её основания брусок. Говорят, что тележка совершает работу. Действительно, она действует на брусок с некоторой силой упругости и брусок при этом перемещается.



Говорят, что если тело может совершить работу, то оно обладает энергией.

Энергию обозначают буквой E . Единица энергии в СИ — джоуль (1 Дж).

2. Различают два вида механической энергии — потенциальную и кинетическую.

Потенциальной энергией называют энергию взаимодействия тел или частей тела, зависящую от их взаимного положения.

Потенциальной энергией обладают все взаимодействующие тела. Так, любое тело взаимодействует с Землёй, следовательно, тело и Земля обладают потенциальной энергией. Частицы, из которых состоят тела, тоже взаимодействуют между собой, и они также обладают потенциальной энергией.

Поскольку потенциальная энергия — это энергия взаимодействия, то она относится не к одному телу, а к системе взаимодействующих тел. В том случае, когда мы говорим о потенциальной энергии тела, поднятого над Землёй, систему составляют Земля и поднятое над ней тело.

3. Выясним, чему равна потенциальная энергия тела, поднятого над Землёй. Для этого найдём связь между работой силы тяжести и изменением потенциальной энергии тела.

Пусть тело массой m падает с высоты h_1 до высоты h_2 (рис. 73). При этом перемещение тела равно $h = h_1 - h_2$. Работа силы тяжести на этом участке будет равна:

$$A = F_{\text{тяж}} h = mgh = mg(h_1 - h_2), \text{ или } A = mgh_1 - mgh_2.$$

Величина $mgh_1 = E_{\text{п1}}$ представляет собой потенциальную энергию тела в начальном положении, $mgh_2 = E_{\text{п2}}$ — потенциальная энергия тела в конечном положении. Формулу можно переписать следующим образом:

$$A = E_{\text{п1}} - E_{\text{п2}} = -(E_{\text{п2}} - E_{\text{п1}}).$$

При изменении положения тела изменяется его потенциальная энергия. Таким образом,

работа силы тяжести равна изменению потенциальной энергии тела, взятому с противоположным знаком.

Знак «минус» означает, что при падении тела сила тяжести совершает положительную работу, а потенциальная энергия тела уменьшается. Если

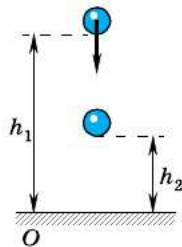


Рис. 73



тело движется вверх, то сила тяжести совершает отрицательную работу, а потенциальная энергия тела при этом увеличивается.

4. При определении потенциальной энергии тела необходимо указывать уровень, относительно которого она отсчитывается, называемый *нулевым уровнем*.

Так, потенциальная энергия мяча, пролетающего над волейбольной сеткой, относительно сетки имеет одно значение, а относительно пола спортзала — другое. При этом важно, что разность потенциальных энергий тела в двух точках не зависит от выбранного нулевого уровня. Это означает, что работа, совершённая за счёт потенциальной энергии тела, не зависит от выбора нулевого уровня.

Часто за нулевой уровень при определении потенциальной энергии принимают поверхность Земли. Если тело падает с некоторой высоты на поверхность Земли, то работа силы тяжести равна потенциальной энергии: $A = mgh$.

Следовательно, *потенциальная энергия тела, поднятого на некоторую высоту над нулевым уровнем, равна работе силы тяжести при падении тела с этой высоты до нулевого уровня*.

5. Потенциальной энергией обладает любое деформированное тело. При сжатии или растяжении тела оно деформируется, изменяются силы взаимодействия между его частицами и возникает сила упругости.

Пусть правый конец пружины (см. рис. 69) перемещается из точки с координатой x_1 в точку с координатой x_2 . Напомним, что работа силы упругости при этом равна:

$$A = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}.$$

Величина $\frac{kx_1^2}{2} = E_{п1}$ характеризует первое состояние деформированного тела и представляет собой его потенциальную энергию в первом состоянии, величина $\frac{kx_2^2}{2} = E_{п2}$ характеризует второе состояние деформированного тела и представляет собой его потенциальную энергию во втором состоянии. Можно записать:

$$A = -(E_{п2} - E_{п1}),$$

т. е. **работа силы упругости равна изменению потенциальной энергии пружины, взятому с противоположным знаком.**



Знак «минус» показывает, что в результате положительной работы, совершённой силой упругости, потенциальная энергия тела уменьшается. При сжатии или растяжении тела под действием внешней силы его потенциальная энергия увеличивается, а сила упругости совершает отрицательную работу.

Вопросы для самопроверки

1. Когда можно сказать о том, что тело обладает энергией? Какова единица энергии в СИ?
2. Какую энергию называют потенциальной?
3. Как вычислить потенциальную энергию тела, поднятого над Землёй?
4. Зависит ли потенциальная энергия тела, поднятого над Землёй, от нулевого уровня?
5. Как вычислить потенциальную энергию упруго деформированного тела?

Задание 19

1. Какую работу надо совершить, чтобы переложить пакет с мукой массой 2 кг с полки, находящейся на высоте 0,5 м относительно пола, на стол, находящийся на высоте 0,75 м относительно пола? Чему равны относительно пола потенциальная энергия пакета с мукой, лежащего на полке, и его потенциальная энергия тогда, когда он находится на столе?
2. Какую работу надо совершить, чтобы пружину жёсткостью 4 кН/м перевести в состояние 1, растянув её на 2 см? Какую дополнительную работу надо совершить, чтобы перевести пружину в состояние 2, растянув её ещё на 1 см? Чему равно изменение потенциальной энергии пружины при её переводе в состояние 1; из состояния 1 в состояние 2?
3. На рисунке 74 приведён график зависимости силы тяжести, действующей на мяч, от высоты подъёма мяча. Вычислите, пользуясь графиком, потенциальную энергию мяча на высоте 1,5 м.
4. На рисунке 75 приведён график зависимости удлинения пружины от действующей на неё силы. Чему равна потенциальная энергия пружины при удлинении 4 см?

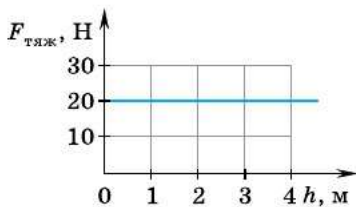


Рис. 74

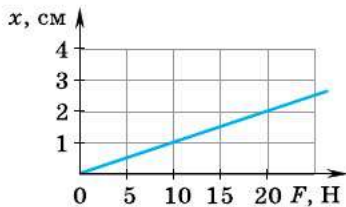


Рис. 75

§ 22. Работа и кинетическая энергия

- ✓ В каком случае можно говорить, что тело обладает кинетической энергией?
- ✓ От чего зависит кинетическая энергия тела?

1. Предположим, что снаряд, летящий с некоторой скоростью, попадает в доску, пробивает её насквозь и вылетает. Снаряд совершил работу по преодолению трения, следовательно, он обладал энергией вследствие своего движения.

Энергию, которой обладает тело вследствие своего движения, называют кинетической энергией.

Выясним, от чего зависит кинетическая энергия.

2. Предположим, что на тело массой m действует некоторая сила. Тело при этом перемещается и приобретает ускорение. При перемещении тела сила совершает работу.

Будем считать, что сила и перемещение направлены в одну сторону вдоль одной прямой (рис. 76). Если координатная ось X направлена в ту же сторону, то проекции на эту ось силы, перемещения и ускорения движения равны их модулям.

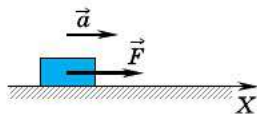


Рис. 76

Сила F , действующая на тело, совершает работу $A = Fs$. Из второго закона Ньютона найдём силу: $F = ma$.

Ускорение, с которым движется тело, равно: $a = \frac{v^2 - v_0^2}{2s}$.

Подставив в формулу работы выражения для силы и перемещения, получим:

$$A = m \frac{v^2 - v_0^2}{2s} s = m \left(\frac{v^2}{2} - \frac{v_0^2}{2} \right) = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}.$$

В левой части равенства стоит работа силы. В правой части равенства стоит разность величин, характеризующих состояние движущегося тела в некоторые моменты времени. Эти величины называют кинетической энергией тела в конечном и начальном

состояниях. Кинетическая энергия тела вычисляется по формуле:

$$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}.$$

Следовательно, можно записать

$$A = E_{\text{к}2} - E_{\text{к}1},$$

или

$$A = \Delta E_{\text{к}}.$$

Работа силы равна изменению кинетической энергии тела.

Это утверждение называют **теоремой о кинетической энергии**.

Если сила совершает положительную работу, то кинетическая энергия тела увеличивается. Скорость тела при этом возрастает. Если сила совершает отрицательную работу, то кинетическая энергия тела уменьшается. Это происходит, например, при уменьшении скорости тела при действии силы трения.

Кинетическая энергия измеряется в тех же единицах, что и работа, т. е. в джоулях.

Так же как и в том случае, когда тело обладает потенциальной энергией, работа может быть совершена за счёт кинетической энергии. При совершении работы происходит изменение состояния тела и изменение его энергии.

Вопросы для самопроверки

1. Какую энергию называют кинетической?
2. Чему равна кинетическая энергия тела?
3. В чём состоит теорема о кинетической энергии?



Задание 20

1. Самолёт массой 150 т в момент отрыва от поверхности земли имеет скорость 288 км/ч. Чему равна работа, совершаемая двигателем самолёта при его разбеге? Чему равно изменение кинетической энергии самолёта?
2. Самолёт массой 150 т имеет скорость 288 км/ч в момент отрыва от поверхности земли. Через некоторое время его скорость становится равной 900 км/ч. Чему равна работа двигателей самолёта при

увеличении его скорости? Чему равно изменение его кинетической энергии? Чему равна кинетическая энергия самолёта при его взлёте и при движении со скоростью 900 км/ч?

3. На рисунке 77 приведён график зависимости кинетической энергии автомобиля от квадрата его скорости. Определите, пользуясь графиком, массу автомобиля.

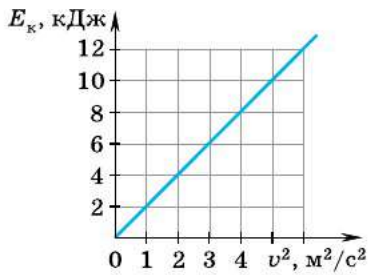


Рис. 77

§ 23. Закон сохранения механической энергии

- ✓ Какую систему тел называют замкнутой?
- ✓ Какие силы называют консервативными?

1. Рассмотрим свободное падение тела с некоторой высоты h относительно поверхности Земли (рис. 78). В точке A тело неподвижно, поэтому оно обладает только потенциальной энергией. В точке B на высоте h_1 тело обладает и потенциальной энергией, и кинетической энергией, поскольку тело в этой точке имеет некоторую скорость v_1 . В момент касания поверхности Земли потенциальная энергия тела равна нулю, оно обладает только кинетической энергией.

Таким образом, во время падения тела его потенциальная энергия уменьшается, а кинетическая увеличивается.

Полной механической энергией E называют сумму потенциальной и кинетической энергии тела.

$$E = E_{\text{п}} + E_{\text{к}}.$$

2. Покажем, что полная механическая энергия системы тел сохраняется. Рассмотрим ещё раз падение тела на поверхность Земли из точки A в точку C (см. рис. 78). Будем считать, что тело и Земля представляют собой замкнутую систему тел, в которой действуют только консервативные силы, в данном случае сила тяжести.

В точке A полная механическая энергия тела равна его потенциальной энергии

$$E = E_{\text{п}} = mgh.$$

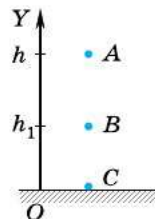


Рис. 78

В точке B полная механическая энергия тела равна

$$E = E_{\text{п1}} + E_{\text{к1}}.$$

$$E_{\text{п1}} = mgh_1, E_{\text{к1}} = \frac{mv_1^2}{2}.$$

Тогда

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

Скорость тела v_1 найдём, используя кинематическое уравнение. Поскольку перемещение тела из точки A в точку B равно

$$s = h - h_1 = \frac{v_1^2 - v_0^2}{2g}, \text{ то } v_1^2 = 2g(h - h_1).$$

Подставив это выражение в формулу полной механической энергии, получим

$$E = mgh_1 + mg(h - h_1) = mgh.$$

Таким образом, в точке B

$$E = mgh.$$

В момент касания поверхности Земли (точка C) тело обладает только кинетической энергией, следовательно, его полная механическая энергия

$$E = E_{\text{к2}} = \frac{mv_2^2}{2}.$$

Скорость тела в этой точке можно найти по формуле $v_2^2 = 2gh$, учитывая, что начальная скорость тела равна нулю. После подстановки выражения для скорости в формулу полной механической энергии получим $E = mgh$.

Таким образом, мы получили, что в трёх рассмотренных точках траектории полная механическая энергия тела равна одному и тому же значению: $E = mgh$. К такому же результату мы придём, рассмотрев другие точки траектории тела.

Полная механическая энергия замкнутой системы тел, в которой действуют только консервативные силы, остаётся неизменной при любых взаимодействиях тел системы.

Это утверждение является **законом сохранения механической энергии**.

3. В реальных системах действуют силы трения. Так, при свободном падении тела в рассмотренном примере (см. рис. 78) действует сила сопротивления воздуха, поэтому потенциальная



энергия в точке A больше полной механической энергии в точке B и в точке C на значение работы, совершаемой силой сопротивления воздуха: $\Delta E = A$. При этом энергия не исчезает, часть механической энергии превращается во внутреннюю энергию тела и воздуха.

4. Как вы уже знаете из курса физики 7 класса, для облегчения труда человека используют различные машины и механизмы, которые, обладая энергией, совершают механическую работу. К таким механизмам относят, например, рычаги, блоки, подъёмные краны и др. При совершении работы происходит преобразование энергии.

Любая машина характеризуется величиной, показывающей, какая часть передаваемой ей энергии используется полезно или какая часть совершённой (полной) работы является полезной. Эту величину называют **коэффициентом полезного действия (КПД)**.

Коэффициентом полезного действия η называют величину, равную отношению полезной работы $A_{\text{п}}$ к полной работе A .

Обычно КПД выражают в процентах.

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

5. Пример решения задачи

1. Мяч брошен вертикально вверх со скоростью 10 м/с. На какой высоте потенциальная энергия мяча будет равна его кинетической энергии?

Дано:

$$v_0 = 10 \text{ м/с}$$

$$E_{\text{п2}} = E_{\text{к2}}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$h - ?$$

Решение:

Система тел «мяч—Земля» замкнутая, в ней действуют только консервативные силы (сила тяжести), поэтому к этой системе можно применить закон сохранения механической энергии:

$$E_{\text{п1}} + E_{\text{к1}} = E_{\text{п2}} + E_{\text{к2}}.$$

За нулевой уровень потенциальной энергии выберем поверхность Земли. Тогда в первом положении полная механическая энергия мяча равна его кинетической энергии:

$$E = E_{\text{к1}} = \frac{mv_0^2}{2}.$$

Во втором положении на высоте h полная механическая энергия мяча

$$E = E_{к2} + E_{п2}.$$

Поскольку по условию задачи $E_{к2} = E_{п2}$, то можно записать:

$$E_{к1} = 2E_{п2}; \frac{mv_0^2}{2} = 2mgh.$$

Отсюда

$$h = \text{---};$$

$$h = \frac{(10 \text{ м/с})^2}{4 \cdot 10 \text{ м/с}^2} = 2,5 \text{ м}.$$

Ответ: $h = 2,5 \text{ м}$.

2. Парашютист массой 70 кг отделился от неподвижно висящего вертолѐта и, пролетев 150 м до раскрытия парашюта, приобрѐл скорость 40 м/с. Чему равна работа силы сопротивления воздуха?

Дано:

$$m = 70 \text{ кг}$$

$$v_0 = 0$$

$$v = 40 \text{ м/с}$$

$$s = h = 150 \text{ м}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$A = ?$

Решение:

За нулевой уровень потенциальной энергии выберем уровень, на котором парашютист приобрѐл скорость v . Тогда при отделении от вертолѐта в начальном положении на высоте h полная механическая энергия парашютиста равна его потенциальной энергии $E = E_{п} = mgh$, поскольку его кинетическая энергия на данной высоте равна нулю.

Пролетев расстояние $s = h$, парашютист приобрѐл кинетическую энергию, а его потенциальная энергия на этом уровне стала равна нулю. Таким образом, во втором положении полная механическая энергия парашютиста равна его кинетической энергии:

$$E = E_{к} = \frac{mv^2}{2}.$$

Потенциальная энергия парашютиста $E_{п}$ при отделении от вертолѐта не равна кинетической $E_{к}$, поскольку сила сопротивления воздуха совершает работу. Следовательно,

$$A = E_{к} - E_{п};$$



$$A = \frac{mv^2}{2} - mgh.$$

$$A = \frac{70 \text{ кг} \cdot 1600 \text{ м/с}^2}{2} - 70 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 150 \text{ м} = -16\,100 \text{ Дж}.$$

Работа имеет знак «минус», поскольку она равна убыли полной механической энергии.

Ответ: $A = -16\,100 \text{ Дж}.$

Вопросы для самопроверки

1. Что называют полной механической энергией?
2. Сформулируйте закон сохранения механической энергии.
3. Выполняется ли закон сохранения механической энергии, если на тела системы действует сила трения? Ответ поясните.
4. Что показывает коэффициент полезного действия?

Задание 21

1. Мяч массой 0,5 кг брошен вертикально вверх со скоростью 10 м/с. Чему равна потенциальная энергия мяча в высшей точке подъёма?
2. Спортсмен массой 60 кг прыгает с 10-метровой вышки в воду. Чему равны: потенциальная энергия спортсмена относительно поверхности воды перед прыжком; его кинетическая энергия при вхождении в воду; его потенциальная и кинетическая энергия на высоте 5 м относительно поверхности воды? Сопротивлением воздуха пренебречь.
3. Определите коэффициент полезного действия наклонной плоскости высотой 1 м и длиной 2 м при перемещении по ней груза массой 4 кг под действием силы 40 Н.

Темы докладов и проектов

1. Достижения отечественной космонавтики.
2. Энергия прыжка и бега человека.
3. Машины и механизмы на службе человека.
4. Конструирование механизмов с использованием конструктора.
5. Реактивное движение в природе.
6. Международные космические станции.



Основное в главе

1. Основные величины (табл. 2).

Таблица 2

Название	Обозначение	Что характеризует	Единица	Способ измерения	Вектор или скаляр	Отношение
Путь	l	Изменение положения тела	м	Линейка	Скаляр	Отношение
Перемещение	$\vec{s}$	Изменение положения тела	м	Линейка	Вектор	Отношение
Время	t	Длительность процесса	с	Секундомер	Скаляр	Абсолютное
Скорость	$\vec{v}$	Быстроту изменения положения	м/с	Спидометр	Вектор	Отношение
Ускорение	$\vec{a}$	Быстроту изменения скорости	м/с ²	Акселерометр	Вектор	Абсолютное
Масса	m	Инертность	кг	Взаимодействие, весы	Скаляр	Абсолютное
Сила	$\vec{F}$	Взаимодействие	Н	Динамометр	Вектор	Абсолютное
Импульс тела	$\vec{p}$	Состояние тела	кг · м/с	Косвенный $\vec{p} = m\vec{v}$	Вектор	Отношение

Название	Обозначение	Что характеризует	Единица	Способ измерения	Вектор или скаляр	Отношение
Импульс силы		Изменение состояния тела (изменение импульса тела)	Н · с	Косвенный $\vec{F}t$	Вектор	Абсолютный
Работа	A	Изменение энергии	Дж	Косвенный $A = Fs$	Скаляр	Отношение
Мощность	N	Быстроту совершения работы	Вт	Косвенный $N = \frac{A}{t}$	Скаляр	Отношение
Механическая энергия	E	Способность совершить работу	Дж	Косвенный $E = E_{\text{п}} + E_{\text{к}}$	Скаляр	Отношение
Потенциальная энергия	$E_{\text{п}}$	Положение	Дж	Косвенный $E_{\text{п}} = mgh$ $E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$	Скаляр	
Кинетическая энергия	$E_{\text{к}}$	Состояние	Дж	Косвенный $E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$	Скаляр	Отношение
Коэффициент полезного действия	η	Какая часть совершённой работы является полезной		Косвенный $\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A}$	Скаляр	Абсолютный

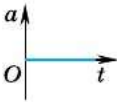
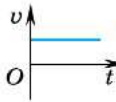
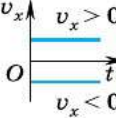
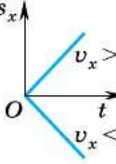
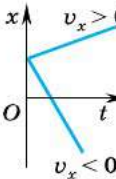
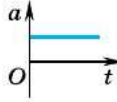
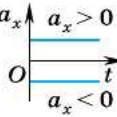
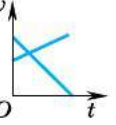
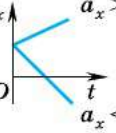
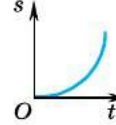
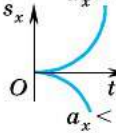
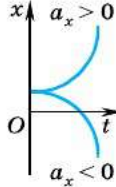
2. Основные уравнения кинематики (табл. 3).

Таблица 3

Вид движения Величина	Прямолинейное		По окружности с постоянной скоростью
	Равномерное	Равноускоренное	
Ускорение	$\vec{a} = 0$	$\vec{a} = \text{const};$ $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t};$ $a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$	$a = \frac{v^2}{R};$ $a = \omega^2 R$
Скорость	$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t};$ $v_x = \frac{s_x}{t}$	$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t;$ $v_x = v_{0x} + a_x t$	$v = \frac{2\pi R}{T};$ $\omega = \frac{2\pi}{T}$
Перемещение	$\vec{s} = \vec{v}t;$ $s_x = v_x t$	$\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2};$ $s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$	
Координата	$x = x_0 + v_x t$	$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$	

3. Основные графики движения (табл. 4).

Таблица 4

Вид движения	Модуль и проекция ускорения	Модуль и проекция скорости	Модуль и проекция перемещения	Координата*
Равномерное		 	 	
Равноускоренное	 	 	 	

4. Основные законы механики (табл. 5).

Таблица 5

Название	Формула	Примечание	Границы и условия применимости
Первый закон Ньютона		Устанавливает существование инерциальных систем отсчёта	Справедливы: в инерциальных системах отсчёта материальных тел, движущихся со скоростями, много меньшими скорости света
Второй закон Ньютона	$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$	Позволяет определить силу, действующую на каждое из взаимодействующих тел	
Третий закон Ньютона	$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$	Относится к обоим взаимодействующим телам	
Второй закон Ньютона (другая формулировка)	$m\vec{v} - m\vec{v}_0 = \vec{F}t$	Устанавливает изменение импульса тела при действии на него внешней силы	
Закон сохранения импульса	$m_1\vec{v}_{01} + m_2\vec{v}_{02} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2$		Справедлив в инерциальных системах отсчёта замкнутых систем
Закон сохранения механической энергии	$E = E_k + E_{\text{п}} = \text{const}$		Справедлив в инерциальных системах отсчёта замкнутых систем, в которых действуют только консервативные силы

5. Силы в механике.

СИЛЫ В МЕХАНИКЕ

Сила
упругости
Закон Гука

$$F_{\text{упр}} = -kx$$

Сила тяготения
Закон
всемирного
тяготения

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

Сила тяжести

$$F_{\text{тяж}} = mg$$

Вес тела

$$\begin{aligned} a &= 0 \\ v &= \text{const} \\ P &= mg \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{g} \downarrow \downarrow \vec{a} \\ P &= m(g - a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{g} \downarrow \uparrow \vec{a} \\ P &= m(g + a) \end{aligned}$$

Сила трения

Покоя

$$\begin{aligned} F_{\text{тр}} &= F \\ F_{\text{тр. max}} &= \mu N \end{aligned}$$

Скольжения

$$F_{\text{тр}} = \mu N$$

Качения



Механические колебания и волны

Колебательное движение является одним из самых распространённых в природе видов движения, и вы его неоднократно наблюдали. Колеблются качели, ветви и листья деревьев на ветру, струны музыкальных инструментов и голосовые связки человека, когда издают звуки.

Некоторые представления о колебательном движении и о его характеристиках вы получили при изучении темы «Звуковые явления». В частности, вы знаете, что механическими колебаниями называют точно или почти точно повторяющееся через равные промежутки времени движение, при котором тело смещается относительно положения устойчивого равновесия, отклоняясь от него то в одну, то в другую сторону.

Для того чтобы тело совершало колебания, оно должно представлять собой колебательную систему. Простейшими колебательными системами, уже изученными вами ранее, являются груз, подвешенный на нити (математический маятник), и груз, прикрепленный к пружине (пружинный маятник). Рассмотрим более подробно свойства этих колебательных систем.

§ 24. Математический и пружинный маятники

- ✓ Какое движение называют колебательным?
- ✓ Какие механические колебательные системы вам известны?

1. Вы уже знаете, что при изучении физических явлений или свойств физических объектов создают их модель. Поступим подобным образом и при изучении колебаний.

Существуют системы, представляющие собой тело определённой массы, подвешенное на нити или стержне (например, качели, маятник часов, отвес). Моделью этих систем является **математический маятник**.

Математическим маятником называют тело, подвешенное на нити, размеры которого много меньше длины нити.

Считается, что нить нерастяжима и не имеет массы, вся масса такого маятника сосредоточена в подвешенном к нити теле. При этом тело можно считать материальной точкой.

2. Рассмотрим процесс колебаний маятника. На маятник действуют равные по модулю и противоположно направленные сила тяжести $\vec{F}_{\text{тяж}}$ и сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$ (рис. 79, а). В положении равновесия (точка О) равнодействующая этих сил равна нулю.

Выведем маятник из положения равновесия, отклонив вправо (рис. 79, б). В этом положении (точка А) силы тяжести и упругости будут направлены под углом друг к другу, и их равнодействующая $\vec{F}$ уже не будет равна нулю. Под действием силы $\vec{F}$

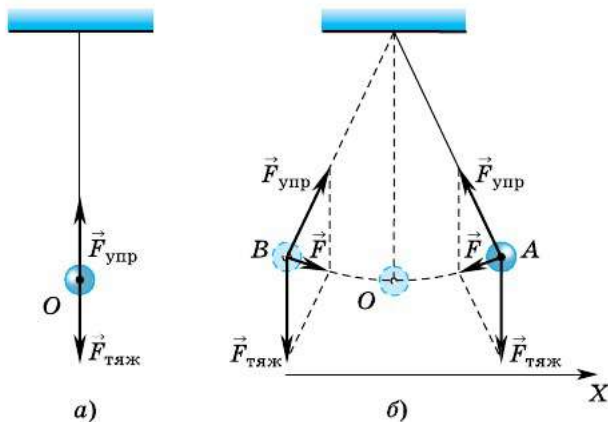


Рис. 79

маятник начнёт двигаться к положению равновесия. Вследствие инертности груз пройдёт положение равновесия и отклонится от него в другую сторону. Дойдя до крайнего левого положения (точка B), маятник под действием равнодействующей сил тяжести и упругости начнёт двигаться к положению равновесия. Пройдя его, он опять отклонится вправо. Процесс будет повторяться.

3. Математический маятник совершает колебания под действием внутренних сил: силы тяжести и силы упругости.

Колебания, происходящие под действием внутренних сил, называют свободными.

Свободные колебания происходят за счёт первоначального запаса энергии.

Выясним, как изменяются смещение, скорость и ускорение при движении маятника.

Вспомним, что отклонение маятника от положения равновесия называют **смещением** x , а модуль наибольшего смещения — **амплитудой колебаний** A .

Анализируя процесс колебания маятника, можно сделать вывод, что это движение происходит под действием переменной силы. Это означает, что в процессе движения меняются не только смещение и скорость груза, но и его ускорение.

При движении маятника (см. рис. 79, б) его скорость в крайних положениях A и B равна нулю, а при прохождении через положение равновесия она максимальна. Равнодействующая сил тяжести и упругости максимальна в положениях A и B и равна нулю в положении равновесия. Следовательно, в соответствии со вторым законом Ньютона ускорение маятника максимально в положениях A и B и равно нулю в положении равновесия.

Следует иметь также в виду, что проекция скорости маятника на ось X имеет разные знаки в зависимости от направления движения. При движении от точки A к точке O проекция скорости на эту ось отрицательна, а при движении от точки B к точке O — положительна. То же относится к проекциям силы $\vec{F}$ и ускорения на ось X : при движении от точки O к точке A они отрицательны, а при движении от точки O к точке B — положительны.



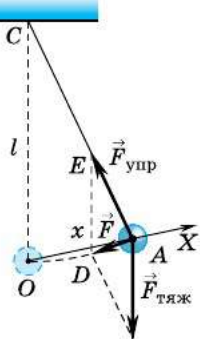


Рис. 80

4. Анализ характера колебаний маятника позволяет сделать вывод, что сила, действующая на него, а следовательно, и ускорение маятника направлены в каждый момент времени в сторону, противоположную смещению. Так, при движении маятника из точки A в точку O (рис. 80) равнодействующая внутренних сил, действующих на маятник, и его ускорение направлены влево, а смещение, которое отсчитывается от точки O, направлено вправо. Кроме того, вам известно, что при равноускоренном движении координата (смещение) прямо пропорциональна ускорению. Следовательно, можно сделать

вывод о том, что сила, действующая в колебательной системе, прямо пропорциональна смещению и направлена в противоположную ему сторону и соответственно ускорение колебаний математического маятника прямо пропорционально его смещению.

5. Рассмотрим ещё одну колебательную систему — пружинный маятник.

Пружинный маятник — это груз, прикреплённый к пружине.

В этой модели маятника мы пренебрегаем массой пружины по сравнению с массой груза, деформацией тела по сравнению с деформацией пружины. Кроме того, считаем, что деформация пружины подчиняется закону Гука: $F_{\text{упр}} = -kx$. Рассмотрим движение такого маятника.

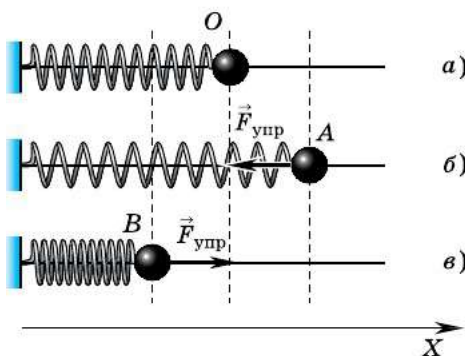


Рис. 81

6. Пока пружина не деформирована (рис. 81, а) (точка O), груз находится в положении равновесия. При этом на груз в горизонтальном направлении силы не действуют.

Выведем груз из положения равновесия, растянув пружину (рис. 81, б), и отпустим его (точка A). На груз будет действовать сила упругости пружины $\vec{F}_{\text{упр}}$,



пропорциональная её удлинению и направленная к положению равновесия. Под действием этой силы груз начнёт двигаться к положению равновесия. Вследствие инертности он пройдёт положение равновесия. Пружина сожмётся, и в ней опять возникнет сила упругости. Дойдя до крайнего левого положения (точка B), груз остановится, а затем под действием силы упругости начнёт двигаться к положению равновесия (рис. 81, в). Пройдя его, он отклонится вправо, и процесс повторится.

Пружинный маятник будет совершать свободные колебания относительно положения равновесия под действием переменной силы. Соответственно в процессе движения изменяются и скорость, и ускорение аналогично тому, как это происходит с математическим маятником.

7. Получим уравнение колебаний для пружинного маятника. Записав согласно второму закону Ньютона уравнение в проекциях на ось X и подставив выражение для силы упругости, получим:

$$F = ma; \quad -kx = ma; \quad a = -\frac{k}{m}x.$$

Так же как и для математического маятника, мы получили, что *колебания пружинного маятника происходят под действием силы, прямо пропорциональной смещению, и ускорение его колебаний также прямо пропорционально смещению и направлено в сторону, противоположную смещению.*

Колебания, происходящие под действием силы, прямо пропорциональной смещению и направленной в сторону, противоположную смещению, называют гармоническими.

Ускорение при гармонических колебаниях прямо пропорционально смещению и направлено в противоположную смещению сторону.

Вопросы для самопроверки

1. Какое движение называют колебательным?
2. Что представляет собой математический маятник? Объясните, как происходят колебания математического маятника.
3. Какие колебания называют свободными?
4. Что представляет собой пружинный маятник? Как происходят колебания пружинного маятника?



5. В каких точках (см. рис. 79) математический маятник имеет максимальные значения скорости и ускорения, а в каких — минимальные?

6. Какие колебания называют гармоническими?

Задание 22

1. Проанализируйте процесс колебаний математического маятника (см. рис. 79) и заполните таблицу 6, отметив в ней максимальные и минимальные значения проекций величин, характеризующих колебания.

Таблица 6

Положение маятника	Смещение	Сила	Скорость	Ускорение
Точка <i>O</i>				
Точка <i>A</i>				
Точка <i>B</i>				

2. Будет ли шарик совершать колебания, если он находится на дне сферической чаши (рис. 82, *a*); на её вершине (рис. 82, *б*)?



Рис. 82

3*. От чего зависит амплитуда свободных колебаний математического маятника?

4. Проанализируйте процесс колебаний пружинного маятника (см. рис. 81) и заполните таблицу, аналогичную таблице 6, отметив в ней максимальные и минимальные значения величин, характеризующих колебания.

5*. Начертите график зависимости проекции на ось *X* силы, возвращающей маятник в положение равновесия, от смещения и график зависимости проекции на ось *X* ускорения от смещения.

§ 25. Период колебаний математического и пружинного маятников

- ✓ Какие величины характеризуют колебательное движение?
- ✓ Что называют частотой и периодом колебаний?

1. Вспомним, что называется частотой и периодом колебаний.

Время, за которое маятник совершает одно полное колебание, называют периодом колебаний.

Период обозначают буквой T и измеряют в *секундах* (с).

Число полных колебаний за одну секунду называют частотой колебаний.

Частоту обозначают буквой ν . Единица частоты колебаний в СИ — *герц* (Гц).

1 Гц — *это частота таких колебаний, при которых за 1 с совершается одно полное колебание.*

Частота колебаний и период связаны соотношением:

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

2. Период колебаний рассмотренных нами колебательных систем — математического и пружинного маятников — зависит от характеристик этих систем.

Эксперимент показывает, что период колебаний математического маятника зависит от длины нити и ускорения свободного падения.

Формула периода колебаний математического маятника имеет вид

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

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

3. Период колебаний пружинного маятника зависит от массы груза и жёсткости пружины.

Формула периода колебаний пружинного маятника имеет вид

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}},$$

где m — масса груза, k — жёсткость пружины.

4. В формулы периода колебаний маятников входят величины, характеризующие сами маятники. Эти величины называют *параметрами* колебательных систем.

Если в процессе колебаний параметры колебательной системы не меняются, то период (частота) колебаний остаётся неизменным. Это справедливо для идеальных колебательных систем, в которых отсутствуют силы трения.

Свободные колебания, которые могла бы совершать система в отсутствие трения, называют собственными колебаниями.

Частота таких колебаний называется *собственной частотой*. Она зависит только от параметров колебательной системы.

Вопросы для самопроверки

1. Что называют периодом колебаний маятника?
2. Что называют частотой колебаний маятника? Какова единица частоты колебаний в СИ?
3. От каких величин и как зависит период колебаний математического маятника?
4. От каких величин и как зависит период колебаний пружинного маятника?
5. Какие колебания называют собственными?

Задание 23

1. Каков период колебаний маятника, если 20 полных колебаний он совершает за 15 с?
2. Чему равна частота колебаний, если период колебаний равен 0,25 с?
3. Какой должна быть длина маятника в маятниковых часах, чтобы период его колебаний был равен 1 с? Считать $g = 10 \text{ м/с}^2$; $\pi^2 = 10$.
4. Чему равен период колебаний маятника, длина нити которого равна 28 см, на Луне? Ускорение свободного падения на Луне $1,75 \text{ м/с}^2$.
5. Определите период и частоту колебаний пружинного маятника, если жёсткость его пружины равна 100 Н/м , а масса груза 1 кг .



**Изучение колебаний
математического и пружинного маятников**

Цель работы:

исследовать, от каких величин зависит, а от каких не зависит период колебаний математического и пружинного маятников.

Приборы и материалы:

штатив, 3 груза разной массы (шарик, груз массой 100 г, гирька), нить длиной 60 см, 2 пружины разной жёсткости, измерительная лента, секундомер (или часы с секундной стрелкой), полосовой магнит.

Порядок выполнения работы

1. Изготовьте маятник, прикрепив к нити груз, и подвесьте его к штативу. Наблюдайте его колебания.
2. Исследуйте зависимость периода колебаний математического маятника от длины нити. Для этого определите время 20 полных колебаний маятников длиной 25 и 49 см. Вычислите период колебаний в каждом случае. Результаты измерений и вычислений с учётом погрешности измерений занесите в таблицу 7. Считайте, что погрешность измерения времени равна цене деления секундомера. Сделайте вывод.

Таблица 7

$l, \text{ м}$	n	$t \pm \Delta t, \text{ с}$	$T \pm \Delta T, \text{ с}$
0,25	20		
0,49	20		

3. Исследуйте зависимость периода колебаний маятника от значения силы, действующей на груз в вертикальном направлении. Для этого под маятником длиной 25 см поместите полосовой магнит. Определите период колебаний, сравните его с периодом колебаний маятника в отсутствие магнита. Сделайте вывод.
4. Покажите, что период колебаний математического маятника не зависит от массы груза. Для этого к нити неизменной длины подвешивайте грузы разной массы. Для каждого случая определите период колебаний, сохраняя одинаковой амплитуду. Данные занесите в таблицу, составленную самостоятельно по аналогии с таблицей 7. Сделайте вывод.
5. Покажите, что период колебаний математического маятника не зависит от амплитуды колебаний. Для этого маятник отклоните сначала на 3 см, а затем на 4 см от положения равновесия и определите период колебаний в каждом случае. Результаты измерений

и вычислений занесите в таблицу, составленную самостоятельно по аналогии с таблицей 7. Сделайте вывод.

6. Покажите, что период колебаний пружинного маятника зависит от массы груза. Прикрепляя к пружине грузы разной массы, определите период колебаний маятника в каждом случае, измерив время 10 колебаний. Данные занесите в таблицу, составленную самостоятельно по аналогии с таблицей 7. Сделайте вывод.

7. Покажите, что период колебаний пружинного маятника зависит от жёсткости пружины. Данные занесите в таблицу, составленную самостоятельно по аналогии с таблицей 7. Сделайте вывод.

8. Покажите, что период колебаний пружинного маятника не зависит от амплитуды. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу, составленную самостоятельно по аналогии с таблицей 7. Сделайте вывод.

Задание 24*

1. Исследуйте область применимости модели математического маятника. Для этого изменяйте длину нити маятника и размеры тела. Проверьте, зависит ли период колебаний от длины маятника, если тело имеет большие размеры, а длина нити мала.

2. Вычислите длины секундных маятников, установленных на полюсе ($g = 9,832 \text{ м/с}^2$), на экваторе ($g = 9,78 \text{ м/с}^2$), в Москве ($g = 9,816 \text{ м/с}^2$), в Санкт-Петербурге ($g = 9,819 \text{ м/с}^2$).

3. Как влияют изменения температуры на ход маятниковых часов?

4. Как изменится частота маятниковых часов при подъёме в гору?

5. Девочка качается на качелях. Изменится ли период колебаний качелей, если на них сядут две девочки? Если девочка будет качаться не сидя, а стоя?

Лабораторная работа № 3*

Измерение ускорения свободного падения с помощью математического маятника

Цель работы:

научиться измерять ускорение свободного падения, используя формулу периода колебаний математического маятника.

Приборы и материалы:

штатив, шарик с прикреплённой к нему нитью, измерительная лента, секундомер (или часы с секундной стрелкой).

Порядок выполнения работы

1. Подвесьте к штативу шарик на нити длиной 30 см.

2. Измерьте время 10 полных колебаний маятника и вычислите период колебаний. Результаты измерений и вычисления с учётом

погрешности измерений занесите в таблицу 8. Считайте, что погрешность измерения длины равна цене деления измерительной ленты, а погрешность измерения времени — цене деления секундомера.

3. Из формулы периода колебаний математического маятника

$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ получите выражение для вычисления ускорения свободного падения. Вычислите ускорение свободного падения.

4. Повторите измерения, изменив длину нити маятника.

5. Вычислите относительную и абсолютную погрешности измерения ускорения свободного падения для каждого случая по формулам:

$$\delta g = \frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{2\Delta T}{T}; \Delta g = g \cdot \delta g.$$

6. Запишите значение ускорения свободного падения в таблицу 8 с учётом погрешности измерений.

Таблица 8

№ опыта	$l \pm \Delta l$, м	n	$t \pm \Delta t$, с	$T \pm \Delta T$, с	g , м/с ²	Δg , м/с ²	$g \pm \Delta g$, м/с ²
1		10					
2		10					

7. Сделайте вывод.

Задание 25*

1. Изменится ли, и если да, то как, погрешность измерения периода колебаний маятника, если увеличить число колебаний с 20 до 30?

2. Как влияет на точность измерения ускорения свободного падения увеличение длины маятника? Почему?

§ 26. Вынужденные колебания. Резонанс

✓ Вспомните формулы для вычисления: потенциальной энергии тела, взаимодействующего с Землёй; потенциальной энергии упруго деформированной пружины; кинетической энергии.

1. Выясним, какие превращения энергии происходят при колебаниях пружинного маятника (см. рис. 81). При растяже-



нии пружины её потенциальная энергия увеличивается и при максимальном растяжении имеет значение $E_{\pi} = \frac{kA^2}{2}$.

При движении груза к положению равновесия потенциальная энергия пружины уменьшается, а кинетическая энергия груза увеличивается. В положении равновесия кинетическая энергия груза максимальна $E_{\kappa} = \frac{mv_m^2}{2}$, а потенциальная энергия пружины равна нулю.

При сжатии пружины увеличивается её потенциальная энергия и уменьшается кинетическая энергия груза. При максимальном сжатии потенциальная энергия пружины максимальна, а кинетическая энергия груза равна нулю.

Если пренебречь силой трения, то в любой момент времени сумма потенциальной и кинетической энергий остаётся неизменной

$$E = E_{\pi} + E_{\kappa} = \text{const.}$$

При наличии силы трения энергия расходуется на совершение работы против этой силы, амплитуда колебаний уменьшается и колебания затухают.

Таким образом, свободные колебания маятника, происходящие за счёт первоначального запаса энергии, всегда *затухающие*.

2. Возникает вопрос: что нужно сделать для того, чтобы колебания с течением времени не прекращались? Очевидно, для получения незатухающих колебаний необходимо компенсировать потери энергии. Это можно сделать разными способами. Рассмотрим один из них.

Вы хорошо знаете, что колебания качелей не будут затухать, если их постоянно подталкивать, т. е. действовать на них с некоторой внешней периодической силой. В этом случае колебания качелей уже не являются свободными, они будут происходить под действием внешней силы. Работа этой внешней силы как раз и восполняет потери энергии, вызванные трением.

Таким образом, **вынужденными колебаниями называют колебания, происходящие под действием внешней, периодически изменяющейся силы.**



Вынужденные колебания, в отличие от свободных, могут происходить с любой частотой. Частота вынужденных колебаний равна частоте изменения действующей на тело силы, в данном случае сила называется *вынуждающей*.

3. Прделаем опыт. Подвесим к верёвке, закреплённой в стойках, несколько маятников разной длины (рис. 83). Отклоним маятник *A* от положения равновесия и предоставим его самому себе. Он будет совершать свободные колебания, действуя с некоторой периодической силой на верёвку. Верёвка, в свою очередь, будет действовать на остальные маятники. В результате все маятники начнут совершать вынужденные колебания с частотой колебаний маятника *A*.

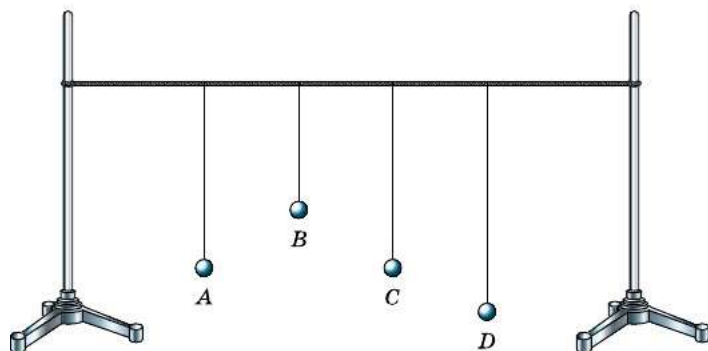


Рис. 83

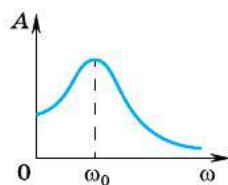


Рис. 84

Однако амплитуда колебаний маятников, за исключением маятника *C*, будет меньше, чем амплитуда колебаний маятника *A*. Маятник же *C*, длина которого равна длине маятника *A*, будет раскачиваться очень сильно. Следовательно, наибольшую амплитуду колебаний имеет маятник, собственная частота колебаний которого совпадает с частотой вынуждающей силы (рис. 84). В этом случае говорят, что наблюдается *резонанс*.

Резонансом называют явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты вынуждающей силы с собственной частотой колебательной системы (маятника).

Резонанс можно наблюдать при колебании качелей. Теперь вы можете объяснить, почему качели будут сильнее раскачиваться, если их подталкивать в такт с их собственными колебаниями. В этом случае частота внешней силы равна частоте колебаний качелей. Любой толчок против движения качелей вызовет уменьшение их амплитуды.

4*. Выясним, какие преобразования энергии происходят при резонансе.

Если частота вынуждающей силы отличается от собственной частоты колебаний тела, то вынуждающая сила будет направлена то по направлению движения тела, то против него. Соответственно работа этой силы будет то отрицательной, то положительной. В целом же работа вынуждающей силы в этом случае незначительно изменяет энергию системы.

Пусть теперь частота внешней силы равна собственной частоте колебаний тела. В этом случае создаются наиболее благоприятные условия для передачи энергии от внешнего источника к колеблющемуся телу, поскольку направление вынуждающей силы совпадает с направлением скорости тела в любой момент времени. Эта сила всегда совершает положительную работу и компенсирует силу сопротивления. Тело колеблется только под действием внутренних сил. Иначе говоря, отрицательная работа против силы сопротивления равна положительной работе внешней силы. Поэтому колебания происходят с максимальной амплитудой.

5. Явление резонанса необходимо учитывать на практике. В частности, станки, машины совершают во время работы небольшие колебания. Если частота этих колебаний совпадает с частотой собственных колебаний отдельных частей машин, то амплитуда колебаний может оказаться очень большой. Машина или опора, на которой она стоит, разрушится.

Известны случаи, когда вследствие резонанса разваливался на части самолёт в воздухе, ломались гребные винты у судов, рушились железнодорожные рельсы.

Не допустить резонанса можно, изменяя либо собственную частоту системы, либо частоту силы, вызывающей колебания. С этой целью, например, солдаты, переходя через мост, идут не в ногу, а вольным шагом. В противном случае частота их шагов может совпасть с частотой собственных колебаний моста и он

разрушится. Так произошло в 1750 г. во Франции близ города Анжера, когда через мост длиной 102 м, висящий на цепях, проходил отряд солдат.

Для предотвращения резонанса поезда переезжают мосты на медленном или на очень быстром ходу, чтобы частота ударов колёс о стыки рельсов была значительно меньше или значительно больше частоты собственных колебаний моста.

Явление резонанса не всегда оказывается вредным. Иногда оно может быть полезным, поскольку позволяет получить с помощью даже небольшой силы большое увеличение амплитуды колебаний.

На явлении резонанса основано действие прибора, позволяющего измерять частоту колебаний. Этот прибор называется *частотомером*. Его работу можно проиллюстрировать следующим опытом. На центробежной машине закрепляют модель частотомера, которая состоит из набора пластин (язычков) разной длины (рис. 85). Можно заметить, что при изменении скорости вращения ручки машины разные пластины приходят в колебание. Колебаться начинают те пластины, собственная частота которых равна частоте вращения.

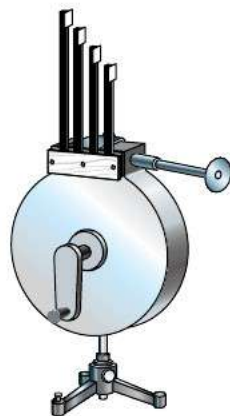


Рис. 85

Вопросы для самопроверки

1. От чего зависит амплитуда свободных колебаний пружинного маятника?
2. Сохраняется ли постоянной амплитуда колебаний маятника при наличии сил трения?
3. Какие превращения энергии происходят при колебаниях пружинного маятника?
4. Почему свободные колебания являются затухающими?
5. Какие колебания называют вынужденными? Приведите примеры вынужденных колебаний.
6. Что называют резонансом?
7. Приведите примеры вредного проявления резонанса. Что нужно сделать, чтобы не допускать резонанс?

Задание 26

1. Заполните таблицу 9, записав в неё, какая сила (внутренняя или внешняя) действует на колебательную систему, если она совершает свободные или вынужденные колебания; чему равны частота и амплитуда этих колебаний; являются они затухающими или нет.

Таблица 9

Характеристика колебаний	Вид колебаний	
	Свободные	Вынужденные
Действующая сила		
Частота		
Амплитуда		
Затухание		

2. Предложите опыт для наблюдения вынужденных колебаний.
3. Изучите экспериментально явление резонанса, используя для этого изготовленные вами математические маятники.
4. При некоторой скорости вращения колеса швейной машины стол, на котором она стоит, иногда сильно раскачивается. Почему?

§ 27. Механические волны

✓ Как называют процесс распространения колебаний в среде?

1. Вы уже знаете, что процесс распространения механических колебаний в среде называют **механической волной**.

Закрепим один конец шнура, слегка натянем его и сместим свободный конец шнура вверх, а затем вниз (приведём его в колебание). Мы увидим, что по шнуру «побежит» волна (рис. 86, а). Части шнура обладают инертностью, поэтому они будут смещаться относительно положения равновесия не одновременно, а с некоторым запаздыванием. Постепенно в колебание придут все участки шнура. По нему распространится колебание, иными словами, будет наблюдаться волна.

Анализируя распространение колебаний по шнуру, можно заметить, что волна «бежит» в горизонтальном направлении, а колебания частицы шнура совершают в вертикальном направлении (рис. 86, б).



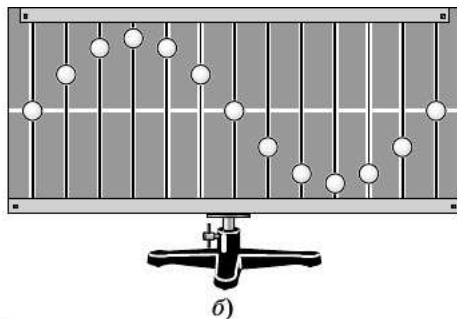
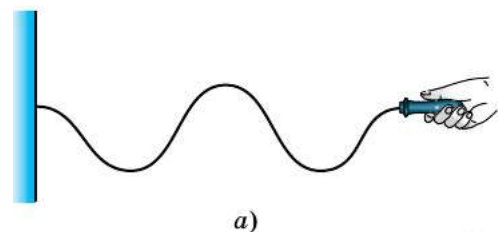


Рис. 86

Волны, направление распространения которых перпендикулярно направлению колебаний частиц среды, называют поперечными.

Поперечные волны представляют собой чередование *горбов* и *впадин*.

Кроме поперечных волн, существуют и продольные.

Волны, направление распространения которых совпадает с направлением колебаний частиц среды, называют продольными.

Закрепим один конец длинной пружины, подвешенной на нитях, и ударим по другому её концу. Увидим, как возникшее на конце пружины сгущение витков «побежит» по ней (рис. 87). Происходит перемещение *сгущений* и *разрежений*.

2. Анализируя процесс образования поперечных и продольных волн, можно сделать следующие выводы:

— *механические волны образуются благодаря инертности частиц среды и взаимодействию между ними, проявляющемуся в существовании сил упругости;*

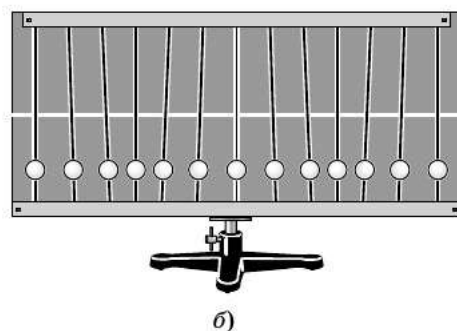
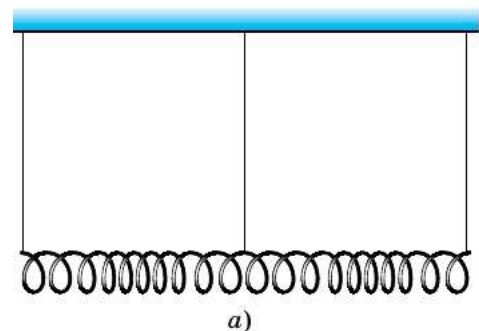


Рис. 87

— каждая частица среды совершает вынужденные колебания, такие же, что и первая частица, приведённая в колебания; частота колебаний всех частиц одинакова и равна частоте источника колебаний;

— колебание каждой частицы происходит с запаздыванием, которое обусловлено её инертностью и конечностью скорости распространения волны; это запаздывание тем больше, чем дальше находится частица от источника колебаний.

Важным свойством волнового движения является то, что вместе с волной не переносится вещество. В этом легко убедиться. Если набросать на поверхность воды кусочки пробки и создать волновое движение, то можно увидеть, что волны «побегут» по поверхности воды. Кусочки же пробки будут подниматься вверх на гребне волны и опускаться вниз на впадине.

3. Рассмотрим, в какой среде распространяются продольные и поперечные волны.

Распространение продольных волн связано с изменением объёма тела. Они могут распространяться как в твёрдых, так и в жидких и газообразных телах, поскольку во всех этих телах при изменении их объёма возникают силы упругости.

Распространение поперечных волн связано, главным образом, с изменением формы тела. В газах и жидкостях при изменении их формы силы упругости не возникают, поэтому поперечные волны в них распространяться не могут. Поперечные волны распространяются только в твёрдых телах.

Примером волнового движения в твёрдом теле является распространение колебаний во время землетрясений. От центра землетрясения распространяются как продольные, так и поперечные волны. Сейсмическая станция принимает сначала продольные волны, а затем поперечные, так как скорость последних меньше. Если известны скорости поперечной и продольной волн и измерен промежуток времени между их приходом, то можно определить расстояние от центра землетрясения до станции.

Исключение составляют волны на поверхности воды, которые вы все наблюдали. Процесс их образования крайне сложен: определённую роль в нём играют силы поверхностного натяжения и сила тяжести.

4. Вам уже знакомо понятие длины волны.

Длиной волны называют расстояние, на которое волна распространяется за время, равное периоду колебаний частиц среды.

Можно также сказать, что длина волны — это расстояние между двумя ближайшими горбами или впадинами поперечной волны (рис. 88, а) или расстояние между двумя ближайшими сгущениями или разрежениями продольной волны (рис. 88, б).

Длина волны обозначается буквой λ и измеряется в **метрах (м)**.

5. Зная длину волны, можно определить её скорость.

За скорость волны принимают скорость перемещения гребня или впадины в поперечной волне, сгущения или разрежения в продольной волне.

$$v = \frac{\lambda}{T}.$$

Как показывают наблюдения, при одной и той же частоте скорость волны, а соответственно и длина волны зависят от среды, в которой они распространяются. В таблице 10 приведены значения скорости звука в разных средах при разной температуре. Из таблицы видно, что в твёрдых телах скорость звука больше, чем в жидкостях и газах, а в жидкостях больше, чем в газах. Это связано с тем, что молекулы в жидкостях и твёрдых телах расположены ближе друг к другу, чем в газах, и сильнее взаимодействуют.

Таблица 10

Среда	Температура, °C	Скорость, м/с
Углекислый газ	0	259
Воздух	0	332
Воздух	10	338
Воздух	30	349
Гелий	0	965
Водород	0	1280

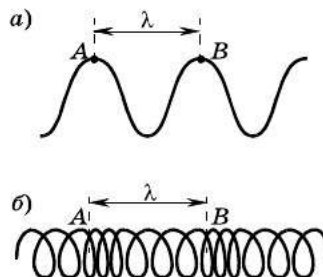


Рис. 88

Среда	Температура, °C	Скорость, м/с
Керосин	15	1330
Вода	25	1497
Медь	20	4700
Сталь	20	5000—6100
Стекло	20	5500

Сравнительно большая скорость звука в гелии и водороде объясняется тем, что масса молекул этих газов меньше, чем других, и соответственно у них меньше инертность.

Скорость волн зависит и от температуры. В частности, скорость звука тем больше, чем выше температура воздуха. Причиной этого является то, что при повышении температуры увеличивается подвижность частиц.

Вопросы для самопроверки

1. Что называют механической волной?
2. Какая волна называется поперечной; продольной?
3. Каковы особенности волнового движения?
4. В каких средах распространяются продольные волны, а в каких — поперечные? Почему?
5. Что называют длиной волны?
6. Как связана скорость волны с длиной волны и периодом колебаний; с длиной волны и частотой колебаний?
7. От чего зависит скорость волн при постоянной частоте колебаний?

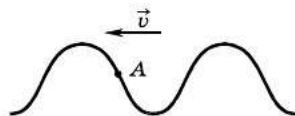


Рис. 89

Задание 27

1. Поперечная волна движется влево (рис. 89). Определите направление движения частицы A в этой волне.
- 2*. Происходит ли при волновом движении передача энергии? Ответ поясните.
3. На рисунке 90 показан моментальный снимок участка шнура, по которому бежит поперечная волна. Чему равно расстояние между точками A и B; A и C; A и D; A и E; A и F; B и F, если длина волны равна λ ?
4. На рисунке 91 показано мгновенное положение частиц среды и направление

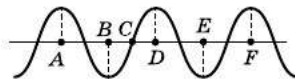


Рис. 90

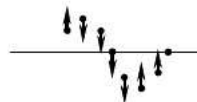


Рис. 91

их движения в поперечной волне. Начертите положение этих частиц и укажите направление их движения через промежутки времени, равные $T/4$, $T/2$, $3T/4$ и T .

5. Лодка качается на волнах, распространяющихся со скоростью 1,5 м/с. Расстояние между двумя ближайшими гребнями волн 6 м. Определите период колебаний лодки.

6. Определите частоту вибратора, который создаёт в воде при 25 °C волны длиной 15 м.

§ 28. Свойства механических волн

✓ В чём состоит явление отражения звука?

✓ Что такое эхо?

1. Вы уже хорошо знакомы с таким явлением, как отражение, например, звуковых волн от преграды, светового луча от зеркала. Отражение — это явление, которое свойственно волнам любой физической природы. Рассмотрим отражение механических волн.

Проведем опыт с прибором «волновая ванна». Поставим на пути волн плоскую пластинку, длина которой больше длины волны. Приведем в колебание вибратор. Увидим, что за пластинкой образуется область, куда волны не проникают (рис. 92). Кроме того, видно, что перед пластинкой образуется как бы сетка из волн. Волны, падающие на пластинку, отражаются от неё и идут навстречу падающим. Таким образом, механические волны отражаются от преграды, размеры которой больше длины волны.

2. В рассмотренном опыте волны распространялись в направлении, перпендикулярном преграде. Отражённая волна распространялась так же перпендикулярно преграде, но в противоположную сторону. Посмотрим, как будет распространяться отражённая волна, если падающая волна направлена под некоторым углом к преграде. Поставим пластинку под углом к направлению распространения волны (рис. 93). Увидим, что отражённая волна также пойдёт под некоторым углом.



Рис. 92



Рис. 93

Угол между направлением распространения падающей волны и перпендикуляром к плоскости пластины (рис. 94) называют **углом падения** (α).

Угол между направлением распространения отражённой волны и перпендикуляром называют **углом отражения** (β).

Опыты показывают, что

угол отражения равен углу падения: $\angle\beta = \angle\alpha$.

В этом заключается **закон отражения механических волн**.

3. При изучении явления отражения с помощью волновой ванны мы ставили на пути волны пластину, размеры которой были больше длины волны, и видели, что за пластину волны не проникают (см. рис. 93).

Изменим опыт. Возьмём небольшую пластину, размеры которой сравнимы с длиной волны. Увидим, что волны будут заходить за пластину (рис. 95), иначе говоря, они будут распространяться почти так же, как если бы препятствия не было.

Явление огибания волной препятствия называют дифракцией.

Благодаря дифракции мы слышим звук из-за угла дома, находясь за деревом и т. п. Дифракцию механических волн можно наблюдать, если размеры окружающих нас предметов невелики по сравнению с длиной волны. Действительно, длина звуковой волны в воздухе при частоте от 64 Гц (низкая басовая нота) до 1300 Гц (верхняя сопрановая нота) лежит в пределах от 5,36 до 0,26 м, что соизмеримо с размерами, например, дачного домика.

4. Прделаем ещё один опыт. Для получения волн возьмём вибратор, на конце которого находятся два острия (рис. 96). Они представляют собой два источника волн, колеблющихся

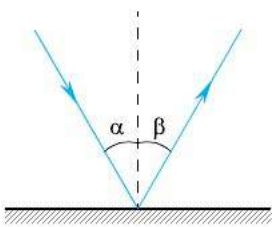


Рис. 94



Рис. 95

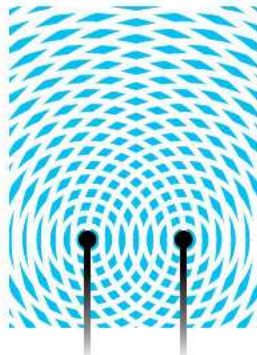


Рис. 96

с одинаковой частотой. В любую точку на поверхности воды приходят одновременно две волны.

Каждая частица среды начинает совершать колебания с частотой вибратора, возбудившего эту волну. А поскольку в данную точку среды приходят сразу две волны, то частица одновременно участвует в двух колебаниях. Происходит сложение колебаний или наложение двух волн.

Если посмотреть на поверхность воды, то можно увидеть чередование областей, в которых колебания особенно сильны, и областей с ослабленными колебаниями, т. е. чередование максимумов и минимумов колебаний.

Явление наложения волн в пространстве, при котором наблюдается неизменное во времени чередование максимумов и минимумов амплитуд колебаний частиц среды, называют интерференцией волн.

Образующуюся при этом на поверхности воды картину называют **интерференционной**.

5. Рассмотрим, как возникает интерференционная картина. Пусть в какую-то точку *A* поверхности воды приходят две волны, гребни которых совпадают (рис. 97, *a*). В этой точке получится усиленный подъём воды. Через полпериода гребни в точке *A* одновременно сменятся впадинами, и вода сильно опустится (рис. 97, *б*). Таким образом, в точке *A* будет происходить усиление колебаний.

В некоторой точке *B* поверхности воды гребень одной волны может совпасть со впадиной другой (рис. 98, *a*). Колебания в этой точке взаимно ослабятся. Через половину периода в точке *B* будет впадина первой волны совпадать с гребнем второй (рис. 98, *б*), и опять колебания ослабятся.

Интерференционная картина устойчива, она не меняется со временем, если частота колебаний вибраторов и соответственно длина излучаемых волн будут одинаковы.

Для того чтобы интерференционная картина была выражена ярко, амплитуды колебаний вибраторов должны быть одинаковы. В этом случае суммарная амплитуда при усилении колебаний будет равна удвоенной амплитуде, а при ослаблении — нулю.

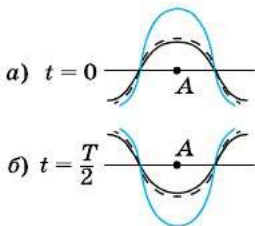


Рис. 97

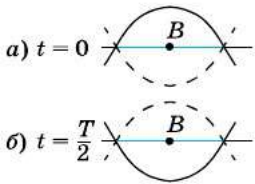


Рис. 98

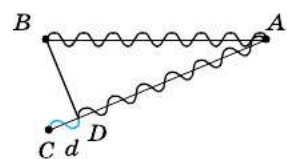


Рис. 99

6*. Можно установить условия образования максимумов и минимумов интерференционной картины.

Амплитуда колебаний в точке *A* будет максимальна тогда, когда в неё придут гребни или впадины обеих волн. Для этого нужно, чтобы на отрезке *CD* (рис. 99), равном разности расстояний *AB* и *CA*, укладывалось целое число длин волн:

$$d = n\lambda, \text{ где } n = 0; 1; 2; \dots$$

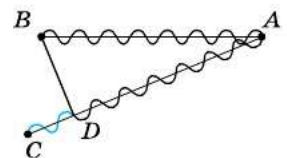


Рис. 100

Чтобы в точке *A* амплитуда колебаний была минимальна, в неё должны прийти гребень от источника *B* и впадина от источника

C (рис. 100). Это будет в том случае, если на отрезке *CD* уложится нечётное число полуволн:

$$d = \frac{\lambda}{2}(2n + 1), \text{ где } n = 0; 1; 2; \dots$$

Вопросы для самопроверки

1. Как продемонстрировать на опыте отражение механических волн?
2. Сформулируйте закон отражения волн.
3. Что называют дифракцией? При каких условиях наблюдается дифракция волн?
4. Что называют интерференцией? Как получить на опыте интерференционную картину?
5. Как образуются интерференционные максимумы и минимумы?
- 6*. Каковы условия интерференционных максимумов и минимумов?

Задание 28

1. Угол между направлениями падающей и отражённой волн равен 80° . Чему равен угол отражения?
2. Послушайте, как звонит будильник в комнате и на открытом воздухе. Одинаковый ли вы слышите звук? Объясните наблюдаемое явление.
- 3*. Разность расстояний от источников волн с одинаковыми частотой и амплитудой до некоторой точки на поверхности воды равна 8 см. Длина волны 4 см. Каков результат интерференции этих волн?
- 4*. Разность расстояний от источников волн с одинаковыми частотой и амплитудой до некоторой точки на поверхности воды равна 15 см. Длина волны 10 см. Каков результат интерференции этих волн?



1. Звуковые колебания и волны.
2. Влияние инфразвука на живой организм.
3. Использование ультразвука в природе, технике и медицине.
4. Волны на поверхности воды.
5. Сейсмические волны.
6. Цунами.



Основное в главе

1. Основные величины (табл. 11).

Таблица 11

Название	Обозначение	Единица	Определение	Связь с другими величинами
Смещение	x	м	Отклонение от положения равновесия	
Амплитуда	A	м	Наибольшее отклонение от положения равновесия	
Период	T	с	Время одного полного колебания	$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}};$ $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$
Частота	ν	Гц	Число колебаний в 1 с	$\nu = \frac{1}{T}$
Длина волны	λ	м	Расстояние, на которое волна распространяется за время, равное периоду колебаний частиц среды	$\lambda = \nu T$
Скорость волны	v	м/с	Скорость перемещения горба или впадины, сгущения или разрежения	$v = \frac{\lambda}{T}; v = \nu\lambda$

2. Виды механических колебаний.



3. Колебательные системы (табл. 12).

Таблица 12

Название	Описание модели	Свойства
Математический маятник	Размеры груза много меньше длины нити; масса нити много меньше массы груза	Существует положение устойчивого равновесия; при выведении из положения равновесия действует сила, стремящаяся вернуть в него маятник; маятник обладает инертностью, поэтому не останавливается в положении равновесия
Пружинный маятник	Масса пружины много меньше массы груза; груз не деформируется, в нём не возникает сила упругости	

4. Механические волны (табл. 13).

Таблица 13

Название	Характерная особенность	Среда	Механизм образования
Поперечная волна	Направление колебаний частиц среды перпендикулярно направлению распространения волны	Распространяется в твёрдых телах	Механические волны образуются благодаря инертности частиц среды и взаимодействию между ними, проявляющемуся в существовании сил упругости; каждая частица среды совершает колебательное движение
Продольная волна	Направление колебаний частиц среды совпадает с направлением распространения волны	Распространяется в газах, жидкостях и твёрдых телах	такое же, что и первая частица, приведённая в колебания; период колебаний всех частиц среды одинаков; колебание каждой частицы происходит с запаздыванием, которое обусловлено её инертностью и конечностью скорости распространения волны; это запаздывание тем больше, чем дальше находится частица от источника колебаний

5. Свойства механических волн (табл. 14).

Таблица 14

Свойство	Определение	Закономерность
Отражение	Изменение направления распространения на границе раздела двух сред	$\angle \beta = \angle \alpha$
Дифракция	Огибание волной преграды	Наблюдается при $l > \lambda$
Интерференция	Сложение волн, в результате которого наблюдается устойчивая картина распределения максимумов и минимумов амплитуд колебаний частиц среды	$\max — d = n\lambda;$ $\min — d = \frac{\lambda}{2}(2n + 1)$



Электромагнитные явления

В курсе физики 8 класса вы познакомились с электрическими явлениями и законами постоянного тока. Это было началом изучения обширной группы явлений и законов, которые обобщаются в единой физической теории, называемой электродинамикой.

В данной главе вы познакомитесь с магнитными и электромагнитными явлениями. Они тесно связаны с уже известными вам явлениями и процессами, обусловленными движением электрических зарядов, т. е. электрическим током.

Как вам известно, покоящиеся электрические заряды создают вокруг себя электрическое поле. Движущиеся заряды создают кроме электрического и магнитное поле. Особенности проявления магнитного поля, его свойства и характеристики будут рассматриваться в этой главе учебника.

§ 29. Постоянные магниты

- ✓ Что такое магнит?
- ✓ Какие свойства магнита вы знаете?

1. История открытия магнитных свойств веществ, так же как и электрических, уходит в глубь веков. Ещё за 600 лет до н. э. древние греки знали, что магнит притягивает к себе железо (так же как знали и о том, что натёртый о шерсть янтарь притягивает лёгкие предметы). Впервые свойства магнитных материалов использо-



а)



б)

Рис. 101

вали в Китае: именно там был сконструирован первый компас. Начиная с XII в. магнитные компасы стали использоваться и в Европе. На рисунке 101, а изображён современный компас, с устройством которого вы все хорошо знакомы, а на рисунке 101, б — компас, изготовленный в XIII в. Этот компас представлял собой диск из магнитного железняка (его называли раньше «путевым камнем»), на котором указаны стороны света. Диск устанавливался на деревянной подушечке и плавал в воде.

2. Тела, способные длительное время сохранять свойство притягивать железо или его сплавы, т. е. намагниченность, называют **постоянными магнитами** или просто **магнитами**. Магниты могут иметь разнообразные форму и размеры. На рисунке 102 изображены полосовой и подковообразный магниты.

Принято различать *естественные* и *искусственные* магниты. Естественные магниты представляют собой некоторые железные руды (например, магнитный железняк), которые обладают способностью притягивать к себе находящиеся поблизости небольшие железные предметы (рис. 103) и оказывают влияние на компас.

Кусок железа или его сплава можно намагнитить, т. е. сделать его искусственным магнитом. Для этого металл нужно достаточно близко поднести к магниту. Такой кусок металла приобретёт магнитные

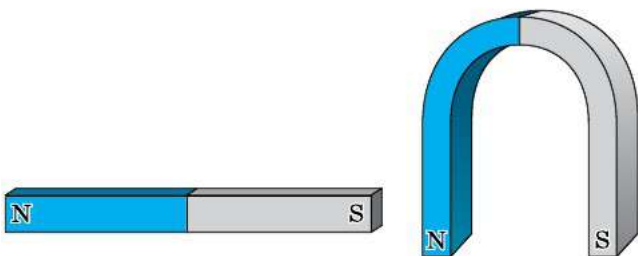


Рис. 102

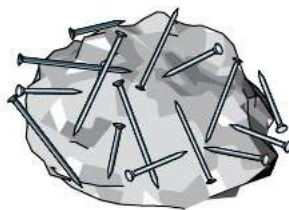


Рис. 103

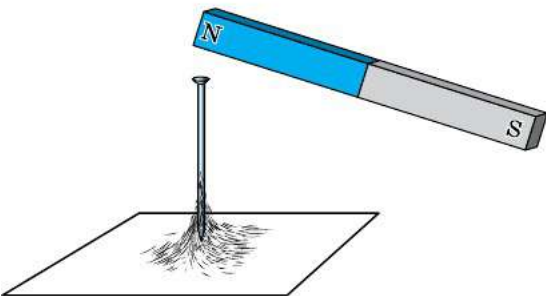


Рис. 104

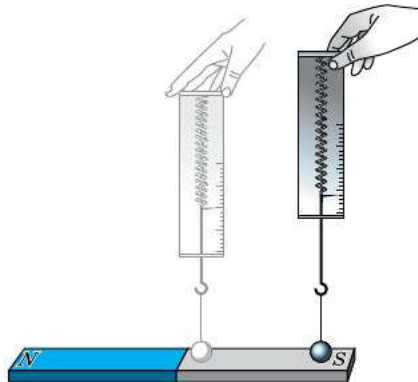


Рис. 105

свойства и будет притягивать к себе другие железные предметы. Однако после удаления магнита он может потерять свои магнитные свойства. Так, поднеся к железному гвоздю магнит (рис. 104), можно наблюдать, как гвоздь притянет к себе металлические опилки. Но стоит убрать магнит, и большая часть опилок опадёт.

3. Выясним, одинаковы ли свойства магнита в разных его точках. Прделаем для этого следующий опыт. Возьмём полосовой магнит и будем дотрагиваться до него железным шариком, закреплённым на динамометре (рис. 105). По показаниям динамометра в момент отрыва шарика от магнита можно судить о силе притяжения шарика к какой-либо точке магнита. Можно заметить, что наибольшее значение силы динамометр покажет, когда шарик будет находиться у концов магнита. Следовательно, притяжение шарика к концам магнита самое сильное, а к середине магнита он практически не притягивается.

Те места магнита, в которых магнитное действие проявляется наиболее сильно, называют **магнитными полюсами**. У всякого магнита есть два полюса: **северный N** и **южный S**. Красным цветом принято окрашивать южный полюс магнита, синим — северный. Получить магнит с одним полюсом невозможно. Если полосовой магнит разделить на две равные части, то каждая из них окажется магнитом с двумя полюсами.

4. Магнитная стрелка является маленьким постоянным магнитом. Если подвесить магнитную стрелку на нити (рис. 106, а) или укрепить на острие (рис. 106, б), позволяя ей свободно вращаться, то магнитная стрелка всегда будет устанавливаться так, что её северный полюс повернётся в направлении Северного географиче-



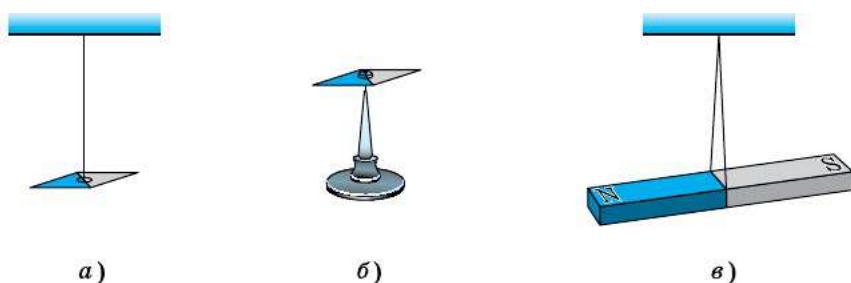


Рис. 106

ского полюса Земли, а южный полюс — в направлении Южного географического полюса Земли. Аналогично будет вести себя и полосовой магнит (рис. 106, в).

Магнитные стрелки используют для обнаружения магнитных свойств любых веществ. Если поднести к магнитной стрелке полосовой магнит (рис. 107), то можно заметить, что северный полюс стрелки будет притягиваться к южному полюсу магнита и отталкиваться от его северного полюса. Южный полюс стрелки будет отталкиваться от южного полюса магнита и притягиваться к его северному полюсу.

Так же взаимодействуют две магнитные стрелки между собой: они повернутся и установятся друг против друга противоположными полюсами (рис. 108).

Таким образом, можно сделать вывод, что *магниты притягиваются разноимёнными полюсами, а отталкиваются — одноимёнными.*

Вопросы для самопроверки

1. Какие тела называют постоянными магнитами?
2. В чём различие между естественными и искусственными магнитами?
3. Как можно намагнитить кусок железа?

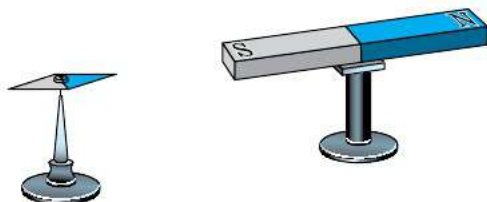


Рис. 107

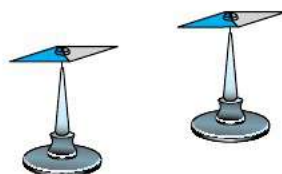


Рис. 108

4. Что называют полюсами магнита?
5. Как взаимодействуют между собой магниты?
6. Как с помощью магнитной стрелки можно определить полюсы полосового магнита, на котором стёрлась краска?

§ 30. Магнитное поле

- ✓ Какое взаимодействие называют электрическим?
- ✓ Как осуществляется электрическое взаимодействие?

1. Взаимодействие магнитов можно объяснить, если предположить, что аналогично электрическому магнитное взаимодействие осуществляется посредством поля. Подобно тому как вокруг каждого электрического заряда существует электрическое поле, вокруг каждого магнита имеется **магнитное поле**.

Убедимся в существовании магнитного поля, для чего воспользуемся маленькими магнитными стрелками. Расположим их вокруг полосового магнита. Стрелки мгновенно придут в движение и расположатся в строго определённом порядке (рис. 109). Это означает, что магнитное поле, существующее вокруг магнита, подействовало с определённой силой на магнитные стрелки и совершило работу. Следовательно, подобно электрическому полю, магнитное поле оказывает определённое действие на другие тела (в данном случае магниты). Действие магнитного поля и является подтверждением его существования.

2. Изменим несколько опыт и вместо магнитных стрелок будем использовать железные опилки, которые вблизи магнита намагничиваются и становятся маленькими магнитиками. Насыпем железные опилки на лист бумаги и положим его на магнит. Слегка встряхнём лист бумаги. Опилки расположатся в виде цепочек (рис. 110).

Можно заметить, что опилки располагаются с разной плотностью вокруг полосового магнита. Это говорит о том, что действия, кото-

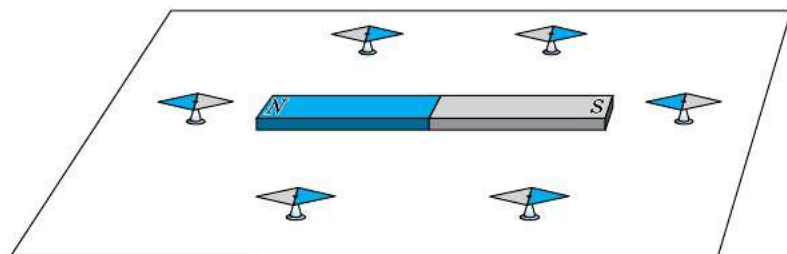


Рис. 109

рые оказывает магнит на опилки, в разных точках поля различны. Наиболее сильно это действие проявляется возле полюсов магнита. Чем дальше от полюсов, тем слабее подобное действие, следовательно, тем слабее магнитное поле.

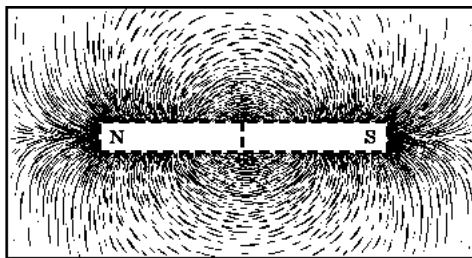


Рис. 110

3. Вы знаете, что силовое действие электрического поля характеризуется физической величиной, называемой напряжённостью. Аналогично можно ввести силовую характеристику и для магнитного поля. Такую физическую величину называют **магнитной индукцией** и обозначают буквой $\vec{B}$. Как и напряжённость электрического поля, магнитная индукция является **векторной величиной**. Направление магнитной индукции в данной точке совпадает с направлением северного полюса магнитной стрелки в этой точке. Магнитная индукция имеет наибольшее значение у полюсов магнита, которое уменьшается при удалении от них.

Магнитная индукция определяет действие магнитного поля на помещённые в него тела.

4. Магнитное поле можно изобразить графически с помощью **линий магнитной индукции**.

Линии, вдоль которых в магнитном поле располагаются магнитные стрелки, называют линиями магнитной индукции.

Линии магнитной индукции магнитного поля, так же как и линии напряжённости электрического поля, — это модель.

Цепочки, которые образуют в магнитном поле магнитные стрелки или железные опилки, показывают форму линий магнитной индукции. Принято считать, что направление линий магнитной индукции в каждой точке совпадает с направлением, которое указывает северный полюс магнитной стрелки, помещённой в эту точку поля. **Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ направлен по касательной к каждой точке линии магнитной индукции.**

Линии магнитной индукции магнита выходят из его северного полюса и входят в южный. Внутри же магнита линии магнитной индукции продолжают и обязательно замыкаются (рис. 111). **Линии магнитной индукции всегда замкнуты.** Они не имеют ни

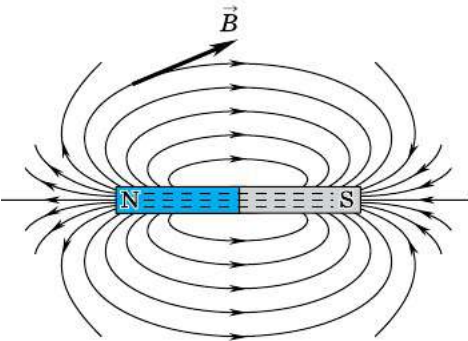


Рис. 111

начала, ни конца. В этом их принципиальное отличие от линий напряжённости электрического поля, которые начинаются и заканчиваются на зарядах. То, что линии магнитной индукции замкнуты, означает, что *в природе не существует магнитных зарядов*.

По густоте линий магнитной индукции можно судить о значении магнитной индукции: чем

гуще расположены линии, тем сильнее магнитное поле, тем больше магнитная индукция.

5. С помощью железных опилок можно получить картину магнитных полей, созданных различными магнитами. На рисунке 112, *а* показано магнитное поле, созданное двумя полосовыми магнитами, обращёнными друг к другу одноимёнными полюсами, а на рисунке 112, *б* — двумя магнитами, обращёнными друг к другу разноимёнными полюсами. Картина магнитного поля подковообразного магнита представлена на рисунке 113.

В некоторых случаях можно создать магнитное поле, в любой точке которого магнитная индукция имеет одно и то же значение. Такое поле называют **однородным магнитным полем**. Линии магнитной индукции в нём параллельны друг другу и располагаются с одинаковой густотой. Однородным, например, можно считать маг-

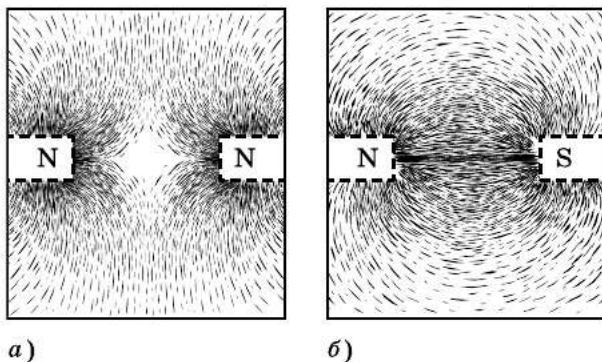


Рис. 112

нитное поле между полюсами подковообразного магнита (см. рис. 113).

Магнитные поля, линии индукции которых перпендикулярны плоскости чертежа, принято изображать в виде системы точек или крестиков. Если представить вектор магнитной индукции в виде стрелы (рис. 114), то линии индукции магнитного поля, направленные из-за чертежа на нас, будут изображаться точками (мы видим острия стрел, летящих на нас). Линии индукции магнитного поля, направленные от нас за чертёж, изображают крестиками (мы видим хвостовое оперение стрел, летящих от нас).

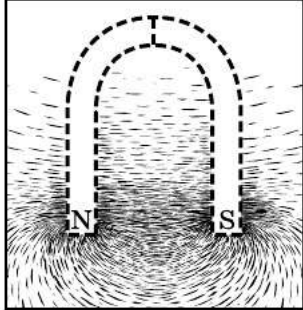


Рис. 113



Рис. 114

Вопросы для самопроверки

1. Как можно доказать существование магнитного поля?
2. Как располагаются магнитные стрелки или железные опилки в магнитном поле?
3. Что характеризует физическая величина, называемая магнитной индукцией?
4. Какое направление принято за направление линий магнитной индукции?
- 5*. Что означает утверждение: линии магнитной индукции — это модель? Ответ поясните.
6. В чём сходство и различие электрического и магнитного полей?
7. Какое поле называют однородным магнитным полем?

Задание 29

1. К магнитной стрелке поднесли полосовой магнит. Она расположилась так, как показано на рисунке 115. Каким полюсом полосовой магнит обращён к стрелке?
2. Левым концом лезвия бритвы прикоснулись к северному полюсу магнита (рис. 116). Будут ли после этого обладать магнитными свойствами оба конца лезвия?

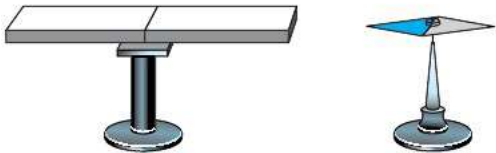


Рис. 115



Рис. 116

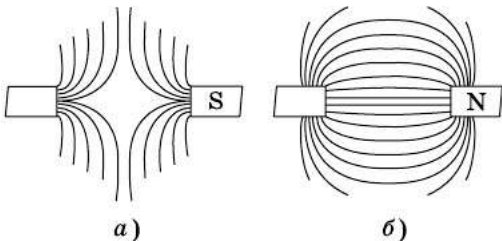


Рис. 117

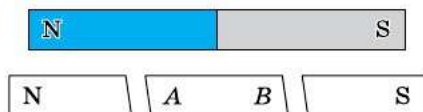


Рис. 118

3. На рисунке 117 показаны линии магнитной индукции магнитного поля, созданного двумя постоянными магнитами. Определите полюс левого магнита и укажите направление линий магнитной индукции в каждом случае.

4. Полосовой магнит разделили на три части (рис. 118). Будут ли обладать магнитными свойствами концы *A* и *B*?

5. На рисунке 119 показаны линии магнитной индукции однородного магнитного поля. Где находится северный полюс магнита — перед чертежом или за ним?

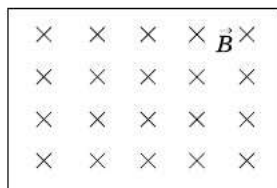


Рис. 119

Лабораторная работа № 4

Изучение магнитного поля постоянных магнитов

Цель работы:

изучить свойства постоянных магнитов и получить картину их магнитных полей.

Приборы и материалы:

два полосовых магнита, подковообразный магнит, коробочка-сито с железными опилками, небольшие железные гвоздики, магнитная стрелка, лист плотной белой бумаги.

Порядок выполнения работы

1. Установите, как взаимодействуют между собой полюса полосовых магнитов (одноимённые и разноимённые). Запишите вывод в тетрадь.
2. Определите, в каких частях магнита магнитное действие проявляется наиболее сильно. Воспользуйтесь для этого небольшими железными гвоздиками и проделайте два опыта.

а) Возьмите один гвоздик и, приставляя его к разным частям магнита, исследуйте действие на него полосового и подковообразного магнитов.

б) Затем, держа горизонтально полосовой магнит, приставьте к концу магнита гвоздик, к первому гвоздику — второй и т. д. Определите, цепочку из скольких гвоздиков может выдержать магнит.

Повторите опыт, поместив первый гвоздик ближе к середине магнита. Сделайте вывод и запишите результаты всех наблюдений.

3. Положите на стол полосовой магнит, а сверху на него — лист плотной белой бумаги. Насыпьте из коробочки-сита железные опилки, слегка постучите по листу и рассмотрите картину расположения опилок. Повторите опыт с двумя магнитами. Получите картину магнитных полей, созданных двумя разноимёнными полюсами и двумя одноимёнными полюсами. Ещё одну картину получите, используя подковообразный магнит. Зарисуйте в тетради картины магнитных полей и покажите на них направление линий магнитной индукции в каждом случае.

4. Расположите магниты в той же последовательности, как в п. 3, и, используя магнитную стрелку, убедитесь в правильности сделанных вами рисунков.

§ 31. Магнитное поле Земли

✓ Какое взаимодействие называют магнитным?

1. Чем объясняется тот факт, что магнитная стрелка всегда устанавливается в строго определённом направлении? Почему один её конец ориентирован на север, а другой — на юг? Это связано с **существованием магнитного поля Земли**. В магнитном поле Земли магнитная стрелка устанавливается вдоль линий магнитной индукции этого поля. Объяснение причин существования магнитного поля Земли до сих пор остаётся до конца не разгаданным.

Очень упрощённо магнитное поле Земли можно представить в виде гигантского полосового магнита, расположенного между Северным и Южным географическими полюсами. Южный конец этого магнита находится около Северного географического полюса Земли, а северный — вблизи её Южного географического полюса (рис. 120).

Многочисленные наблюдения показали, что *географические и магнитные полюсы не совпадают*. Положение магнитных полюсов Земли непрерывно меняется. Так, южный магнитный

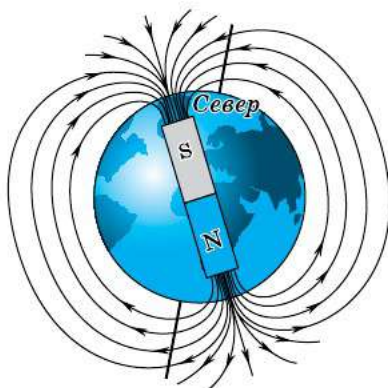


Рис. 120

полюс, по данным 2012 г., находится на 85° северной широты и 147° западной долготы. Северный же магнитный полюс, по данным 2012 г., расположен на 64° южной широты и 137° восточной долготы. Сразу же обращает на себя внимание тот факт, что магнитная ось (линия, соединяющая северный и южный магнитные полюсы) не совпадает с географической осью и не проходит через центр Земли. Более того, положение магнитных полюсов Земли непрерывно меняется, но очень медленно. Если же представить изменение магнитного поля Земли в рамках геологической истории (а это миллионы лет), то за этот период магнитные полюсы Земли не только сдвигались, но и много раз меняли свою полярность (северный магнитный полюс становился южным и наоборот).

2. В связи с тем что направление магнитной оси не совпадает с направлением географической, магнитная стрелка компаса лишь приблизительно показывает направление на географические север и юг. На земном шаре существуют области, в которых стрелка компаса очень сильно отклоняется от направления линии индукции магнитного поля Земли. Такие области называют областями **магнитной аномалии**.

Причиной таких аномалий в большинстве случаев являются залежи железной руды в недрах Земли. Поэтому обнаружение магнитной аномалии даёт информацию о наличии рудных полезных ископаемых. Одной из крупнейших магнитных аномалий в нашей стране является Курская магнитная аномалия.

3. Магнитное поле Земли на 90% обусловлено её внутренним строением. Однако существенное влияние на магнитное поле Земли оказывают процессы, происходящие в околоземном пространстве, и прежде всего на Солнце.

С поверхности Солнца в мировое пространство выбрасываются потоки заряженных частиц. Особенно мощные потоки частиц рождаются при взрывных явлениях на Солнце, т. е. в период усиления солнечной активности. Магнитное поле, созданное этими частицами, вызывает кратковременные изменения магнитного поля Земли. Возникают так называемые *магнитные бури*. Наблюдения показали, что магнитные бури сильно влияют на всё живое на Земле, в том числе и на человека.

4. Изучение магнитного поля Земли имеет чрезвычайно важное научное и практическое значение. Полёты искусственных спутников и космических кораблей открыли новые возможности для изучения магнитного поля Земли. Было, в частности, установлено, что земное магнитное поле в значительной степени препят-



ствует проникновению в атмосферу Земли космического излучения, воздействие которого на клетки живого организма вызывает мутации. Это приводит как к позитивному, так и к негативному изменению и развитию клетки. Если предположить, что магнитное поле Земли исчезло, то одновременно с ним исчезнет и всё живое.

Магнитное поле обнаружено у всех планет Солнечной системы, кроме Венеры.

Вопросы для самопроверки

1. Какие факты свидетельствуют о том, что вокруг Земли существует магнитное поле?
2. Где находятся магнитные полюсы Земли?
3. Являются ли положения магнитных полюсов Земли постоянными?
4. Что такое области магнитных аномалий?
5. Чем объясняется появление магнитных бурь?
6. Почему изучение магнитного поля Земли имеет огромное научное и практическое значение?

§ 32. Магнитное поле электрического тока

- ✓ Что называют постоянным магнитом?
- ✓ Что вам известно о магнитном поле?

1. Вы уже знаете, что магнитное поле существует вокруг любого постоянного магнита. Однако постоянный магнит — не единственный источник магнитного поля.

Рассмотрим рисунок 121, на котором изображён опыт, поставленный датским учёным *Хансом Кристианом Эрстедом* (1777—1851) в 1820 г. Установка состоит из магнитной стрелки, которая может свободно вращаться, и проводника, соединённого с источником тока. До включения тока стрелка располагается в магнитном

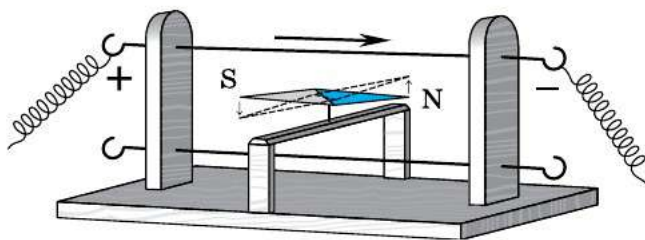


Рис. 121



поле Земли, ориентируясь с севера на юг. Проводник располагают параллельно магнитной стрелке. При замыкании цепи стрелка поворачивается на 90° и устанавливается перпендикулярно проводнику с током. При размыкании цепи магнитная стрелка возвращается в своё начальное положение.

Это означает, что проводник с током и магнитная стрелка взаимодействуют друг с другом подобно тому, как взаимодействуют постоянный магнит и магнитная стрелка. Следовательно, *вокруг проводника с электрическим током существует магнитное поле*, которое и совершает работу по повороту магнитной стрелки.

2. Опыт Эрстеда вызвал необычайный интерес у физиков того времени. Раньше электрические и магнитные явления рассматривались как совершенно независимые. Открытие Эрстеда обнаружило взаимосвязь между этими явлениями. Было установлено, что *существование магнитных полей связано с движением электрических зарядов*. Это открытие послужило началом новых исследований.

Многочисленные опыты подтвердили, что во всех случаях при движении заряженных частиц обязательно появляется магнитное поле, независимо от рода проводника или среды, в которой частицы движутся.

Неподвижные электрические заряды порождают только электрическое поле, оно не действует на магнитную стрелку. Вокруг движущихся зарядов, т. е. электрического тока, существует и электрическое, и магнитное поле.

3. Для того чтобы обнаружить магнитное поле вокруг проводника с током, воспользуемся тем же способом, которым мы пользовались для обнаружения магнитного поля постоянного магнита.

Сквозь лист картона пропустим проводник, соединённый с источником тока. Насыпем на картон тонкий слой железных опилок. При включении тока железные опилки под действием магнитного поля переориентируются и расположатся по concentрическим окружностям (рис. 122). Цепочки, которые образуют в магнитном поле железные опилки, как вы уже знаете, показывают форму линий магнитной индукции. Эти линии, как и в случае с постоянными магнитами, замкнуты.

Несколько изменим опыт: вместо металлических опилок поставим на лист картона магнитные стрелки. При замыкании элек-

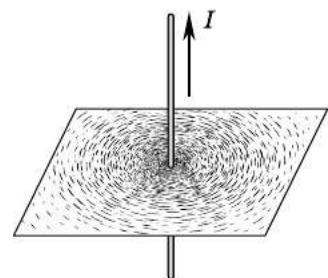


Рис. 122



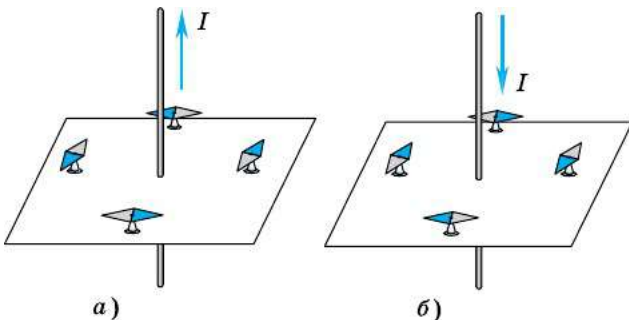


Рис. 123

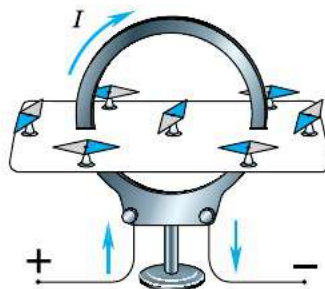


Рис. 124

трической цепи стрелки расположатся вдоль линий магнитной индукции (рис. 123, а). Если же изменить направление тока в проводнике, то все стрелки повернутся на 180° (рис. 123, б).

На рисунке 124 показано расположение магнитных стрелок вокруг проводника с током, имеющего форму витка. Как и в предыдущем опыте, стрелки в магнитном поле расположатся вдоль линий магнитной индукции, но ориентированы они будут по-разному, поскольку в левой части рисунка ток «выходит» из листа, а в правой — «входит» в него.

Таким образом, *линии магнитной индукции магнитного поля имеют определённое направление, которое связано с направлением тока в проводнике.*

4. Для определения направления линий магнитной индукции поля, созданного проводником с током, пользуются *правилом буравчика*:

если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением линий магнитной индукции.

На рисунке 125 показано направление тока в проводнике, а также направление линий магнитной индукции.

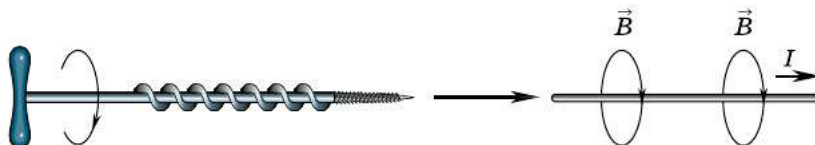


Рис. 125

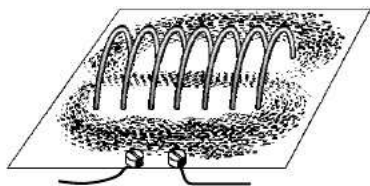


Рис. 126

5. Большой практический интерес представляет магнитное поле катушки с током. На рисунке 126 показана картина магнитного поля катушки с током, полученная с помощью железных опилок. Внутри катушки линии магнитной индукции параллельны друг другу, а на концах расходятся и замыкаются вне катушки. Подобная картина аналогична расположению линий магнитной индукции поля полосового магнита (см. рис. 110).

Если подвесить катушку с током на тонких и гибких проводниках и дать ей возможность свободно вращаться, то она установится так, что один её конец

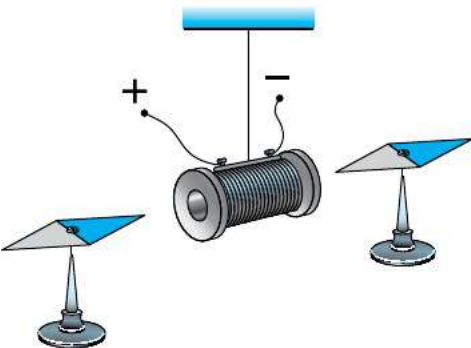


Рис. 127

будет обращён на север, другой — на юг (рис. 127). Следовательно, катушка с током подобна магниту. Если поменять направление тока в катушке, то она повернётся на 180° . Это свидетельствует о том, что направление линий индукции магнитного поля катушки связано с направлением тока в проводнике (как и во всех предыдущих опытах).

6. Для определения направления линий магнитной индукции магнитного поля, возникающего в катушке с током, можно также воспользоваться правилом буравчика, сформулировав его так:

если направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением тока в катушке, то направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением линий магнитной индукции внутри катушки.

На рисунке 128 линии магнитной индукции, совпадающие с направлением поступательного движения острия буравчика, выходят из правой части катушки с током. Следовательно, справа у катушки с током северный полюс, а слева — южный.

7. Взаимосвязь магнитных полей и движущихся электрических зарядов впервые попытался объяснить Ампер. Он предпо-

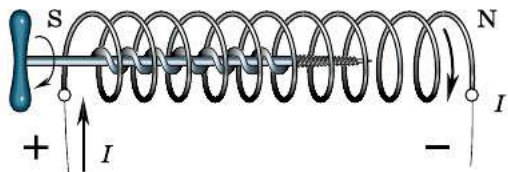


Рис. 128

жил, что внутри каждой молекулы вещества, подобного железу или его сплавам, циркулируют электрические токи. Вокруг этих токов существуют магнитные поля, которые и приводят к возникновению магнитных свойств вещества. Гипотеза Ампера была очень прогрессивна для начала XIX в., поскольку ещё не было известно ни о строении атома, ни о движении заряженных частиц — электронов вокруг ядра. Развитие теории магнетизма подтвердило правильность предположения Ампера.

Вопросы для самопроверки

1. Опишите опыт Эрстеда. В чём, по вашему мнению, заключается роль этого опыта с точки зрения научного познания?
2. Какое поле существует вокруг неподвижного заряда; вокруг движущегося заряда?
3. Какие опыты могут подтвердить существование магнитного поля вокруг проводника с током?
4. Как на опыте показать, что направление линий магнитной индукции связано с направлением тока в проводнике?
5. Сформулируйте правило буравчика.
6. Как показать, что магнитное поле катушки с током подобно магнитному полю полосового магнита?
7. Что следует сделать, чтобы изменить магнитные полюсы катушки с током на противоположные?
8. В чём состоит гипотеза Ампера?

Задание 30

1. Как можно узнать, замкнута ли цепь, содержащая проводник, не пользуясь амперметром?
2. Каким полюсом повернётся к вам магнитная стрелка, если ток в проводнике направлен от A к B (рис. 129)?

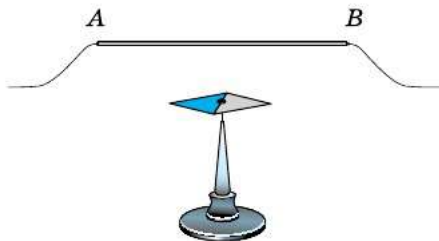


Рис. 129

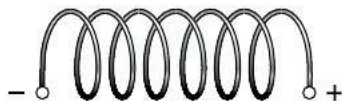


Рис. 130

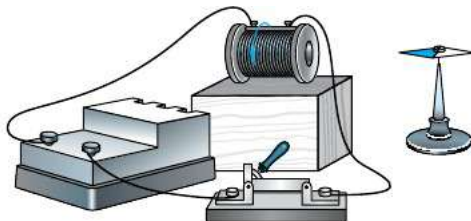


Рис. 131

3. Определите полюсы магнитного поля катушки, включённой в цепь, как показано на рисунке 130.

4. При замыкании электрической цепи северный полюс магнитной стрелки повернулся, как показано на рисунке 131. Определите, какие знаки («+» или «-») должны стоять возле каждой клеммы источника тока (стрелкой показана навивка провода катушки).

5. Придумайте и выполните опыт, который показал бы, что вокруг покоящихся электрических зарядов не существует магнитного поля.

§ 33. Применение магнитов

- ✓ Как можно создать магнитное поле?
- ✓ Как обнаружить существование магнитного поля?

1. Магнитное поле постоянного магнита остаётся неизменным, магнитное поле катушки с током можно изменять. Если увеличить силу тока в проводнике, то индукция магнитного поля тока также увеличится. Чтобы обнаружить такую зависимость, достаточно включить в цепь реостат, как показано на рисунке 132, и с его помощью изменять силу тока в катушке. При увеличении силы тока катушка притянет больше железных опилок.

Действие магнитного поля катушки с током можно усилить во много раз (иногда во много тысяч раз), поместив внутрь катушки железный сердечник (рис. 133).

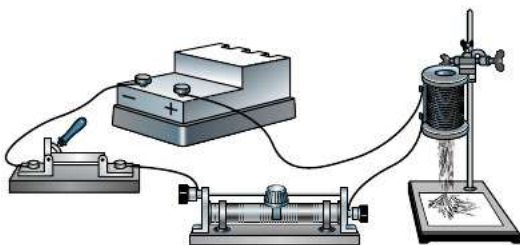


Рис. 132

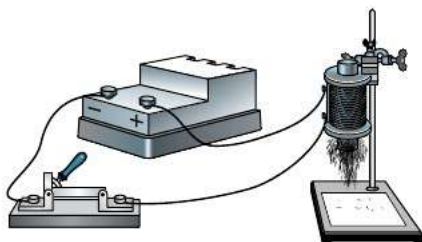


Рис. 133



Катушку с железным сердечником внутри называют электромагнитом.

2. Электромагниты, благодаря возможности регулировать их магнитное действие, широко применяются в технике и в научных исследованиях.

Например, электромагниты используют для подъёма и переноски тяжёлых стальных или чугунных изделий, для извлечения чёрных (содержащих железистые компоненты) металлов на свалках металлического лома (рис. 134, а). Электромагниты подъёмного крана обладают огромной мощностью.

Во многих технических устройствах, таких как телефон, телеграф, электроизмерительные приборы, также применяются электромагниты.

Ещё недавно казалось, что поезд на магнитной «подушке» — это дело отдалённого будущего. Сегодня такие поезда построены, в Китае, Японии, Южной Корее и Германии они уже находятся в эксплуатации. Поезд (рис. 134, б) не имеет колёс, а «плывёт» над длинной магнитной полосой, заменяющей рельсы. Под магнитной полосой расположены мощные электромагниты, создающие необходимое магнитное поле. Электрический ток подаётся в эти электромагниты таким образом, что они ведут себя как двигатель, перемещающий поезд вдоль пути. Поезда на магнитной подушке не испытывают трения, не загрязняют атмосферу и практически бесшумны.



Рис. 134

3. Постоянные магниты также широко используют в промышленности, в быту и в медицине. Например, в современных точильных машинах, чтобы удерживать металлическую деталь, применяют постоянные магниты, а не тиски, которые могут повредить заготовку.

В своём доме вы наверняка сможете найти магнитную защёлку в холодильнике или в дверце шкафа. Защёлка представляет собой металлические магниты, закреплённые в пластиковом чехле на раме. Эти магниты притягиваются к металлической пластине на двери и прочно удерживают её в закрытом положении.

В медицине постоянные магниты используют, например, в диагностике. При проведении обследования в организм человека вводится специальная «пилюля», движением которой можно управлять, манипулируя магнитом, находящимся снаружи. «Пилюля» представляет собой миниатюрный радиопередатчик с металлическим наконечником, с помощью которого получают информацию о таких факторах, как температура или содержание соли в крови.

4. Постоянные магниты и электромагниты иногда используют вместе. Например, на железных дорогах в целях большей безопасности применяют системы, в которых магниты и электромагниты дополняют друг друга. На определённом расстоянии от светофора к рельсу вплотную прикрепляют сильный постоянный магнит. Когда поезд проходит над магнитом, в кабине машиниста поворачивается полосовой магнит и включает звуковой сигнал. Через несколько секунд кабина проходит над электромагнитом, связанным со светофором. Если на светофоре горит зелёный свет, то в цепи электромагнита течёт ток. Магнитное поле электромагнита возвращает в начальное положение постоянный магнит в кабине. Когда же на светофоре горит красный или жёлтый свет, электромагнит выключен. Сразу же автоматически включается тормозная система, которая, как и звуковой сигнал, соединена с постоянным магнитом.

Вопросы для самопроверки

1. Как можно изменить магнитное поле катушки с током?
2. Что называют электромагнитом?
3. Приведите примеры использования электромагнитов в промышленности.
4. Приведите примеры использования постоянных магнитов.
5. Назовите имеющиеся у вас дома приборы или технические устройства, в которых применяется постоянный магнит или электромагнит.

Задание 31

1. На рисунке 135 показана схема электромагнитного реле, с помощью которого включается цепь высокого напряжения. Реле подключают к маломощному источнику тока. На схеме цифрами обозначено:

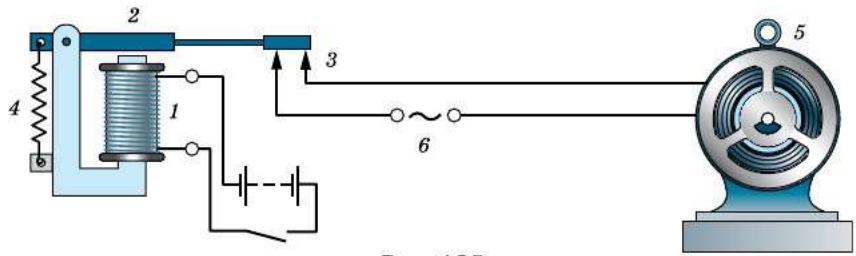


Рис. 135

1 — электромагнит; 2 — якорь; 3 — контакты цепи высокого напряжения; 4 — пружина; 5 — электродвигатель; 6 — источник тока высокого напряжения.

Объясните принцип действия реле. Из какого материала должен быть изготовлен якорь 2, притягивающийся к электромагниту 1?

2. Объясните принцип действия магнитного сепаратора для зерна, показанного в разрезе на рисунке 136. Цифрами на рисунке обозначено: 1 — смесь семян с магнитным порошком; 2 — вращающийся барабан; 3 — электромагнит; 4 — семена с гладкой поверхностью; 5 — семена с шероховатой поверхностью (сорняки).

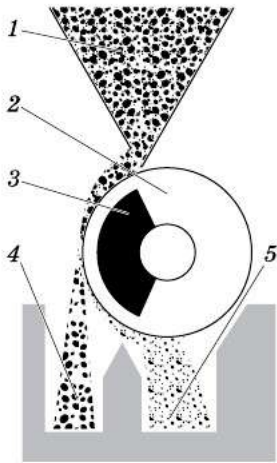


Рис. 136

Лабораторная работа № 5

Сборка электромагнита и его испытание

Цель работы:

изучить принцип действия электромагнита с помощью катушки без сердечника и научиться собирать электромагнит из готовых деталей.

Приборы и материалы:

лабораторный источник питания, реостат, ключ, соединительные провода, магнитная стрелка, детали для сборки электромагнита, железный гвоздь.

Порядок выполнения работы

1. Соберите электрическую цепь, состоящую из источника тока, катушки электромагнита без сердечника, ключа и соединительных про-

водов. Замкните цепь и при помощи магнитной стрелки определите полюсы катушки. Начертите схему электрической цепи и укажите направление тока в ней¹.

2. Медленно отодвигая магнитную стрелку от катушки вдоль её оси, наблюдайте за отклонением стрелки от начального положения. Сделайте вывод.

3. Установите магнитную стрелку на таком расстоянии от катушки, чтобы магнитное поле почти не действовало на неё. Вставьте в катушку железный сердечник и пронаблюдайте действие электромагнита на стрелку. Сделайте вывод.

4. С помощью реостата изменяйте силу тока в цепи и наблюдайте за отклонением магнитной стрелки. Сделайте вывод.

5. Из готовых деталей соберите электромагнит. Катушки соедините между собой последовательно так, чтобы на их свободных концах получились разноимённые полюсы. С помощью магнитной стрелки установите расположение полюсов электромагнита. Начертите схему электромагнита и покажите на ней направление тока в катушках электромагнита.

6. Поместите железный гвоздь под полюсами электромагнита и, замыкая и размыкая цепь, наблюдайте за работой электромагнита.

§ 34. Действие магнитного поля на проводник с током

✓ Что характеризует магнитная индукция?

1. Вы уже знаете, что магнитные поля, созданные постоянными магнитами или токами, действуют на помещённые в поле магнитные стрелки (или железные опилки). Но магнитные свойства постоянных магнитов, в соответствии с гипотезой Ампера, в свою очередь, обусловлены токами, циркулирующими в частицах, из которых состоит вещество этих магнитов. Таким образом, можно предположить, что *в основе всех магнитных взаимодействий лежит действие магнитного поля на электрический ток.*

Рассмотрим более подробно действие магнитного поля на проводник с током и попытаемся подтвердить или опровергнуть высказанное предположение.

2. Соберём установку, состоящую из источника тока, ключа, реостата и проводника, как показано на рисунке 137. Проводник подвесим на тонких проводах и поместим в магнитное поле, созданное подковообразным магнитом. При отсутствии тока в проводнике провода будут расположены вертикально. При замыкании цепи проводник отклонится от первоначального положения вправо.

¹ Условное обозначение на схеме: катушки $\left. \begin{array}{c} \text{---} \end{array} \right\}$, катушки с сердечником $\left. \begin{array}{c} \text{---} \end{array} \right\} |$.



Если же поменять направление тока в цепи, то проводник отклонится в противоположную сторону.

Следовательно, *магнитное поле действует на проводник с током с некоторой силой.*

3. Выясним, от чего зависит сила, действующая на проводник с током в магнитном поле.

Увеличивая с помощью реостата силу тока в цепи (см. рис. 137), можно заметить увеличение силы, действующей со стороны магнитного поля на проводник. Это будет проявляться в большем отклонении проводника от первоначального положения. Многочисленные эксперименты учёных показали, что сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, *прямо пропорциональна силе тока в цепи:*

$$F \sim I.$$

Если теперь подковообразный магнит заменить на более мощный, то сила, действующая на проводник с током, также увеличится. Более строгие и точные эксперименты показали, что сила, действующая на проводник с током, *прямо пропорциональна магнитной индукции поля:*

$$F \sim B.$$

Магнитное поле действует только на ту часть проводника, которая расположена в магнитном поле. Если в несколько раз увеличить длину участка проводника, находящегося в магнитном поле, то во столько же раз увеличится и сила, действующая со стороны магнитного поля на проводник. Следовательно, *чем больше длина l проводника с током, тем больше сила, действующая на него:*

$$F \sim l.$$

Таким образом, если направление тока в проводнике перпендикулярно линиям магнитной индукции, то **сила, с которой магнитное поле действует на помещённый в него проводник с током, равна произведению магнитной индукции, силы тока и длины проводника.**

$$F = BIl.$$

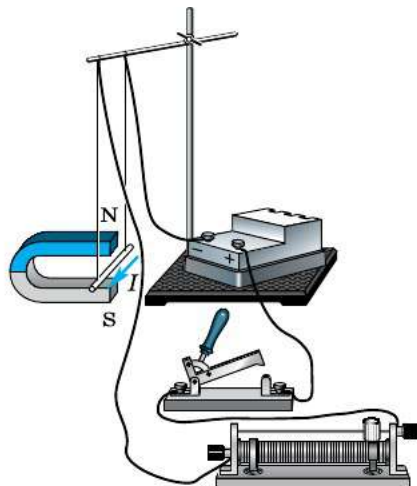


Рис. 137



В этом состоит **закон Ампера**. Он был назван в честь Андре-Мари Ампера, установившего в 1820 г. закон «взаимодействия электрических токов». Силу, с которой магнитное поле действует на проводник с током, называют **силой Ампера**.

4. Для определения направления силы Ампера используют *правило левой руки*:

если левую руку расположить так, что линии магнитной индукции входят в ладонь, а четыре пальца направлены по направлению тока в проводнике, то отогнутый на 90° большой палец покажет направление действующей на проводник силы (рис. 138).

5. Измерив силу, действующую на проводник с током, силу тока в проводнике и его длину, можно определить магнитную индукцию магнитного поля. В самом деле, поскольку для каждого конкретного однородного поля сила F , действующая на проводник длиной l , сила тока в котором I , зависит только от самого магнитного поля, то отношение $\frac{F}{Il}$ можно принять за характеристику магнитного поля.

Магнитная индукция B равна отношению силы F , с которой магнитное поле действует на расположенный перпендикулярно магнитным линиям проводник с током, к произведению силы тока I и длины проводника l .

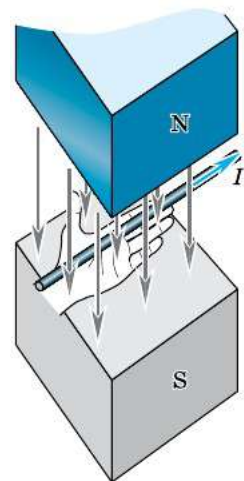


Рис. 138

$$B = \frac{F}{Il}.$$

Единица магнитной индукции в СИ названа *тесла (1 Тл)* в честь югославского учёного-электротехника **Никола Тесла** (1856—1943).

$$[B] = \frac{[F]}{[I][l]} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \text{ Тл}.$$

За единицу магнитной индукции принимают магнитную индукцию однородного поля, в котором на проводник длиной 1 м при силе тока в нём 1 А действует со стороны магнитного поля сила 1 Н.

6. Пример решения задачи

Чему равна сила тока, протекающего в прямолинейном проводнике длиной 50 см, если проводник расположен в однородном магнитном поле с индукцией $4 \cdot 10^{-2}$ Тл перпендикулярно линиям магнитной индукции? Сила, действующая на проводник со стороны магнитного поля, равна 0,25 Н.

Дано:

$$l = 50 \text{ см}$$

$$B = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$$

$$F = 0,25 \text{ Н}$$

$$I = ?$$

СИ

$$0,5 \text{ м}$$

Решение:

Согласно закону Ампера при условии взаимно перпендикулярного расположения проводника с током и вектора магнитной индукции $F = BIl$.

Отсюда можно выделить силу тока:

$$I = \frac{F}{Bl};$$

$$I = \frac{0,25 \text{ Н}}{4 \cdot 10^{-2} \text{ Тл} \cdot 0,5 \text{ м}} = 12,5 \text{ А}.$$

Ответ: $I = 12,5 \text{ А}$.

Вопросы для самопроверки

1. Какой опыт позволяет обнаружить действие магнитного поля на проводник с током?
2. От каких физических величин зависит сила, действующая на проводник с током в магнитном поле?
3. В чём состоит закон Ампера?
4. Как определить направление силы Ампера?
5. Чему равна магнитная индукция?
6. Какова единица магнитной индукции?

Задание 32

1. Определите направление силы Ампера в каждом случае (рис. 139).
2. На рисунках для обозначения направления тока в проводнике, который расположен перпендикулярно плоскости чертежа, показыва-

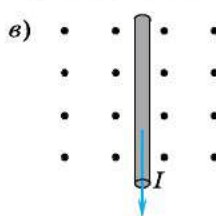
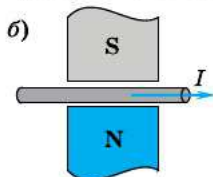
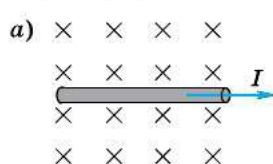


Рис. 139



ют сечение проводника и ставят точку, если ток направлен на нас, или крестик — если ток направлен от нас. Составьте задачу для каждого из представленных на рисунке 140 случаев и решите её.

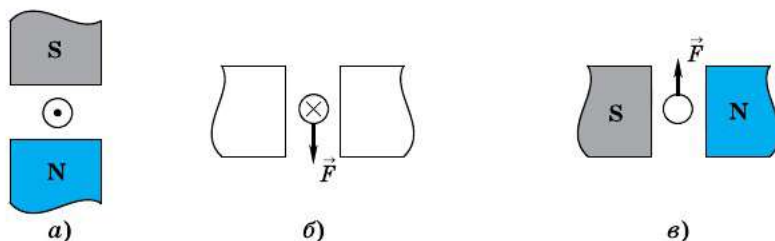


Рис. 140

3. Чему равна магнитная индукция магнитного поля, в котором на проводник длиной 2 см действует сила 100 мН, если сила тока в проводнике 20 А? Проводник с током расположен перпендикулярно линиям магнитной индукции.

4. Определите силу, с которой магнитное поле с индукцией 2 Тл действует на проводник с током длиной 20 см. Сила тока в проводнике 1 А. Проводник с током и линии индукции магнитного поля взаимно перпендикулярны.

5. При введении единицы силы тока используется опыт Ампера по взаимодействию проводников с током (рис. 141). Объясните причину такого поведения проводников с током.

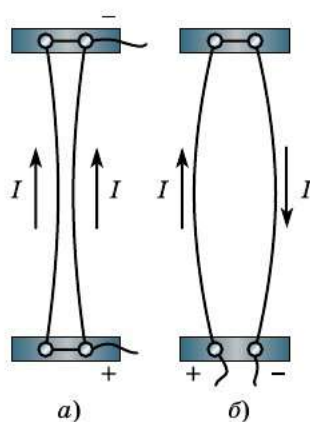


Рис. 141

Лабораторная работа № 6

Изучение действия магнитного поля на проводник с током

Цель работы:

исследовать зависимость направления силы, действующей на проводник с током в магнитном поле, от направления тока в нём и от направления вектора магнитной индукции.

Приборы и материалы:

лабораторный источник питания, реостат, ключ, соединительные провода, подковообразный магнит, штатив, катушка-моток.

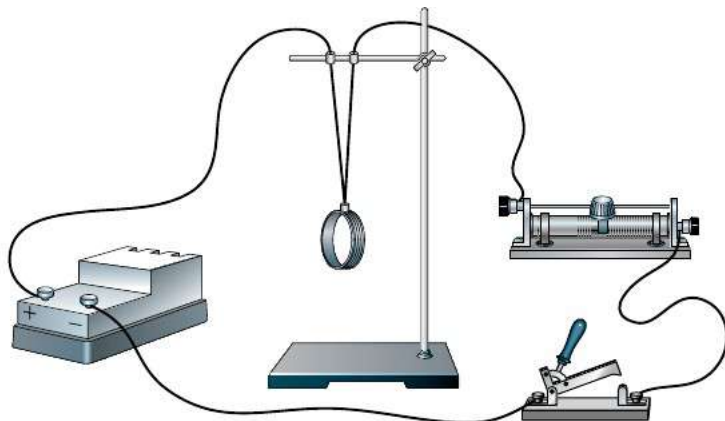


Рис. 142

Порядок выполнения работы

1. Соберите электрическую цепь, состоящую из источника тока, реостата, ключа и катушки-мотка. Подвесьте катушку-моток к штативу (рис. 142).
2. Поднесите один из полюсов подковообразного магнита к катушке и, замыкая и размыкая ключ, наблюдайте движение катушки-мотка.
3. Повторите опыт, поднося к катушке другой полюс магнита. Сделайте вывод.
4. Измените направление тока в цепи и повторите опыт, поднося к катушке-мотку магнит разными полюсами. Пронаблюдайте движение катушки и сделайте вывод.

§ 35. Электродвигатель

- ✓ Вспомните закон Ампера.
- ✓ Как определить направление силы, действующей на помещённый в магнитное поле проводник с током?

1. Механическое движение проводника с током в магнитном поле имеет огромное практическое значение. Более полутора столетий назад, в 1834 г., русский учёный **Борис Семёнович Якоби** (1801—1874) впервые сконструировал электрический двигатель постоянного тока, пригодный для практических целей. Принцип работы этого двигателя основан на действии магнитного поля на проводник с током. Четыре года спустя электродвигатель Якоби уже использовался для приведения в движение гребного вала суд-

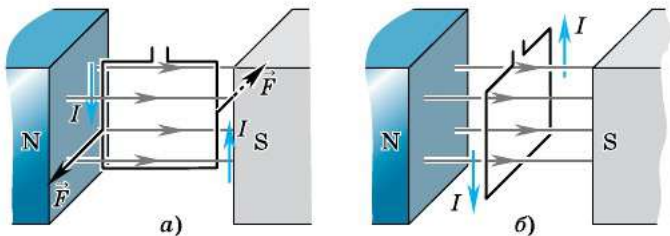


Рис. 143

на, а к 70-м гг. XIX в. электродвигатель был уже настолько усовершенствован, что в неизменном виде сохранился до наших дней. С момента изобретения двигателя постоянного тока началась новая эпоха развития промышленности.

2. Чтобы понять принцип работы электродвигателя, проделаем опыт. Между полюсами магнита поместим прямоугольную рамку, состоящую из нескольких витков проволоки, которая может свободно вращаться вокруг вертикальной оси. При отсутствии электрического тока в рамке она располагается произвольным образом.

Если плоскость рамки параллельна линиям магнитной индукции магнитного поля (рис. 143, а), то при пропускании по ней тока рамка начнёт поворачиваться. Это произойдёт потому, что на каждую из сторон рамки, перпендикулярную линиям магнитной индукции, действует сила Ампера. Направление силы зависит от направления тока. Обе силы поворачивают рамку в одну сторону, в данном случае против хода часовой стрелки.

Когда плоскость рамки будет перпендикулярна линиям магнитной индукции (рис. 143, б), рамка остановится. Чтобы этого не произошло и она продолжала вращаться в том же направлении, необходимо поменять направление тока в цепи. Для этого используют

специальные металлические полукольца 1, прикреплённые к рамке (рис. 144). По полукольцам скользят контактные пластины 2, соединённые с источником тока. При повороте рамки на 180° меняется контактная пластина, которой касается полукольцо, и, следовательно, меняется направление тока в рамке. Таким образом, направление тока в цепи изменяется, и рамка всё время вращается в одном направлении.

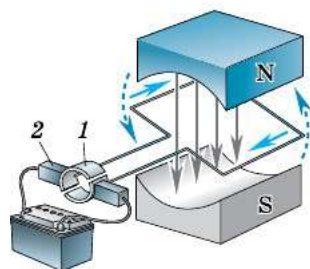


Рис. 144

3. Существуют различные конструкции электродвигателей. Наиболее распространённым является так называемый *коллекторный электродвигатель*, содержащий три основных узла: статор, ротор и коллектор (рис. 145).

Статор 1 (в переводе с латинского — «стоящий неподвижно») представляет собой либо постоянный магнит, либо электромагнит, который служит для создания магнитного поля.

Ротор 2 (в переводе с латинского — «вращающийся») представляет собой сердечник, на который наматывается обмотка. Часто ротор называют *якорем* двигателя.

На оси ротора закрепляют медные *коллекторные пластины 3*, к которым припаиваются выводы обмотки ротора. Две угольные щётки *4* с помощью специальных пружин плотно прижимаются к коллекторным пластинам. К щёткам от источника тока подводится напряжение, питающее обмотку ротора.

При прохождении электрического тока по обмотке ротора он под действием силы Ампера приходит во вращение. Вращательное движение ротора передаётся валу, на который он насажен, а от него — различным механизмам.

4. Электродвигатели обладают целым рядом преимуществ по сравнению с тепловыми двигателями, которые работают за счёт энергии сжигаемого топлива. Прежде всего, электродвигатели экологически целесообразны: они не загрязняют атмосферу, им не нужен запас топлива и т. д. Последние годы ведутся работы по замене в автомобилях двигателей внутреннего сгорания на электрические. Есть надежда, что города нашей планеты скоро избавятся от выхлопных газов.

Кроме того, современные электродвигатели можно изготовить любой мощности: от нескольких ватт, как, например, в бытовых домашних приборах, до сотен и тысяч киловатт в промышленном производстве. При одинаковой мощности электрические двигатели имеют существенно меньшие размеры, чем тепловые. И наконец, коэффициент полезного действия электрических двигателей гораздо выше, чем тепловых. КПД мощных электродвигателей достигает 98%, что невозможно ни для какого другого двигателя.

Электродвигатели, используемые сегодня в промышленности, работают в основном на переменном токе. Но и двигатели постоянного тока достаточно широко используются, особенно на транспор-

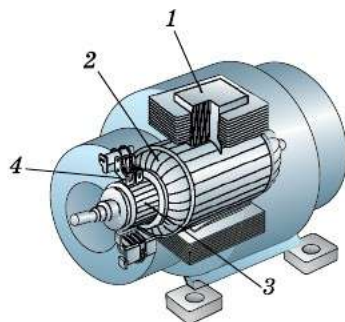


Рис. 145

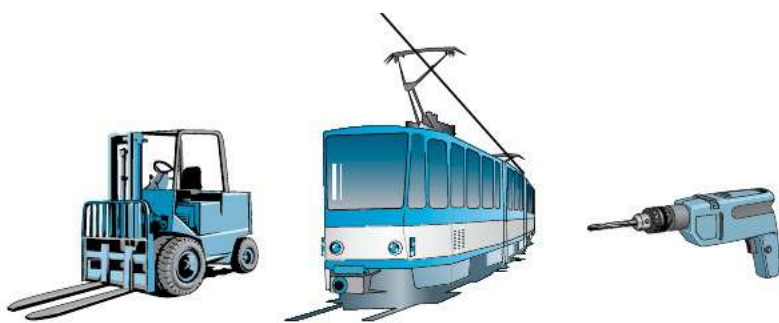


Рис. 146

те. Электропоезда, трамваи, троллейбусы работают на постоянном токе (рис. 146). Микроэлектродвигатели постоянного тока широко применяют в системах автоматического регулирования, в бытовых приборах — электробритвах, кофемолках и т. д. Мощные электродвигатели используются главным образом для приведения в действие прокатных станков, подъёмных кранов и пр.

Вопросы для самопроверки

1. На каком физическом явлении основано действие электрического двигателя?
2. Объясните, почему вращается рамка с током, помещённая в магнитное поле.
3. Каковы преимущества электрических двигателей по сравнению с тепловыми?
4. Где используются электрические двигатели постоянного тока?

Лабораторная работа № 7

Изучение работы электродвигателя постоянного тока

Цель работы:

познакомиться на модели электродвигателя постоянного тока с его устройством и работой.

Приборы и материалы:

модель электродвигателя, лабораторный источник питания, реостат, ключ, соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Рассмотрите основные детали модели электродвигателя постоянного тока.
2. Начертите схему электрической цепи, состоящей из источника тока, модели электродвигателя, ключа и реостата, соединённых последовательно. Соберите электрическую цепь.

3. Замкните цепь. С помощью реостата регулируйте силу тока в цепи. Наблюдая за работой электродвигателя, сделайте вывод о зависимости скорости вращения его якоря от силы тока в цепи.

§ 36. Явление электромагнитной индукции

✓ В чём проявляется взаимосвязь электрических и магнитных явлений?

1. Взаимосвязь электрических и магнитных явлений, впервые обнаруженная Эрстедом, особенно интересовала физиков. Однако как в опытах Эрстеда, так и во всех последующих экспериментах, удавалось установить только возможность создания электрическим током магнитного поля. Великий английский учёный **Майкл Фарадей** (1791—1867) в 1821 г. записал в своём дневнике: «Коль скоро электричество может создавать магнетизм, может ли магнетизм создавать электричество?» Фарадей был абсолютно уверен в единой природе электрических и магнитных явлений. Гипотезу Фарадея можно представить примерно так: электрический ток способен намагнитить кусок железа, следовательно, можно предположить, что и магнит может вызвать появление электрического тока.

Начиная с 1824 г. Фарадей пытался решить поставленную задачу «превратить электричество в магнетизм». Однако только в 1831 г. его усилия увенчались успехом: с помощью магнита в замкнутой цепи был получен электрический ток.

2. Некоторые опыты, поставленные Фарадеем, можно легко воспроизвести, используя современные приборы. Рассмотрим один из них.

К гальванометру подключим катушку, состоящую из большого числа витков изолированного провода (рис. 147, а). Если вдвигать в катушку полосовой магнит, то можно увидеть, что стрелка гальванометра отклонится, фиксируя появление электрического тока в цепи (рис. 147, б). Но как только магнит останавливается,

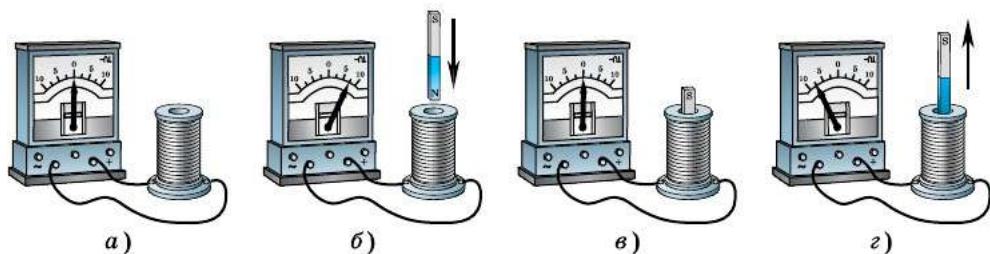


Рис. 147



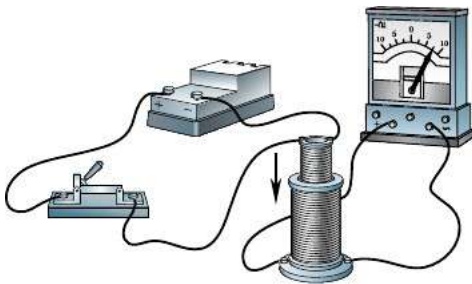


Рис. 148

ток в катушке прекращается (рис. 147, в). При выдвигании магнита из катушки ток вновь появляется в цепи, но его направление, как показывает гальванометр, изменяется на противоположное (рис. 147, г).

В этом опыте гальванометр фиксировал ток тогда, когда магнит находился в движении.

При этом магнитное поле, соз-

данное магнитом и пронизывающее катушку, изменялось. Когда магнит был внесён в катушку и не перемещался, магнитное поле не изменялось и тока в катушке не было.

Явление возникновения тока в замкнутом проводнике при изменении магнитного поля, пронизывающего этот проводник, называют электромагнитной индукцией.

Ток, возникающий в цепи, называют **индукционным током** (в переводе с латинского — «наведённый»).

3. Несколько изменим опыт и, оставив неподжным магнит, будем перемещать катушку относительно магнита. Результат останется неизменным: при движении катушки изменяется пронизывающее её магнитное поле, и в цепи возникает индукционный ток.

Заменим полосовой магнит электромагнитом, обмотка которого соединена с источником тока (рис. 148). При перемещении электромагнита в катушке гальванометр зафиксирует появление в ней индукционного тока. Если теперь с помощью ключа замыкать и размыкать цепь электромагнита, оставив его неподжным в катушке, то в ней в моменты замыкания и размыкания ключа также будет возникать индукционный ток.

Таким образом, *при любом изменении магнитного поля, пронизывающего катушку, в ней возникает индукционный ток.*

Вопросы для самопроверки

1. Что послужило основанием для выдвижения Фарадеем гипотезы о существовании явления электромагнитной индукции?
2. Опишите опыты, подтверждающие гипотезу Фарадея.
3. Что называют явлением электромагнитной индукции?
4. Что называют индукционным током?



§ 37. Магнитный поток

- ✓ Что характеризует магнитная индукция?
- ✓ Что называют линиями магнитной индукции?

1. Для объяснения явления электромагнитной индукции необходимо ввести ещё одну физическую величину, характеризующую магнитное поле, — **магнитный поток**.

Поместим плоский замкнутый проводник (его называют обычно *контуром*) в однородное магнитное поле. Площадь контура постоянна и равна S (рис. 149, *а, б*). Магнитное поле, индукция которого B_1 , слабее, чем поле индукцией B_2 . Мы можем судить об этом по числу линий магнитной индукции, пронизывающих контур.

Произведение модуля вектора магнитной индукции B и площади контура S характеризует магнитный поток, пронизывающий данный контур.

Магнитный поток обозначают буквой Φ .

В рассмотренном примере линии магнитной индукции перпендикулярны плоскости контура. В этом случае магнитный поток равен:

$$\Phi = BS.$$

Поскольку $B_1 < B_2$, то $\Phi_1 < \Phi_2$, где $\Phi_1 = B_1 S$, $\Phi_2 = B_2 S$. Чем больше модуль вектора магнитной индукции, тем больше магнитный поток.

2. Значение магнитного потока зависит и от площади контура S , который пронизывает магнитное поле. Число линий магнитной индукции, проходящих через контур площадью S_1 на рисунке 149, *в*, существенно больше, чем через контур пло-

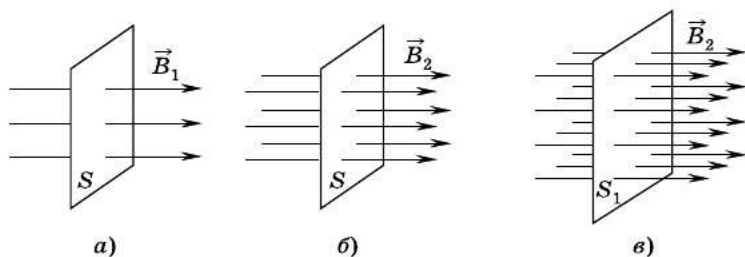


Рис. 149

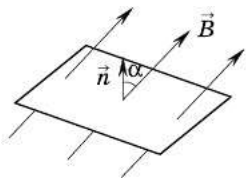


Рис. 150

щадью S на рисунке 149, б. Поэтому можно утверждать, что чем больше площадь контура, находящегося в некотором магнитном поле, тем большим будет магнитный поток.

3*. Во многих случаях линии магнитной индукции, пронизывающие контур, проходят через него под некоторым углом α (рис. 150). Значение магнитного потока при

этом зависит от угла α между вектором магнитной индукции $\vec{B}$ и нормалью к плоскости контура $\vec{n}$.

Поэтому в общем виде формулу магнитного потока можно записать так:

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

4. Единица магнитного потока в СИ — вебер (1 Вб):

$$[\Phi] = [B][S] = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2 = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2 = 1 \text{ Вб}.$$

За единицу магнитного потока принят магнитный поток, создаваемый однородным магнитным полем индукцией 1 Тл через поверхность площадью 1 м², расположенную перпендикулярно вектору магнитной индукции.

5. Вернёмся к опыту, изображённому на рисунке 147, а. При движении полосового магнита относительно катушки, замкнутой на гальванометр, в цепи возникал индукционный ток. Если изобразить магнитное поле постоянного магнита, который вносят в катушку (для простоты мы ограничимся одним витком), то можно понять, что магнитный поток, пронизывающий виток, будет постоянно меняться (рис. 151).

Таким образом, *при всяком изменении магнитного потока через замкнутый проводящий контур в нём возникает индукционный ток.*

6. На явлении электромагнитной индукции основано действие *генератора постоянного тока* — устройства, в котором создаётся электрический ток. Как и в двигателе постоянного тока, в генераторе основным элементом является вращающаяся рамка (или несколько рамок), помещённая в магнитное поле. Однако если в двигателе электрическая энергия преобразуется в механическую, то в генераторе происходит процесс преобразования механической энергии в электрическую.

На рисунке 152, а изображена принципиальная схема генератора постоянного тока. В магнитном поле, которое создаётся



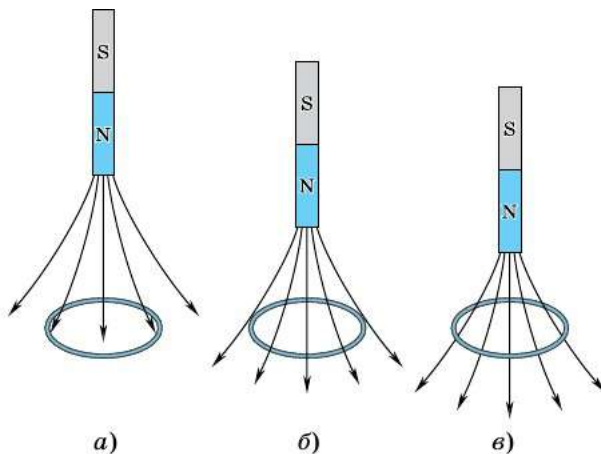


Рис. 151

постоянным магнитом, вращается рамка (в некоторых устройствах рамка неподвижна, а вращается магнит). При повороте рамки магнитный поток, пронизывающий её, изменяется, и в рамке возникает индукционный ток. Через скользящие контакты ток поступает к потребителю.

Концы рамки прикреплены к полукольцам. В этом случае при вращении рамки по часовой стрелке на правом конце рамки всегда будет положительный полюс, а на левом — отрицательный полюс, и направление тока во внешней цепи останется неизменным.

Сила индукционного тока, возникающего в рамке, будет меняться от нуля, когда плоскость рамки параллельна линиям магнитной индукции, до некоторого максимального значения, когда рамка перпендикулярна вектору магнитной индукции, а затем уменьшается до нуля. Чтобы уменьшить пульсации тока,

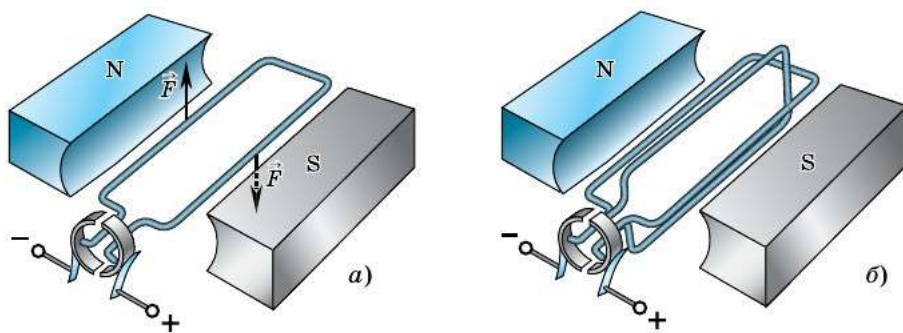


Рис. 152

можно вместо одной рамки использовать две, расположенные перпендикулярно друг другу, как показано на рисунке 152, б. Индукционный ток при этом существенно выравнивается. Современные генераторы содержат большое число подобных рамок, что даёт возможность получить постоянный ток.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое магнитный поток? От каких физических величин зависит значение магнитного потока?
2. По какой формуле может быть вычислен магнитный поток, пронизывающий контур, расположенный перпендикулярно вектору магнитной индукции однородного магнитного поля?
3. Что принято за единицу магнитного потока?
4. Объясните, почему происходит изменение магнитного потока при внесении постоянного магнита в катушку.
5. В чём состоит принципиальное отличие генератора постоянного тока от двигателя постоянного тока?
6. Объясните принцип действия генератора постоянного тока.

Задание 33

1. Как изменится магнитный поток, пронизывающий контур, помещённый в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции, если контур повернуть, как показано на рисунке 152, а?
2. Чему равен магнитный поток в том случае, когда плоскость контура расположена вдоль линий магнитной индукции?
3. Как изменится магнитный поток, пронизывающий контур, если модуль вектора магнитной индукции увеличится в 2 раза, а площадь поверхности контура уменьшится в 2 раза?
4. Чему равна магнитная индукция однородного магнитного поля, в которое поместили проводящий контур площадью 50 см^2 ? Магнитный поток, пронизывающий контур, равен $0,1 \text{ мВб}$. Контур расположен перпендикулярно линиям магнитной индукции.

§ 38. Направление индукционного тока. Правило Ленца

- ✓ Что называют явлением электромагнитной индукции?
- ✓ Что называют магнитным потоком?

1. При наблюдении опытов, описанных в § 36, стрелка гальванометра отклонялась то в одну, то в другую сторону в зависимости от направления движения магнита. Это говорит о том, что возникающий в катушке ток имел разное направление.

Выясним, от чего зависит направление индукционного тока. Для этого продelaем опыт, используя прибор, изображённый на рисунке 153.

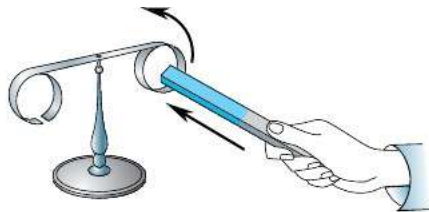


Рис. 153

На концах алюминиевой пластинки закреплены два алюминиевых кольца. Одно из колец сплошное, а на втором сделан разрез.

Пластина может свободно вращаться вокруг вертикальной оси. Будем поочерёдно вводить магнит северным полюсом в каждое кольцо. Если магнит ввести в сплошное кольцо, то оно оттолкнётся от магнита и пластинка повернётся. Введём в кольцо магнит, а затем будем выдвигать его из кольца. При удалении магнита от кольца оно, напротив, будет притягиваться и следовать за магнитом. Если постоянный магнит подносить к кольцу с разрезом, то никакого взаимодействия кольца и магнита наблюдаться не будет.

Объяснить столь разное поведение колец можно следующим образом: при приближении магнита к кольцам в них должен возникнуть индукционный ток. Однако в кольце с разрезом, который аналогичен разомкнутой цепи, тока не будет. Индукционный ток возникает только в сплошном кольце, и только оно взаимодействует с магнитом.

2. Выясним, в чём причина отталкивания или притяжения сплошного кольца при движении постоянного магнита.

При введении магнита в кольцо в нём возникает индукционный ток. Поскольку кольцо отталкивается от магнита (см. рис. 153), то магнитное поле возникшего в кольце тока направлено противоположно магнитному полю магнита. Кольцо и магнит обращены одноимёнными полюсами друг к другу.

При удалении магнита от кольца надетого на магнит, кольцо будет притягиваться к магниту. Следовательно, кольцо с током и магнит обращены друг к другу в этом случае разноимёнными полюсами. Поэтому кольцо следует за магнитом.

3. При увеличении магнитного потока, пронизывающего сплошное кольцо, индукционный ток имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует нарастанию магнитного потока. Если же магнитный поток через кольцо ослабевает, то индукционный ток создаёт такое магнитное поле,

которое стремится компенсировать уменьшение магнитного потока через кольцо.

Правило для определения направления индукционного тока впервые сформулировал российский физик *Эмилий Христианович Ленц* (1804—1865).

Согласно *правилу Ленца*, возникающий в замкнутом контуре индукционный ток имеет такое направление, что созданное им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызвавшего этот ток.

Вопросы для самопроверки

- 1. От чего зависит направление индукционного тока?
- 2. Объясните опыт с двумя кольцами.
- 3. Сформулируйте правило Ленца.

Задание 34

- 1. Как будут вести себя кольца в описанном в параграфе опыте, если магнит подносить к ним и удалять от них южным полюсом?
- 2. Определите направление индукционного тока, возникающего в катушке при введении в неё магнита (рис. 154).
- 3. Используя данные рисунка 155, определите полюсы полосового магнита.

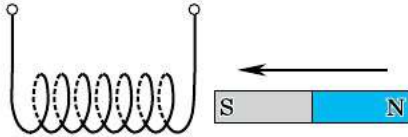


Рис. 154

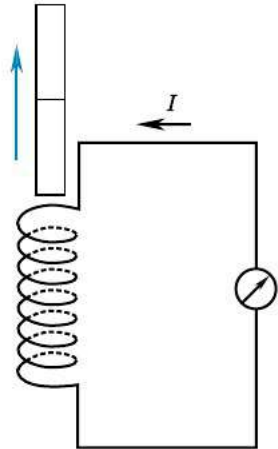


Рис. 155

Лабораторная работа № 8*

Изучение явления электромагнитной индукции

Цель работы:

изучить явление электромагнитной индукции и получить индукционный ток.

полосовой магнит, электромагнит разборный, миллиамперметр, лабораторный источник питания, ключ, реостат, соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Подключите миллиамперметр к одной из катушек электромагнита.
2. Вдвигая полосовой магнит внутрь катушки, определите направление индукционного тока. Повторите опыт, выдвигая магнит из катушки. Сделайте вывод.
3. Определите, как влияет скорость движения постоянного магнита внутри катушки на силу индукционного тока в ней. Объясните наблюдаемое изменение силы тока и сделайте вывод.
4. Соберите ещё одну цепь, состоящую из источника тока, второй катушки электромагнита, реостата и ключа, соединённых последовательно. Расположите вторую катушку рядом с первой так, чтобы их оси совпадали.
5. Замыкая и размыкая цепь, проследите, возникает ли индукционный ток в первой катушке, соединённой с миллиамперметром. Определите его направление. Сделайте вывод.
6. Замкнув цепь второй катушки, изменяйте силу тока в ней с помощью реостата. Определите направление индукционного тока при возрастании и убывании силы тока в первой катушке. Сделайте вывод.

§ 39. Самоиндукция

- ✓ Как будет изменяться магнитное поле, возникающее вокруг проводника с током, при изменении силы тока в цепи?
- ✓ В чём состоит правило Ленца?

1. Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из источника тока, ключа и проводника, силу тока в которой можно изменять с помощью реостата. Поскольку возникающее вокруг проводника магнитное поле зависит от силы тока в цепи, изменение силы тока вызовет изменение индукции магнитного поля, создаваемого этим током. Следовательно, сам проводник с изменяющейся в нём силой тока окажется в изменяющемся магнитном поле, что приведёт к возникновению индукционного тока в этом же проводнике. Подобное явление получило название **самоиндукции**, а ток, возникающий при этом, — *ток самоиндукции*.



Самоиндукция является частным случаем электромагнитной индукции и представляет собой по сути «индуктивное влияние электрического тока на самого себя».

Впервые явление самоиндукции наблюдал американский учёный **Джозеф Генри** (1797—1878) в 1832 г.: индукционный ток возникал в катушке, когда магнитный поток в ней увеличивался или уменьшался вследствие изменения тока, протекающего в самой катушке.

2. Явление самоиндукции можно наблюдать на достаточно простых опытах.

Соберём электрическую цепь, состоящую из двух параллельно подключённых к источнику тока одинаковых ламп. Последовательно с первой лампой включён реостат, а со второй — катушка с железным сердечником (рис. 156). Реостат имеет такое же электрическое сопротивление, что и обмотка катушки.

Опыт показывает, что при замыкании цепи первая лампа загорается практически сразу, а вторая — с заметным запаздыванием. Нарастанию тока в части цепи с катушкой препятствует возникающий при этом ток самоиндукции. Согласно правилу Ленца этот ток препятствует изменению, в данном случае возрастанию, магнитного потока. Постепенно магнитный поток перестаёт изменяться, и ток самоиндукции становится равным нулю. Сила тока в цепи с катушкой становится максимальной.

При размыкании цепи возникающий при этом ток самоиндукции направлен в ту же сторону, что и ток от источника, поскольку он препятствует уменьшению силы тока в цепи. При этом магнитный поток, созданный током в катушке, уменьшается; возникающий ток препятствует этому изменению, поддерживая основной ток в цепи.

3. Явление самоиндукции подобно явлению инерции в механике. Аналогичность этих процессов проявляется в том, что как движущееся тело нельзя мгновенно остановить, а покоящееся — привести в движение, так и ток за счёт самоиндукции не может мгновенно приобрести определённое значение. Он нарастает и уменьшается постепенно.

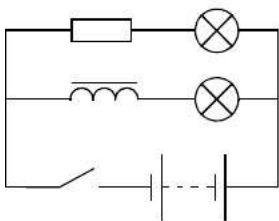


Рис. 156

4. Как уже было показано, магнитный поток Φ прямо пропорционален модулю вектора магнитной индукции B : $\Phi \sim B$.

§ 40. Переменный электрический ток

✓ Каков принцип действия генератора постоянного тока?

1. Рассматривая принцип действия генератора постоянного тока (см. рис. 151 и 152), мы выяснили, что в процессе вращения рамки в магнитном поле сила тока, возникающего в рамке, будет меняться от максимального значения (рамка перпендикулярна магнитной индукции) до нуля (рамка располагается вдоль линий магнитной индукции). Подобное изменение происходит за одну четверть оборота рамки. При дальнейшем её движении индуцированный ток изменит направление, и сила тока будет возрастать от нуля до максимального значения, когда рамка совершит половину оборота и опять окажется перпендикулярной линиям магнитной индукции. Если концы рамки соединить не с полукольцами, а с кольцами или непосредственно с контактными пластинами и присоединить к ним внешнюю цепь, то во внешней цепи направление тока и значение силы тока будут периодически изменяться.

Таким образом, при вращении рамки в магнитном поле в ней индуцируется *электрический ток; при этом сила тока периодически меняется по модулю и направлению*. Такой ток называют **переменным током**.

2. На рисунке 157 представлен график зависимости силы переменного тока (его принято обозначать буквой i) от времени. В цепях переменного тока периодически изменяется не только сила тока, но и напряжение. В соответствии с законом Ома изменение силы тока всегда пропорционально изменению напряжения.

3. Переменный ток и переменное напряжение характеризуются рядом величин. Одна из них — частота.

Стандартная частота, с которой изменяются напряжение и сила переменного тока, равна 50 Гц. Это означает, что на протяжении 1 с ток 50 раз течёт в одну сторону и 50 раз в противоположную. Такая частота принята во многих странах. В США принята другая частота — 60 Гц.

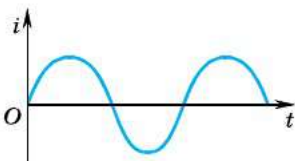


Рис. 157

4*. Как видно из рисунка 157, сила тока изменяется от нуля до некоторого максимального (амплитудного) значения и обратно. Очевидно, что переменный ток можно характеризовать *амплитудным (максимальным) значением силы тока I_m* , а переменное напряже-



ние — *амплитудным (максимальным) значением напряжения U_m* . Однако поскольку сила тока и напряжение постоянно меняются, то их значения не позволяют оценить те действия, которые производит переменный ток (например, тепловое действие). Поэтому для характеристики переменного тока вводят величину, называемую **действующим значением силы переменного тока**.

Предположим, по проводнику течёт переменный ток в течение определённого времени (например, в течение одного периода колебаний). При этом в проводнике выделяется некоторое количество теплоты.

Пусть теперь по этому проводнику течёт постоянный ток в течение того же промежутка времени и при этом выделяется то же количество теплоты. Можно сказать, переменный ток производит такое же действие, что и постоянный, и действующее значение силы переменного тока равно силе постоянного тока.

Действующее значение силы переменного тока равно

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Действующее значение напряжения переменного тока равно

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Если говорят, что напряжение в осветительных сетях 220 В, то имеют в виду действующее значение напряжения.

5. Устройство генераторов переменного тока, которые используются в промышленности, достаточно сложно. Поскольку с клемм генератора снимают высокое напряжение, то используют не один виток, а значительное их число, и определённым образом соединяют между собой. Кроме того, в генераторах переменного тока обмотка, в которой индуцируется переменное напряжение, устанавливается неподвижно, а магниты, которые создают магнитное поле, вращаются (рис. 158).

Ротор генератора может приводиться в движение с помощью паровой турбины (турбогенера-

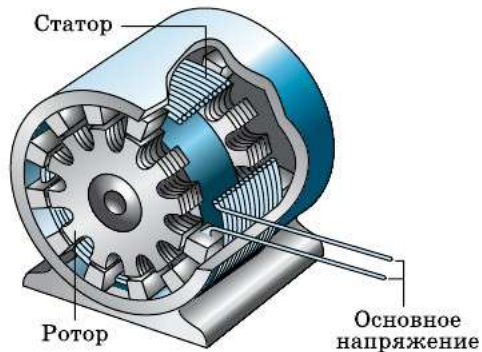


Рис. 158

тор), гидротурбины (гидрогенератор), двигателя внутреннего сгорания.

Турбогенераторы, например, создают напряжение 13—15 кВ.

Вопросы для самопроверки

1. Какой ток называют переменным?
2. Какова частота переменного тока в осветительной сети?
- 3*. Чему равны действующие значения силы тока и напряжения переменного тока?
4. Как устроен генератор переменного тока?

Задание 36

1. Чем отличается переменный ток от постоянного?
- 2*. Чему равно амплитудное значение напряжения, если действующее значение равно 127 В; 220 В?
- 3*. Найдите действующее значение силы переменного тока, если максимальное значение силы тока 10 А.
4. Подготовьте сообщение о современных генераторах, используя различные источники информации, в том числе Интернет.

§ 41. Трансформатор

- ✓ Какой ток называют переменным?
- ✓ В чём состоит явление электромагнитной индукции?

1. Преимущества переменного тока по сравнению с постоянным были оценены далеко не сразу. Считается, что использование переменного тока началось с работ выдающегося русского электротехника и изобретателя **Павла Николаевича Яблочкова** (1847—1894). В 1876 г. он впервые применил переменный электрический ток для питания прообраза современной электрической лампочки — «свечи Яблочкова».

Одним из основных преимуществ переменного электрического тока является возможность изменения его напряжения и, как следствие, передача электрической энергии на очень большие расстояния, о чём более подробно пойдёт речь в следующем параграфе.

2. Для повышения или понижения напряжения используют **трансформаторы**. Трансформатор состоит из замкнутого стального сердечника, собранного из пластин, на который надеты две катушки с проволочными обмотками (рис. 159). Одна об-



мотка, называемая **первичной**, присоединяется к источнику переменного напряжения. Вторая обмотка, называемая **вторичной**, присоединяется к потребителям электроэнергии.

3. В основе действия трансформатора лежит явление электромагнитной индукции. Рассмотрим принцип работы трансформатора, опуская некоторые детали. Пусть к первичной обмотке приложено напряжение U_1 и сила тока в ней I_1 . При этом

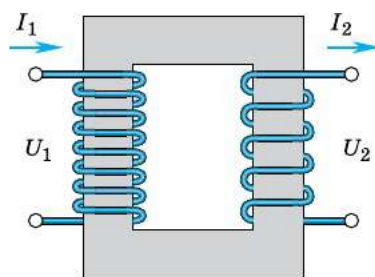


Рис. 159

возникнет переменное магнитное поле, которое будет сконцентрировано внутри сердечника. Переменное магнитное поле, пронизывая витки вторичной обмотки, в результате электромагнитной индукции создаёт на её концах напряжение U_2 . Если катушка замкнута на лампочку, то по цепи этой обмотки пойдёт ток, сила тока которого I_2 , и лампочка загорится.

4. Напряжение на каждом витке первичной и вторичной обмоток одинаково и равно u . Следовательно, напряжение на каждой из обмоток — $U_1 = n_1 u$, а $U_2 = n_2 u$, где n_1 и n_2 — число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора. Тогда можно записать:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1} = k.$$

Отношение напряжения на вторичной обмотке трансформатора к напряжению на первичной его обмотке равно отношению числа витков вторичной обмотки к числу витков первичной обмотки.

Величина, равная этому отношению, обозначается буквой k и называется **коэффициентом трансформации**.

Если вторичная обмотка имеет большее число витков, чем первичная, то трансформатор повышает напряжение; если вторичная обмотка имеет меньшее число витков, чем первичная, то трансформатор понижает напряжение.

Трансформатор, изображённый на рисунке 159, имеет одну обмотку, рассчитанную на 127 или 220 В, а другую — на 6 или 12 В. Если первую обмотку соединить с источником напряжения 127 или 220 В, то трансформатор будет понижающим: напряжение на второй обмотке будет равно 6 или 12 В. Если же на вторую





подать напряжение 6 В или 12 В, то трансформатор будет работать как повышающий: с первой обмотки можно будет снять напряжение 127 или 220 В.

5. Если вторичная обмотка трансформатора замкнута, то в ней идёт ток. При этом происходит непрерывная передача энергии из первичной цепи во вторичную, и мощность тока в первичной цепи $P_1 = U_1 I_1$ примерно равна мощности тока во вторичной цепи $P_2 = U_2 I_2$. Равенство не является точным, так как часть энергии расходуется на нагревание обмоток, сердечника и т. п. Однако потери эти невелики, в современных мощных трансформаторах они не превышают 2—3%. Поэтому можно записать:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2, \text{ или } \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}.$$

Таким образом, *повышая в несколько раз напряжение, мы уменьшаем во столько же раз силу тока, и наоборот.*

Поскольку $\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1}$, то $\frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1}{n_2}$.

Сила тока в первичной и во вторичной обмотках трансформатора обратно пропорциональна числу витков в них.

6. Трансформаторы широко используются и в технике, и в быту. Как вы знаете, напряжение, подаваемое в квартиры, — 220 В. Это же напряжение подаётся и на любую розетку, к которой подключаются электропотребители. Однако для питания, например, кинескопа телевизора необходимо напряжение до 25 000 В, для микроволновой электропечи — до 500 В, для транзистора — всего лишь несколько вольт. Следовательно, в каждом устройстве обязательно присутствуют трансформаторы, которые преобразуют напряжение сети в напряжение, которое подаётся на тот или иной прибор.

Вопросы для самопроверки

1. Каково назначение трансформатора?
2. Объясните по рисунку 159, как устроен трансформатор.
3. Какое явление лежит в основе работы трансформатора?
4. Что называется коэффициентом трансформации?
5. Какой трансформатор является повышающим, а какой понижающим?
6. Как соотносятся силы токов в первичной и во вторичной обмотках трансформатора?

1. Можно ли с помощью трансформатора повышать и понижать постоянное напряжение?
2. Какие потери энергии происходят при работе трансформатора?
3. Приведите примеры машин и механизмов, при работе которых используется трансформатор.
- 4*. Почему сердечник трансформатора собран из пластин, а не сделан из целого куска металла?
5. Понижающий трансформатор с коэффициентом трансформации 0,1 включён в сеть напряжением 220 В. Каково напряжение на выходе трансформатора?
6. Трансформатор повышает напряжение со 110 до 660 В и содержит в первичной обмотке 420 витков. Чему равен коэффициент трансформации? Сколько витков содержит вторичная обмотка?

§ 42. Передача электрической энергии

- ✓ Какой ток — постоянный или переменный — вырабатывается генераторами тока на электростанциях?

1. Электрическая энергия вырабатывается на электростанциях с помощью генераторов. При этом в электрическую энергию превращаются либо внутренняя энергия топлива, либо потенциальная энергия падающей воды, либо внутриатомная энергия.

Электрическую энергию, выработанную генератором, передают от электростанции к потребителям на достаточно большие расстояния. При передаче электроэнергии на расстояние неизбежны её потери в линиях. Это связано с тем, что ток, проходя по проводам, нагревает их. Соответственно возникает задача уменьшения потерь энергии на нагревание проводов. Как это сделать?

2. Вы знаете, что количество теплоты, выделяющееся в проводнике при прохождении по нему электрического тока, рассчитывается по закону Джоуля—Ленца

$$Q = I^2 R t.$$

Чтобы уменьшить потери энергии в проводах, можно было бы уменьшить их сопротивление. Однако для этого необходимо увеличить площадь поперечного сечения проводников, что приведёт к существенному увеличению их массы. Практически это означает, что такой способ передачи электроэнергии невозможен.



Другой способ уменьшения потерь сводится к уменьшению силы тока в линии передачи. При данной мощности уменьшение силы тока возможно лишь при увеличении напряжения, поскольку $P = IU$.

Таким образом, *при передаче электроэнергии на большие расстояния используют высокое напряжение.*

3. Линии, по которым электрическая энергия передаётся от электростанций к потребителям, называют линиями электропередачи (ЛЭП).

Генераторы электрической энергии дают переменное напряжение, не превышающее 20 кВ. Чтобы передать электроэнергию без существенных потерь мощности, это напряжение повышают до 75—500 кВ с помощью повышающего трансформатора. Чем длиннее линия электропередачи, тем более высокое напряжение используется в ней. Сегодня существуют ЛЭП на 1150 кВ. Высота опор такой линии — 45 м (это высота 15-этажного дома).

Для использования электроэнергии в быту и на производстве напряжение нужно понизить, что осуществляется с помощью понижающего трансформатора. Обычно понижение напряжения происходит в несколько этапов. Сначала это происходит на понижающей подстанции в конце ЛЭП, затем — на местах потребления до необходимого напряжения.

Главными потребителями электроэнергии являются промышленность и транспорт. Невозможно себе представить жизнь современного общества без широкого использования электроэнергии.

Вопросы для самопроверки

1. С чем связаны потери электроэнергии при передаче её на расстояние?
2. Можно ли практически уменьшить потери электроэнергии, уменьшив сопротивление проводов?
3. Что необходимо сделать, чтобы уменьшить потери электроэнергии при передаче её на расстояние?
4. Как осуществляется передача электроэнергии от электростанции к потребителю?

Темы докладов и проектов

1. Конструирование электромагнитных приборов.
2. Применение электромагнитных приборов в медицине.
3. Эксперименты с магнитной жидкостью.

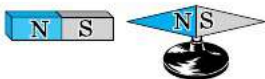
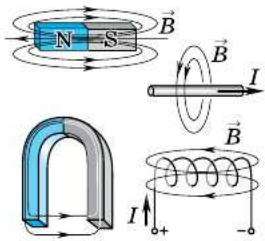




1. Основным понятием данной главы является понятие «магнитное поле». Магнитное поле порождается электрическим током (движущимися зарядами) и обнаруживается по действию на электрический ток (движущиеся заряды).

2. Основные понятия и величины (табл. 15).

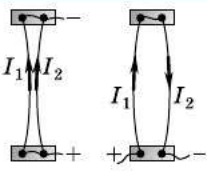
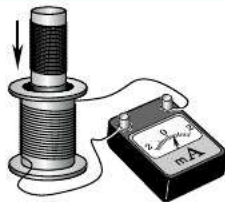
Таблица 15

Название	Обозначение	Формула	Единица	Основные особенности
Магнитные полюсы	N — северный, S — южный			Магниты разноимёнными полюсами притягиваются, а одноимёнными — отталкиваются 
Магнитная индукция	$\vec{B}$	$B = \frac{F}{Il}$	Тл	Силовая характеристика магнитного поля, аналогичная вектору $\vec{E}$ напряжённости электрического поля
Линии магнитной индукции				Линии магнитной индукции всегда замкнуты 
Сила Ампера	F	$F = B_{\perp} Il$		

Название	Обозначение	Формула	Единица	Основные особенности
Магнитный поток	Φ	$\Phi = BS$, если линии магнитной индукции перпендикулярны плоскости контура	Вб	
Индуктивность	L	$L = \frac{\Phi}{I}$	Гн	Зависит от размеров проводника, его формы, свойств среды, в которой находится проводник, но не зависит от силы тока, протекающего по данному проводнику

3. Фундаментальные опыты (табл. 16).

Таблица 16

Опыт	Физическое содержание	Схема опыта
Эрстеда	Вокруг проводника с током существует магнитное поле	
Ампера	Взаимодействие проводников с током	
Фарадея	При изменении магнитного поля, пронизывающего замкнутый контур, в нём возникает электрический ток	

4. Взаимосвязь между физическими величинами, характеризующими электрические и магнитные явления, устанавливается следующими правилами (табл. 17).

Таблица 17

Правило	Определение	Пример
Буравчик	Если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением линий магнитной индукции; если направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением тока в катушке, то направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением линий магнитной индукции внутри катушки	
Левой руки	Если левую руку расположить так, что линии магнитной индукции входят в ладонь, а четыре пальца направлены по направлению тока в проводнике, то отогнутый на 90° большой палец покажет направление действующей на проводник силы	
Ленца	Возникающий в замкнутом контуре индукционный ток имеет такое направление, что созданное им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызвавшего этот ток	



Электромагнитные колебания и волны

Вы уже имеете определённые представления о механических колебаниях и волнах.

Механические колебания — это такое движение, при котором тело смещается относительно положения равновесия, отклоняясь от него то в одну, то в другую сторону. Распространение механических колебаний в среде, т. е. механические волны, происходит благодаря инертности частиц среды и наличию сил взаимодействия между ними.

Помимо механических колебаний и волн существуют колебания и волны другой физической природы — электромагнитные. Благодаря их открытию и изучению стала возможной передача сигналов на большие расстояния: радиосвязь, телевидение, телеграф и т. п. Механизм образования электромагнитных колебаний и волн существенно сложнее, чем механических. Их изучение осложняется и тем, что электромагнитные колебания и волны, в отличие от механических, не наблюдаются непосредственно.

Рассмотрим, что же собой представляют электромагнитные колебания и волны.

§ 43. Конденсатор

- ✓ Какую физическую величину называют электрическим зарядом?
- ✓ Что называют электрическим полем?
- ✓ Что характеризует электрическое напряжение?

1. Вы уже знаете, что для получения свободных механических колебаний необходима колебательная система. Условием существования электромагнитных колебаний также является наличие колебательной системы. Одним из элементов такой системы является **конденсатор** (в переводе с латинского — «сгуститель»).

Простейший конденсатор состоит из двух металлических пластин (обкладок), разделённых диэлектриком (рис. 160, а). Толщина диэлектрика много меньше размеров пластин. На рисунке 160, б показано условное обозначение конденсатора на схемах.

Зарядим конденсатор, сообщая его пластинам равные по модулю и противоположные по знаку заряды. Это можно сделать по-разному, например, присоединить пластины к разным полюсам электрофорной машины или сообщить заряд одной из пластин, а другую заземлить. Тогда заземлённая пластина по индукции зарядится равным по модулю зарядом противоположного знака.

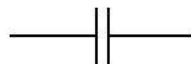
При характеристике конденсатора важно иметь в виду:

- пластины конденсатора имеют заряды, равные по модулю и противоположные по знаку;
- заряд конденсатора определяется зарядом одной из его пластин;
- заряды сосредоточены на внутренних поверхностях пластин конденсатора;
- электрическое поле, создаваемое зарядами на пластинах, сосредоточено внутри конденсатора.

2. Зарядим конденсатор и отключим его от электрофорной машины. Заряды на пластинах конденсатора и поле внутри него сохраняются. Свойство конденсатора накапливать и сохранять электрические заряды характеризуют величиной, называемой **электрической ёмкостью**. Чтобы выяснить смысл этой физической величины, сделаем опыт.



а)



б)

Рис. 160

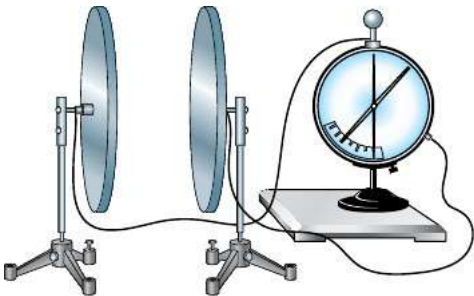


Рис. 161

Присоединим одну пластину конденсатора к стержню электрометра, а другую — к его корпусу. В этом случае электрометр будет измерять напряжение между пластинами конденсатора.

Возьмём три одинаково заряженных шара. Коснёмся пластины конденсатора одним из шаров и передадим ему при этом

заряд q . Электрометр покажет значение напряжения U (рис. 161).

Если пластины конденсатора коснуться и вторым шаром, то заряд конденсатора станет равным $2q$, а электрометр покажет напряжение $2U$.

Коснёмся теперь пластины третьим шаром, заряд конденсатора станет равным $3q$, а напряжение между пластинами $3U$.

Таким образом, при увеличении заряда конденсатора увеличивается напряжение между его обкладками, причём напряжение увеличивается во столько же раз, во сколько раз увеличивается заряд.

Отношение заряда к напряжению остаётся постоянным:

$$\frac{q}{U} = \frac{2q}{2U} = \frac{3q}{3U} = \text{const.}$$

Если подобный опыт проделать с другим конденсатором, то мы также получим, что отношение заряда к напряжению остаётся постоянным. Однако для другого конденсатора это отношение имеет иное значение.

Таким образом,

электрической ёмкостью конденсатора называют величину, численно равную отношению заряда конденсатора к напряжению на его пластинах.

Электрическая ёмкость обозначается буквой C .

$$C = \frac{q}{U}.$$

Если присоединить конденсаторы разной ёмкости к источникам тока, имеющим на клеммах одинаковое напряжение, то конденсатор большей ёмкости получит больший электрический заряд.

3. Единицей ёмкости в СИ является *фарад (1 Ф)*:

$$[C] = \frac{[q]}{[U]} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = 1 \text{ Ф}.$$

За единицу ёмкости принимают ёмкость такого конденсатора, напряжение между пластинами которого равно 1 В при заряде на них 1 Кл.

Фарад — очень крупная единица ёмкости. Поэтому на практике часто применяют дольные единицы — *микрофарад (1 мкФ)* и *пикофарад (1 пФ)*.

$$1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}; 1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}.$$

4. Вернёмся к опыту (см. рис. 161) и выясним, от чего зависит ёмкость конденсатора.

Зарядим конденсатор и отметим показания электрометра. Сблизив пластины, увидим, что напряжение между пластинами уменьшается. Поскольку заряд на пластинах оставался неизменным, то уменьшение напряжения связано с увеличением ёмкости конденсатора.

Будем изменять площадь перекрытия пластин конденсатора, перемещая их друг относительно друга в вертикальной плоскости (вверх или вниз), не меняя при этом расстояние между пластинами. Заметим, что при уменьшении площади перекрытия пластин напряжение между ними увеличивается, следовательно, ёмкость уменьшается.

Внесём между пластинами конденсатора диэлектрик, например эбонит или лист стекла. Увидим, что напряжение уменьшается, следовательно, ёмкость конденсатора увеличивается.

Таким образом, *ёмкость конденсатора зависит от площади пластин, расстояния между ними и свойств внесённого в конденсатор диэлектрика. Она прямо пропорциональна площади пластин и обратно пропорциональна расстоянию между ними.*

5. Полученный экспериментальным путём вывод о зависимости ёмкости конденсатора от его параметров очень важен в практическом отношении. Он указывает способы изменения ёмкости конденсаторов. Существуют *конденсаторы перемен-*

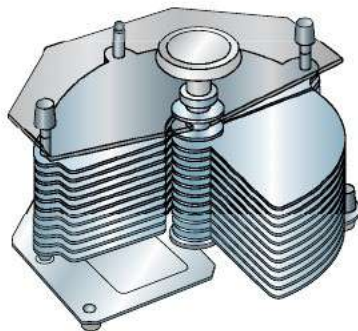


Рис. 162

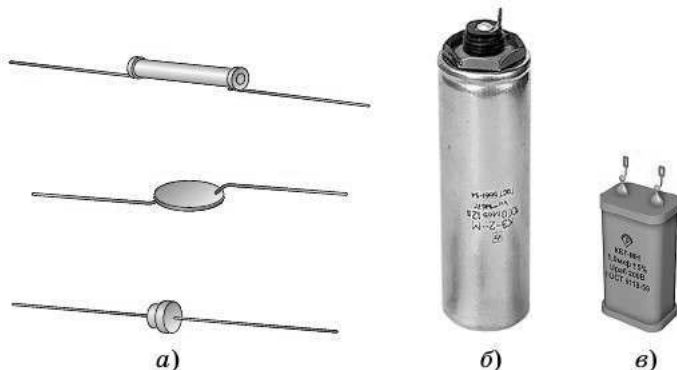


Рис. 163

ной ёмкости (рис. 162), электрическую ёмкость которых можно изменить, повернув рукоятку и уменьшив или увеличив при этом площадь пластин. Увеличить электрическую ёмкость можно за счёт диэлектриков, при этом площадь пластин может быть очень небольшой. В последнее время широкое применение находят *керамические конденсаторы* (рис. 163, а). Диэлектриком в них служит специальная керамика. Электрическая ёмкость таких конденсаторов достигает сотен пикофард.

Для получения очень больших ёмкостей используют *электролитические конденсаторы* (рис. 163, б). В качестве диэлектрика в них применяют тонкую плёнку окиси алюминия. Ёмкость таких конденсаторов может достигать сотен и тысяч микрофард. Существуют также *бумажные конденсаторы* (рис. 163, в), представляющие собой две полосы металлической фольги, разделённые полосой парафинированной бумаги.

Вопросы для самопроверки

1. Какое устройство называют конденсатором?
2. Что называют электрической ёмкостью конденсатора? Какова единица электрической ёмкости?
3. От чего и как зависит ёмкость плоского конденсатора?

Задание 38

1. Объясните процесс зарядки конденсатора с помощью положительно заряженной палочки; с помощью отрицательно заряженной палочки.
2. Расстояние между пластинами плоского конденсатора увеличили в 4 раза. Как изменилась ёмкость конденсатора?

Соединим конденсатор с источником тока, поставив переключатель в положение 1. Конденсатор зарядится, на его пластинах появится электрический заряд: на одной положительный, на другой отрицательный.

Переведём переключатель в положение 2, отключив тем самым конденсатор от источника тока и присоединив его к катушке. Конденсатор начнёт разряжаться, и через катушку потечёт электрический ток. При этом стрелка гальванометра будет совершать колебания.

3. Рассмотрим процесс разрядки конденсатора подробнее. Пусть в момент времени $t = 0$ конденсатор заряжен (рис. 166, а). При замыкании цепи он начнёт разряжаться и через катушку потечёт ток. При этом сила тока будет увеличиваться. Благодаря явлению самоиндукции в катушке возникнет ток самоиндукции, который будет направлен против тока в цепи. Поэтому сила тока в катушке будет нарастать постепенно и достигнет максимального значения, когда конденсатор полностью разрядится в момент времени $t = T/4$ (рис. 166, б).

Затем сила тока начнёт уменьшаться, но постепенно, поскольку в этом случае ток самоиндукции будет направлен так, чтобы поддержать ток в цепи. В момент времени $t = T/2$ ток прекратится, при этом конденсатор перезарядится (рис. 166, в). Нижняя пластина теперь будет заряжена положительно, а верхняя — отрицательно.

В следующий момент времени конденсатор начнёт разряжаться, через катушку потечёт ток, однако его направление будет противоположным направлению тока в первой половине периода. В момент времени $t = 3T/4$ сила тока достигнет максимального значения (рис. 166, г), а затем начнёт уменьшаться. Конденсатор будет перезарядаться. В момент времени $t = T$ (рис. 166, д) ток

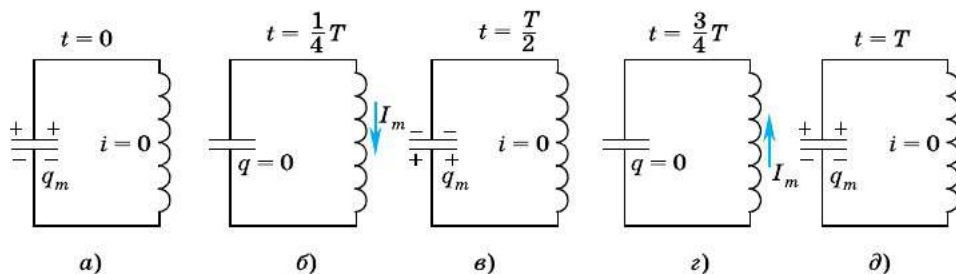


Рис. 166



прекратится, конденсатор окажется заряженным так, как в начальный момент времени. Процесс начнёт повторяться.

Таким образом, заряд конденсатора изменяется периодически от максимального значения до нуля, затем до максимального значения, но противоположного знака, и опять до нуля. Сила тока так же изменяется, но её значение максимально в тот момент времени, когда заряд конденсатора равен нулю.

4. Вы уже знаете, что между пластинами заряженного конденсатора существует электрическое поле; его напряжённость тем больше, чем больше заряд. Изменение заряда на пластинах конденсатора колебательного контура сопровождается изменением электрического поля, которое происходит периодически, так же как и изменение заряда.

Когда по катушке колебательного контура течёт электрический ток, то вокруг катушки существует магнитное поле. Модуль вектора магнитной индукции этого поля тем больше, чем больше сила тока в катушке. При периодическом изменении силы тока в колебательном контуре происходят периодические изменения магнитного поля. Модуль вектора магнитной индукции имеет наибольшее значение, когда сила тока максимальна. При этом конденсатор не заряжен и электрическое поле отсутствует. Когда заряд конденсатора максимален, напряжённость электрического поля имеет наибольшее значение, а ток и магнитное поле отсутствуют.

Периодические изменения электрического заряда, силы тока, электрического и магнитного полей, происходящие в колебательном контуре, называют электромагнитными колебаниями.

5. Колебания, происходящие в колебательном контуре в данном случае, являются свободными, поскольку они существуют благодаря начальному запасу энергии в конденсаторе. В процессе колебаний энергия в контур не поступает.

Минимальный промежуток времени, через который процесс в колебательном контуре полностью повторяется, называют **периодом электромагнитных колебаний**. За период колебаний заряд на обкладках конденсатора изменяется от максимального значения до следующего максимального значения того же знака или сила тока изменится от максимального значения до следующего максимального значения при том же направлении тока.

Период электромагнитных колебаний определяется параметрами колебательной системы, в данном случае электроёмкостью

конденсатора и индуктивностью катушки. Период тем больше, чем больше ёмкость конденсатора и индуктивность катушки.

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Вопросы для самопроверки

1. Что называют колебательным контуром?
2. В каком положении должен находиться переключатель (см. рис. 165) при зарядке конденсатора; при его разрядке?
3. Объясните процессы, происходящие в колебательном контуре при разрядке конденсатора.
4. Почему сила тока в колебательном контуре увеличивается и уменьшается постепенно?
5. Как изменяются электрическое и магнитное поля в колебательном контуре?
6. Что называют электромагнитными колебаниями?

Задание 39

1. Докажите, что колебательный контур является колебательной системой.
2. Почему описанные в параграфе колебания в колебательном контуре являются свободными?
3. Можно ли получить свободные электромагнитные колебания, если вместо катушки взять прямой проводник?
4. Как изменится заряд конденсатора колебательного контура через промежутки времени, равный $T/2$; $2T$?

§ 45. Вынужденные электромагнитные колебания

- ✓ Какие механические колебания называют вынужденными?
- ✓ Чему равна частота вынужденных колебаний?
- ✓ Какое явление называют резонансом?

1. Рассматривая процессы в колебательном контуре, мы видели, что в нём происходят превращения энергии электрического поля в энергию магнитного поля. Если бы не было потерь энергии, то максимальная энергия электрического поля была бы равна максимальной энергии магнитного поля и сумма энергии магнитного и электрического полей в любой момент времени была бы одинаковой. В реальных процессах, однако, часть энергии расходуется на работу электрического поля в проводниках, обладающих сопротивлением. При этом электрическая энергия

превращается во внутреннюю энергию; выделяющееся количество теплоты подчиняется закону Джоуля — Ленца. Поэтому суммарная энергия электрического и магнитного полей с течением времени уменьшается и колебания затухают.

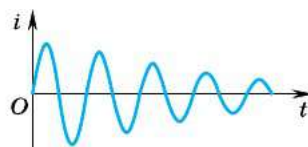


Рис. 167

Таким образом, свободные электромагнитные колебания являются **затухающими**.

Чтобы затухание колебаний происходило медленнее, необходимо уменьшить сопротивление контура, при этом уменьшится энергия, идущая на нагревание проводников.

Затухающие колебания вы уже наблюдали на опыте (см. рис. 165). Вы видели, что при замыкании переключателем цепи контура стрелка гальванометра начинала колебаться, однако амплитуда колебаний достаточно быстро уменьшалась; они затухали. График зависимости силы тока затухающих колебаний от времени приведён на рисунке 167.

2. Для того чтобы получить незатухающие колебания, необходимо периодически передавать контуру энергию, которая будет компенсировать потери энергии. Чтобы это осуществить, можно включить в контур источник, напряжение которого изменяется периодически, с определённой частотой. В этом случае в контуре будут существовать вынужденные электромагнитные колебания, происходящие с частотой, равной частоте изменения напряжения источника тока.

Если в контуре существуют вынужденные колебания, то это означает, что заряд конденсатора, сила тока, энергия электрического и магнитного полей периодически изменяются с частотой приложенного переменного напряжения.

3. В том случае, когда частота переменного напряжения совпадает с частотой колебаний контура, наступает **резонанс**. При этом наблюдается увеличение силы тока. Оно связано с тем, что энергия поступает в контур с той же частотой, с какой расходуется. Резонанс электромагнитных колебаний аналогичен резонансу механических колебаний.

Явление резонанса широко применяется в радиотехнике. Оно используется, например, при настройке радиоприёмника или телевизора на какую-нибудь радиостанцию. Поворачивая ручку настройки, мы изменяем ёмкость конденсатора и, следовательно, частоту электромагнитных колебаний в контуре. Когда эта частота совпадёт с частотой, на которой работает передающая



радиостанция, наступит резонанс. Сила тока в контуре радиоприёмника достигнет максимума, а принимаемый сигнал данной частоты будет иметь наибольшую громкость.

Вопросы для самопроверки

1. Почему свободные электромагнитные колебания являются затухающими?
2. Что нужно сделать, чтобы колебания в контуре были незатухающими?
3. С какой частотой происходят вынужденные электромагнитные колебания?
4. Где используется явление резонанса электромагнитных колебаний?

§ 46. Электромагнитные волны

- ✓ Что называют механической волной?
- ✓ Что является источником электрического поля; магнитного поля?
- ✓ Как обнаружить электрическое и магнитное поля?

1. Подобно тому как механические колебания распространяются в среде в виде механических волн, электромагнитные колебания распространяются в пространстве в виде электромагнитных волн. Как происходит распространение колебаний? Вспомните опыты Эрстеда и Фарадея, а также проведённые вами эксперименты по взаимодействию магнитной стрелки и проводника с током, по возникновению тока в катушке при движении в ней полосового магнита. Эти эксперименты показывают, что электрическое и магнитное поля взаимосвязаны. Если в какой-либо точке пространства возникает переменное электрическое поле, то в соседних точках оно возбуждает переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, возбуждает переменное электрическое поле, и т. д. Таким образом, можно говорить о едином поле — **электромагнитном**.

Процесс распространения электромагнитного поля представляет собой электромагнитные волны.

В процессе распространения электромагнитного поля происходит перенос энергии, которой обладает это поле.

2. Рассмотрим образование электромагнитных волн. Электромагнитные колебания, как вы уже знаете, можно получить в колебательном контуре. Колебательный процесс сопрово-



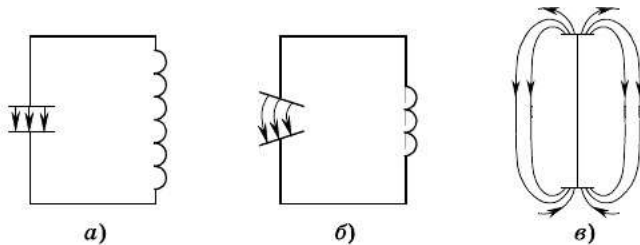


Рис. 168

ждается превращением энергии магнитного поля в энергию электрического поля и обратно. Вся энергия при этом остаётся в колебательном контуре, и лишь незначительная её часть излучается в пространство (рис. 168, а).

Если раздвигать пластины конденсатора (рис. 168, б), уменьшать число витков катушки, то получим открытый колебательный контур (рис. 168, в). Этот контур представляет собой по существу прямой провод, верхний конец которого соединён с горизонтальным проводом, располагающимся как можно выше над землёй, а нижний конец заземлён. Электромагнитное поле теперь охватывает всё пространство вокруг контура. Рассмотренное устройство представляет собой антенну.

Поскольку индуктивность и ёмкость открытого колебательного контура малы, то, учитывая, что $\nu = \frac{1}{T}$, а $T = 2\pi\sqrt{LC}$, можно сделать вывод, что частота возбуждаемых в нём электромагнитных колебаний велика.

3. Как создать в открытом колебательном контуре электромагнитные колебания? Для этого немецкий физик **Генрих Герц** (1857—1894) предложил использовать устройство, называемое теперь *вибратором Герца*. Провод разрезали посередине, раздвинули его, оставив небольшой промежуток, и подали на него высокое напряжение. При некотором значении напряжения между концами проводов проскакивала искра (рис. 169), цепь замыкалась и в контуре возникали колебания.

Эти колебания быстро затухали, поскольку вибратор излучал электромагнитные волны и терял при этом энергию. Поэтому проводники необходимо было снова заряжать.

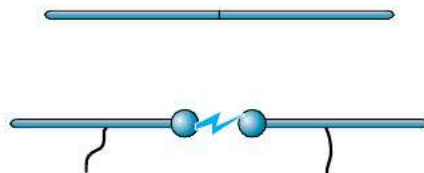


Рис. 169



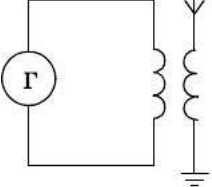


Рис. 170

В настоящее время для получения незатухающих колебаний в открытом колебательном контуре используют генератор незатухающих колебаний, с которым этот контур связан через катушку индуктивности (рис. 170).

4. Электромагнитные волны, в отличие от механических, могут распространяться в вакууме. Теория электромагнитного поля была создана

английским учёным **Джеймсом Клерком Максвеллом** (1831—1879). Максвелл теоретически обосновал, что *электрическое и магнитное поля тесно связаны между собой и образуют единое электромагнитное поле*. Максвелл показал, что электромагнитное поле распространяется в пространстве с конечной скоростью. Эта скорость является фундаментальной физической постоянной и равна $c \approx 300\,000$ км/с. Длина волны — это расстояние, на которое перемещается электромагнитная волна за время, равное периоду колебаний T .

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu},$$

где ν — частота колебаний.

Именно эти теоретические выводы Максвелла были подтверждены в экспериментах Герца.

Диапазон электромагнитных волн очень широк: от 10^{-15} до 10^{10} м. Радиовещание и телевизионное вещание осуществляются в диапазоне $10^4 \div 10^9$ Гц. В таблице 18 приведены характеристики радиоволн.

Таблица 18

Название волны	Частота	Длина волны, м
Длинные	30—300 кГц	10 000—1000
Средние	300 кГц — 3 МГц	1000—100
Короткие	3—30 МГц	100—10
Ультракороткие		
метровые	30—300 МГц	10—1
дециметровые	300—3000 МГц	1—0,1
сантиметровые	3000—30 000 МГц	0,1—0,01

Вопросы для самопроверки

1. Что называют электромагнитной волной?
2. Какие опыты свидетельствуют о взаимосвязи электрического и магнитного полей?
3. Может ли излучать закрытый колебательный контур?
4. Что собой представляет вибратор Герца?
5. Переносится ли энергия при распространении электромагнитных волн?
6. Чему равна скорость электромагнитных волн? Как она связана с длиной электромагнитной волны?

Задание 40



1. Сравните механические и электромагнитные волны: по частоте, по скорости распространения, по свойствам среды, в которой они распространяются.
2. Почему волна, которая возникает в колебательном контуре и распространяется в пространстве, называется электромагнитной?
3. Каковы частота и период электромагнитных колебаний, если радиостанция излучает волны длиной 15 м?
4. Определите длину электромагнитной волны, излучаемой радиолокационной станцией, работающей на частоте $3 \cdot 10^9$ Гц.
5. На какой частоте суда передают сигнал бедствия SOS, если по международному соглашению длина радиоволны должна быть 600 м?
6. Представьте в виде столбчатой диаграммы значения частот радиоволн (см. табл. 18).

§ 47. Использование электромагнитных волн для передачи информации

- ✓ Что называют электромагнитной волной?
- ✓ Что необходимо сделать, чтобы электромагнитные волны излучались в пространство?

1. Для регистрации электромагнитных волн Герц использовал приёмный вибратор, который был устроен так же, как и излучающий. Под действием переменного электромагнитного поля в приёмном вибраторе возбуждался переменный ток. Герц обнаружил колебания тока, наблюдая искорки в промежутке между проводниками приёмного вибратора. При этом частота



приёмного вибратора совпадала с частотой электромагнитной волны и наблюдался резонанс.

2. Понятно, что излучатель и приёмник Герца были далеки от совершенства и не могли использоваться для передачи информации.

В России над усовершенствованием излучателя и приёмника работал **Александр Степанович Попов** (1859—1906). Он предложил более чувствительный способ регистрации электромагнитных волн и создал первую приёмную антенну. Основной частью приёмника А. С. Попова является *когерер*. Он представляет собой стеклянную трубочку с двумя электродами, заполненную мелкими металлическими опилками. В обычных условиях опилки находятся на некоторых расстояниях друг от друга, и когерер имеет большое сопротивление.

Когда электромагнитная волна достигает когерера, то через опилки проходит ток высокой частоты. Между опилками проскакивают искорки, которые как бы сплавляют опилки, и сопротивление когерера уменьшается. При этом увеличивается сила тока и с помощью реле замыкается цепь электрического звонка (рис. 171). Молоточек звонка ударяет не только по звонковой чаше, но и по когереру, встряхивая его, разлепляя частицы, тем самым увеличивая сопротивление. Ток прекращается, и когерер готов к приёму новой волны.

Таким образом, электромагнитная волна, поступающая в приёмное устройство, управляет током в цепи.

Если в цепь приёмного устройства включить телеграфный аппарат, то можно регистрировать сигналы «точки» или «тире»

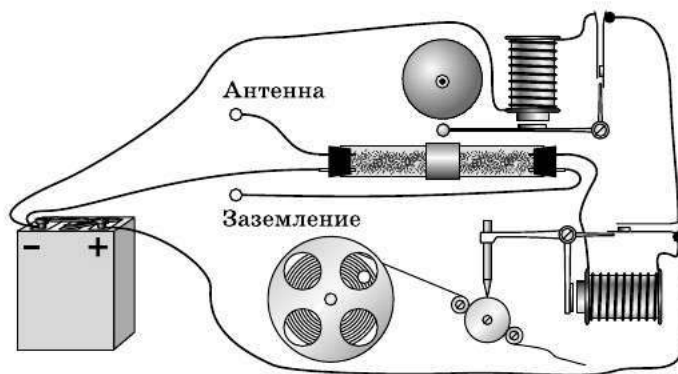


Рис. 171

в зависимости от того, в течение какого промежутка времени замкнут ключ передающей станции. В этом случае электромагнитные волны несут определённую информацию.

7 мая 1895 г. А. С. Попов на заседании Русского физико-химического общества в Петербурге продемонстрировал действие своего прибора, явившегося первым радиоприёмником.

Вначале радиосвязь была установлена на расстоянии 250 м, затем 600 м, затем 20 км. В 1901 г. дальность радиосвязи достигла уже 150 км. К этому времени была усовершенствована конструкция как передатчика, так и приёмника.

Таким образом, принципы радиосвязи заключаются в следующем:

- в передающей антенне создаётся переменный ток высокой частоты;
- ток вызывает переменное электромагнитное поле, которое распространяется в пространстве в виде электромагнитной волны;
- электромагнитная волна вызывает в приёмной антенне переменный ток той же частоты, что и частота передатчика.

3*. Кроме передачи телеграфных сигналов, возникает необходимость передачи речи и музыки, т. е. колебаний звуковой частоты. Передать их непосредственно, даже усилив, невозможно, так как частота колебаний мала и электромагнитные волны такой частоты не излучаются.

Поэтому для передачи колебаний звуковой частоты используют колебания высокой частоты, но изменяют их амплитуду со звуковой частотой. Изменение амплитуды сигнала высокой частоты в соответствии со звуковой частотой называют **амплитудной модуляцией**.

В специальном устройстве — *модуляторе* — колебания низкой (рис. 172, а) и высо-

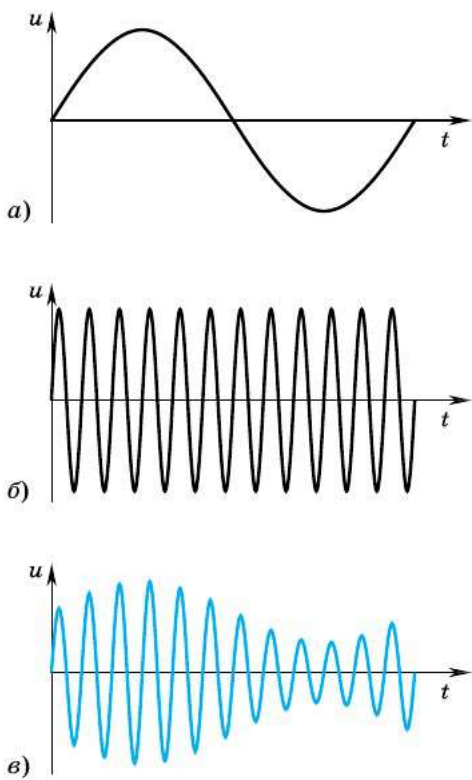


Рис. 172

кой частоты (рис. 172, б) складываются таким образом, что амплитуда колебаний высокой частоты изменяется в соответствии с колебаниями звуковой частоты. Модулированные колебания (рис. 172, в) излучаются передающей антенной.

Таким образом, передатчик состоит из генератора колебаний высокой частоты, источника звуковых колебаний, устройства, в котором происходит модуляция сигнала высокой частоты (изменение амплитуды), и передающей антенны (рис. 173).

Модулированные колебания доходят до приёмника. В приёмнике из этих колебаний выделяются колебания низкой частоты. Процесс выделения колебаний низкой частоты из модулированных высокочастотных колебаний называется **детектированием**.

Детектирование осуществляется с помощью специального прибора — *детектора*, который проводит ток только в одном направлении. В цепи детектора из высокочастотных модулированных колебаний получают пульсирующий ток, амплитуда которого меняется со звуковой частотой.

Чтобы полностью разделить высокочастотные колебания и колебания звуковой частоты, в цепи детектора ставят параллельно соединённые конденсатор и громкоговоритель. Через конденсатор проходят токи высокой частоты, для токов низкой частоты он представляет большое сопротивление. Токи низкой частоты проходят через громкоговоритель. Таким образом, в громкоговорителе будут воспроизводиться звуковые колебания, частота которых соответствует колебаниям низкой частоты передающей станции.

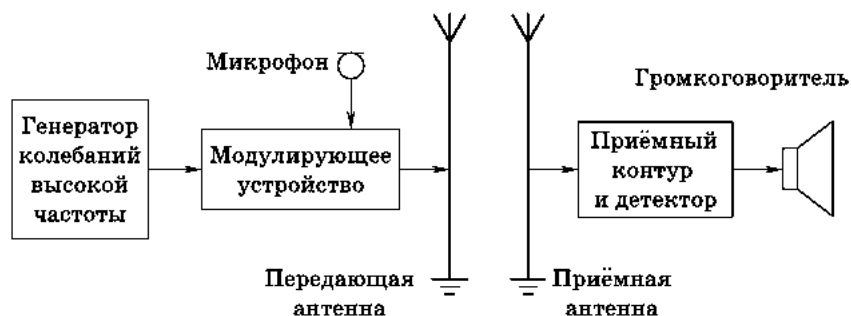


Рис. 173

4. На рисунке 174 приведена схема простейшего детекторного радиоприёмника. Он состоит из колебательного контура, конденсатор которого имеет переменную ёмкость, и присоединённой к контуру цепи, состоящей из детектора Д, конденсатора К и наушников Н. Колебательный контур связан с антенной.

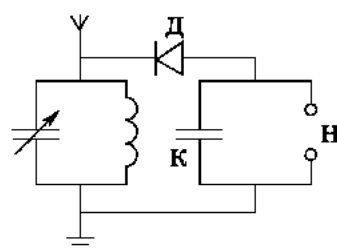


Рис. 174

С помощью конденсатора переменной ёмкости можно настраивать контур на определённую частоту. При совпадении частоты контура с частотой принимаемой станции в наушниках отчётливо слышен звук.

Как видим, детекторный радиоприёмник работает без источников тока, только за счёт энергии электромагнитных волн. Поэтому он не может принимать сигналы от далёких и маломощных радиостанций.

На смену простым детекторным радиоприёмникам пришли более мощные, ламповые. В них в качестве усилителей и детекторов использовались электронные лампы. В конце XX в. ламповые радиоприёмники были вытеснены полупроводниковыми, в которых громоздкие и потребляющие большую мощность лампы заменены полупроводниковыми устройствами.

Вопросы для самопроверки

1. Что собой представляет приёмник электромагнитных волн, использованный Г. Герцем?
2. Какой элемент является основной частью приёмника А. С. Попова? Как он работает?
- 3*. Что такое модуляция? Как она осуществляется?
- 4*. Что такое детектирование? Как осуществляется детектирование?
5. Из чего состоит детекторный радиоприёмник?
6. Может ли детекторный радиоприёмник принимать сигналы от далёких радиостанций? Почему?

Задание 41

1. Почему работающие электрические звонки, пылесосы, лампы дневного света могут быть источниками радиопомех?
2. Настраивая радиоприёмник, мы изменяем площадь пластин конденсатора в колебательном контуре. Как изменяется площадь пластин при переходе к более длинным волнам?

§ 48*. Свойства электромагнитных волн

- ✓ Какими свойствами обладают механические волны?
- ✓ Вспомните закон отражения волн.



1. Электромагнитные волны обладают теми же свойствами, что и другие виды волн, в частности механические. Подтвердим это



Рис. 175

экспериментально. В качестве источника будем использовать генератор, излучающий волны длиной 3 см, модулированные звуковой частотой. Генератор снабжён рупорной антенной, что позволяет получать направленное излучение (рис. 175).



Приёмник электромагнитных волн также имеет рупорную антенну. В приёмник встроен детектор, который выделяет сигнал звуковой частоты. Этот сигнал после усиления подаётся на громкоговоритель. Проведём несколько опытов.

2. Расположим рупоры друг напротив друга и добьёмся хорошей слышимости звука в громкоговорителе.

Расположим теперь рупор генератора под некоторым углом к горизонтальному металлическому листу. Звук слышен не будет. Поворачивая приёмник, заметим, что звук будет наиболее громким, когда угол падения волны станет равным углу отражения (рис. 176).

Если изменить направление падающей волны, изменится и направление отражённой волны. Это свидетельствует о том, что электромагнитные волны обладают *свойством отражения*. При этом угол отражения равен углу падения: $\angle \beta = \angle \alpha$.

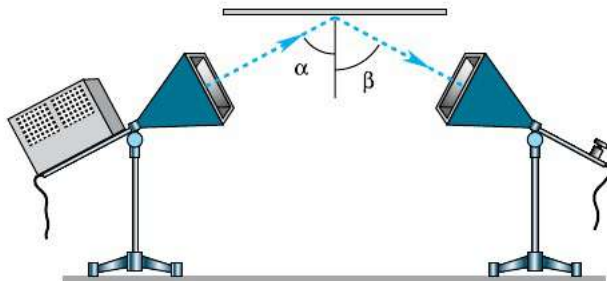


Рис. 176

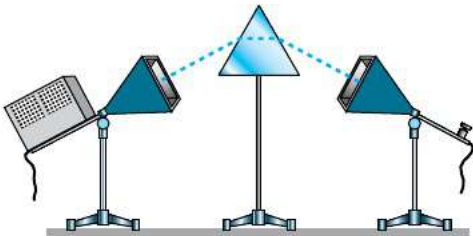


Рис. 177

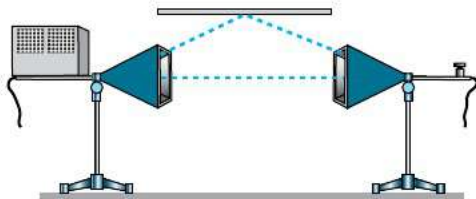


Рис. 178

3. Расположим рупоры генератора и приёмника под углом друг к другу. Металлический лист заменим призмой из диэлектрика (рис. 177). При определённом положении призмы звук усиливается. Если призму убрать или повернуть, то звук не будет слышен.

Опыт свидетельствует о том, что электромагнитные волны *преломляются* на границе диэлектрика.

4. Рупоры генератора и приёмника расположим под некоторым небольшим углом друг к другу, при котором наблюдается ослабленный приём сигнала. Поместим над ними металлический лист (рис. 178). Получим две волны: одна распространяется непосредственно от генератора, другая после отражения от листа. Эти волны имеют одинаковую частоту. Встречаясь в некоторой точке пространства и имея при этом некоторую постоянную разность хода волн, эти волны *интерferируют*. Перемещая приёмник, можно слышать усиление и ослабление звука, соответствующие максимумам и минимумам интерференционной картины.

5. Расположим рупоры друг напротив друга и поставим между ними металлический экран, состоящий из двух пластин. Сигнал не будет слышен. Раздвинем теперь пластины так, чтобы образовалась щель шириной 3 см (рис. 179). Передвигая приёмник за экраном по дуге окружности, центр которой расположен на середине щели, можно обнаружить слева и справа от щели усиление и ослабление звука. Следовательно, происходит *дифракция* электромагнитных волн.

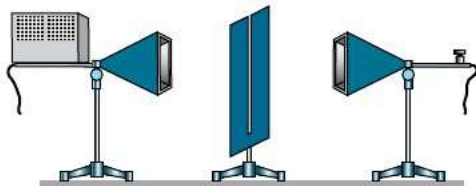


Рис. 179



Таким образом, электромагнитные волны отражаются, преломляются, им свойственны интерференция и дифракция.

Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте закон отражения электромагнитных волн. Как его продемонстрировать?
2. Как продемонстрировать преломление электромагнитных волн?
3. Как продемонстрировать интерференцию электромагнитных волн?
4. Какому условию должны удовлетворять источники волн, чтобы можно было наблюдать их интерференцию?
5. Почему ширина щели или металлической пластины в опыте по наблюдению дифракции электромагнитных волн равна 3 см?

§ 49. Электромагнитная природа света

- ✓ Чему равна скорость электромагнитных волн?
- ✓ Что происходит со световым пучком при прохождении через трёхгранную призму?

1. Вопрос, что такое свет, каковы его свойства, волновал учёных ещё в глубокой древности. Учение о свете развивалось таким образом, что некоторые законы, которым подчиняются световые явления, были установлены раньше, чем стало понятно, какова же природа света. К таким законам относятся законы прямолинейного распространения, отражения, преломления, полного внутреннего отражения света, которые вы изучали в 7 классе в теме «Световые явления». Однако объяснение эти законы получили существенно позже.

2. В XVII в. почти одновременно возникли две теории о природе света. Основоположителем одной из них был Ньютон. Он полагал, что свет — это поток световых частиц, которые распространяются в пространстве. Согласно второй теории, предложенной голландским физиком *Христианом Гюйгенсом* (1629—1695), свет — это волна, которая распространяется в упругой среде, заполняющей всё вокруг. Эту среду называли *световым эфиром*. Световые явления, которые в то время были открыты, хорошо объяснялись как одной теорией, так и другой. Эти две теории долгое время сосуществовали.

3. В начале XIX в. были изучены явления интерференции и дифракции света. Уже тогда было известно, что эти явления на-

лилась от Юпитера, то затмение произошло на 22 мин позже расчитанного срока.

Рёмер предположил, что именно 22 мин потребовалось свету, чтобы пройти расстояние, на которое Земля удалилась от Юпитера по сравнению с её первоначальным положением. Разделив это расстояние на 22 мин, Рёмер вычислил скорость света, которая получилась равной 215 000 км/с. Конечно, это значение сильно отличается от того, которое было получено впоследствии. Однако Рёмер установил конечность скорости распространения света.

Во всех лабораторных методах измерения скорости света использовался один и тот же принцип увеличения расстояния, которое должен был пройти свет. Он заключался в том, что прежде, чем попасть к наблюдателю, свет испытывал многократное отражение. В первом лабораторном опыте, который выполнил французский физик А. Физо, было получено значение скорости света, равное 313 300 км/с. По результатам точных современных экспериментов значение скорости света в вакууме составляет 299 792 458 м/с.

Совпадение значений скорости света, полученных экспериментально и теоретически, является одним из доказательств того, что свет — это электромагнитные волны определённой частоты.

5. В курсе физики 7 класса, кроме отражения и преломления света, вы изучали явление разложения белого света в спектр при прохождении через трёхгранную призму (рис. I на форзаце). Разложение белого света происходит потому, что пучки разного цвета по-разному преломляются призмой.

Вы также знаете, что угол преломления света зависит от скорости распространения света в среде. Световые пучки разного цвета имеют разные углы преломления, поскольку скорость их распространения в среде различна.

Возникает вопрос: чем различаются физические характеристики световых волн, соответствующих разным цветам? Оказалось, что частотой или длиной волны. Так, частота волн, соответствующих красному цвету, лежит в диапазоне $3,85 \cdot 10^{14}$ — $4,84 \cdot 10^{14}$ Гц, а частота волн, соответствующих фиолетовому цвету, — $6,67 \cdot 10^{14}$ — $7,89 \cdot 10^{14}$ Гц.

Следовательно, показатель преломления среды зависит от частоты волн.





Дисперсией света называют зависимость скорости света в среде от частоты света.

Дисперсией объясняется радуга, иногда в солнечный день можно наблюдать дисперсию при преломлении света в капле воды.

6. Вы уже наблюдали интерференцию и дифракцию механических и электромагнитных волн. Эти явления характерны и для световых волн.

Проблема наблюдения интерференции световых волн связана с тем, что довольно сложно создать два источника света, которые излучали бы волны одинаковой частоты. Принципиальное решение этой проблемы заключается в том, что пучок света от одного источника делится на два с помощью либо двух зеркал, либо двух призм, либо иным способом.

Если два световых пучка, имеющих одинаковую частоту и разность хода, равную целому числу длин волн, встречаются в некоторой точке пространства, то они усиливают друг друга и в этом месте наблюдается интерференционный максимум — светлая или разноцветная полоса (для белого света) или окрашенная полоса (для света определённой частоты).

Если разность хода равна нечётному числу полуволн, то в некоторой точке пространства наблюдается интерференционный минимум — тёмная полоса.

Во всех других точках колебания происходят с постоянными амплитудами, значения которых лежат в интервале от минимального до максимального.

Интерференцию света вы можете наблюдать в тонком слое бензина, покрывающего лужу, или в мыльных плёнках.

Рассмотрим, как происходит сложение световых волн при их прохождении через мыльную плёнку. На рисунке 181 изображена в разрезе в сильно увеличенном виде мыльная плёнка. Предположим, что свет падает на наружную поверхность плёнки в точке *A*. Часть светового пучка отражается от этой поверхности, а часть, преломляясь, проходит внутрь плёнки и, отражаясь от её внутренней поверхности в точке *B*, выходит наружу. Эти два отражённых пучка складываются и дают интерференционную картину. В данном слу-

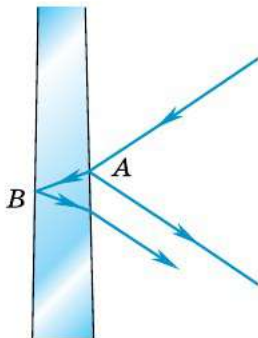


Рис. 181

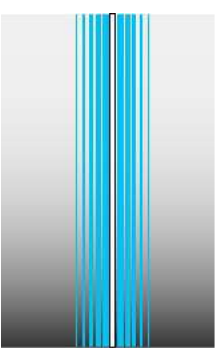


Рис. 182

чае отражённые от внешней и внутренней поверхностей плёнки световые волны имеют одинаковую частоту, поскольку они представляют собой два разделённых световых пучка от одного и того же источника. Разность хода появляется за счёт того, что преломлённая волна дважды проходит толщину плёнки.

Интерференцию в тонких плёнках вы неоднократно наблюдали в мыльных пузырях, которые имеют разноцветную окраску. Это объясняется тем, что плёнка мыльного пузыря имеет разную толщину: из-за стекания мыльного раствора вниз нижние слои плёнки оказываются

толще, чем верхние. Поскольку разность хода и длина световой волны (частота света) связаны между собой, то при разной толщине плёнки и, соответственно, разности хода наблюдаются разные цвета.

7. Если на пути светового пучка поставить тонкую нить, свет уже не будет распространяться прямолинейно, он будет огибать эту нить, заходить за неё, и на экране мы увидим чередование светлых и тёмных полос (рис. 182). Описанное явление, как вам известно, называется дифракцией. Это явление имеет место всегда, однако наблюдать его можно, если длина волны света сравнима с размерами преграды, а расстояние между преградой и экраном достаточно велико. Дифракционную картину можно наблюдать не только от нити, но и от очень узкой щели. В этом случае свет огибает границы щели.

Таким образом, для световых волн, так же как и волн любой другой природы, наблюдаются при определённых условиях явления интерференции и дифракции.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы доказательства электромагнитной природы света?
2. В чём сущность астрономического метода измерения скорости света?
3. В чём сущность лабораторных методов измерения скорости света?
4. Что называют дисперсией света? Какой опыт позволяет наблюдать это явление?
5. Каковы условия наблюдения интерференции света?
6. Каковы условия наблюдения дифракции света?



1. Поставьте опыт по наблюдению дисперсии. Опишите его.
2. Слегка прикройте глаза и посмотрите сквозь ресницы на солнце. Опишите свои наблюдения.
- 3*. Если у вас есть лазерная указка, сделайте в затемнённой комнате следующий опыт. Возьмите прозрачную пластинку, лучше из обычного стекла. Проведите очень тонким фломастером или пером несколько штрихов. Укрепите пластинку и направьте на неё луч лазерной указки. Что вы наблюдаете на стене? Объясните результат опыта.

§ 50. Шкала электромагнитных волн

- ✓ По каким физическим характеристикам различаются световые волны, соответствующие разным цветам?
- ✓ Как связаны длина волны и частота колебаний?

1. Диапазон частот электромагнитных волн очень широк: он лежит в пределах от 0 до $3 \cdot 10^{22}$ Гц, а длина волны — в пределах от 10^{-14} м до бесконечности. По длине волны или частоте электромагнитные волны можно разделить на семь диапазонов, границы которых весьма условны, поэтому соседние диапазоны в большинстве случаев перекрывают друг друга. На рисунке 183 приведена шкала электромагнитных волн с указанием частот и длин волн соответствующих диапазонов. Обладая рядом общих свойств, волны разной частоты имеют и специфические свойства. Охарактеризуем их.

2. Волнам первого диапазона соответствуют частоты $0—2 \cdot 10^4$ Гц. Это *низкочастотные волны* (волны звуковой частоты), их источником является переменный ток. Вы знаете, что частота переменного тока в городской сети 50 Гц. Интенсивность таких волн мала.

3. *Радиоволны* занимают диапазон частот от $2 \cdot 10^4$ до $3 \cdot 10^{12}$ Гц. Эти волны используются, как вы знаете, для осуществления радиосвязи, радиолокации, телевизионных передач. Радиоволны, в свою очередь, делятся на длинные, средние, короткие и ультракороткие, а также сверхвысокочастотное излучение в диапазоне от 10^9 до $3 \cdot 10^{12}$ Гц.

Сверхвысокочастотные волны практически не поглощаются атмосферой, поэтому они могут распространяться на большие



расстояния. Это позволяет использовать их для осуществления космической связи.

4. Между сверхвысокочастотными волнами и световыми волнами лежит *инфракрасное излучение*. Ему соответствуют частоты от $3 \cdot 10^{12}$ до $4 \cdot 10^{14}$ Гц. Инфракрасные волны излучают все нагретые тела. Мощным источником инфракрасного излучения является Солнце. Оно используется для сушки овощей и фруктов, а также в приборах ночного видения (биноклях, оптических прицелах); приёмники инфракрасного излучения в виде специальных фотопластинок позволяют фотографировать объекты в полной темноте.



Рис. 183

5. Следующий диапазон — это *видимый свет*, его частоты лежат в пределах от $4 \cdot 10^{14}$ до $8 \cdot 10^{14}$ Гц. Удивительно, что человеческий глаз может непосредственно воспринимать электромагнитные волны лишь в очень узком диапазоне частот. При этом он максимально чувствителен к излучению частотой $5,3 \cdot 10^{14}$ Гц, что совпадает с частотой, соответствующей максимальной интенсивности излучения Солнца.

6. За видимым светом следует область *ультрафиолетового излучения*, диапазон которого от $8 \cdot 10^{14}$ до $3 \cdot 10^{16}$ Гц. Естественными источниками ультрафиолетового излучения являются Солнце, звёзды и другие космические объекты. Ультрафиолетовое излучение оказывает как полезное, так и вредное воздействие на человеческий организм. В частности, оно приводит к образованию защитного пигмента — загара, обладает бактерицидным действием. С другой стороны, чрезмерные дозы ультрафиолетового излучения могут вызвать ожог кожи и повреждение глаз.

7. Следующие два диапазона — *рентгеновское излучение* с частотой $3 \cdot 10^{15}$ — $3 \cdot 10^{20}$ Гц и *γ -излучение* с частотой больше чем $3 \cdot 10^{19}$ Гц. Рентгеновское излучение обладает высокой проникающей способностью, поэтому оно применяется в медицине для получения снимков внутренних органов и скелета, для лечения онкологических заболеваний. Его применяют при исследовании структуры кристаллической решётки, для обнаружения различного рода дефектов в материалах.

Гамма-излучение обладает ещё большей проникающей способностью, чем рентгеновское излучение. Оно возникает при ядерных взрывах и является крайне опасным и губительным для человека. В результате ядерных реакций, которые происходят в недрах Солнца и звёзд, в космическое пространство поступает огромная энергия, которую несёт γ -излучение. Оно поглощается атмосферой Земли, поэтому на Земле сохраняется биологическая жизнь.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите диапазоны электромагнитных волн.
2. Каковы свойства инфракрасных волн?
3. Каковы свойства ультрафиолетового излучения?
4. Каковы свойства рентгеновского излучения?
5. Каковы свойства γ -излучения?



- 1. История изобретения радио.
- 2. Современные средства связи.
- 3. Использование инфракрасного излучения в военной технике.
- 4. Использование рентгеновского излучения в медицине.
- 5. Конструирование детекторного радиоприёмника.



Основное в главе

- 1. Основные понятия и величины (табл. 19).

Таблица 19

Название	Обозначение	Формула	Единица	Основные особенности
Ёмкость конденсатора	C	$C = \frac{q}{U}$	Ф	Зависит от площади пластин, расстояния между ними и свойств внесённого в конденсатор диэлектрика

- 2. Свойства колебательной системы (табл. 20).

Таблица 20

Название	Характеристики	Свойства
Колебательный контур	Ёмкость конденсатора; индуктивность катушки	Существует состояние равновесия — конденсатор не заряжен; при выведении из состояния равновесия действует фактор, стремящийся вернуть в него колебательную систему (напряжение на конденсаторе); система обладает инертностью (самоиндукция) и поэтому проходит состояние равновесия

3. Свойства электромагнитных волн радиодиапазона и оптического диапазона (табл. 21).

Таблица 21

<i>Название</i>	<i>Определение</i>
Отражение	Изменение направления распространения на границе двух сред
Преломление	Изменение направления распространения при переходе из одной среды в другую
Дисперсия	Зависимость скорости света в среде от частоты падающего света
Дифракция	Огибание волной преграды
Интерференция	Сложение волн, в результате которого наблюдается устойчивая картина распределения максимумов и минимумов колебаний



Элементы квантовой физики

До сих пор вы изучали физические явления, которые объяснялись законами классической физики: классической механики, молекулярно-кинетической теории и электродинамики.

В данной главе учебника вы познакомитесь с физическими явлениями, которые могут быть объяснены только в рамках сравнительно недавно открытой физической теории — квантовой теории. При изучении материала этой главы вам придётся пересмотреть, а порой и отказаться от многих привычных понятий и представлений, физических законов и моделей, которые вы использовали, изучая классическую физику.

Многие вопросы и проблемы, которые оставались без ответа в классической физике, нашли своё объяснение только на основе квантовой физики.

§ 51*. Фотоэффект

- ✓ Каков диапазон частот ультрафиолетового излучения?
- ✓ В чём состоит волновая теория света?

1. Изучение вопросов квантовой физики мы начнём с рассмотрения явления фотоэффекта, полное объяснение которого классическая физика дать не смогла.

Фотоэффект был открыт в 1887 г. Г. Герцем и затем экспериментально исследован выдающимся российским физиком **Александром Григорьевичем Столетовым** (1839—1896).



Явление фотоэффекта можно наблюдать на опыте. Сообщим цинковой пластине, присоединённой к электрометру, отрицательный заряд. При освещении пластины ультрафиолетовым светом, например от электрической дуги, электрометр будет очень быстро разряжаться (рис. 184). Если же сообщить пластине положительный электрический заряд и затем осветить ультрафиолетовым светом, то электрометр не разрядится.

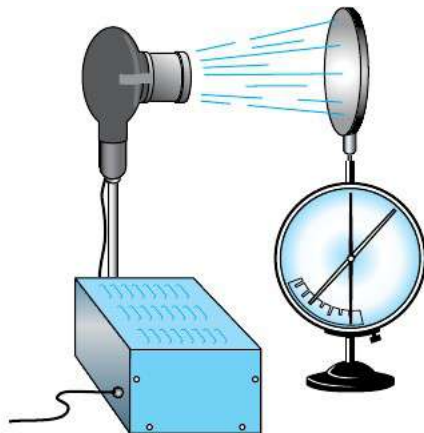


Рис. 184

2. Единственная возможная гипотеза, объясняющая данное явление, заключается в том, что с поверхности цинковой пластины под действием света могут вылетать отрицательно заряженные частицы. Измерения заряда и массы этих частиц показали, что вырываемые с поверхности частицы — электроны.

Явление вырывания электронов из вещества под действием света называют фотоэффектом.

3. Объяснение фотоэффекта с позиций волновой теории света представляется на первый взгляд несложным. Под действием света увеличивается энергия электронов в атомах, и они начинают вырываться из пластины. Если пластина заряжена отрицательно, то под действием света электрометр постепенно разряжается; если же заряд пластины положителен, то при её освещении заряд не меняется. Электрическое поле пластины возвращает назад вырвавшиеся свободные электроны. При этом чем больше энергия светового пучка, тем больше электронов вырывается из пластины.

Однако уже небольшое изменение условий опыта покажет несостоятельность предложенного объяснения. Например, если на пути светового пучка поместить стеклянную пластину, то отрицательно заряженная цинковая пластина не разрядится. Можно сколь угодно увеличивать световой поток, результат опыта не изменится. Как известно, стекло, пропуская видимое излучение,

поглощает ультрафиолетовые лучи. Следовательно, именно ультрафиолетовое излучение и вызывает фотоэффект.

Этот факт невозможно объяснить на основе волновой теории света. Непонятно, почему даже очень мощный световой поток не может вырвать электроны из цинковой пластины.

Тщательные эксперименты учёных позволили выявить ещё ряд особенностей фотоэффекта, которые невозможно объяснить с точки зрения волновой теории света.

4. Явление фотоэффекта и его законы, установленные в результате многочисленных экспериментов учёных, были объяснены в 1905 г. **Альбертом Эйнштейном** (1879—1955) — выдающимся немецким физиком XX в.

А. Эйнштейн высказал принципиально новую, невозможную с позиций классической физики гипотезу: *свет испускается, распространяется и поглощается определёнными порциями — квантами.*

Несколько раньше, в 1900 г., немецкий учёный **Макс Планк** (1858—1947) предположил, что электромагнитное излучение, в том числе и видимый свет, испускается порциями — квантами. Значение порции энергии электромагнитного излучения зависит только от частоты излучения и может быть определено по формуле:

$$E = h\nu,$$

где E — энергия кванта, ν — частота излучения, h — постоянная величина, получившая впоследствии название постоянной Планка. Постоянная Планка равна $6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

Соответственно, при фотоэффекте электрон поглощает фотон (энергию кванта света). Энергия электрона возрастает, позволяя ему, преодолев силы взаимодействия внутри вещества, совершить работу (называется работой выхода электронов из металла) и выйти из металла.

5. Гипотезы М. Планка и А. Эйнштейна не только кардинально меняли все классические представления об электромагнитном излучении как сугубо волновом процессе, но и позволили предсказать существование принципиально новой элементарной частицы. Частица электромагнитного излучения, получившая название **фотон** (от греческого слова, означающего «свет»), реально существует в природе, что вскоре было подтверждено в многочисленных экспериментах.

6. Фотоэффект и другие явления, открытые физиками на рубеже XX в., доказывают, что свет является потоком особого рода частиц — фотонов. Однако такие явления, как интерференция и дифракция, неопровержимо свидетельствуют о волновых свойствах света. Естественно возникает вопрос: что же такое свет — поток фотонов или электромагнитная волна?

Ответ на этот вопрос, полученный учёными уже более века назад, может показаться в первый момент необычным: свет в зависимости от ситуации может вести себя как поток частиц (фотонов) или как волна.

Вопросы для самопроверки

1. В чём состоит явление фотоэффекта?
2. Будет ли происходить фотоэффект, если цинковую пластину зарядить положительно?
3. Как можно объяснить процесс вырывания электронов с поверхности металла с позиций волновой теории света?
4. Какие факты, наблюдаемые при изучении фотоэффекта, не могут быть объяснены исходя из классической волновой теории?
5. В чём состоит гипотеза Планка и Эйнштейна?
6. Что такое фотон?

Задание 43*

Как изменится время разрядки электрометра в опыте по обнаружению фотоэффекта, если:

- а) электрометр приблизить к источнику света;
- б) закрыть непрозрачным экраном часть цинковой пластины;
- в) поставить светофильтр, задерживающий инфракрасную часть спектра;
- г) поставить светофильтр, задерживающий ультрафиолетовую часть спектра?

§ 52. Строение атома

- ✓ Каков структурный состав атома?
- ✓ Как можно определить заряд атомного ядра химического элемента?

1. О сложном строении атома, о наличии внутри атомов электрических зарядов знали учёные ещё в XIX в. В 1897 г. английским физиком *Джозефом Джоном Томсоном* (1856—1940) был открыт электрон — частица с наименьшим электриче-



ским зарядом. Он же предложил в 1903 г. одну из первых моделей строения атома. По предположению Дж. Томсона, атом представляет собой шар, заполненный положительно заряженным веществом, в который вкраплены электроны. Эту модель атома не случайно называли «кексом с изюмом», в котором роль изюминок играли электроны. Число электронов должно было быть таким, чтобы их суммарный заряд был равен по модулю положительному заряду шара. Диаметр атома составляет примерно 10^{-10} м.

Модель атома, предложенная Томсоном, просуществовала в науке около 10 лет и вполне успешно объясняла целый ряд физических явлений: электризацию, электрическую проводимость и др. Однако она нуждалась в экспериментальной проверке.

2. Вторая модель строения атома, появившаяся в результате экспериментального изучения внутренней структуры атома, была предложена в 1911 г. английским физиком **Эрнестом Резерфордом** (1871—1937). Напомним, что согласно этой модели в центре атома расположено положительно заряженное ядро, вокруг которого движутся электроны. По аналогии со строением Солнечной системы эту модель называют **планетарной моделью атома**. Поскольку масса электрона очень мала (в несколько тысяч раз меньше массы атома), практически вся масса атома сосредоточена в ядре. Так как атом электрически нейтрален, то заряд ядра равен модулю суммарного заряда электронов.

3. Основанием для создания планетарной модели атома были результаты экспериментов, проводившихся в 1908—1911 гг. под руководством Резерфорда. Исследовалось рассеяние α -частиц (ядер гелия) металлической фольгой.

Схема опытов Резерфорда показана на рисунке 185. Радиоактивный элемент, излучающий α -частицы, помещался внутри свинцового цилиндра 1. Вылетев из сосуда через узкий канал, α -частицы проходили сквозь тонкую металлическую фольгу 2 толщиной около 10^{-6} м и попадали на полупрозрачный экран 3, покрытый специальным веществом.

Столкновение каждой частицы с экраном вызывало вспышку света, которую мож-

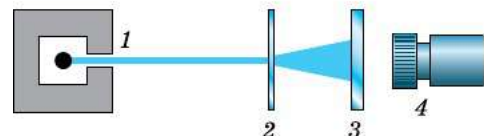


Рис. 185

но было наблюдать в микроскоп 4. Установку помещали в сосуд, из которого был откачан воздух.

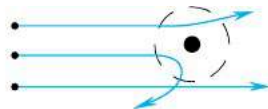


Рис. 186

Экран располагался под разными углами к первоначальному направлению движения α -частиц, и каждый раз подсчитывалось число частиц, рассеивавшихся на тот или иной угол. Выяснилось, что большинство частиц свободно проходили сквозь фольгу, испытывая лишь незначительные отклонения. Однако в некоторых очень редких случаях наблюдалось рассеяние α -частиц на большие углы (от 90 до 180°) (рис. 186). Это случалось примерно в одном из $20\,000$ наблюдений. Не случайно Резерфорд в своём дневнике писал: «Это было почти столь же невероятно, как если бы вы выстрелили 15-дюймовым снарядом в кусок тонкой бумаги, а снаряд возвратился бы к вам и нанёс вам удар».

4. Анализируя результаты многочисленных экспериментов, Резерфорд пришёл к выводу, что отражение α -частиц обусловлено их отталкиванием положительно заряженными частицами, массы которых соизмеримы с массой α -частицы. Масса электрона примерно в 8000 раз меньше массы α -частицы, поэтому электроны, входящие в состав атома, не могли существенным образом изменить направление движения α -частицы.

Опыты Резерфорда позволили также оценить размеры атомного ядра. Оказалось, что ядро имеет диаметр порядка 10^{-14} — 10^{-15} м, т. е. в десятки и сотни тысяч раз меньше диаметра атома.

Таким образом, в результате экспериментов по рассеянию α -частиц была доказана несостоятельность модели атома Томсона.

Дальнейшие исследования Резерфорда и его учеников позволили установить, что заряд атомного ядра $q_{\text{ядра}}$ равен произведению порядкового номера Z элемента в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева и заряда электрона e :

$$q_{\text{ядра}} = Ze.$$

Так, например, порядковый номер углерода C — 6 . Это означает, что в его атоме шесть электронов, а заряд ядра равен по модулю шестикратному заряду электрона.

Вопросы для самопроверки

1. Что собой представляет модель атома Томсона?
2. Какова модель атома Резерфорда?

3. Результаты каких опытов явились обоснованием планетарной модели атома?

4. Каковы размеры атома и атомного ядра?

5. Чему равен заряд атомного ядра?

§ 53. Спектры испускания и поглощения

✓ Как можно получить спектр белого света?

✓ Из каких семи простых цветов состоит белый свет?

1. Как вы уже знаете, при прохождении узкого пучка белого света через призму на экране можно увидеть **сплошной спектр** (рис. II на форзаце). Сплошные спектры наблюдаются не только при разложении солнечного света, но и любого света, излучаемого раскалёнными (нагретыми до нескольких тысяч градусов) твёрдыми и жидкими телами. Солнце — лишь одно из подобных раскалённых тел.

2. Спектр вещества в газообразном состоянии отличается от сплошного спектра и состоит из узких цветных линий разной яркости на чёрном фоне (см. рис. II на форзаце). Такой спектр называют **линейчатым спектром испускания**.

Для того чтобы получить линейчатый спектр испускания, необходимо исследуемое вещество разогреть до очень высокой температуры и перевести в газообразное состояние. Наличие линейчатого спектра означает, что вещество излучает свет только вполне определённых длин волн.

У каждого химического элемента свой линейчатый спектр испускания, не совпадающий со спектром ни одного другого химического элемента.

Если на пути пучка белого света, дающего сплошной спектр испускания, поместить вещество в газообразном состоянии, то на фоне сплошного спектра появятся тёмные линии (см. рис. II на форзаце). Такой спектр называют **спектром поглощения**.

Линии спектра поглощения располагаются в тех же местах спектра, в которых находятся линии спектра испускания для данного вещества.

3. Расположение отдельных линий спектра зависит от строения атомов вещества, и именно поэтому для каждого химического элемента набор линий единственный. В настоящее время получены спектры всех химических элементов и составлены таблицы спектров.



§ 54. Радиоактивность

- ✓ Каковы свойства рентгеновского излучения?
- ✓ Как действует магнитное поле на заряженные частицы?

1. В начале 1896 г. французским физиком **Анри Беккерелем** (1852—1908) было обнаружено неизвестное ранее невидимое излучение сильной проникающей способности. С этого открытия началась новая эпоха в развитии научного знания.

Исследуя рентгеновское излучение, Беккерель проводил эксперименты с некоторыми веществами, в том числе с солями урана, и полагал, что под действием солнечных лучей уран испускает излучение, подобное рентгеновскому. На фотопластинку, завернутую в плотную бумагу, он положил крупинки урановой соли и выставил на солнечный свет. После проявления пластинка почернела как раз в тех местах, где лежала соль. Однажды учёный обнаружил, что почернение пластинки происходит и в том случае, когда уран предварительно не освещался солнечным светом. Это означало, что уран самопроизвольно испускает какое-то излучение.

В 1898 г. французские учёные **Мария Склодовская-Кюри** (1867—1934) и **Пьер Кюри** (1859—1906) выделили из урановой руды два новых химических элемента — радий и полоний, которые тоже самопроизвольно испускали невидимое излучение, подобное излучению урана, но гораздо более мощное.

Способность некоторых веществ к самопроизвольному излучению называли **радиоактивностью**, а вид излучения — **радиоактивным**.

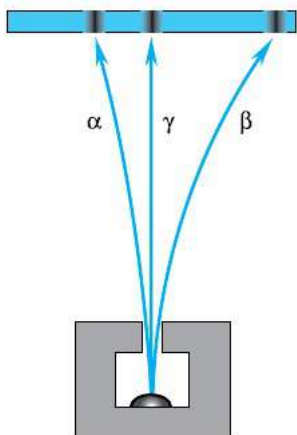


Рис. 187

2. В 1899 г. Э. Резерфорд экспериментально обнаружил, что радиоактивное излучение имеет сложный состав.

Опыт, поставленный Резерфордом, схематично представлен на рисунке 187. В толстостенный свинцовый сосуд, имеющий небольшое отверстие, помещалась крупинка радия. На выходящее из отверстия излучение действовало сильное магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны исходящему пучку. После проявления фотопластинки, расположенной напротив отверстия, были обнаружены три пятна, а не одно, как ожидалось. Одно пятно располагалось в центре, строго напротив отвер-

ствия, два других — по разные стороны от центрального пятна. Поскольку два пучка отклонились в магнитном поле, значит, они представляют собой потоки противоположно заряженных частиц.

Положительно заряженные частицы называли **альфа-частицами**, а соответствующее излучение — **α -излучением**; отрицательно заряженные частицы были названы **бета-частицами**, а излучение — **β -излучением**.

Природа третьего, нейтрального излучения, на которое не действовало магнитное поле, была выявлена годом позже. Его называли **гамма-излучением**.

Дальнейшие исследования показали, что α -частицы — это ядра атома гелия, β -частицы — электроны, а γ -излучение представляет собой поток электромагнитного излучения или поток фотонов. Длина волны γ -излучения ещё меньше, чем рентгеновского, и лежит в диапазоне 10^{-10} — 10^{-13} м.

Энергия испускаемых при радиоактивности частиц может иметь значения, в сотни тысяч и миллионы раз превосходящие энергию в химических реакциях.

3. В результате многочисленных экспериментов было установлено, что в природе существует большое число радиоактивных элементов. Так, среди элементов, содержащихся в земной коре, радиоактивными являются все элементы в таблице Д. И. Менделеева с порядковыми номерами более 83. Обнаружена радиоактивность и у других, более лёгких элементов.

4. Существуют различные методы регистрации и изучения взаимных превращений ядер. С помощью некоторых приборов (например, счётчика Гейгера, о котором более подробно будет рассказано в § 64) можно регистрировать частицы. Другие же приборы и устройства позволяют наблюдать и фотографировать *треки* (следы) заряженных частиц.

Рассмотрим более подробно принцип действия и устройство *камеры Вильсона*, созданной в 1912 г.

Камера представляет собой цилиндрический сосуд с плоской стеклянной крышкой, в котором находится воздух с насыщенными парами спирта (на рис. 188 сосуд показан в разрезе). Внутри цилиндра может двигаться поршень. При быстром расширении смесь воздуха и паров спирта охлаждается и переходит в состояние пересыщения. Если в этот момент в камеру через тонкое окошко попадает заряженная частица, то на пути её движения возникает цепочка в виде капель, образующихся из сконденси-



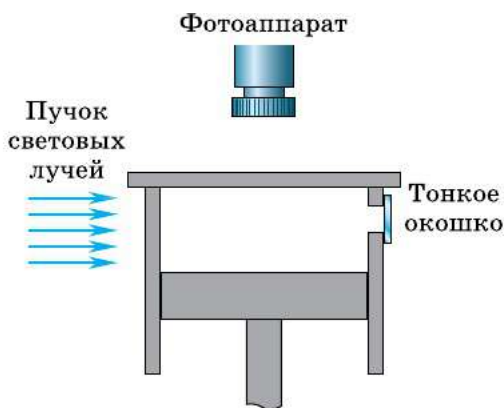


Рис. 188

ровавшейся смеси. Благодаря подобному следу траектория движения частицы становится видимой. Чтобы сфотографировать треки частиц в камере Вильсона, её освещают сбоку.

Если поместить камеру Вильсона в магнитное поле, то треки заряженных частиц искривляются. Радиус кривизны трека зависит от скорости движения частицы, её массы и заряда. Зная индукцию магнитного поля, исследователям удаётся определить характеристики попадающих в камеру частиц.

Вопросы для самопроверки

1. Как было обнаружено радиоактивное излучение?
2. Что называли радиоактивностью?
3. Опишите опыт Резерфорда по изучению явления радиоактивности.
4. Каков состав радиоактивного излучения? Что представляет собой α -излучение; β -излучение; γ -излучение?
5. Опишите устройство и принцип действия камеры Вильсона. Какие характеристики частиц можно определить с её помощью?

§ 55. Состав атомного ядра

- ✓ Каков состав радиоактивного излучения?
- ✓ Какие частицы входят в состав ядра атома?
- ✓ Какие химические элементы называют изотопами?

1. После открытия явления радиоактивности и определения состава радиоактивного излучения становится очевидным сложный состав ядра атома.



В 1919 г. Резерфорд провёл опыт по облучению α -частицами ядер атома азота, а затем и других элементов. В результате опыта происходило расщепление атомных ядер, которое сопровождалось вылетом ядер водорода. Резерфорд пришёл к выводу о том, что эти частицы, названные впоследствии **протонами**, входят в состав ядра. Протон обозначают буквой p .

Однако открытие протона ещё не давало ответа на вопрос о строении ядра атома. Предположение о том, что все ядра состоят только из протонов, никак не могло быть принято учёными. Протон имеет положительный заряд, равный заряду электрона, масса протона $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг, т. е. примерно в 1836 раз больше массы электрона. Если исходить из того, что масса ядра любого химического элемента должна была быть равна Zm_p , где Z — порядковый номер элемента в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева, то полученное значение окажется гораздо меньше тех величин, которые были экспериментально получены учёными.

2. В 1932 г. английский учёный **Джеймс Чедвик** (1891—1974), один из учеников Резерфорда, экспериментально доказал, что существует ещё одна частица, входящая в состав любого атомного ядра. В опытах Чедвика при облучении бериллия α -частицами возникало излучение, которое не отклонялось ни электрическим, ни магнитным полем. Следовательно, оно электрически нейтрально. Частицы, из которых состояло бериллиевое излучение, были названы **нейтронами**. Нейтрон обозначается буквой n . Масса нейтрона $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг примерно равна массе протона.

3. Вскоре после открытия нейтрона в 1932 г. русский физик **Дмитрий Дмитриевич Иваненко** (1904—1994) и немецкий физик **Вернер Гейзенберг** (1901—1976) предложили **протонно-нейтронную модель ядра**, согласно которой ядро любого химического элемента состоит из протонов и нейтронов. Эти частицы связаны между собой особыми ядерными силами, которые очень велики, но действуют только на малых расстояниях. (Вспомните, что размер ядра порядка 10^{-14} — 10^{-15} м.) Кроме того, характер взаимодействия этих сил не зависит от заряда взаимодействующих частиц. Протоны и нейтроны получили общее название — **нуклоны**.

Протонно-нейтронная модель ядра была впоследствии полностью подтверждена экспериментально.



4. Вследствие электрической нейтральности атома в нормальном состоянии число протонов в ядре и их суммарный заряд равны числу электронов, движущихся вокруг ядра, и их общему заряду. Следовательно, число протонов в ядре равно порядковому номеру элемента в таблице Д. И. Менделеева и называется **зарядовым числом Z** . Число же нейтронов N равно разности между атомной массой элемента и числом протонов.

Суммарное число протонов и нейтронов, или общее число нуклонов в ядре, называют **массовым числом A** :

$$A = Z + N.$$

Для обозначения ядра любого химического элемента перед его символом сверху указывается значение массового числа A , а снизу — зарядового числа Z . Так, например, для гелия (массовое число $A = 4$, зарядовое число $Z = 2$) можно записать: ${}^4_2\text{He}$.

Запись ${}^{14}_7\text{N}$ означает, что в ядре атома азота находятся 7 протонов (поскольку зарядовое число $Z = 7$) и 7 нейтронов (поскольку массовое число $A = 14$, а $N = A - Z$).

5. Одни и те же химические элементы при одинаковом числе протонов могут иметь в ядре разное число нейтронов. Так, ядро водорода ${}^1_1\text{H}$ в обычном состоянии содержит только один протон. Однако в природе существует ещё тяжёлый водород — дейтерий ${}^2_1\text{H}$, в состав ядра которого входят протон и нейтрон, и тритий ${}^3_1\text{H}$, содержащий протон и два нейтрона.

Элементы, имеющие одинаковое зарядовое число и разные массовые числа, называют изотопами.



Изотопы располагаются в одной и той же клетке Периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева и имеют одинаковое строение электронных оболочек. Поскольку химические свойства атомов зависят только от числа электронов, а следовательно, от заряда ядра, то все изотопы какого-либо атома, отличающиеся друг от друга числом нейтронов в ядре, обладают одинаковыми химическими свойствами.

Разное число нейтронов в ядрах изотопов приводит к проявлению у них различных физических свойств, поскольку массы их ядер различны. Например, тяжёлая вода — соединение дейтерия с кислородом — заметно отличается от обычной воды. При нормальном атмосферном давлении она закипает при температуре $101,2^\circ\text{C}$ и замерзает при $3,8^\circ\text{C}$.

Стабильных изотопов, существующих в природе, известно около 350. Нестабильных же, т. е. претерпевающих радиоактивный распад частиц, немного. Искусственных радиоактивных изотопов, полученных в ускорителях и реакторах, известно более 1000. В принципе радиоактивные изотопы могут быть получены у всех без исключения элементов.

Вопросы для самопроверки

1. Какая частица названа протоном? Каков заряд протона?
2. Каков заряд нейтрона?
3. Что собой представляет протонно-нейтронная модель ядра? Кем она была предложена?
4. Какое общее название дано протонам и нейтронам?
5. Что называют массовым числом; зарядовым числом?
6. Что такое изотопы?



Задание 44

1. Сколько протонов и сколько нейтронов содержат ядра следующих атомов: ${}^9_4\text{Be}$; ${}^{32}_{16}\text{S}$; ${}^{207}_{82}\text{Pb}$?
2. Определите, используя таблицу Д. И. Менделеева, ядро какого химического элемента содержит 20 протонов и 20 нейтронов.
3. Атом какого химического элемента содержит 15 электронов?
4. Чем различаются составы ядер двух изотопов урана: ${}^{235}_{92}\text{U}$ и ${}^{238}_{92}\text{U}$?
- 5*. Как вы думаете, почему атомные массы большинства химических элементов, приведённых в таблице Д. И. Менделеева, не целые числа?

§ 56. Радиоактивные превращения

- ✓ Что собой представляет альфа-излучение; бета-излучение; гамма-излучение?

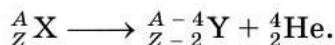
1. При исследовании природы и механизма радиоактивного излучения было установлено, что радиоактивные вещества в результате излучения претерпевают изменения. После того как было установлено, что в центре атома расположено ядро, стало понятно, что именно оно претерпевает изменения при радиоактивных превращениях. В самом деле, ведь α -частицы — это положительные частицы (${}^4_2\text{He}$), и их нет в электронной оболочке атома. При β -излучении испускаются электроны (${}^0_{-1}e$), но умень-

шение числа электронов в атоме превращает его в ион того же элемента, но не в новый химический элемент.

Радиоактивное превращение одних ядер в другие называют **радиоактивным распадом**.

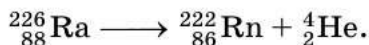
2. Существует два вида радиоактивных распадов: *альфа-распад* и *бета-распад*.

При **альфа-распаде** радиоактивное ядро X превращается в новое ядро Y , испуская при этом α -частицу. Уравнение альфа-распада выглядит следующим образом:

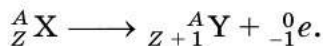


В результате альфа-распада элемент смещается на две клетки к началу таблицы Д. И. Менделеева.

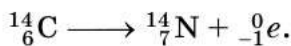
Например, при альфа-распаде радия, одного из наиболее широко используемых на практике источников α -частиц, ядро атома радия превращается в ядро атома радона:



При **бета-распаде** из ядра X вылетает электрон ${}_{-1}^0e$. Заряд нового ядра Y при этом увеличивается на единицу, а массовое число остаётся неизменным. Уравнение бета-распада записывается так:



Примером бета-распада может быть превращение изотопа углерода в ядро атома азота:



В результате бета-распада элемент смещается на одну клетку к концу таблицы Д. И. Менделеева.

Гамма-излучение, часто сопровождающее альфа- и бета-распад, не приводит к изменению массового числа и заряда радиоактивного элемента.

3. Радиоактивное излучение не является процессом бесконечным. Число радиоактивных атомов со временем уменьшается, и, следовательно, уменьшается интенсивность процесса радиоактивного распада. Для каждого вещества активность этого процесса разная. Так, активность радона уменьшается в 2 раза через минуту, а для урана это время измеряется миллиардами лет. Характеристикой интенсивности радиоактивного распада принято считать **период полураспада**.

Периодом полураспада T называют промежуток времени, в течение которого распадается половина первоначального числа атомов радиоактивного вещества.

Например, если в начальный момент времени вещество содержало 1000 радиоактивных атомов (рис. 189), то по истечении периода полураспада их должно остаться вдвое меньше — 500. В данном случае это время равно 5 мин. Через следующие 5 мин число нераспавшихся атомов станет ещё в 2 раза меньше — 250, и т. д.

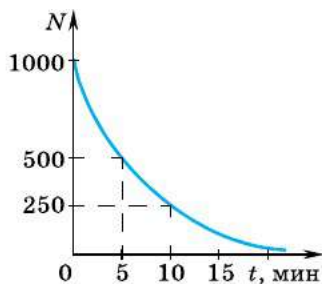


Рис. 189

Невозможно предсказать, когда произойдёт радиоактивное превращение каждого отдельного атома вещества. Оно может произойти в следующее мгновение, а может и через 10 мин, и через сутки, и через 1000 лет. Таким образом, поведение каждого отдельного атома совершенно случайно, оно носит, как говорят, вероятностный, статистический характер. Бессмысленно поэтому говорить о времени жизни одного какого-либо атома. Когда используется это понятие, то имеется в виду его значение, измеренное для очень большого числа атомов данного вещества.

4*. Радиоактивный распад — это пример процесса, который не может быть описан с помощью законов классической механики. *Закон радиоактивного распада* характеризует не отдельные атомы, а всю совокупность атомов, он является статистическим законом. Этот закон позволяет определить число нераспавшихся атомов в любой момент времени.

Пусть число радиоактивных атомов в начальный момент времени равно N_0 . Через промежуток времени, равный периоду полураспада, это число будет равно $\frac{N_0}{2}$. Ещё через такое же время число нераспавшихся атомов станет равным половине от оставшихся, т. е.

$$\frac{1}{2} \frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2}.$$

Через n периодов полураспада, т. е. по истечении времени $t = nT$, радиоактивных атомов останется:

$$N = N_0 \frac{1}{2^n} = N_0 \frac{1}{2^{t/T}}.$$

Полученное выражение и есть **закон радиоактивного распада**. Чем больше период полураспада T , тем медленнее происходит распад, тем дольше «живёт» радиоактивное вещество.

Вопросы для самопроверки

1. Что называют радиоактивным распадом?
2. Что происходит с ядром радиоактивного вещества при α -распаде? Приведите пример.
3. Что происходит с ядром радиоактивного вещества при β -распаде? Приведите пример.
4. Что называют периодом полураспада?
5. Можно ли предсказать и описать поведение каждого отдельного атома? Почему?
- 6*. Объясните смысл закона радиоактивного распада. В чём состоит принципиальное отличие закона радиоактивного распада от законов классической механики?

Задание 45

1. Запишите реакцию α -распада изотопа полония ${}_{84}^{210}\text{Po}$. Какой химический элемент образуется в результате этой реакции?
2. Ядро какого элемента образовалось из ядра изотопа кобальта ${}_{27}^{60}\text{Co}$ после испускания β -частицы?
3. Ядро урана ${}_{92}^{233}\text{U}$ превращается в результате радиоактивного распада в ядро висмута ${}_{83}^{209}\text{Bi}$. Сколько α - и β -частиц испускается при подобном распаде?
4. Определите массовое и зарядовое числа изотопа, который получится из ядра атома тория ${}_{90}^{232}\text{Th}$ после трёх α - и двух β -распадов.
5. Период полураспада радона 3,8 дня. Через сколько дней масса радона уменьшится в 4 раза?
6. Какая часть первоначального числа атомов радиоактивного вещества останется нераспавшейся через 4 дня, если известно, что период полураспада этого элемента 2 дня?



§ 57. Ядерные силы

✓ Какие виды взаимодействий вам известны?

1. Вы уже знаете, что ядро атома состоит из положительно заряженных протонов и электрически нейтральных частиц — нейтронов.

Известно также, что заряженные тела взаимодействуют друг с другом. Поскольку протоны одноимённо заряжены, они взаим-

но отталкиваются. Между нуклонами, так же как и между всеми телами, действуют гравитационные силы притяжения. Однако гравитационное взаимодействие между двумя нуклонами ничтожно мало, поскольку очень малы их массы. Достаточно простые расчёты показывают, что электрические силы взаимодействия между протонами в 10^{36} раз больше гравитационных.

Следовательно, поскольку подавляющее число ядер атомов достаточно устойчиво и не «разрываются» электрическими силами отталкивания, частицы в ядре должны быть связаны между собой особыми силами притяжения, которые называют **ядерными силами**.

2. Одно из принципиальных отличий ядерных сил от всех других известных в природе сил заключается в их *короткодействии*. Ядерные силы проявляют себя только на расстояниях, сравнимых с размерами нуклона, — 10^{-15} м. На таком расстоянии они примерно в 100 раз больше сил электрического взаимодействия, но уже на расстоянии 10^{-14} м оказываются ничтожно малыми.

Ядерные силы очень велики. Они сжимают ядерное вещество до плотности в сотни миллионов тонн на 1 см^3 . В природе пока известен только один макроскопический объект, плотность вещества которого имеет такой же порядок, — это нейтронные звёзды.

3. Нуклоны в ядре прочно удерживаются ядерными силами. Чтобы вырвать нуклон из ядра, требуется очень большая энергия. Эта энергия необходима для совершения определённой работы против ядерных сил, удерживающих протоны и нейтроны в ядре.

Энергию, которая требуется для полного расщепления ядра атома на отдельные нуклоны, называют энергией связи ядра.

На основании закона сохранения энергии верным является и обратное утверждение:

энергия связи ядра атома равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц.

Для ядра каждого химического элемента, в соответствии с его индивидуальным составом — числом протонов и нейтронов, характерна своя собственная энергия связи.

О том, насколько велика энергия связи, позволяет судить следующий факт: образование 4 г гелия из водорода сопровожда-



ется выделением такой же энергии, как и при сжигании двух вагонов угля.

4. Было установлено, что наименее устойчивыми являются лёгкие ядра и ядра тяжёлых элементов. Именно эта особенность строения ядер и характерных для них ядерных сил была положена в основу использования ядерной энергии в процессе деления тяжёлых ядер и синтеза лёгких.

Так, при расщеплении тяжёлых ядер, например урана, образуются ядра более лёгких элементов, у которых энергия связи больше (это элементы из центральной части Периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева). В этом процессе выделяется энергия, равная разности энергий связи вновь образовавшихся элементов и распавшегося ядра.

При соединении (синтезе) двух лёгких ядер может образоваться новое более тяжёлое ядро, энергия связи которого существенно больше. При таком ядерном процессе также выделяется значительная энергия, равная разности энергии связи нового ядра и двух лёгких ядер.

Вопросы для самопроверки

1. Какие силы действуют между нуклонами в ядре?
2. Чем отличаются ядерные силы от других сил?
3. Что называют энергией связи? Почему каждому химическому элементу соответствует своя энергия связи?
4. При каких ядерных процессах выделяется энергия? Почему?

§ 58. Ядерные реакции

- ✓ Что называют радиоактивным распадом?
- ✓ Какие виды радиоактивных распадов вам известны?

1. Превращение одних ядер в другие происходит не только при радиоактивном распаде. Изменение состава ядра атома возможно и в случаях взаимодействия ядер друг с другом или с элементарными частицами.

Превращение исходного атомного ядра при взаимодействии с какой-либо частицей в другое ядро, отличное от исходного, называют ядерной реакцией.



Первая ядерная реакция была проведена Резерфордом в 1919 г. Это было расщепление ядра азота быстрой α -частицей:

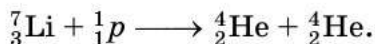


В результате ядерной реакции, сопровождавшейся выбросом протона, образовался изотоп кислорода.

2. При ядерных реакциях взаимодействующие частицы должны вплотную приблизиться друг к другу. Как уже говорилось, на очень близких расстояниях начинают действовать ядерные силы, поэтому для ядерной реакции необходимо сообщить взаимодействующим частицам или ядрам большую кинетическую энергию.

Для осуществления ядерных реакций чаще всего используют *ускорители элементарных частиц*, т. е. специальные технические устройства, позволяющие сообщать частицам (протонам, α -частицам, ядрам дейтерия и др.) большую кинетическую энергию. Эта энергия в десятки тысяч раз больше энергии α -частиц, появляющихся при радиоактивном распаде.

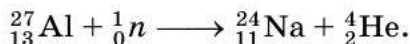
3. Ядерную реакцию на быстрых (ускоренных) протонах впервые удалось осуществить в 1932 г. Это было расщепление лития на две α -частицы:



В данной реакции кинетическая энергия двух образовавшихся ядер гелия оказалась больше кинетической энергии протона. Это означает, что часть ядерной энергии лития превратилась в кинетическую энергию разлетающихся частиц.

Особую роль в исследовании ядерных реакций сыграло открытие нейтрона. Поскольку нейтроны электрически нейтральны, они беспрепятственно проникают в ядра атомов и вызывают их превращения.

Примером подобного рода ядерной реакции может быть реакция, происходящая при бомбардировке нейтронами ядер алюминия:



4. Для всех ядерных реакций обязательно выполнение *законов сохранения зарядового и массового чисел*.





Можно вернуться к любой из рассмотренных реакций и убедиться в выполнении этих законов. Так, в последней реакции зарядовое число нейтрона — 0, зарядовое число алюминия — 13, следовательно, до начала реакции сумма зарядовых чисел равна 13. В результате реакции зарядовое число останется равным 13, т. е. сумме зарядовых чисел натрия и гелия ($11 + 2 = 13$). Сумма массовых чисел нейтрона и алюминия ($1 + 27 = 28$) до реакции равна сумме массовых чисел натрия и гелия ($24 + 4 = 28$) после реакции.

Закон сохранения зарядового числа является частным случаем общего закона сохранения электрического заряда, с которым вы уже познакомились при изучении электрических явлений. Закон сохранения массового числа есть проявление общего закона сохранения массы, хорошо известного вам из курса химии.

Законы сохранения позволяют предсказать возможные варианты ядерных превращений.

Вопросы для самопроверки

1. Что называют ядерной реакцией?
2. В чём состоит отличие ядерных реакций от радиоактивного распада?
3. С какой целью используются ускорители элементарных частиц при осуществлении ядерных реакций?
4. Почему нейтроны могут вызвать ядерные реакции независимо от энергии частицы, а протоны и α -частицы — только обладая большой кинетической энергией?
5. Какие законы сохранения выполняются в ядерных реакциях?

Задание 46

1. Определите зарядовое и массовое числа образовавшегося в результате ядерной реакции изотопа кремния:



2. Определите неизвестные продукты ядерных реакций:



3. Допишите в уравнениях реакций недостающие обозначения элементов:



§ 59*. Дефект массы.

Энергетический выход ядерных реакций

✓ Вспомните законы сохранения зарядового и массового чисел.

1. Экспериментальные исследования позволяют проводить точные измерения масс атомных ядер. Благодаря этим измерениям удалось установить, что *масса ядра всегда меньше суммы масс составляющих его протонов и нейтронов*:

$$M_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n.$$

Разность между массой нуклонов и массой ядра называют **дефектом массы**. Дефект массы Δm для любого ядра можно вычислить, если из суммы масс протонов и нейтронов вычесть массу ядра:

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - M_{\text{я}}.$$

2. Вычислим, например, дефект массы ядра гелия ${}^4_2\text{He}$, т. е. ядра, состоящего из двух протонов и двух нейтронов.

Масса протона $m_p = 1,0073$ а. е. м.¹, масса нейтрона $m_n = 1,0087$ а. е. м., масса ядра гелия $M_{\text{я}} = 4,0026$ а. е. м. Дефект массы составляет:

$$\Delta m = (2 \cdot 1,0073 + 2 \cdot 1,0087) - 4,0026 = 0,0294 \text{ (а. е. м.)}.$$

3. Зная дефект массы, можно определить энергию связи ядра. Для этого необходимо воспользоваться *законом взаимосвязи массы и энергии*, открытым А. Эйнштейном в 1905 г. В соответствии с этим законом энергия тела прямо пропорциональна его массе:

$$E = mc^2,$$

где c — скорость света в вакууме.

Следовательно, изменение массы тела Δm пропорционально изменению его энергии ΔE .

В приведённом выше примере энергия ядра гелия меньше энергии системы, состоящей из двух протонов и двух нейтронов: $\Delta E = \Delta mc^2$. Подставив в это выражение значение дефекта массы Δm , можно получить значение изменения энергии

$$\Delta E = 4,394 \cdot 10^{-12} \text{ Дж.}$$

¹ В качестве единицы массы в ядерной физике используется атомная единица массы — а. е. м. $1 \text{ а. е. м.} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$

Именно эта энергия должна выделяться при образовании ядра гелия из двух протонов и двух нейтронов. Следовательно, *энергия связи ядра равна*

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2.$$

4. Используя закон взаимосвязи массы и энергии, можно найти изменение энергии системы частиц. Для этого необходимо разность масс частиц, вступающих в ядерную реакцию, и масс частиц, полученных в результате этой реакции, умножить на квадрат скорости света.

Любая ядерная реакция происходит либо с выделением энергии, либо с её поглощением. Если сумма масс исходного ядра и частиц, вступающих в реакцию, больше суммы масс вновь образовавшегося ядра и испускаемых частиц, то энергия выделяется. Если же разность масс отрицательна, то должно происходить поглощение энергии.

Энергию, которая выделяется при ядерной реакции, называют **энергетическим выходом ядерной реакции**. Разработка способов получения и технического использования энергии ядерных реакций является одной из актуальнейших проблем современности.

Вопросы для самопроверки

1. Что называют дефектом массы?
2. Как можно рассчитать дефект массы?
3. Что называют энергетическим выходом ядерной реакции?
4. Какой закон используется для расчёта энергии связи ядра или энергетического выхода ядерной реакции?
5. В каком случае происходит выделение, а в каком — поглощение энергии при ядерной реакции?

§ 60. Деление ядер урана. Цепная реакция

✓ Что называют ядерной реакцией?

1. Вы уже знаете, что тяжёлые ядра могут в определённых условиях распадаться на ядра меньшей массы.

Процесс распада массивного ядра на две приблизительно равные части, сопровождающийся вылетом других частиц, называют **делением ядер**.



нии в него нейтрона можно только у изотопов с массовым числом 235. Ядро урана $^{238}_{92}\text{U}$ поглощает нейтрон, а деления не происходит.

5. Очень важной особенностью урана-235 (как и некоторых других тяжёлых элементов) является тот факт, что эти ядра с наибольшей вероятностью делятся под действием медленных нейтронов, т. е. нейтронов с очень маленькой кинетической энергией. При делении же ядер образуются быстрые нейтроны. Если быстрые нейтроны замедлить, то цепная ядерная реакция продолжится. Графит, обычная и тяжёлая вода могут замедлить быстрые нейтроны, практически не поглощая их. Подобные вещества называют *замедлителями нейтронов*.

6. Обязательным условием осуществления цепной реакции является то, что масса урана должна быть определённой. Если масса урана невелика, то нейтроны могут пролететь через урановый образец, не попав ни в одно из ядер.

Минимальную массу урана, необходимую для осуществления цепной ядерной реакции, называют критической массой.

Для урана-235 критическая масса равна примерно 50 кг. Зная плотность урана, можно определить примерный размер образца, в котором начнётся цепная реакция: это шар радиусом 9 см.

Превышение критической массы означает увеличение числа нейтронов, что в итоге приводит к возникновению неуправляемой цепной реакции, или, проще говоря, к ядерному взрыву. На этом основан принцип действия ядерной бомбы.

7. Управляемая цепная реакция деления ядер осуществляется в специальных технических устройствах, которые называют *ядерными реакторами*.

На фотографии (рис. III на форзаце) показана центральная часть (активная зона) ядерного реактора. Среди стержней есть замедлители, управляющие стержни и стержни, в которых размещают ядерное горючее.

Вопросы для самопроверки

1. Какой процесс называют делением ядер?
2. Каков механизм деления ядер урана $^{235}_{92}\text{U}$?
3. Что такое цепная ядерная реакция? Чем она отличается от обычной ядерной реакции?

4. С какой целью используют замедлители нейтронов?
5. Что называют критической массой? Почему цепная реакция не произойдёт, если масса урана меньше критической?
6. В чём состоит принципиальное отличие управляемых ядерных реакций от неуправляемых?

§ 61. Ядерный реактор. Ядерная энергетика

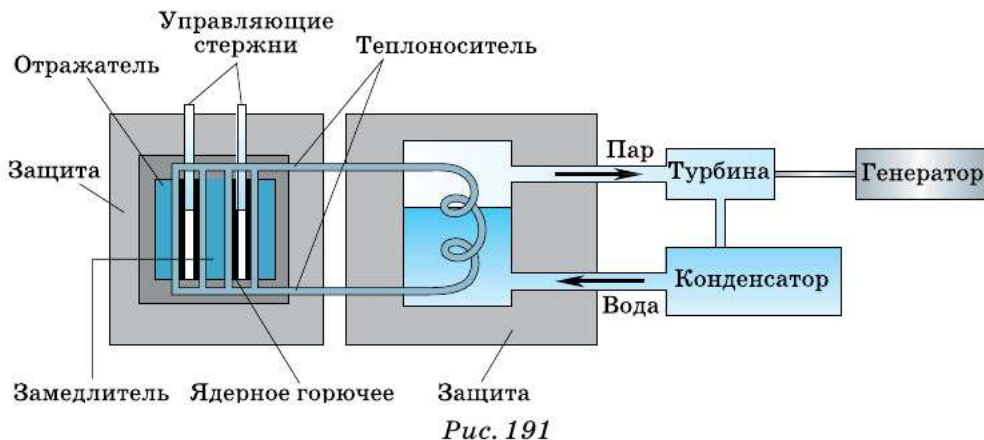
- ✓ Какую реакцию называют цепной ядерной реакцией?
- ✓ В каких условиях возможна управляемая ядерная реакция?

1. Впервые управляемая цепная реакция деления ядер урана была осуществлена в 1942 г. в США под руководством итальянского физика **Энрико Ферми** (1901—1954). В 1946 г. ядерный реактор был запущен и в нашей стране. Руководил работой выдающийся российский учёный **Игорь Васильевич Курчатов** (1903—1960).

Схема энергетической установки с ядерным реактором изображена на рисунке 191.

Основной частью ядерного реактора является *активная зона*. В ней находятся урановые стержни — *ядерное горючее* и *замедлитель нейтронов* для регулирования скорости протекания реакции.

Энергия, выделяющаяся в ходе ядерной реакции, отводится *теплоносителем*. В зависимости от конструкции ядерного реактора в качестве теплоносителя может использоваться обыкновенная вода или какой-либо жидкий металл.



Для уменьшения утечки нейтронов активную зону реактора окружают *отражателем* нейтронов, который возвращает их в активную зону. За отражателем располагается *защитная оболочка* из металла и бетона, предохраняющая окружающую среду от радиации.

Управление цепной ядерной реакцией осуществляется с помощью *управляющих стержней*, вводимых в активную зону реактора. Их изготавливают из веществ, которые хорошо поглощают нейтроны. Высота погружения стержней в активную зону может регулироваться.

Перед началом работы реактора стержни полностью вводят в его активную зону. При этом поглощается значительная часть нейтронов, и цепная реакция не происходит. Для запуска реактора управляющие стержни постепенно выводятся из активной зоны. С помощью специальной автоматики они удерживаются в таком положении, чтобы число нейтронов сохранялось постоянным и происходила цепная реакция деления ядер урана. В аварийной ситуации стержни быстро погружаются в активную зону, число нейтронов резко уменьшается и цепная реакция прекращается.

2. Ядерные реакторы по своему назначению, виду ядерного горючего, при котором могут использоваться не только медленные, но и быстрые нейтроны, делятся на несколько групп. Особая роль принадлежит реакторам, в которых энергия, выделяющаяся при делении ядер, преобразуется в электрическую энергию. Это происходит на *атомных электростанциях*.

Теплоноситель, циркулирующий в активной зоне, нагревает воду и превращает её в пар. Пар вращает турбину, которая приводит во вращение ротор генератора электрического тока. Отработанный пар в конденсаторе охлаждается и превращается в воду. Затем вода возвращается в активную зону, и процесс повторяется.

3. Несмотря на опасности, связанные с радиоактивным излучением, а также принципиальной возможностью взрыва, ядерная энергетика развивается во всём мире и является одним из самых перспективных на сегодняшний день направлений энергетики. Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых, запасы угля, нефти и природного газа — невозполняемых источников энергии, используемых на тепловых электростанциях, стремительно сокращаются. Почти исчерпали себя и возмож-

ности дальнейшего развития гидроэнергетики. Получение энергии из возобновляемых источников энергии за счёт энергии Мирового океана, солнечной энергии до сих пор остаётся проблемой будущего.

Во-вторых, атомные электростанции с экологической точки зрения более безопасны. Они не загрязняют атмосферу дымом и пылью, как тепловые электростанции, не нарушают природное равновесие, что неотвратно при строительстве гидроэлектростанций.

4. Однако использование ядерной энергии в мирных целях также создаёт серьёзные проблемы. Одна из них связана с необходимостью защиты людей и окружающей среды от возможного воздействия нейтронов и γ -излучения. Аварии на Чернобыльской АЭС и ряде других зарубежных электростанций привели к гибели людей и радиоактивному загрязнению огромных территорий, которые будут непригодны для жизни ещё многие годы.

Серьёзной проблемой, во многом ещё не решённой, является необходимость захоронения радиоактивных отходов, образующихся в результате работы ядерных реакторов. Отработавшее ядерное горючее всё ещё остаётся радиоактивным, и необходимо найти способ его безопасного хранения.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое активная зона реактора?
2. Из каких основных частей состоит ядерный реактор?
3. Как осуществляется управление ядерной реакцией в реакторе?
4. Из каких веществ изготавливают управляющие стержни? Почему?
5. Каковы преимущества атомных электростанций перед тепловыми электростанциями и гидроэлектростанциями?
6. Какие проблемы возникают при использовании ядерной энергии в мирных целях?

§ 62*. Термоядерные реакции

✓ Какие ядерные процессы происходят с выделением энергии?

1. Как вы уже знаете, энергия выделяется как при делении тяжёлых ядер, так и в процессе синтеза лёгких.

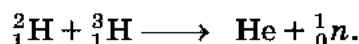
Для осуществления реакции синтеза двух лёгких ядер необходимо их сблизить на расстояние порядка 10^{-14} — 10^{-15} м. Как



вы помните, электрические силы отталкивания препятствуют сближению ядер, и для преодоления их необходимо, чтобы ядра обладали большой кинетической энергией. Для сообщения ядрам большой кинетической энергии реакция синтеза должна проходить при очень высокой температуре, поскольку с ростом температуры увеличивается скорость частиц и их кинетическая энергия.

Реакции слияния лёгких ядер, происходящие при очень высоких температурах, называют термоядерными.

2. Возможность использования термоядерных реакций открывает перед человечеством новый путь получения энергии. Одной из самых перспективных в этом отношении является реакция синтеза дейтерия и трития, в результате которой образуется гелий и вылетает свободный нейтрон:



Выделяющаяся при синтезе 1 г гелия из дейтерия и трития энергия равна $4,2 \cdot 10^{11}$ Дж. Такая же энергия может выделяться, например, при сжигании 10 т дизельного топлива.

Энергия, выделяющаяся в термоядерных реакциях, намного превышает энергию цепных ядерных реакций.

3. Однако практическое осуществление термоядерной реакции связано со множеством трудностей, преодолеть которые до сих пор не удаётся.

Прежде всего, как показывают теоретические расчёты, температура, при которой начинается реакция синтеза, должна быть примерно 100 млн градусов Цельсия. При такой температуре атомы полностью ионизируются и превращаются в *плазму*, т. е. такое состояние вещества, которое содержит ядра и свободные электроны. Подобное состояние характерно для вещества Солнца и других звёзд; они представляют собой природные термоядерные реакторы.

И в земных условиях, как показывают современные исследования, такие температуры могут быть достигнуты, если создать в плазме мощные электрические разряды. Но при этом возникает другая трудность: для того чтобы возникла термоядерная реакция, необходимо удерживать высокотемпературную плазму на протяжении 0,1—1 с.

Очевидно, что никакой сосуд не сможет удержать плазму; любое вещество мгновенно превратится в пар. Российские учё-

ные **Андрей Дмитриевич Сахаров** (1921—1989) и **Игорь Евгеньевич Тамм** (1895—1971) предложили метод удержания плазмы, заключающийся в «подвешивании» плазмы в сильном магнитном поле. Использование этого метода позволило сконструировать экспериментальные установки, которые постоянно совершенствуются.

4. Термоядерная реакция, как и цепная ядерная реакция, может быть *управляемой* и *неуправляемой*.

На сегодняшний день удалось осуществить лишь неуправляемую термоядерную реакцию. Она происходит при взрыве водородной бомбы.

Управляемая термоядерная реакция требует технического решения целого ряда проблем. Однако создание термоядерного реактора, как считают учёные, может быть осуществлено уже в ближайшие годы.

Вопросы для самопроверки

1. Какие реакции называют термоядерными?
2. Почему реакция синтеза лёгких ядер происходит только при очень высоких температурах?
3. Какие трудности возникают при реакциях ядерного синтеза?
4. В чём отличие управляемой термоядерной реакции от неуправляемой?

§ 63. Действия радиоактивных излучений и их применение

✓ Каков состав радиоактивного излучения?

1. Ядерные излучения оказывают очень сильное воздействие на все живые организмы. Характер этого действия зависит от вида излучения и от его интенсивности. Даже сравнительно слабое излучение нарушает жизнедеятельность клеток, вызывая лучевую болезнь. При воздействии ядерных излучений на живые организмы происходит ионизация атомов и молекул в клетках, что нарушает способность клеток к делению.

2. Радиоактивное излучение имеет сложный состав. Это гамма- и рентгеновское излучение, электроны, протоны, α -частицы, а также ионы тяжёлых элементов.

α -Частицы практически не способны проникнуть через наружный слой кожи человека. Их задерживает даже лист бумаги.



В то же время α -частицы, попавшие внутрь организма через открытую рану или с пищей и воздухом, чрезвычайно опасны для человека.

β -Частицы обладают большей проникающей способностью. Они могут проникнуть в ткани живого организма на несколько сантиметров и вызвать определённые изменения клеток.

Наибольшей проникающей способностью обладают γ -излучение и нейтроны. Поэтому при внешнем облучении они представляют для человека наибольшую опасность.

3. Мерой воздействия радиоактивного излучения является поглощённая доза излучения.

Отношение энергии, поглощённой облучаемым телом, к его массе называют поглощённой дозой излучения.

$$D = \frac{E}{m}.$$

Единица поглощённой дозы в СИ — *грей* (**1 Гр**):

$$[D] = \frac{[E]}{[m]} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 1 \text{ Гр}.$$

За единицу поглощённой дозы принимают дозу поглощённого излучения, при которой веществу массой 1 кг передаётся энергия излучения 1 Дж.

Естественный фон радиации (космические лучи, радиоактивность земной коры и окружающей среды в целом) составляет дозу излучения около 0,002 Гр за год на человека. По современным представлениям, без участия естественного радиационного фона, вероятно, не было бы и жизни на Земле в её настоящем виде. Обязательным условием эволюции является изменчивость как следствие мутации генов. Одним из факторов, вызывающих мутации, является естественный фон ионизирующей радиации.

Доза излучения 3—10 Гр смертельна, если получена за короткое время. Многолетняя практика работы с источниками радиоактивных излучений позволила установить предельно допустимую для человека дозу за 1 год — 0,05 Гр. При одноразовом рентгеновском обследовании доза облучения человека в несколько раз меньше допустимой дозы.

4. Для получения информации о радиоактивном излучении используют различные устройства, основанные на разных

методах их регистрации. В практических целях чаще всего используется *счётчик Гейгера* — прибор для автоматического счёта частиц (в основном электронов).

Счётчик состоит из стеклянной трубки, покрытой изнутри металлическим слоем, и тонкой металлической нити, проходящей вдоль оси трубки (рис. 192). Между ними создаётся высокое напряжение, которое может действовать на заряженные частицы. Трубка заполняется при низком давлении неоном или аргоном. Заряженная частица, попадая в баллон с газом, отрывает от атомов электроны и создаёт положительные ионы и электроны. Сила тока, проходящего через счётчик, резко возрастает и фиксируется регистрирующим устройством.



Рис. 192

5. Общим правилом при работе с любым источником радиоактивного излучения является сведение к возможному минимуму уровня облучения человека. Самый простой способ защиты — это удаление людей на достаточно большое расстояние. Именно поэтому при малейшем подозрении на возможность выброса радиоактивного излучения всё население немедленно эвакуируется.

В тех случаях, когда удаление от источника невозможно, используют специальные поглощающие материалы для защиты от излучения. В зависимости от характера излучения это может быть свинец, бор, графит или другие вещества.

6. Радиоактивное излучение, точнее, радиоактивные изотопы, получаемые в результате ядерных реакций, широко используются как в научных исследованиях, так и в практической деятельности людей.

Наибольшее применение имеет *метод меченых атомов*. Метод основан на том, что свойства радиоактивных изотопов не отличаются от свойств нерадиоактивных изотопов тех же элементов. Поскольку обнаружить радиоактивные элементы можно по их излучению, они играют роль своеобразной «метки», с помощью которой можно проследить за поведением элемента при различных химических реакциях и превращениях веществ.

Метод меченых атомов широко используется в медицине и биологии. С его помощью удалось исследовать обмен веществ в живых организмах. В медицине радиоактивные изотопы по-

могут как при диагностике, так и при лечении ряда заболеваний.

Используются радиоактивные излучения в машиностроении, металлургии, сельском хозяйстве и т. д. Так, по степени поглощения излучений можно определить толщину металлических пластин, обнаружить наличие в них дефектов. Очень полезную информацию получают археологи, используя радиоактивный углерод. Определяя его процентное содержание в органических веществах, удаётся определить их возраст. Так, например, определялся возраст египетских мумий.

Вопросы для самопроверки

1. Каково биологическое действие радиоактивных излучений?
2. Как отличается друг от друга биологическое действие α -частиц, β -частиц и γ -излучения?
3. Что называют поглощённой дозой излучения?
4. Каков естественный фон радиации? Насколько он опасен для человека?
5. Каковы меры защиты от радиоактивного излучения?
6. Объясните устройство и принцип действия счётчика Гейгера.
7. В чём состоит метод меченых атомов? Приведите примеры использования этого метода.

§ 64*. Элементарные частицы

✓ Какие элементарные частицы вам известны?

1. Частицы, которые невозможно разделить на составные части, называют **элементарными**.

Ещё в XIX в. элементарными считались атомы. Их внутренняя структура — ядро и электроны — была обнаружена в опытах Э. Резерфорда в начале XX в. Вскоре стало известно, что и ядро состоит из отдельных частиц — протонов и нейтронов. Поэтому до 1932 г. считалось, что элементарными частицами являются *электрон, протон и нейтрон*. Отнесли к числу элементарных частиц и *фотон*.

Однако позже было обнаружено, что нейтрон, распадаясь, превращается в протон, электрон и ещё одну очень лёгкую электрически нейтральную частицу, названную *нейтрино* (в переводе с итальянского — «нейтрончик»). В 1935 г. Х. Юкава предсказал существование **мезонов**, которые вскоре были экспе-



риментально обнаружены. Началась эпоха открытия всё новых и новых элементарных частиц.

На сегодняшний день обнаружено около 400 различных элементарных частиц.

2. Теоретические исследования в области ядерной физики прогнозировали существование совершенно необычных частиц. Так, ещё в 1928 г. П. Дирак, один из основоположников квантовой физики, предсказал возможность существования «двойника» электрона, т. е. частицы со всеми характеристиками электрона, но имеющей положительный заряд. Эту частицу называли **позитроном**, и в 1932 г. она была экспериментально обнаружена в космическом излучении.

В дальнейшем было установлено, что у всех элементарных частиц есть античастицы. Были обнаружены **антипротон** и **антинейтрон** и другие античастицы.

Из античастиц могут возникать атомы. Например, в атоме «антиводорода» вокруг отрицательно заряженного антипротона вращается положительно заряженный позитрон. Физические и химические свойства «антиатомов» совершенно тождественны своим естественным двойникам.

Следует особо подчеркнуть, что античастицы и антиатомы — такие же реальные частицы, как и их двойники. В 1969 г. на одном из ускорителей под Москвой российские физики получили ядра атомов антигелия. Иначе говоря, возможность существования *антивещества* — это объективная реальность, познание которой ещё только начинается.

3. При столкновении частицы и античастицы они исчезают, или, как принято говорить, *аннигилируют*. Это также одна из гипотез П. Дирака, которую экспериментально подтвердил несколькими годами позже Ф. Жолио-Кюри.

Например, при столкновении электрона и позитрона обе частицы исчезают, а рождаются два γ -кванта (два фотона с частотой γ -излучения):

$$e^- + e^+ \longrightarrow 2\gamma.$$

В соответствии с законами сохранения частицы должны взаимопревращаться — как исчезать, так и рождаться парами.

4. Многочисленные элементарные частицы классифицируют по группам.

Частицы, взаимодействующие друг с другом посредством ядерных сил, называют **адронами**. Это протоны, нейтроны, ме-



зоны и другие частицы. Частицы, не взаимодействующие посредством ядерных сил, называют **лептонами**; среди них — электроны и нейтрино.

Продолжая исследования и пытаясь объяснить существование такого огромного числа элементарных частиц и особенностей их поведения, в 60—70-х гг. XX столетия учёные сначала выдвинули гипотезу, а потом и экспериментально её подтвердили, в соответствии с которой все адроны должны состоять из более элементарных частиц — **кварков**. Одной из особенностей кварков является их дробный заряд, равный $-\frac{1}{3}e$ и $+\frac{2}{3}e$.

Вопросы для самопроверки

1. Какие частицы называют элементарными?
2. Что такое античастицы?
3. Что такое антивещество?
4. Что происходит при столкновении частицы и античастицы?
5. Какие частицы называют адронами, а какие — лептонами?
6. Что является особенностью кварков?

Темы докладов

1. Возобновляемые источники энергии и их роль в развитии энергобюджета страны.
2. Использование радиоактивных излучений в научных исследованиях и на практике.
3. Основные направления развития ядерной энергетики.
4. Большой адронный коллайдер.

5 Основное в главе

1. Квантовые явления — принципиально новая группа явлений природы, которые не могут быть объяснены с позиций классической физики: фотоэффект*; явление радиоактивности; ядерные реакции.

2. Существуют разные виды спектров.



3. Во всех ядерных реакциях (табл. 22) выполняются законы сохранения зарядового и массового чисел.

Таблица 22

Название	Физический смысл	Пример
Радиоактивный распад	Превращение радиоактивного ядра в новое ядро, сопровождающееся:	
α-распад	испусканием α-частицы (ядра гелия)	$^{226}_{88}\text{Ra} \longrightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + ^4_2\text{He}$
β-распад	испусканием β-частицы (электрона)	$^{14}_6\text{C} \longrightarrow ^{14}_7\text{N} + ^0_{-1}e$
Ядерная реакция	Превращение исходного атомного ядра при взаимодействии с какой-либо частицей в другое ядро, отличное от исходного	$^{14}_7\text{N} + ^4_2\text{He} \longrightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1p$
Цепная реакция деления тяжёлых ядер	Процесс распада массивного ядра на две приблизительно равные части, сопровождающийся вылетом других частиц	$^{235}_{92}\text{U} + ^1_0n \rightarrow ^{144}_{56}\text{Ba} + ^{89}_{36}\text{Kr} + 3^1_0n$
Термоядерная реакция	Синтез лёгких ядер	$^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \longrightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0n$

4. Некоторые элементарные частицы и их характеристики (табл. 23).

Таблица 23

Название	Символ		Заряд ($q_e = 1$)	Масса ($m_e = 1$)	Стабильность
	Частица	Античастица			
Фотон	γ		0	0	Стабилен
Электрон	e^-	e^+	-1, +1	1	Стабилен
Протон	p	$\tilde{p}$	+1, -1	1836	Стабилен
Нейтрон	n	$\tilde{n}$	0	1839	Время жизни — 10^3 с
Нейтрино	ν	$\tilde{\nu}$	0	0	Стабильно



Вселенная

До настоящего времени вы изучали явления, которые происходят в микромире (в мире атомов и элементарных частиц), в макромире (в мире вокруг нас).

В этой главе вы познакомитесь с явлениями мегамира — явлениями, которые происходят в мире звёзд и планет. В курсе физики 7 класса вы узнали, что физика зародилась из астрономии — одной из древнейших наук о природе.

Астрономия изучает движение звёзд, планет, их спутников, а также явления, происходящие в атмосфере планет, в звёздах и других небесных телах.

В этой главе вы вновь обратитесь к астрономии, но уже для того, чтобы узнать о методах исследования небесных тел, используя известные вам физические законы, объяснить многие явления, происходящие с небесными объектами, которые веками представляли загадку для людей.

§ 65. Строение и масштабы Вселенной

✓ Какие небесные тела можно увидеть на небе невооружённым глазом?

1. В ясную безлунную ночь каждый из вас наблюдал небо, усеянное звёздами различной яркости. Ещё в глубокой древности наиболее яркие звёзды объединили в отдельные группы, называемые созвездиями. Многие из созвездий имеют определённую форму: крест — созвездие Лебедя, латинская буква W — Кассиопея. Некоторым созвездиям присвоили имена мифических

героев (например, Гераклес, Орион, Цефей) и животных (Телец, Гидра, Заяц).

Видимые на небе невооружённым глазом звёзды разделены по яркости на *звёздные величины*. Чем слабее звезда, тем больше её звёздная величина.

Наиболее яркие звёзды имеют собственные имена, в основном заимствованные из арабских источников. В каждом созвездии звёзды обозначают буквами греческого алфавита в порядке уменьшения их яркости. Так, летом и осенью высоко над головой вечером видно созвездие Лебеда (рис. 193), самая яркая звезда которого (α Лебеда) называется Денеб, что от арабского «аль джанаб аль даджаджах» означает «хвост курицы», так как в древности созвездие Лебеда во многих странах представляли в виде курицы. Звёздная величина звезды Денеб $1,25^m$. Самая яркая звезда Сириус (α Большого Пса) имеет отрицательную звёздную величину $-1,6^m$.

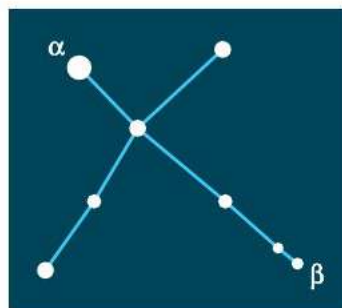


Рис. 193

2. Наряду со звёздами на небе можно наблюдать планеты, которые медленно перемещаются среди неподвижных звёзд («планетас» в переводе с греческого — «блуждающая» звезда). Условия наилучшей видимости планет и других астрономических объектов можно посмотреть в ежегоднике «Школьный астрономический календарь» или в Интернете. Солнце и Луна тоже совершают движение по небу.

Астрономы тщательно следили за перемещением Солнца, планет и Луны среди звёзд. Созвездия, через которые проходили эти небесные тела в течение года, получили названия **зодиакальных** (греческое слово «зодиак» имеет тот же корень, что и «зоопарк», и переводится на русский язык как «круг животных»), так как большинство из зодиакальных созвездий носят названия животных.

3. Самые крупные из существующих наземных и спутниковых телескопов проникают в космическое пространство до расстояний свыше десятка миллиардов световых лет. Это означает, что лучам света от самых далёких звёзд и звёздных систем требуется свыше десятка миллиардов световых лет, чтобы дойти до нас.



1 световой год (св. год) — путь, проходимый светом за год.

$$1 \text{ св. год} = cT_0 = 9,48 \cdot 10^{15} \text{ м},$$

где $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ — скорость света, $T_0 = 1 \text{ год} = 3,16 \cdot 10^7 \text{ с}$.

Внутри этой доступной наблюдениям части Вселенной имеется несколько десятков миллиардов галактик, похожих на наш Млечный Путь (Галактику) или на гигантскую спиральную галактику туманность Андромеды (М31) (рис. IV на форзаце). Каждая галактика содержит десятки и сотни миллиардов звёзд, похожих и не похожих на наше Солнце.

Несмотря на огромное количество звёзд в видимой Вселенной, главное её свойство — пустота.

В астрономии принято измерять расстояние до звёзд в *парсеках (пк)*.

$$1 \text{ пк} = 3 \cdot 10^{16} \text{ м}.$$

Астрономы измерили расстояния до многих звёзд. Так, расстояние до ближайшей к нам звезды Проксима (ближайшая из трёх звёзд в тройной звезде α Центавра) составляет 4,2 св. года = 1,33 пк.

Чтобы представить, каково расстояние между звёздами, предположим, что все звёзды Галактики, т. е. Млечного Пути, уменьшили до размеров капель, тогда взаимные расстояния между ними составят 50—100 км.

4. Наряду со звёздами и планетами во Вселенной имеются газ и пыль, которые в основном сосредоточены в галактиках. Масса газа и пыли в галактиках почти в 100 раз меньше, чем масса звёзд. Если разреженный газ, расположенный вблизи горячих звёзд, может наблюдаться в виде светящейся газовой туманности, то облака пыли наблюдаются в виде тёмных туманностей, которые поглощают свет далёких звёзд. Примером пылевой туманности может служить туманность Мексиканский Залив, которая расположена рядом с газовыми светящимися туманностями Северная Америка и Пеликан (рис. 194) в созвездии Лебедя.

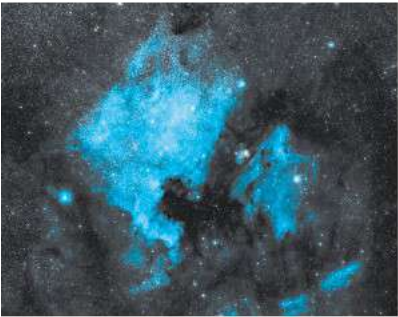


Рис. 194

Внутри галактик существуют группы звёзд, которые называют **звёздными скоплениями**. Различают два вида скоплений: *рассеянное* и *шаровое*. Примером рассеянных,

Таким образом, астрономия позволяет изучать физические процессы в таких условиях, которые в настоящее время не могут быть созданы в лабораториях на Земле.

6. Объектом исследования астрономии является вся Вселенная в целом. Всё, что мы наблюдаем в микро- и макром мире, является частью Вселенной, других вселенных нет. В отличие от звёзд, галактик, планет и других небесных тел нам не с чем сравнить Вселенную, мы не можем сравнить и проверить наши теоретические представления о ней с другими вселенными.

Астрономам удалось выявить ряд свойств Вселенной. Самые далёкие галактики, которые наблюдаются в самые крупные современные телескопы, расположены на расстояниях почти в миллиарды световых лет от нас. Подсчитав полную массу всех наблюдаемых небесных тел в этом объёме Вселенной, получили среднюю плотность вещества в ней $\rho \approx 3 \cdot 10^{-27}$ кг/м³. Следующий важный факт — расширение Вселенной, которое проявляется в наблюдаемом разбегании галактик, причём чем дальше находится галактика, тем с большей скоростью она удаляется от нас. Этот факт указывает на то, что Вселенная эволюционирует, её параметры меняются со временем. Экстраполируя назад наблюдаемое расширение, было определено время $t_{\text{Вс}} \approx 13,5$ млрд лет, когда это расширение началось. Это время считают возрастом Вселенной. Так как разбегание галактик и расширение Вселенной очень похоже на разлёт осколков во время взрыва, то теория, объясняющая расширение Вселенной, получила название *теории Большого взрыва*.

Согласно теории Большого взрыва, в прошлом Вселенная имела небольшие размеры, большую плотность и высокую температуру. На самых ранних этапах расширения плотность была настолько высокой, что вещество представляло собой смесь элементарных частиц, протонов, электронов, нейтрино, фотонов и др. В дальнейшем, по мере расширения, вещество остывало, плотность уменьшалась. В первые минуты жизни во Вселенной образовались атомы водорода и гелия, в дальнейшем, через сотни миллионов лет после начала расширения вещество охладилось настолько, что стали образовываться галактики и звёзды, а затем и планеты. Примерно через 8 млрд лет образовались Солнце и Солнечная система. В дальнейшем, около 3 млрд лет назад, возникла жизнь на Земле. Сейчас через 13,5 млрд лет после Большого взрыва мы, люди, изучаем настоящее и на основе известных законов природы пытаемся заглянуть в будущее Вселенной.

Вопросы для самопроверки

1. Какие небесные тела существуют во Вселенной?
2. Через какие созвездия проходит видимый годичный путь Солнца?
3. Какие объекты входят в состав Галактики?
4. Чем отличаются рассеянные звёздные скопления от шаровых?
5. Что такое световой год?
6. Какие наблюдения указывают на расширение Вселенной?
7. Какие условия были во Вселенной на ранних этапах её эволюции?

Задание 47

1. Звёздная величина Полярной звезды (α Малой Медведицы) около $2,5^m$, а Альдебарана (α Тельца) около 1^m . Какая из этих звёзд выглядит ярче?
2. Перенесите таблицу 24 в тетрадь и заполните её.

Таблица 24

Небесное тело	Пример
Планета	
Созвездие	
Зодиакальное созвездие	
Спиральная галактика	
Звёздное скопление	
Пылевая туманность	
Газовая туманность	

3. Найдите на небе Полярную звезду.
4. Подготовьте сообщение на тему «Созвездие Ориона и интересные объекты в нём», используя различные источники информации, в том числе Интернет.
5. Зарисуйте вид Луны, отметьте дату и время наблюдений.

§ 66. Развитие представлений о системе мира. Строение и масштабы Солнечной системы

✓ Что вы знаете о строении Солнечной системы?

1. Древнегреческие мыслители, пытаясь представить себе строение мира (Вселенной), объяснить видимое движение небесных светил и определить их положение на небе, создали





Рис. 197

геоцентрическую систему мира (от греческого «Гей» — Земля). Согласно этой системе центром Вселенной считалась неподвижная Земля, а все небесные светила — обращающимися вокруг неё. Такой взгляд на строение мира в те далёкие времена был вполне закономерен, так как непосредственно вытекал из наблюдений.

Наиболее полно геоцентрическая система мира была разработана во II в. н. э. в трудах греческого учёного **Клавдия Птолемея** (70—147). Птолемей утверждал, что Солнце и Луна равномерно движутся вокруг Земли в прямом направлении

(с запада на восток) по большим кругам — *деферентам* (от латинского «деферанс» — несущий). Планеты тоже равномерно и в прямом направлении движутся по малым кругам — *эпициклам* (от греческих слов «эпи» — на и «киклос» — круг), а центры эпициклов равномерно движутся в прямом направлении по своим деферентам (рис. 197).

Идея геоцентризма хорошо укладывалась в рамки религиозных христианских представлений о Вселенной, поэтому поддерживалась церковью. Благодаря этому, а также тому, что система Птолемея являлась наиболее точной и наиболее разработанной астрономической теорией поздней античности и средневековья, она продержалась почти полтора тысячелетия.

Сложной задачей оказалось объяснение движения планет на фоне звёзд. На рисунке 198 показано видимое петлеобразное движение Венеры по созвездию Рыбы в 2009 г.

2. В середине XVI столетия польский астроном **Николай Коперник** (1473—1543) пришёл к выводу, что суточное движение небесного свода очень просто объяснить вращением Земли вокруг оси. Он же показал, что вся сложность системы Птолемея сразу исчезает, если выдвинуть следующие гипотезы:

1) планеты вращаются вокруг Солнца, а не вокруг Земли;



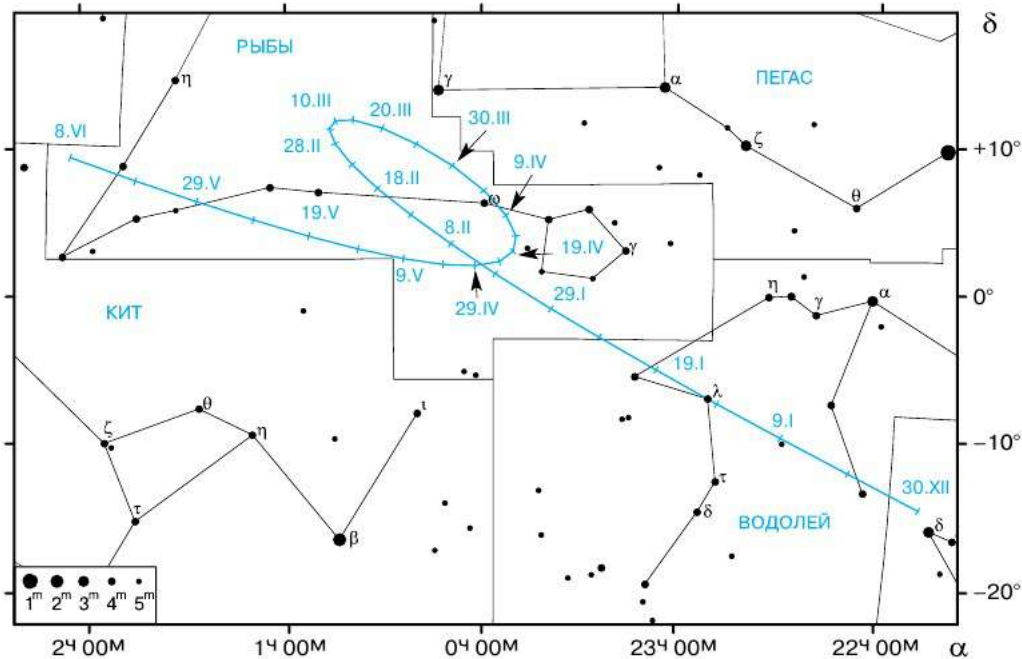


Рис. 198

2) Земля есть одна из планет и, следовательно, также обращается вокруг Солнца.

Таким образом, по теории Коперника, описываемые планетами петли происходят от того, что мы смотрим на планету с движущейся Земли.

Годичное движение Солнца объяснялось годичным движением Земли вокруг Солнца. Вокруг Земли движется только Луна.

Земля ничем не выделена и является одной из планет, занимая третье место от Солнца. Порядок расположения планет от Солнца такой: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер и Сатурн. Систему мира, в центре которой расположено Солнце, называют **гелиоцентрической** (от греческого «гелиос» — Солнце). На рисунке 199 приведена схема гелиоцентрической системы мира.

Планеты Марс, Юпитер и Сатурн, а также Уран и Нептун называют **внешними**.

К **внутренним** (или нижним) планетам относятся Меркурий и Венера, их орбиты расположены ближе к Солнцу, чем орбита Земли.

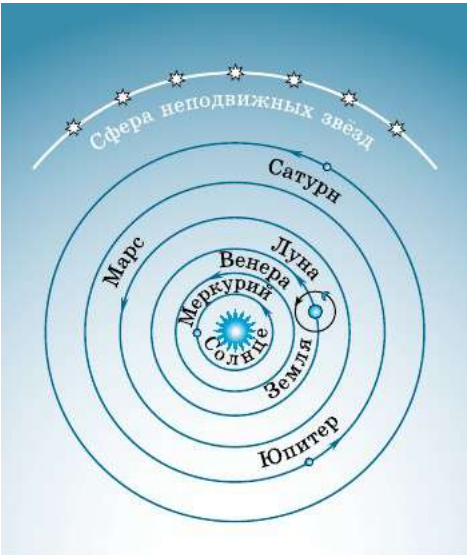


Рис. 199

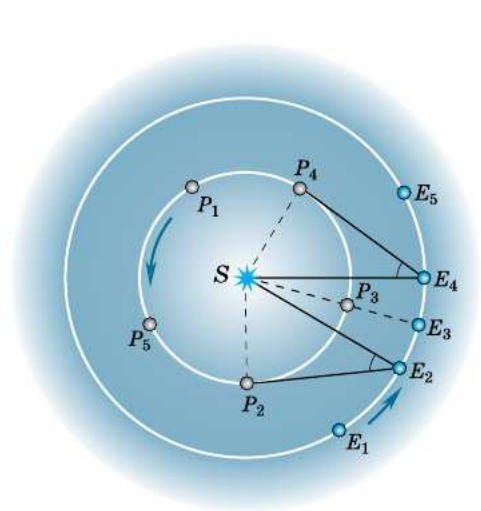


Рис. 200

На рисунке 200 показано взаимное расположение Венеры P и Земли E . Обе планеты движутся в одну сторону, но Венера движется быстрее Земли. В первый момент Венера находится за Солнцем в точке P_1 и с Земли (точка E_1) не видна. После этого она появляется из-за Солнца и с каждым днём отходит от него всё дальше влево, т. е. к востоку. В это время Венера видна по вечерам. Достигнув наибольшего удаления от Солнца в точке P_2 ($\angle SE_2P_2$), она начинает затем приближаться к Солнцу, проходит между Солнцем и Землёй (точка P_3) и появляется по другую сторону Солнца, к западу от него, в виде утренней звезды. После наибольшего удаления (точка P_4 , $\angle SE_4P_4$) опять приближается к Солнцу и, наконец, скрывается за ним (точка P_5); затем явления повторяются в прежнем порядке.

По повторяющимся на небе расположениям планет относительно Солнца Коперник вычислил их расстояние от него, приняв за единицу измерения расстояние от Земли до Солнца (1 астрономическая единица — 1 а. е. = 149,6 млн км): Меркурий — 0,4 а. е.; Венера — 0,7 а. е.; Земля — 1 а. е.; Марс — 1,5 а. е.; Юпитер — 5 а. е.; Сатурн — 10 а. е.

3. Наблюдая за положением планет среди звёзд длительное время, можно заметить, что планеты в основном перемеща-

ются среди звёзд с запада на восток, всё время находясь в пределах пояса зодиакальных созвездий (см. рис. 198). Это движение планет, во многом напоминающее движение Солнца и Луны среди звёзд, называют *прямым движением*.

В движении всех планет время от времени наступают остановки (получившие название стояний), после чего планеты начинают двигаться среди звёзд в обратном направлении, т. е. с востока на запад. Это *обратное*, или *попятное*, движение длится несколько недель или месяцев, затем следует новая остановка (новое стояние), после чего планета продолжает своё прямое движение к востоку. Таким образом, путь планет на небе получается петлеобразным или зигзагообразным.

Меркурий и Венера всегда находятся вблизи Солнца, удаляясь от него попеременно к западу и к востоку. Благодаря близости к Солнцу эти две планеты видны только в восточной области неба под утро, до восхода солнца, либо в западной стороне по вечерам, вскоре после захода солнца. Таким образом, видимое движение Меркурия и Венеры значительно отличается от видимого пути Марса, Юпитера и Сатурна. Перемещение же Солнца и Луны на фоне звёзд происходит по большим кругам всегда в прямом направлении.

4. Солнечная система — совокупность небесных тел, движущихся вокруг Солнца. В Солнечную систему входят восемь больших планет со своими спутниками, свыше 100 тыс. малых планет (астероидов), множество комет и метеорных тел (камней самых разнообразных размеров) и потоки мелкой пыли (метеорные рои).

Планеты представляют собой шарообразные тела, которые светят отражённым солнечным светом.

Астероиды — сравнительно небольшие твёрдые тела размерами, не превышающими сотен километров, и в подавляющем большинстве неправильной формы. Почти все малые планеты движутся вокруг Солнца между орбитами Марса и Юпитера, образуя своеобразное кольцо, называемое **поясом** или **зоной астероидов**.

Планеты и астероиды видны потому, что освещаются Солнцем. Даже самые крупные из малых планет видны только в телескоп и выглядят светящимися точками как звёзды, поэтому и получили название астероидов. Далёкие планеты Уран и Нептун, скудно освещаемые Солнцем, также доступны наблюдениям лишь в телескопы. Более близкие к Солнцу планеты видны невооружённым глазом, поэтому были известны с древнейших времён.

Все планеты и астероиды обращаются вокруг Солнца в направлении движения Земли, которое считается прямым. Они образуют планетную систему, являющуюся частью Солнечной системы. Радиус планетной системы близок к 40 а. е., или $6 \cdot 10^9$ км (шесть миллиардов километров), и определяется расстоянием от Солнца до карликовой планеты Плутон. Если луч света распространяется от Солнца до Земли (1 а. е.) примерно за 8 мин, то до границы планетной системы он будет распространяться около 5,5 ч. И всё же радиус планетной системы почти в 6900 раз меньше расстояния до ближайшей звезды Проксима Центавра.

Расстояния до звёзд и галактик измеряют в *парсеках* (пк) или в *световых годах* (св. год).

$$1 \text{ пк} = 3 \cdot 10^{16} \text{ м},$$

$$1 \text{ св. год} = 9,48 \cdot 10^{15} \text{ м}.$$

Вопросы для самопроверки

1. Что такое геоцентрическая система мира?
2. Что такое гелиоцентрическая система мира?
3. Какие планеты являются внутренними, а какие — внешними?
4. Какие наблюдения доказывают, что Земля движется вокруг Солнца?
5. Когда можно наблюдать Меркурий и Венеру?
6. Перечислите основные объекты, входящие в состав Солнечной системы.
7. Где в Солнечной системе расположены орбиты астероидов?

Задание 48

1. Наибольшее удаление Венеры от Солнца составляет $\approx 46^\circ$. Нарисуйте взаимное расположение Венеры, Земли и Солнца в момент наибольшего удаления Венеры от Солнца и рассчитайте расстояние Венеры от Солнца в астрономических единицах.
2. Зарисуйте вид Луны и отметьте дату и время наблюдений.

§ 67. Система «Земля—Луна»

- ✓ Какие фазы наблюдаются у Луны?
- ✓ В какое время суток виден серп растущей и убывающей Луны?

1. Луна — ближайшее к Земле небесное тело и её естественный спутник.

Луна, как и все светила, принимает участие в суточном движении небесной сферы. Но кроме этого, она имеет ещё и собственное движение, которое очень легко заметить.

Луна движется по звёздному небу с запада на восток, в ту же сторону, что и Солнце, но значительно быстрее: за 27,3 суток она описывает полный круг и возвращается в то же место среди звёзд.

Период обращения Луны вокруг Земли называют звёздным или сидерическим месяцем.

Луна медленно вращается вокруг своей оси в прямом направлении с периодом, равным сидерическому месяцу, и поэтому она всё время повернута к Земле одной стороной. Обратную сторону Луны впервые удалось увидеть только 7 октября 1959 г., когда советская автоматическая станция «Луна-3» облетела Луну и сфотографировала её обратную сторону, передав снимки на Землю.

Легко рассчитать, что за сутки Луна перемещается к востоку на $\frac{360^\circ}{27,3} \approx 13^\circ$, а в час несколько больше, чем на полградуса, т. е. почти на величину своего видимого диаметра. Поэтому, когда Луна проходит недалеко от какой-нибудь яркой звезды, её движение легко заметить в тот же вечер.

Так как Луна быстро движется к востоку, то каждый день она восходит и заходит позже, чем накануне, почти на 52 мин.

Луна движется по эллиптической орбите и, подобно Солнцу, не выходит из пояса зодиакальных созвездий.

Минимальное расстояние между Луной и Землёй 363 300 км, максимальное — 405 000 км (среднее расстояние 384 400 км).

Средняя скорость обращения Луны вокруг Земли равна

$$v = \frac{2\pi a}{T}; \quad v = \frac{2\pi \cdot 384\,400 \text{ км}}{27,3 \cdot 86\,400 \text{ с}} \approx 1 \text{ км/с}.$$

2. Луна, подобно Земле, представляет собой тёмный непрозрачный шар, светящийся отражённым солнечным светом. Солнце всегда освещает приблизительно половину этого шара, другая половина остаётся тёмной. Но так как к Земле обыкновенно бывают обращены и часть светлого освещённого полушария, и часть неосвещённого, то Луна большую часть кажется нам неполной, предстаёт в той или иной *фазе*. На рисунке 201 показана смена лунных фаз.

Во время **новолуния**, когда Луна проходит между Землёй и Солнцем, к нам обращена её неосвещённая, тёмная сторона.



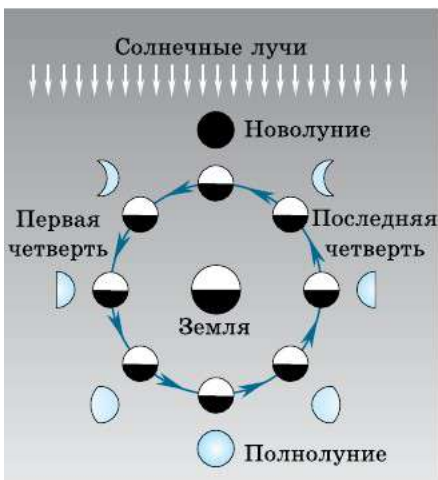


Рис. 201

Луна тогда совершенно не видна. В дальнейшем Луна перемещается к востоку от Солнца и видна в виде узкого серпа, обращённого выпуклостью вправо. Говорят, что мы видим молодую, растущую Луну, которая видна вечером после захода солнца.

Через неделю после новолуния видна ровно половина освещённого полушария Луны и половина неосвещённого. Мы видим тогда освещённой правую половину лунного диска. Эту фазу называют **первой четвертью**. Затем к нам поворачивается

всё большая и большая часть освещённого полушария, пока ещё через неделю не наступит **полнолуние**. В это время Солнце, Земля и Луна находятся почти на одной прямой. После этого Луна начинает убывать; с каждым днём скрывается из наших глаз всё большая часть светлого полушария.

Через неделю после полнолуния наступает **последняя четверть**; мы видим с Земли освещённую левую половину лунного диска. Наконец, Луна принимает форму серпа, обращённого выпуклостью влево (говорят, что мы видим старую Луну), и вскоре исчезает; наступает опять новолуние. Старая Луна видна в утренние часы перед восходом Солнца.

Промежуток времени между двумя последовательными новолуниями (или одинаковыми фазами) называют синодическим месяцем.

Синодический месяц равен 29,5 суткам и лежит в основе лунного календаря.

3. При своём движении Луна заслоняет звёзды зодиакальных созвездий, по которым проходит лунный путь. Значительно реже Луна закрывает планеты, оказавшиеся на её пути. Периодически Луна частично или полностью заслоняет Солнце. Такое явление называют **солнечным затмением**. Солнечные затмения бывают только во время новолуния.

Полные солнечные затмения случаются довольно часто (в среднем 13 затмений за 18 лет), но каждое затмение может наблюдаться лишь в сравнительно узкой полосе земной поверхности. Поэтому для конкретного места это явление случается очень редко — через сотни лет. Так, например, в Москве полные солнечные затмения наблюдались 7 июня 1415 г., 25 февраля 1476 г., 19 августа 1887 г. Очередное полное затмение Солнца в Москве продолжительностью около 7 мин произойдёт 16 октября 2126 г.

Лунные затмения происходят при прохождении Луны сквозь земную тень. Во время полного затмения Луна видна на небе, только её свет заметно слабее, чем обычно, и становится тёмно-красным. Это объясняется тем, что солнечные лучи преломляются в земной атмосфере и таким образом попадают на поверхность Луны.

На протяжении календарного года происходят от двух до пяти солнечных затмений и до трёх лунных затмений.

4. Уровень воды в океанах испытывает постоянные правильные колебания. Во время приливов уровень воды плавно нарастает, достигая наибольшего значения, а затем постепенно снижается до минимального уровня. Максимумы подъёмов воды чередуются примерно через 12 ч 26 мин. Таким образом, в каждом месте океанского берега за 24 ч 52 мин бывают два прилива и два отлива. Максимальные приливы бывают, когда Луна находится выше всего над горизонтом и ниже всего под горизонтом. Но вы уже знаете, что из-за движения Луны вокруг Земли Луна проходит выше всего над горизонтом как раз через 24 ч 52 мин. Это указывает на связь приливов с расположением Луны относительно Земли.

Действительно, приливы вызывает притяжение Луны. При взаимодействии Луны и Земли различные точки земного шара приобретают ускорение. Рассмотрим схему приливов.

Предположим для простоты, что вся Земля покрыта океаном, точка *E* — центр Земли (рис. 202). Очевидно, точка *A*, наиболее близкая к Луне, имеет большее ускорение, чем точка *E*, ускорение которой, в свою очередь, больше, чем ускорение точки *B*. Поэтому частицы воды близ точки *A* уйдут вперёд по сравнению с твёрдой оболочкой Земли, и на этой стороне Земли вода поднимется. В точке *A* будет наблюдаться прилив. Но такой же прилив будет в то же время и на противоположной стороне Земли, так как ускорение, создаваемое притяжением Луны в точке *B*, меньше, чем в центре



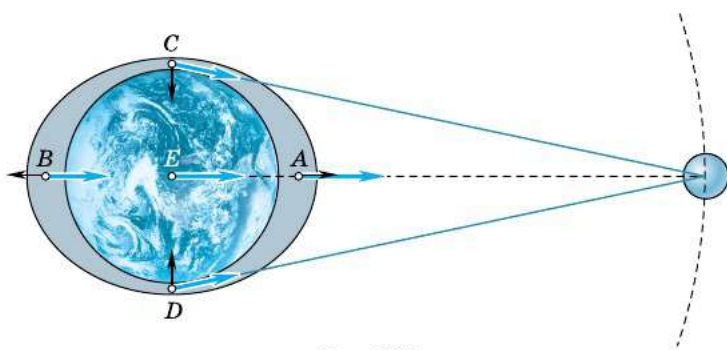


Рис. 202

Земли. Частицы воды близ точки *B* будут отставать от твёрдой оболочки Земли, и вода поднимется на этой стороне Земли.

На рисунке 202 синие стрелки указывают направление притяжения к Луне, чёрные — направление смещения воды по отношению к твёрдой оболочке Земли.

В точках *C* и *D* водная оболочка будет испытывать дополнительное смещение, направленное к центру Земли. В этих точках будет наблюдаться отлив.

Итак, под действием лунного притяжения водная оболочка Земли имеет слегка вытянутую в сторону Луны форму. Близ точек *A*, где Луна выше всего над горизонтом, и *B*, где Луна ниже всего под горизонтом, будет прилив. Близ точек *C*, где Луна заходит, и *D*, где Луна восходит, будут наблюдаться отливы.

Вследствие вращения Земли приливные выступы образуются каждый следующий момент уже в новых точках земной поверхности. Поэтому в течение 24 ч 52 мин они обойдут вокруг всего земного шара; за это время в каждом месте случаются два прилива и два отлива.

Солнце, как и Луна, также вызывает приливы. Несмотря на большую удалённость Солнца от Земли, но благодаря его большой массе приливы, которые оно вызывает, всего в 2,5 раза меньше лунных.

Во время полнолуний и новолуний лунные и солнечные приливы складываются и наблюдаются самые большие приливы. Напротив, когда Луна в первой или последней четверти, во время лунного прилива будет солнечный отлив; действие Солнца вычитается из действия Луны, и приливы делаются существенно меньшими.

Вопросы для самопроверки

- 1. Чему равен звёздный месяц?
- 2. Чему равен синодический месяц?
- 3. Как расположены Луна, Земля и Солнце во время новолуния и во время полнолуния? Сделайте рисунок.
- 4*. Солнечные затмения происходят во время новолуний. Почему солнечные затмения случаются не каждый месяц?
- 5. Что указывает на связь приливов с движением Луны?

Задание 49

- 1. Зарисуйте фазу Луны, отметив дату и время наблюдений.
- 2. Перенесите таблицу 25 наблюдений за фазами Луны в тетрадь и заполните её за весь период наблюдений.

Таблица 25

Дата (день и час)	Фаза (рисунок)

- 3. По результатам задания 2 оцените период смены лунных фаз.
- 4. Утром или вечером видна молодая Луна (фаза до первой четверти)?
- 5. Утром или вечером видна старая Луна (фаза перед новолунием)?

§ 68. Физическая природа планеты Земля и её естественного спутника Луны

- ✓ Вспомните закон всемирного тяготения.
- ✓ Почему происходит смена времени года?

1. Третья планета от Солнца — Земля имеет форму чуть приплюснутого шара со средним радиусом $R_{\oplus} = 6378$ км. Экваториальный радиус Земли равен 6378,16 км, полярный радиус — 6356,78 км, т. е. полюс на 21,38 км ближе к центру Земли, чем экватор. На снимках из космоса прослеживаются и форма Земли, и основные детали её поверхности (рис. V на форзаце).

Ось вращения Земли расположена под углом $66,5^{\circ}$ к плоскости её движения вокруг Солнца и практически не меняет своего направления. Вследствие этого происходят периодические ежегодные изменения освещённости Северного и Южного полушарий Земли, что приводит к смене времён года.

В действительности ось вращения Земли описывает на небесной сфере малый круг, совершая один полный оборот за 26 тыс. лет.

Ближайшие сотни лет северный полюс мира, в который направлена ось вращения Земли, будет находиться недалеко от Полярной звезды, затем начнёт удаляться от неё. Через 12 тыс. лет полюс мира приблизится к самой яркой звезде северного неба — Веге из созвездия Лиры.

Описанное явление носит название **прецессии** оси вращения Земли. Обнаружил явление прецессии древнегреческий астроном **Гиппарх** (ок. 190—125 до н. э.). Сравнивая положение звёзд в своём каталоге и в каталоге, составленном задолго до него, он обнаружил медленное перемещение полюса мира.

Одна из важнейших характеристик Земли — масса, которая равна $M_{\oplus} = 5,98 \cdot 10^{24}$ кг.

Средняя плотность Земли равна 5520 кг/м³. При этом в ядре, состоящем из железа и никеля в основном с температурой 8000—9000 °С, плотность равна 12 000 кг/м³, а в коре, состоящей из более лёгких химических элементов, — 2700 кг/м³.

Поверхность Земли на 70% покрыта водой.

2. Земля окружена атмосферой, состоящей в основном из азота и кислорода. Углекислого газа в атмосфере всего 0,03%.

Благодаря углекислому газу и водяному пару, присутствующим в атмосфере, климат Земли значительно теплее, чем был бы при отсутствии этих газов. Это связано с **парниковым эффектом**, который возникает из-за наличия этих газов в атмосфере. Как известно, солнечные лучи свободно пропускаются прозрачной плёнкой в парник и нагревают грунт и воздух до высокой температуры. Нагретый грунт и воздух излучают инфракрасные (тепловые) лучи, которые наружу не пропускаются плёнкой. Поэтому тепло скапливается внутри парника, повышая его температуру.

Для Земли плёнкой служат углекислый газ и водяные пары в атмосфере. Атмосфера прозрачна для солнечных лучей, они проникают к поверхности Земли и нагревают её и прилежащий воздух. Инфракрасное излучение этими газами не выпускается наружу, и тепло удерживается в приземном слое, тем самым повышая его температуру. Поэтому средняя годовая температура Земли около +15 °С. Если бы в атмосфере не было углекислого газа и водяных паров, то температура на Земле была бы почти на 40 °С ниже. Как мы увидим далее, парниковый эффект играет огромную роль в формировании климата Венеры.



Земля представляет собой огромный магнит, южный полюс которого находится на севере Гренландии. Действие магнитного поля проявляется на расстояниях в десятки тысяч километров от Земли.

3. Луна — холодное шаровидное тело с твёрдой поверхностью, радиусом 1738 км. Масса Луны в 81,3 раза меньше массы Земли, определена по движению искусственных спутников вокруг неё, неоднократно выводимых в 1966—1971 гг. на *селеноцентрические*¹ орбиты. Первым искусственным спутником Луны стал советский космический аппарат «Луна-10», запущенный 3 апреля 1966 г. Средняя плотность Луны $\rho = 3350 \text{ кг/м}^3$, или 0,6 плотности Земли, ускорение свободного падения на её поверхности $1,63 \text{ м/с}^2$ (в 6 раз меньше земного). Продолжительность солнечных суток на Луне около 29,5 земных суток. Луна лишена воды и атмосферы. За продолжительный лунный день (14,8 земных суток) поверхность Луны нагревается до температуры $+130^\circ\text{C}$, а ночью охлаждается до -170°C .

Из-за малой силы тяжести и высокой температуры Луна не смогла удержать около себя атмосферу.

Рельеф лунного полушария, обращённого к Земле, хорошо виден даже в небольшой телескоп. Обширные тёмные округлые и сравнительно ровные низменности получили ещё в XVII в. название **морей**: Море Спокойствия, Море Ясности и т. д. (рис. 203). Их размеры от 200 до 1200 км в поперечнике. Самая большая низменность, протяжённостью свыше 2000 км, названа Океаном Бурь. Сглаженная поверхность морей покрыта тёмным веществом — застывшей базальтовой лавой, некогда изверженной из лунных недр. Океан Бурь и наиболее крупные моря различимы невооружённым глазом в виде тёмных пятен.

Светлые области — **материки** занимают свыше 60% видимой поверхности Луны. Материки покрыты как отдельными горами, так и горными хребтами. Так, Море Дождей ограничено с северо-востока Альпами, с востока — Кавказом. Высота гор различна, отдельные горные вершины достигают 8 км.

Горные районы покрыты множеством кольцевых структур — **кратеров**, в меньшем числе они имеются и в морях. Размеры кратеров — от 1 м до 250 км. Многие кратеры названы именами учёных: Архимед, Гиппарх и др. У таких крупных кратеров, как

¹ Орбиты вокруг Луны. Название происходит от греческого «Селена» — Луна.



Рис. 203

Тихо, Коперник, Кеплер, наблюдаются расходящиеся светлые лучевые структуры.

По современным представлениям большинство кратеров образовалось при столкновении с лунной поверхностью крупных метеоритов, астероидов и комет. Лунный грунт неоднократно доставлялся космическими аппаратами на Землю и исследовался в лабораториях.

Вопросы для самопроверки

1. Что определяет смену времени года и наличие тепловых поясов на Земле?
2. Что представляет собой явление прецессии?
3. Какова физическая природа парникового эффекта?
4. Какова природа лунных кратеров?

Задание 50

Используя закон всемирного тяготения, вычислите массу Земли, зная, что $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Лабораторная работа № 9

Определение размеров лунных кратеров

Цель работы:

измерить размеры различных образований на поверхности Луны.

Приборы и материалы:

фотография видимой поверхности Луны (см. рис. 203), миллиметровая линейка.

Порядок выполнения работы

1. Вспомните или выпишите из справочника угловой и линейный диаметры Луны.
2. Найдите на фотографии Луны некоторые образования: Море Дождей, Море Ясности, горы Апеннины, кратер Тихо, кратер Платон.
3. Оцените погрешность измерений миллиметровой линейки.
4. Определите линейный масштаб фотографии лунной поверхности. Масштаб равен отношению диаметра Луны в км к диаметру Луны в мм.
5. Измерьте максимальный и минимальный размеры лунных образований. Результаты измерений запишите в таблицу 26.
6. Рассчитайте линейные размеры этих образований и запишите полученные результаты в таблицу 26.

Таблица 26

№ п/п	Объект	Измеренные размеры, мм		Линейный размер, км	
		макс.	мин.	макс.	мин.
1	Море Дождей				
2	Море Ясности				
3	Горы Апеннины				
4	Кратер Тихо				
5	Кратер Платон				

7. Сравните размеры лунных образований с размерами Чёрного моря и длиной Кавказского хребта.

§ 69. Планеты

- ✓ Какие планеты вам известны?
- ✓ Какая планета самая близкая от Солнца; самая далёкая от Солнца?

1. Вокруг Солнца обращаются восемь больших планет. По физическим характеристикам их объединяют в две группы, разграниченные в пространстве поясом астероидов. Планеты, движу-



щиеся внутри этого пояса (Меркурий, Венера, Земля и Марс), принадлежат к планетам земной группы (см. рис. V на форзаце). Все эти планеты небольшие по размерам и массе (самая крупная из них — Земля), имеют твёрдую поверхность, сравнительно высокую среднюю плотность, близкую к плотности Земли (5520 кг/м^3), медленно вращаются и обладают атмосферой (кроме Меркурия). В основном они состоят из тяжёлых химических элементов, существенно тяжелее водорода и гелия. Планеты земной группы имеют мало спутников (Земля имеет один спутник, а Марс — два спутника). Физические характеристики планет земной группы изучены как космическими, так и наземными средствами.

Планеты, движущиеся за поясом астероидов, образуют группу планет-гигантов (рис. VI на форзаце), возглавляемую Юпитером — самой крупной и массивной планетой Солнечной системы. К этой группе относятся Сатурн, Уран и Нептун. Они обладают значительными размерами и массой, малой средней плотностью, сравнимой с плотностью воды, быстрым вращением и мощными, протяжёнными гелиево-водородными атмосферами с небольшим содержанием аммиака и метана и не имеют твёрдой поверхности. Планеты-гиганты имеют большое число спутников и окружены кольцами, состоящими из мириад¹ мелких твёрдых частиц.

К карликовым планетам относят Плутон и ещё несколько вновь открытых больших небесных тел за орбитой Нептуна.

2. Самая маленькая планета земной группы — Меркурий имеет диаметр 4880 км (0,383 диаметра Земли), массу — 0,056 массы Земли и не имеет атмосферы. Её рельеф очень похож на лунный. Солнечные сутки на Меркурии длятся 176 земных суток, или два меркурианских года!

Венера по своим характеристикам похожа на Землю, её поверхность скрыта от нас мощным слоем облаков. Плотную атмосферу на Венере открыл в 1761 г. М. В. Ломоносов во время наблюдений редкого явления прохождения Венеры по диску Солнца. Советские космические станции, совершившие мягкую посадку на её поверхность, показали, что атмосфера Венеры состоит на 96% из углекислого газа и на 4% из азота, давление на поверхности составляет 90 атм, а температура поверхности около 500°C . Столь высокая температура поверхности определяется сильным парниковым эффектом, создаваемым углекислым газом.

¹ В переводе с греческого означает «бесчисленное количество, неисчисли-
мое множество».

Наиболее изученной из планет земной группы является Марс, на поверхность которого неоднократно совершали мягкую посадку советские и американские космические станции. Длительность солнечных суток на Марсе $24^{\text{ч}}39^{\text{м}}29^{\text{с}}$. Наклон его оси вращения равен $23^{\circ}56'$, т. е. близок к наклону земной оси ($23^{\circ}26'$).

Поэтому на Марсе, как и на Земле, имеются жаркий, два умеренных и два холодных тепловых пояса, а также происходит смена сезонов года, каждый из которых почти в 2 раза продолжительнее земных сезонов, поскольку марсианский год длится 687 земных суток. Но контрасты сезонов года на Марсе иные, чем на Земле, так как он находится от Солнца в 1,52 раза дальше Земли, получает от него тепла в 2,3 раза меньше, лишён водных бассейнов, снежной зимы и жаркого лета.

Среднегодовая температура поверхности Марса близка к -70°C . Но вблизи экватора днём она повышается до $+20\dots+25^{\circ}\text{C}$, к заходу солнца снижается до -10°C и ниже, а под утро падает до -90°C . Такие резкие колебания температуры объясняются очень разреженной атмосферой Марса, которая не в состоянии сохранить тепло, полученное днём поверхностью планеты, и в ночное время оно быстро излучается в мировое пространство.

В атмосфере планеты содержится до 95% углекислого газа, около 2% азота, 0,3% кислорода и примерно 0,01% водяных паров.

Марс имеет два естественных спутника — Фобос и Деймос¹. Эти спутники видны лишь в сильные телескопы. Оба спутника сфотографированы космическими станциями. Они оказались бесформенными глыбами размером $27 \times 21 \times 19$ км (Фобос) и $15 \times 12 \times 8$ км (Деймос). Поверхность спутников покрыта кратерами диаметрами от 50 м до 10 км, несомненно являющимися результатом метеоритных ударов, так как в недрах малых тел вулканическая деятельность невозможна.

3. Юпитер настолько велик, что его масса почти в 2,5 раза превышает суммарную массу остальных планет и в 318 раз больше массы Земли. Видимый диск Юпитера — это верхние слои его протяжённой атмосферы. Даже в небольшие телескопы хорошо заметно сжатие планеты вдоль её оси вращения, равное $1/16$, т. е. экваториальный диаметр диска в 1,07 раза больше полярного. Экваториальный радиус планеты равен 71 400 км и в 11,2 раза

¹ В греческой мифологии Фобос («страх»), Деймос («ужас») — спутники бога войны Ареса (в римской мифологии — Марса).

превосходит радиус Земли. Ускорение свободного падения на планете в 2,67 раза больше земного.

Значительное сжатие Юпитера объясняется быстрым вращением, имеющим зональный характер: экваториальная зона вращается с периодом $9^{\text{ч}}50^{\text{м}}30^{\text{с}}$, а умеренные зоны медленнее, с периодом $9^{\text{ч}}55^{\text{м}}42^{\text{с}}$, т. е. не как твёрдое тело, а жидкое и газообразное.

По современным сведениям, масса Юпитера состоит примерно из 74% водорода, 20% гелия и 6% тяжёлых химических элементов, находящихся в недрах планеты.

Вокруг Юпитера вращается много спутников, четыре из них — Ио, Европа, Ганнимед и Каллисто — самые крупные, сравнимые по размерам с Луной. Остальные имеют размеры от 10 до 280 км и неправильную форму. На Ио обнаружено несколько действующих вулканов.

С помощью космических аппаратов вокруг Юпитера обнаружили кольцо, внешний радиус которого близок к 126 000 км. Кольцо очень тонкое, обращено к Земле ребром, и поэтому с Земли оно не видно.

Сатурн — планета с огромным кольцом — более других планет-гигантов похож на Юпитер. Его масса в 95 раз и экваториальный радиус (60 370 км) в 9,5 раза превышают земные. Ускорение свободного падения на Сатурне в 1,15 раза превышает земное. Структура Сатурна такая же, как и Юпитера, он тоже вращается не как твёрдое тело, с периодами $10^{\text{ч}}14^{\text{м}}$ (экваториальный пояс) и $10^{\text{ч}}39^{\text{м}}$ (умеренные пояса), средняя плотность равна 690 кг/м^3 .

У Сатурна обнаружено много спутников с поперечниками от 34 до 5150 км. Самый большой спутник — Титан виден в школьный телескоп. Диаметр Титана почти в 1,5 раза больше диаметра Луны. Он окружён плотной азотной атмосферой. Поверхности крупных спутников покрыты множеством кратеров самых различных размеров. Подавляющее большинство кратеров явно ударного происхождения.

Кольцо у Сатурна было открыто ещё в 1656 г. голландским физиком Х. Гюйгенсом. Кольцо у планеты не сплошное, а состоит из мириад твёрдых частиц различных размеров — от нескольких сантиметров до нескольких метров. Толщина кольца не превышает 2 км.

По своим физическим свойствам Уран и Нептун схожи друг с другом. Видимая поверхность (диск) каждой планеты представляет собой плотные слои протяжённой атмосферы, состоящей из

молекулярного водорода, гелия, метана и аммиака. Измерения показали, что температура видимой поверхности Урана равна -150°C , а Нептуна -170°C . Обе планеты обладают кольцами, правда не столь яркими, как у Сатурна.

О физической природе карликовой планеты Плутон известно очень мало. Он вращается вокруг оси с периодом $6^{\text{д}}9^{\text{ч}}24^{\text{м}}$.

В 1978 г. у Плутона был открыт спутник, названный Хароном, отстоящий от него на расстоянии 17 000 км. Плутон и Харон всё время повернуты одной стороной друг к другу, так что их периоды обращения вокруг оси и вокруг друг друга одинаковы.

Масса Плутона оказалась поразительно малой, всего лишь около 0,0015 массы Земли, т. е. примерно в 8 раз меньше массы Луны, а у Харона — ещё в 2 раза меньше! Радиус Плутона равен 1100 км, а Харона близок к 650 км, так что оба тела можно считать двойной планетой.

Вопросы для самопроверки

1. Какая из планет земной группы имеет наименьшие размеры и массу?
2. Какая из планет-гигантов имеет максимальные размеры и массу?
3. Почему поверхность Венеры нагрета почти до 500°C ?
4. Почему по современным представлениям на Венере невозможна жизнь?
- 5*. Ось вращения Юпитера почти перпендикулярна плоскости его орбиты вокруг Солнца. Есть ли смена времён года на этой планете?
6. Что представляют собой кольца планет?

Задание 51

1. Перечислите основные сходства планет земной группы.
2. Перечислите основные сходства планет-гигантов.
3. Найдите на вечернем небе Венеру, Марс, Юпитер и Сатурн.
4. Если в школе есть телескоп, используя его, найдите на небе изученные планеты.

Лабораторная работа № 10

Определение высоты и скорости выброса вещества из вулкана на спутнике Юпитера Ио

Цель работы:

определить характеристики вулканических процессов на небесных телах.

Приборы и материалы:

фотография спутника Ио (рис. 204), полученная с космического аппарата «Вояджер», миллиметровая линейка.

Порядок выполнения работы

1. Вспомните или выпишите из справочника диаметр D спутника Ио и ускорение свободного падения g на его поверхности.
2. Определите линейный масштаб фотографии спутника. Масштаб равен отношению диаметра спутника в км к его диаметру в мм.
3. Измерьте высоту подъёма вулканического выброса h в мм. Результаты измерений запишите в таблицу 27 с учётом погрешности измерения.
4. Рассчитайте высоту выброса h в км.
5. Используя формулу $v = \sqrt{2gh}$ (из закона сохранения механической энергии), рассчитайте скорость выброса вещества из жерла вулкана.
6. Определите высоту над поверхностью Земли $h_{\oplus}$, на которую поднялось бы вещество, выброшенное из жерла земного вулкана с такой же скоростью, что и на Ио.

Таблица 27

D , км	g , м/с ²	h , мм	h , км	v , м/с	$h_{\oplus}$, км

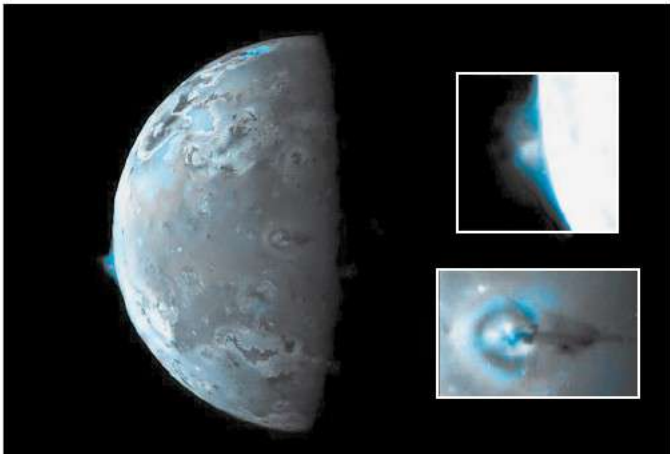


Рис. 204

§ 70. Малые тела Солнечной системы

- ✓ Вспомните основные объекты, входящие в состав Солнечной системы.
- ✓ Какие планеты Солнечной системы вы знаете?

1. В 1801 г. итальянский астроном *Джузеппе Пиацци* (1746—1826) случайно обнаружил неизвестный небольшой объект, движение которого указывало на то, что он относится к Солнечной системе. Всего через год был открыт ещё один подобный объект. Оба объекта имели звездообразный вид и двигались вокруг Солнца на расстоянии 2,8 а. е. от него. Звездообразный вид указывал на малые размеры этих небесных тел, поэтому их называли малыми планетами или **астероидами** (в переводе с греческого — «звездообразные»). Открытые астероиды были названы соответственно Церера и Паллада. В настоящее время открыто свыше ста тысяч малых планет (рис. VII на форзаце).

Все малые планеты движутся в ту же сторону, что и планеты. Большинство периодов малых планет составляет от 3,5 до 6 лет, что соответствует средним расстояниям до Солнца (2,3—3,3 а. е.).

Хотя некоторые астероиды подходят близко к Земле, их поверхности, как правило, не могут наблюдаться из-за того, что они очень малы. Размеры некоторых астероидов измерялись по времени затмения ими звёзд. Так, астероид Паллада имеет в поперечнике 560 км, Веста — 380 км. Размеры большинства из астероидов можно оценить по их блеску, они составляют от 200 до 10 км и менее.

В настоящее время Церера, имеющая в поперечнике около 950 км, как и Плутон, отнесена к карликовым планетам.

Общая масса всех астероидов небольшая, она существенно меньше массы любой планеты.

2. **Кометы** — небесные светила, которые получили своё название от греческого «кометас» — «хвостатая» или «косматая» (звезда). Действительно, яркие кометы, видимые невооружённым глазом, имеют хвост протяжённостью в несколько миллионов и даже десятков миллионов километров. Яркие кометы появляются сравнительно редко, в среднем одна комета за 10—15 лет. Слабые же по блеску кометы появляются часто; на фотографиях звёздного неба ежегодно обнаруживают несколько комет.

В прежние времена появление комет наводило на людей панический страх; в них видели предвестников бедствий. Боль-

шинство комет входят в состав нашей Солнечной системы. Под действием притяжения Солнца они, как и планеты, обращаются вокруг него по вытянутым эллиптическим орбитам.

Самой известной кометой является комета Галлея (см. рис. VII на форзаце), названная так в честь исследователя комет, английского учёного *Эдмунда Галлея* (1656—1742), который предсказал её появление. Комета Галлея движется по очень вытянутой эллиптической орбите. В перигелии она сближается с Солнцем до минимального расстояния 0,59 а. е. (заходит внутрь орбиты Венеры), а в афелии удаляется за орбиту Нептуна на максимальное расстояние 35,3 а. е. Последний раз комета появилась в 1986 г., в момент её прохождения вблизи Солнца для её изучения был осуществлён запуск двух советских космических станций «Вега-1» и «Вега-2» и ещё двух аппаратов.

Фотографирование ядра кометы Галлея советскими космическими станциями с расстояния около 8000 км показало, что оно имеет неправильную форму размером $16 \times 18 \times 8$ км. В следующий раз её можно будет увидеть в 2062 г.

На больших расстояниях от Солнца кометы представляют собой глыбы твёрдого вещества из льда, застывших газов и пыли, замороженных частиц метеорного вещества. При приближении к Солнцу лёд начинает таять и испаряться, вокруг ядра кометы, начальные размеры которого не превышают десятков километров, образуется протяжённая оболочка — **кома** (рис. 205). Под действием давления солнечного света и солнечного ветра часть газов комы отталкивается в сторону, противоположную Солнцу, образуя **хвост** кометы. Иногда размеры комы достигают величин, сравнимых с диаметром Солнца. Так, например, диаметр комы сверхгигантской кометы Холмса в 1882 г. был равным 1,5 млн км, а длина её хвоста достигала 300 млн км.

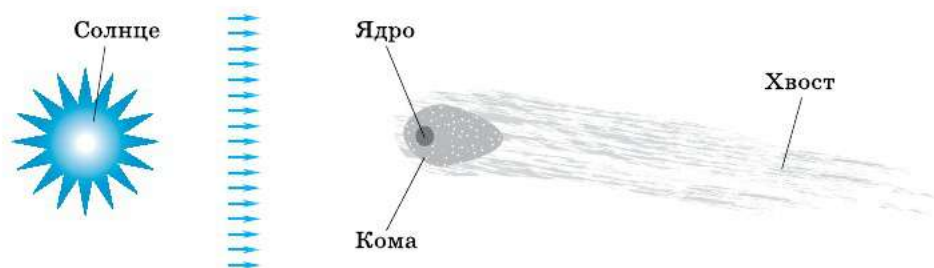


Рис. 205



В конце концов комета теряет вещество и разрушается на части. Глыбы, камни и пылинки её ядра продолжают двигаться по той же орбите вокруг Солнца, по которой двигалась комета. Если орбита пересекает земную орбиту, то ежегодно, когда Земля попадает в точку пересечения, наблюдаются метеорные дожди.

3. Метеоры (от греческого «метеорос» — парящий в воздухе) вспыхивают в земной атмосфере при вторжении в неё извне мельчайших твёрдых частиц. В народе метеоры часто называют «падающими звёздами». В межпланетном пространстве движется множество таких частиц, получивших общее название метеорных тел или микрометеоритов. Массы подавляющего их большинства измеряются десятками и тысячами долями грамма и в редких случаях — несколькими граммами. Скорость их движения относительно Земли различна, но у многих не превышает 10—15 км/с. Если в атмосферу влетает частица со скоростью свыше 30 км/с, то из-за трения о воздух она быстро раскаляется, вспыхивает и порождает метеор. Чем больше масса и скорость частицы, тем ярче метеорная вспышка. В среднем по всему небу за час появляются 5—6 ярких метеоров.

Большинство метеоров вспыхивает на высоте 70—80 км над земной поверхностью, полностью распыляясь в атмосфере. Помимо отдельных метеорных частиц, вокруг Солнца движутся целые их рои, называемые метеорными потоками. Они порождены распадающимися или уже распавшимися кометами. Каждый метеорный рой обращается вокруг Солнца по той же орбите, что и породившая его комета, и многие из них в определённые дни года встречаются с Землёй. В эти дни число метеоров значительно возрастает, а если метеорный рой компактный, то наблюдаются метеорные, или звёздные, дожди, когда в одной ограниченной области неба за одну минуту вспыхивают сотни метеоров.

4. Помимо пыли в межпланетном пространстве движется множество твёрдых тел размером от сантиметров до десятков метров. Они получили название *метеороидов*. Выпавшие на Землю метеороиды называют **метеоритами**.

Самый крупный железный метеорит Гоба найден на территории Намибии: он имеет размер $3 \times 3 \times 1$ м и массу 60 т.

Никаких новых химических элементов, неизвестных на Земле, в метеоритах не найдено, что полностью подтверждает единство вещества на Земле и вне её.

На месте падения более крупных метеоритов образуются метеоритные кратеры значительных размеров. Такие кратеры обна-

ружены в Аризоне (США), Канаде, на Таймыре (Россия) и в других местах. У Аризонского метеоритного кратера диаметр 1207 м, глубина 174 м и высота окружающего его вала от 40 до 50 м.

Метеориты падают не только на Землю, но и на другие планеты и их спутники. При отсутствии у планет и их спутников атмосферы даже небольшие метеориты, падающие с большой скоростью на поверхность этих тел, взрываются, плавят поверхность и образуют на ней кратеры внушительных размеров. Крупные метеориты могут образовать кратеры диаметром несколько десятков километров. Это подтверждается открытием обилия метеоритных кратеров на поверхности Луны, Меркурия, Марса и его спутников, Юпитера, Сатурна и Урана.

Вопросы для самоконтроля

1. Что представляют собой астероиды?
2. Чем отличается метеор от метеорита?
3. Что представляет собой явление метеора?
4. Почему иногда происходят метеорные дожди?
5. Почему у кометы появляется хвост?
6. Как вы думаете, что произойдёт с Землёй, если она пройдёт через хвост кометы?

Задание 52

1. Кометы при каждом прохождении вблизи Солнца теряют примерно 0,005 своей массы. Период обращения кометы Галлея 76 лет. Оцените примерный возраст кометы Галлея.
- 2*. Плотность планеты-карлика Церера примерно равна 3000 кг/м^3 .

Оцените её массу и сравните с массой Земли. (Объём шара вычисляется по формуле $V = \frac{4}{3}\pi R^3$.)

§ 71. Солнечная система — комплекс тел, имеющих общее происхождение

- ✓ Что называют радиоактивным распадом?
- ✓ Что называют периодом полураспада?

1. Наука, которая изучает происхождение и эволюцию Солнечной системы, называется **космогонией**. Первая серьёзная космогоническая гипотеза о происхождении Солнечной системы была создана и опубликована в 1755 г. немецким философом *Иммануилом Кантом* (1724—1804), считавшим, что Солнце



образовалось из твёрдых частиц огромного облака, которые сближались и слипались между собой под действием взаимного тяготения.

Вторая космогоническая гипотеза была выдвинута в 1796 г. французским астрономом *Пьером Симоном Лапласом* (1749—1827). Принимая кольцо Сатурна за газовое, отделившееся от планеты при её вращении вокруг оси, Лаплас полагал, что на ранней стадии своего развития Солнце представляло собой огромную, медленно вращающуюся, раскалённую туманность — *протосолнце*. Под действием силы тяжести протосолнце сжималось, а скорость его вращения всё увеличивалась, поэтому оно приобретало сплюснутую форму. По мере дальнейшего сжатия от протосолнца отделялось гигантское кольцо, которое охлаждалось и разрывалось на отдельные сгустки. Из них будто бы и формировались планеты. Такой отрыв колец от протосолнца происходил несколько раз. Аналогичным путём образовались и спутники планет.

Эта гипотеза просуществовала более ста лет. Однако, подобно гипотезе Канта, она была отвергнута, так как не объясняла всех закономерностей Солнечной системы.

2. Следует отметить, что проблема происхождения Солнечной системы является одной из основных в современном естествознании. Несмотря на то что этой проблемой занимались многие учёные, её решение сегодня получено лишь в самых общих чертах. Дело в том, что планетная система, окружающая наше Солнце, уникальна, и теорию, объясняющую её образование, мы не можем пока проверить на примере других планетных систем. Моделирование этого процесса оказалось очень сложным, поскольку необходимо учитывать значительное число самых разнообразных факторов, сыгравших свою роль в процессе образования планет.

Общую схему развития нашей планетной системы можно описать следующим образом. Около 5 млрд лет назад в протяжённом газопылевом облаке образовалось центральное сгущение — протосолнце, которое медленно сжималось. Другая часть облака, массой примерно в 10 раз меньшей, медленно вращалась вокруг него. По мере сжатия скорость вращения облака увеличивалась, и оно приняло форму диска. В результате столкновения атомов, молекул и пылинок туманность постепенно разогревалась. Этой схемой вполне объясняется различие в химическом составе и массах планет земной группы и планет-гигантов. Дей-



ствительно, по мере разгорания Солнца лёгкие химические элементы (водород, гелий) покидали центральные области облака, уходя к его периферии. Поэтому планеты земной группы сформировались из тяжёлых элементов с малыми примесями лёгких элементов и получились небольшого размера. Из-за большой плотности газа и пыли излучение Солнца слабо проникало к периферии протопланетного облака, где царила низкая температура, и пришедшие газы намерзали на твёрдые частицы. Поэтому далёкие планеты-гиганты сформировались крупными и в основном из лёгких химических элементов.

Процесс формирования планет представляется следующим образом. В дискообразном газопылевом облаке вследствие взаимного столкновения его частиц возникали многочисленные сгущения. Множество мелких сгущений разрушалось от взаимных столкновений, а иные выпадали на крупные сгущения, в результате чего они увеличивались в размерах и уплотнялись, постепенно создавая «зародыши» планет. Неупругие удары при столкновениях сгущений привели к тому, что орбиты «зародышей» планет стали близкими к окружностям. Со временем выжили лишь те наиболее крупные «зародыши», которые располагались далеко друг от друга и не оказывали существенного взаимного гравитационного воздействия, поэтому их орбиты вокруг Солнца стали устойчивыми. Из этих зародышей на протяжении сотен миллионов лет и сформировались большие планеты. Между орбитами Марса и Юпитера, где значительное гравитационное влияние Юпитера препятствовало росту сгущений и нарушало устойчивость их орбит, сформировались малые планеты — астероиды и метеороиды, которые в нашу эпоху часто сталкиваются друг с другом и с планетами. На самой периферии начального облака из остатков лёгких газов и незначительного количества пыли возникло множество комет.

3. Проверка этой весьма правдоподобной гипотезы пока ещё затруднена, так как только сравнительно недавно были обнаружены планетные системы около различных звёзд. При наблюдении в инфракрасном диапазоне длин волн с помощью космических телескопов обнаружили, как полагают, протопланетные облака вокруг некоторых звёзд, например вокруг Веги (α Лиры), Фомальгаута (α Южной Рыбы). Особый интерес представляет открытие больших планет и протопланетных облаков около солнцеподобных звёзд. Таким образом, современная астрономия ставит на наблюдательную основу теорию образования Солнечной системы.

Анализ содержания радиоактивных элементов в земной коре, исследования метеоритов и лунного грунта, а также геологические данные указывают на вероятный возраст Земли — 4,5 млрд лет. Солнце и его планеты начали формироваться около 5 млрд лет назад. Благодаря спокойной эволюции Солнца, умеренно обогревающего Землю, на ней около 3 млрд лет назад зародилась жизнь, которая за этот длительный промежуток времени проэволюционировала в разумную.

Очевидно, формирование планет вокруг Солнца и звёзд на определённом этапе их развития есть закономерный процесс. Поэтому мы вправе полагать, что многие звёзды обладают планетами и на многих из них существует жизнь, в том числе и разумная.

Вопросы для самопроверки

1. В чём суть гипотез Канта и Ланласа?
2. Как определяют возраст Земли?
3. Почему планеты земной группы образовались ближе к Солнцу, чем планеты-гиганты?
4. Есть ли планеты около других звёзд?

§ 72. Использование результатов космических исследований в науке, технике и народном хозяйстве

- ✓ вспомните ход лучей после прохождения линзы.
- ✓ Какие вам известны виды излучений?

1. Современная астрофизика применяет разнообразную и часто технически очень сложную аппаратуру, предназначенную для регистрации электромагнитных волн различных диапазонов.

Земная атмосфера пропускает далеко не все электромагнитные волны, излучаемые небесными телами. Она поглощает гамма-излучение, рентгеновские лучи и ультрафиолетовые лучи с длиной волны $\lambda < 3000$ нм, значительную долю инфракрасного излучения с длиной волны $\lambda > 1000$ нм (оно поглощается главным образом водяными парами и углекислым газом) и радиоволны с длиной волны $\lambda < 1$ мм и $\lambda > 20$ м. Излучение небесных тел, не доходящее до земной поверхности, исследуется с искусственных спутников и орбитальных научных станций, обращающихся вокруг Земли, а также с автоматических межпланетных стан-



Рис. 206

ций, направляемых к другим планетам Солнечной системы. Излучение, проходящее сквозь атмосферу, изучается непосредственно с поверхности Земли при помощи *телескопов* (от греческого «теле» — вдалеке и «скопео» — смотрю). Телескопы для исследования небесных тел в диапазоне видимого света называют оптическими, а в диапазоне радиоволн — **радиотелескопами**.

Существует два основных вида оптических телескопов: зеркальные — **рефлекторы**¹ и линзовые — **рефракторы**. У рефлекторов (рис. 206) объективом, собирающим световые лучи, служит вогнутое зеркало, а у рефракторов (рис. 207) объектив изготовлен из стеклянных линз.

Основное назначение телескопов состоит в том, чтобы собрать как можно больше энергии от небесного тела и различить как можно меньшие детали.

Диаметр объектива определяет **разрешающую способность** (или разрешение) телескопа — возможность видеть отдельно близко расположенные объекты и мелкие детали на поверхности небесного тела. Чем больше диаметр объектива, тем более мелкие детали можно разглядеть в телескоп.

Космическое радиоизлучение впервые было обнаружено в 1931 г., а с 1946 г. началась установка в астрономических обсерваториях радиотелескопов для приёма радиоизлучения небесных объектов.

Радиотелескопы (рис. 208) состоят из приёмной антенны и чувствительного радиоприёмника. Мощность доходящего до Земли радиоизлучения подавляющего большинства небесных тел настолько мала, что для его приёма необходимы антенны с полезной площадью в тысячи и десятки тысяч квадратных метров.

Самый крупный в Европе стационарный радиотелескоп установлен вблизи станицы Зеленчукской Ставропольского края. Его отражатель собран из 900 плоских металлических зеркал размером $2 \times 7,4$ м и имеет вид замкнутого кольца диаметром 600 м.

¹ Рефлектор — от латинского reflectere — «отражать», поскольку зеркало отражает лучи; рефрактор — refractus — «преломлённый», так как линзы преломляют световые лучи.





Рис. 207



Рис. 208

Большое значение для изучения структуры и состава небесных тел имеет спектральный анализ.

На рисунке II на форзаце показаны солнечный и звёздный спектры — сплошной спектр с тёмными линиями поглощения. Каждая линия соответствует определённому химическому элементу, находящемуся в атмосфере Солнца и звёзд.

Так как планеты освещаются Солнцем, то их спектры почти идентичны солнечному, а небольшие отличия являются следствием частичного поглощения солнечных лучей поверхностями планет. Если же планета окружена атмосферой, то в её спектре появляются линии и полосы поглощения, свойственные химическому составу атмосферы.

Распределение энергии в спектре излучения небесного тела определяется его температурой и вызывает ощущение цвета этого тела. Так, звёзды голубого цвета, как Спика (α Девы), имеют температуру поверхности около 20 000 К, белого цвета, как Сириус (α Большого Пса), — около 10 000 К, жёлтого цвета, как наше Солнце, — около 6000 К, оранжевого цвета, как Арктур (α Волопаса), — 4200 К, а красного, как звезда Бетельгейзе (α Ориона), — 3000 К.

2. Мы уже привыкли к тому, что телевидение работает там, где есть телебашня. Приём телевизионного сигнала осуществляется в пределах прямой видимости телебашни, чем выше она, тем на большей площади доступен приём телепередач. Поэтому стремятся сделать телебашню как можно выше. Такое сложное и высокое сооружение, как Останкинская телебашня,

высотой свыше полукилометра, обеспечивает уверенный приём телепрограмм в Москве и прилегающих районах Московской области, дальше используют разветвлённую сеть ретрансляторов, небольших телебашен, вещающих на небольшой район области и т. д. А как обеспечить телевизионными программами всю огромную территорию России? Это стало возможным с помощью искусственных спутников Земли, которые, как высокие телебашни, посылают телесигнал на гигантскую территорию, с которой этот спутник виден. Итак, с телевизионной студии, например в Останкино, сигнал посылают на спутник, а он ретранслирует его на всю огромную территорию прямого видения спутника. Первые такие спутники теле- и радиосвязи «Орбита», «Москва», «Экран» начали работать в 1965 г.

В настоящее время наиболее популярная система телепередающих спутников — *геостационарные* спутники. Период обращения этих спутников равен периоду вращения Земли вокруг своей оси — 24 ч. Плоскость их круговой орбиты лежит в плоскости земного экватора, а высота над поверхностью Земли около 36 000 км (радиус орбиты $\approx 42\,500$ км).

Геостационарные спутники удобны тем, что они всегда висят над одной и той же точкой земной поверхности. Они как бы жёстко связаны с Землёй, как будто одна высокая телебашня с высотой 36 000 км, установленная на экваторе. Поэтому, один раз направив свою антенну на этот спутник, уже не надо беспокоиться о том, что он сместится, и нет необходимости поворачивать антенну за ним. Три таких спутника, разнесённые по орбите на 120° , обеспечивают приём телевидения по всему земному шару. Сейчас в Москве приём сигналов с такого геостационарного спутника осуществляет компания «НТВ+» и другие компании, благодаря этому мы можем смотреть телепередачи студий стран Европы и Америки.

3. Большую помощь в прогнозе погоды оказывают метеорологические спутники, позволяющие из космоса получать информацию об облачном покрове, ветрах, тайфунах и циклонах. Так, система из двух искусственных спутников Земли «Метеор-2», находящихся на круговых околополярных орбитах высотой 900 км над поверхностью Земли, позволяет дважды в сутки собирать метеорологическую информацию со всей поверхности Земли. Эти спутники заменяют большое число наземных метео-



станций. Мы уже привыкли по телевизору смотреть снимки из космоса, когда слушаем прогнозы погоды.

4. Особое место при изучении ресурсов Земли принадлежит мероприятиям по охране природы. В связи с этим космическим средствам контроля в охране природы принадлежит особое место, так как только с их помощью можно оперативно следить за всей поверхностью Земли и оценивать вред, наносимый окружающей среде в каждом отдельном случае.

Спутниковый контроль позволяет оперативно регистрировать изменения, происходящие с растениями, наблюдать за всходами посевов, следить за ростом возделываемых культур, определять сроки их уборки, распространение вредителей.

5. Вывод телескопов за пределы земной атмосферы сильно расширил возможности астрономии в изучении космического пространства. Так, первые телескопы, запущенные в космическое пространство, показали, что наше Солнце является мощным источником ультрафиолетового и рентгеновского излучений. Особенно увеличивается интенсивность этих излучений во время вспышек на Солнце. Ультрафиолетовое и рентгеновское излучения солнечных вспышек вызывают значительные возмущения в атмосфере Земли, влияют на погоду и самочувствие людей. По этой причине в космическом пространстве сейчас летают несколько спутников, которые непрерывно следят за Солнцем, предупреждая людей о вспышках на нём.

Рентгеновские и ультрафиолетовые телескопы изучают звёзды и галактики. Благодаря им астрономам удалось узнать много нового о рождении, жизни и смерти звёзд. Исследование далёких галактик со спутников показало, что их рентгеновское и гамма-излучения связаны с большими чёрными дырами, находящимися в их ядрах, позволило по-новому посмотреть на природу этих гигантских звёздных островов во Вселенной.

Оказалось, что и оптические телескопы, вынесенные за пределы земной атмосферы, позволяют увидеть то, что с Земли не удаётся увидеть. В настоящее время на орбите вокруг Земли вращается космический телескоп им. Хаббла. Диаметр его объектива 2,4 м, но по качеству изображения, получаемого с его помощью, он существенно лучше всех больших наземных телескопов.

6. Благодаря космическим аппаратам осуществлены посадки на Луну, на планеты Марс и Венера, сфотографированы и исследованы большинство планет Солнечной системы. Многие



астрономы считают, что благодаря космическим исследованиям приоритет в изучении планет Солнечной системы переходит к таким наукам, как геология, геофизика и геохимия. Недалеко то время, когда человек достигнет планеты Марс и коснётся её поверхности. И всё это будет определяться развитием космонавтики и космических исследований.

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите типы телескопов.
2. Приведите примеры использования искусственных спутников Земли в народном хозяйстве.
3. Почему выгодно использовать для телевидения искусственные спутники Земли?
4. Что такое геостационарный спутник?
5. Почему астрономы вынуждены запускать телескопы за пределы земной атмосферы?

Темы докладов и проектов

1. Созвездия в древнегреческой мифологии.
2. Исследования Луны космическими аппаратами.
3. Законы Кеплера и элементы орбит планет.
4. Обнаружение и исследование планетных систем.
5. Крупнейшие обсерватории и телескопы мира.
6. Исследование галактик с космических обсерваторий в различных диапазонах длин волн.



Основное в главе

1. Вы познакомились с небесными телами, существующими во Вселенной (рис. 209).
2. Планеты Солнечной системы делятся на две большие группы: планеты земной группы и планеты-гиганты (табл. 28). К карликовым планетам относится Плутон. Планеты земной группы имеют меньшие размеры и массы, большие плотности, медленнее вращаются вокруг оси, расположены ближе к Солнцу, чем планеты-гиганты. Планеты-гиганты имеют кольца, много спутников и протяжённые атмосферы большой плотности.



Рис. 209

Таблица 28

<i>Планеты земной группы</i>	<i>Планеты-гиганты</i>
Меркурий	Юпитер
Венера	Сатурн
Земля	Уран
Марс	Нептун

Заключение

Вы изучили различные физические явления: механические, тепловые, электромагнитные, квантовые. Физические явления происходят с объектами мегамира (взаимодействие и движение планет, звёзд и других небесных тел, их природа и эволюция), объектами макромира и объектами микромира (взаимодействие и движение объектов, размеры которых меньше 10^{-10} м). При этом явления мегамира, макромира и микромира тесно связаны между собой. Так, процессы, происходящие в недрах Солнца и других звёзд, подчиняются законам микромира; взаимодействие астрономических объектов описывается законами механики; такие явления макромира, как нагревание тел, действие жидкости на погружённое в неё тело, проводимость различных сред объясняются с точки зрения теории строения вещества.

Вы изучили не только законы классической физики (законы Ньютона, Ома, Кулона, Ампера и др.), но и некоторые понятия и идеи современной физики: получили представления о фотоне, о корпускулярно-волновых свойствах света и частиц вещества, познакомились со статистическим и квантовым описанием поведения частиц вещества. В результате физика-наука предстала перед вами как развивающаяся, эволюционирующая система знаний. Понятно, что без практического применения наука «мертва». Внедрение достижений науки в практику, с одной стороны, позволяет судить о справедливости полученных научных результатов, а с другой стороны, способствует развитию материального производства и научно-техническому прогрессу.

Во все времена одним из важных стимулов развития науки являлись практические потребности человека. Научные разработки получали свою реализацию в технических устройствах и технологиях, развитие которых позволяло создавать новую экспериментальную технику, с помощью которой проводились более точные и сложные эксперименты, приводящие к новым открытиям. Таким образом, развитие науки и развитие техники связаны между собой, оказывают друг на друга взаимное влияние. С развитием науки и техники связано развитие общества.

В истории развития науки и техники выделяют несколько научно-технических революций (НТР). Научно-техническая революция характеризуется превращением науки в производительную силу и соответствующим этому коренным изменением материально-технической базы общественного производства, его формы и содержания, характера труда.

Как вы уже знаете, *первая научно-техническая революция* относится к XVIII в. и связана с изобретением в 1769 г. английским учёным **Джеймсом Уаттом** (1736—1819) паровой машины (рис. 210). Её предпосылками послужили исследования в области термодинамики. В паровой машине Уатта поршень передвигался благодаря давлению на него пара.

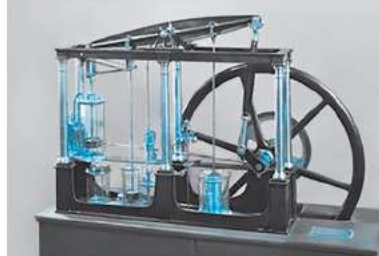


Рис. 210

Увеличивая давление пара в цилиндре паровой машины, можно было добиться большей мощности, не увеличивая её размеров. Таким образом, Уатт предложил способ создания небольших паровых машин, которые в скором времени изменили всё общественное производство.

Проект первой в России паровой машины, способной непосредственно приводить в действие рабочие механизмы, предложил в 1763 г. российский изобретатель **Иван Иванович Ползунов** (1728—1766), работавший механиком на Колывано-Воскресенских горнорудных заводах Алтая. Проект попал на стол к начальнику заводов, который одобрил его и отослал в Петербург, откуда вскоре пришёл ответ: «...Сей его вымысл за новое изобретение почесть должно». Ползунов приступил к строительству мощной паровой машины, приводившей в движение огромную воздуходувку (рис. 211). Изобретение парового двигателя привело к развитию транспорта, к появлению паровозов, пароходов.

Дальнейшее развитие энергетики, транспорта, промышленного и сельскохозяйственного производства связано с научными достижениями в электродинамике: обнаружение и исследование движения проводника с током в магнитном поле, явления электромагнитной индукции, что привело к изменению источников энергии и электрификации промышленности, транспорта и быта. Основой процесса электрификации послужило изобретение немецким электротехником **Вернером фон Сименсом**

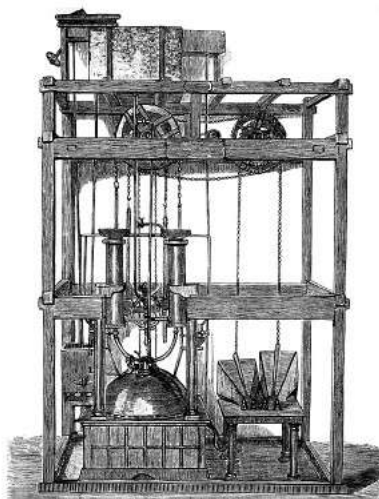


Рис. 211



Рис. 212

(1816—1892) динамо-машины (электрического генератора), электрической железной дороги, американским инженером **Томасом Эдисоном** (1847—1931) генератора, трансформатора и другой электроаппаратуры. Именно Эдисону принадлежит создание первого практически действующего телефонного микрофона, способа усиления звука в телефоне с помощью индукционной катушки, изобретение фонографа (рис. 212). Он же изобрёл электрическую лампочку накаливания с угольной нитью в баллоне (рис. 213), из которого откачан воздух, что позволило создать систему освещения с использованием большого числа ламп. На свои изобретения Эдисон получил 1093 патента в США и около 3000 патентов в других странах мира.

Принципиальное значение для развития промышленного производства имело изобретение двигателя внутреннего сгорания немецкими учёными **Рудольфом Дизелем** (1858—1913) и **Николаусом Отто** (1832—1891). Первый функционирующий одноцилиндровый двигатель (рис. 214) был создан Дизелем в 1897 г. КПД двигателя составлял 26,2% при массе 5 т. Это намного превосходило существующие двигатели Отто (рис. 215) с КПД 20% и судовые паровые турбины с КПД 12%. Поскольку сильно сжимать в цилиндре горючую смесь нельзя, так как она может воспла-

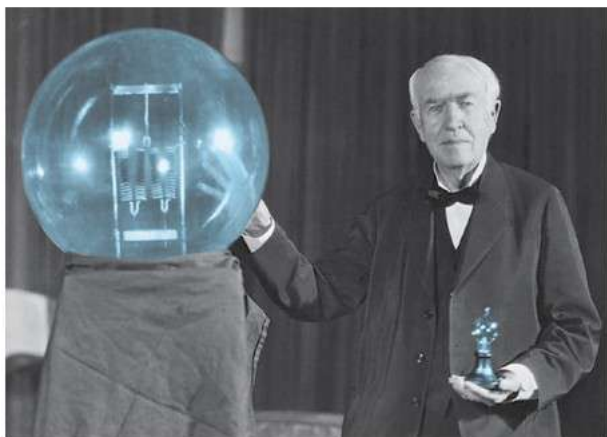


Рис. 213

мениться, Дизель предложил сжимать чистый воздух и впрыскивать в него жидкое топливо. Температура сжатого воздуха достигала $600\text{--}650\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом топливо самовоспламенялось, что и позволило повысить КПД двигателя.

Существенное изменение претерпела организация производства. Американский инженер **Фредерик Тейлор** (1856—1915) создал систему научной организации труда на конвейере, позволившую бесперебойно производить стандартизованные изделия, что привело к существенному росту производительности труда. Изменилась и структура производства: преимущественное развитие получили производство средств производства и тяжёлая промышленность — металлургия, машиностроение, добывающая промышленность.

Началом *второй научно-технической революции* считают 40—50-е гг. XX в. Её предпосылками явились научные открытия первой половины XX в. в области электроники, ядерной физики и квантовой механики, достижения кибернетики, микробиологии, биохимии, химии полимеров.

К основным открытиям и изобретениям этих лет относятся:

40-е гг. — телевидение, транзисторы, компьютер, радар, ракеты, атомная бомба;

50-е гг. — водородная бомба, искусственные спутники Земли, реактивный пассажирский самолёт, электроэнергетическая установка на базе ядерного реактора, станки с числовым программным управлением (ЧПУ);

60-е гг. — лазеры, интегральные схемы, спутники связи, скоростные экспрессы;

70-е гг. — микропроцессоры, волоконно-оптическая передача информации, промышленные роботы, биотехнология;

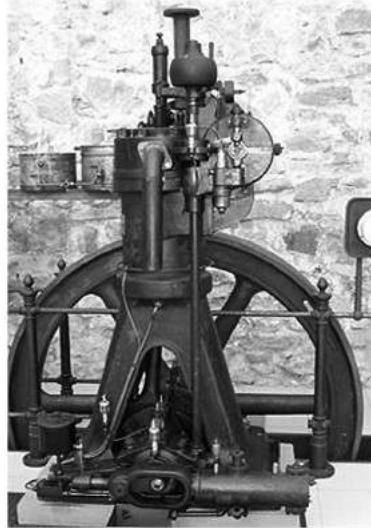


Рис. 214



Рис. 215

80-е гг. — сверхобъёмные интегральные схемы, сверхпрочная керамика, компьютеры нового поколения, генная инженерия, термоядерный синтез.

Следствием внедрения этих научных достижений явились автоматизация производственных процессов, управление ими с помощью электронных устройств, создание новых материалов с заданными свойствами, успешное освоение космического пространства. Особое значение имело появление новых источников энергии, развитие атомной энергетики. Всё это привело к резкому повышению технического уровня развития производства и превращению науки в непосредственную производительную силу, что является характерной особенностью второй НТР.

Современный этап развития науки и техники характеризуется возрастанием роли информации во всех сферах жизни общества. Этому способствовало создание персонального компьютера, мощных телекоммуникационных систем, информационных сетей, спутниковой связи. Поэтому в XXI в. происходит переход от постиндустриального общества к информационному. Отличительной чертой информационного общества является наличие развитых информационных технологий во всех сферах жизни общества.

Благодаря этому ускоряется процесс внедрения научных разработок в производство, усиливается процесс интеграции науки и производства, что в свою очередь стимулирует инновационные поиски в науке.

Одной из характерных особенностей *современного этапа научно-технической революции* является развитие наукоёмких технологий. Если в XX в. развивались высокие технологии в авиации, космонавтике, ядерной энергетике, электронике, а затем микроэлектронике и информатике, то начало XXI в. ознаменовалось созданием новых направлений в науке и технике — биотехнологий и нанотехнологий.

Биотехнология применяет современные знания и технологии для изменения генетического материала растений, животных и микробов для получения на этой основе новых результатов. Успех биотехнологических исследований становится возможным благодаря взаимодействию биологии с физикой и техникой, особенно с материаловедением и микроэлектроникой.

Основу современной научно-технической революции составляют нанотехнологии. Исследования в области нанотехнологий стали возможны благодаря развитию химии и физики, в частно-

сти материаловедения, а также благодаря появлению микроскопов, позволяющих наблюдать наноразмерные объекты.

Область применения нанотехнологий в настоящее время уже достаточно широка, так же как огромны перспективы их использования в области переработки и передачи информации, в области медицины и биологии, материаловедения, в военном деле и др.

Одним из перспективных направлений физических исследований являются исследования в области физики высоких энергий. В этой связи внимание учёных в последние годы приковано к *Большому адронному коллайдеру* (БАК) (рис. 216). БАК — циклический ускоритель элементарных частиц, расположенный в тоннеле длиной 27 км на глубине от 50 до 175 м на границе Франции и Швейцарии недалеко от Женевы.

Принцип действия БАК заключается в следующем. В коллайдер вводятся элементарные частицы — протоны, которые собираются в пучки. Под действием электромагнитного поля положительно заряженные протоны разгоняются по круговым орбитам во встречных направлениях до фантастической скорости — лишь на 0,000002% меньше скорости света. При соударении протонов выделяется очень большая энергия, резко возрастает температура, и протоны должны распасться на минимально возможные составляющие.

Таким образом, исследования с помощью БАК позволят учёным проникнуть внутрь материи и ответить на ряд вопросов, на которые существующие экспериментальные средства ответа не дают. Прежде всего, это вопрос о происхождении Вселенной, о том, что такое масса вещества, рождение и судьба вещества и антивещества.



Рис. 216

Ответы к заданиям

Задание 1. 1. а) 800 м; б) 400 м. 4. 40 м; 0. 5. 3,5 м; 0,5 м.

Задание 2. 1. 4 м; 8 м; 1 м/с; $x = 4 + t$ (м). 2. 1,5 м/с; 6 м/с; -4,5 м/с; $x_1 = 3 + 1,5t$ (м); $x_2 = 3 + 6t$ (м); $x_3 = 9 - 4,5t$ (м). 3. 3 м/с; -2 м/с; 9 м; -6 м. 4. 9,6 км; 2,4 км. 5. 5 мин. 6. 6 с; 120 м.

Задание 3. 3. 8 м; 0; 5 м. 4. 45 м/с; 5 м/с.

Задание 4. 1. 40 км/ч; 0; 80 км/ч; 60 км/ч. 2. 58,3 км/ч. 3. 60 км/ч.

Задание 5. 1. $\approx 0,17$ м/с². 2. 20 м/с. 3. 1 м/с². 4. 4 м/с.

Задание 6. 4. 2 м/с²; -3 м/с².

Задание 7. 1. $\approx 1,2$ км; $\approx 1,2$ км. 2. 300 м; 320 м. 3. 35 м; 35 м. 4. 112,5 м. 5. 40 с; 560 м.

Задание 8. 1. 2 с; 20 м/с; 15 м; 10 м/с. 3. 5 м; 0; 10 м/с. 4*. 4,8 м/с².

Задание 9. 1. $\approx 0,94$ м/с; 3,14 рад/с. 2. ≈ 57 рад/с; ≈ 9 Гц; 0,11 с; ≈ 5400 . 3. 2,5 см. 4. ≈ 643 м/с². 5. 3,45 м/с².

Задание 11. 1. 0,25 м/с. 2. 90 г.

Задание 12. 1. 2 кН. 2. 13 м/с². 3. 20 с. 4. 1,1 м/с². 6. 16 мН.

Задание 14. 1. $20,5 \cdot 10^{19}$ Н. 2. 1,7 м/с². 3*. $3,3 \cdot 10^8$ м. 4. 3,6 км/с.

Задание 15. 1. 480 Н. 2. 2 кН. 3. 2,4 Н; 5,6 Н.

Задание 16. 1. 0,5. 2. 0,03; 6 Н. 3. 1,1 м/с²; 2,2 Н; 0,45 Н. 4. 21 кН; 6 кН; 12 кН.

Задание 17. 1. $100 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. 2. $100 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$.

3. а) $30\,000 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$; б) 0; в) $60\,000 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. 4. $0,5 \text{ м/с}$.

5. 4 м/с .

Задание 18. 1. $1,7 \text{ кДж}$. 2. 1950 Дж . 3. $0,16 \text{ Дж}$. 5. $1,8 \text{ кН}$.

Задание 19. 1. 5 Дж ; 10 Дж ; 15 Дж . 2. $0,8 \text{ Дж}$; $0,2 \text{ Дж}$; $-0,8 \text{ Дж}$; $-0,2 \text{ Дж}$. 3. 30 Дж . 4. $0,8 \text{ Дж}$.

Задание 20. 1. 480 МДж ; 480 МДж . 2. $4207,5 \text{ МДж}$; $4207,5 \text{ МДж}$; 480 МДж ; $4687,5 \text{ МДж}$. 3. 4 т .

Задание 21. 1. 25 Дж . 2. 6 кДж ; 6 кДж ; 3 кДж ; 3 кДж . 3. 50% .

Задание 23. 1. $0,75 \text{ с}$. 2. 4 Гц . 3. 25 см . 4. $\approx 2,5 \text{ с}$. 5. $\approx 0,63 \text{ с}$; $\approx 1,6 \text{ Гц}$.

Задание 24*. 2. $0,24930 \text{ м}$; $0,24798 \text{ м}$; $0,24889 \text{ м}$; $0,24897 \text{ м}$.

Задание 25*. 1. Уменьшится.

Задание 27. 5. 4 с . 6. $99,8 \text{ Гц}$.

Задание 28. 1. 40° . 3*. max . 4*. min .

Задание 32. 3. $0,25 \text{ Тл}$. 4. $0,4 \text{ Н}$.

Задание 33. 3. Не изменится. 4. $0,02 \text{ Тл}$.

Задание 35. 4. 3 мГн . 5*. $0,25 \text{ Гн}$.

Задание 37. 4. 22 В . 5. 6 ; 2520 .

Задание 40. 3. $2 \cdot 10^7 \text{ Гц}$; $5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$. 4. $0,1 \text{ м}$. 5. $5 \cdot 10^5 \text{ Гц}$.

Задание 45. 3. 6 ; 3. 4. 220 ; 96 . 5. $7,6 \text{ дня}$. 6. $1/4$.

Задание 48. 1. $0,72 \text{ а. е.}$

Задание 50. $6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$.

Задание 52. 1. $\approx 1,5 \cdot 10^4 \text{ лет}$.

Предметный указатель

Альфа-распад 230
Амплитуда колебаний 111
Амплитудная модуляция 201
Астероиды 261, 277

Бета-распад 230

Вебер (единица магнитного
потока) 168

Вес тела 68

Взаимодействие 54

Гелиоцентрическая система
мира 259

Генри (единица индуктивно-
сти) 175

Геоцентрическая система
мира 258

Грей (единица поглощённой
дозы) 246

Движение тела по окружно-
сти с постоянной по модулю
скоростью 44

Детектирование 202

Действующее значение
напряжения 177

— — силы тока 177

Дефект массы 237

Дисперсия света 209

Дифракция механических
волн 130

Длина волны 127

Закон всемирного тяготения
64

— отражения механических
волн 130

— радиоактивного распада
231

— сохранения зарядового
числа 235

— — импульса 81

— — массового числа 235

— — механической энергии
99

— Ньютона

— — второй 59, 79

— — первый 52

— — третий 62

Замкнутая система тел 80

Зарядовое число 228

Затмения лунные 265

— солнечные 264

Звёздные скопления 254

Изотопы 228

Импульс силы 78

— тела 79

Индуктивность проводника
175

Индукционный ток 166

Инертность 55
 Инерция 53
 Интерференция механических волн 131
Квант 218
 Кинетическая энергия 96
 Колебания вынужденные 120
 — гармонические 113
 — свободные 111
 — собственные 116
 Колебательная система 109
 Колебательный контур 191
 Кометы 277
 Конденсатор 187
 Коэффициент полезного действия 100
 — трансформации 179
 Критическая масса 240
Линейная скорость 46
 Линейчатый спектр испускания 222
 Линии электропередачи (ЛЭП) 182
 — магнитной индукции 141
Магнитная индукция 158
 Магнитное поле 140
 — — однородное 142
 Магнитный поток 167
 Масса 55
 Массовое число 228
 Математический маятник 110
 Материальная точка 8
 Мгновенная скорость 24
 Метеориты 279
 Метеоры 279
 Механическая волна 124
 — работа 87
 Механические колебания 109
 Механическое движение 6
 Мощность 91
Невесомость 69
 Нейтрон 227
 Неравномерное движение 22
 Нуклон 227
Перегрузка 69
 Перемещение 9
 Переменный ток 176
 Период колебаний 115
 — обращения 45
 — полураспада 231
 — электромагнитных колебаний 193
 Планетарная модель атома 220
 Планеты внешние 259
 — внутренние 259
 — гиганты 272
 — земной группы 272
 Поглощённая доза излучения 246
 Позитрон 249
 Поперечная волна 125
 Потенциальная энергия 93
 Полная механическая энергия 98
 Постоянные магниты 137
 Правило буравчика 149
 — Ленца 172
 — сложения перемещений 20
 — — скоростей 20
 Принцип независимости действия сил 56
 — относительности Галилея 63
 Продольная волна 125
 Протон 227
 Протонно-нейтронная модель ядра 227
 Пружинный маятник 112

Равнодействующая сила 56
Равномерное прямолинейное движение 11
Равноускоренное движение 25
Радиоактивность 224
Радиоактивный распад 230
Радиотелескоп 284
Реактивное движение 83
Резонанс 121, 195

Самоиндукция 173
Световой год 254
Свободное падение 39
Сидерический (звёздный) месяц 263
Сила 56
— Ампера 158
— внешняя 80
— внутренняя 80
— консервативная 91
— неконсервативная 91
— реакции опоры 68
— тяжести 65
Синодический месяц 264
Система отсчёта 7
— — инерциальная 53
— — неинерциальная 53
Скорость волны 127
— первая космическая 66
— равномерного прямолинейного движения 11
Смещение 111
Созвездия 252
— зодиакальные 253
Спектр поглощения 222
Спектральный анализ 223
Сплошной спектр 222
Средняя скорость 23
— путевая скорость 23

Телескоп-рефлектор 284
Телескоп-рефрактор 284
Тело отсчёта 6
Теорема о кинетической энергии 97
Термоядерная реакция 244
Тесла (единица магнитной индукции) 158
Трансформатор 178

Угловая скорость 46
Уравнение движения 12
Ускорение 26

Фарад (единица ёмкости) 189
Фотон 218
Фотоэффект 217

Центростремительное ускорение 48

Частота колебаний 115
— обращения 45

Электрическая ёмкость 188
Электромагнит 153
Электромагнитная индукция 166
Электромагнитное поле 196
Электромагнитные волны 196
— колебания 193
Элементарные частицы 248
Энергетический выход ядерной реакции 238
Энергия 93
— связи ядра 233
Ядерная реакция 234
Ядерные силы 233

Введение	3
-----------------------	----------

Глава 1. Законы механики

§ 1. Основные понятия механики	6
§ 2. Равномерное прямолинейное движение	11
§ 3. Относительность механического движения	17
§ 4. Скорость тела при неравномерном движении	22
§ 5. Ускорение. Равноускоренное прямолинейное движение	25
§ 6. Графики зависимости скорости от времени при равноускоренном движении	29
§ 7. Перемещение при равноускоренном прямолинейном движении	32
<i>Лабораторная работа № 1</i>	
Исследование равноускоренного прямолинейного движения	37
§ 8. Свободное падение	38
§ 9. Перемещение и скорость при криволинейном движении	43
§ 10. Движение тела по окружности с постоянной по модулю скоростью	44
§ 11. Первый закон Ньютона	50
§ 12. Взаимодействие тел. Масса и сила	54
§ 13. Второй закон Ньютона	57
§ 14. Третий закон Ньютона	60
§ 15. Движение искусственных спутников Земли	64
§ 16. Невесомость и перегрузки	68
§ 17. Движение тела под действием нескольких сил	72
§ 18. Импульс тела. Закон сохранения импульса	77
§ 19. Реактивное движение	83
§ 20. Механическая работа и мощность	87
§ 21. Работа и потенциальная энергия	92
§ 22. Работа и кинетическая энергия	96
§ 23. Закон сохранения механической энергии	98
Основное в главе 1	103

Глава 2. Механические колебания и волны

§ 24. Математический и пружинный маятники	110
§ 25. Период колебаний математического и пружинного маятников	115
<i>Лабораторная работа № 2</i>	
Изучение колебаний математического и пружинного маятников	117
<i>Лабораторная работа № 3*</i>	
Измерение ускорения свободного падения с помощью математического маятника	118
§ 26. Вынужденные колебания. Резонанс	119
§ 27. Механические волны	124
§ 28. Свойства механических волн	129
Основное в главе 2	133

Глава 3. Электромагнитные явления

§ 29. Постоянные магниты	136
§ 30. Магнитное поле	140
<i>Лабораторная работа № 4</i>	
Изучение магнитного поля постоянных магнитов	144
§ 31. Магнитное поле Земли	145
§ 32. Магнитное поле электрического тока	147
§ 33. Применение магнитов	152
<i>Лабораторная работа № 5</i>	
Сборка электромагнита и его испытание	155
§ 34. Действие магнитного поля на проводник с током	156
<i>Лабораторная работа № 6</i>	
Изучение действия магнитного поля на проводник с током	160
§ 35. Электродвигатель	161
<i>Лабораторная работа № 7</i>	
Изучение работы электродвигателя постоянного тока	164
§ 36. Явление электромагнитной индукции	165
§ 37. Магнитный поток	167
§ 38. Направление индукционного тока. Правило Ленца	170

Изучение явления электромагнитной индукции	172
§ 39. Самоиндукция	173
§ 40. Переменный электрический ток	176
§ 41. Трансформатор	178
§ 42. Передача электрической энергии	181
Основное в главе 3	183

Глава 4. Электромагнитные колебания и волны

§ 43. Конденсатор	187
§ 44. Колебательный контур. Свободные электромагнитные колебания	191
§ 45. Вынужденные электромагнитные колебания	194
§ 46. Электромагнитные волны	196
§ 47. Использование электромагнитных волн для передачи информации	199
§ 48*. Свойства электромагнитных волн	204
§ 49. Электромагнитная природа света	206
§ 50. Шкала электромагнитных волн	211
Основное в главе 4	214

Глава 5. Элементы квантовой физики

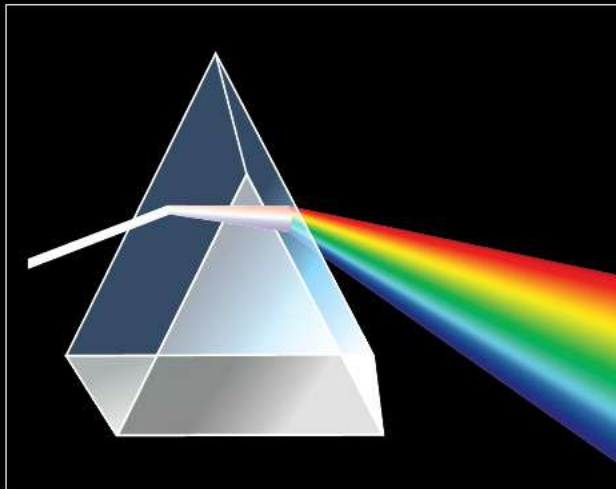
§ 51*. Фотоэффект	216
§ 52. Строение атома	219
§ 53. Спектры испускания и поглощения	222
§ 54. Радиоактивность	224
§ 55. Состав атомного ядра	226
§ 56. Радиоактивные превращения	229
§ 57. Ядерные силы	232
§ 58. Ядерные реакции	234
§ 59*. Дефект массы. Энергетический выход ядерных реакций	237
§ 60. Деление ядер урана. Цепная реакция	238
§ 61. Ядерный реактор. Ядерная энергетика	241
§ 62*. Термоядерные реакции	243
§ 63. Действия радиоактивных излучений и их применение	245
§ 64*. Элементарные частицы	248
Основное в главе 5	250

Глава 6. Вселенная

§ 65. Строение и масштабы Вселенной	252
§ 66. Развитие представлений о системе мира. Строение и масштабы Солнечной системы	257
§ 67. Система «Земля—Луна»	262
§ 68. Физическая природа планеты Земля и её естественного спутника Луны	267
<i>Лабораторная работа № 9</i> Определение размеров лунных кратеров	270
§ 69. Планеты	271
<i>Лабораторная работа № 10</i> Определение высоты и скорости выброса вещества из вулкана на спутнике Юпитера Ио	275
§ 70. Малые тела Солнечной системы	277
§ 71. Солнечная система — комплекс тел, имеющих общее происхождение	280
§ 72. Использование результатов космических исследований в науке, технике и народном хозяйстве	283
Основное в главе 6	288
Заключение	290
Ответы к заданиям	296
Предметный указатель	298

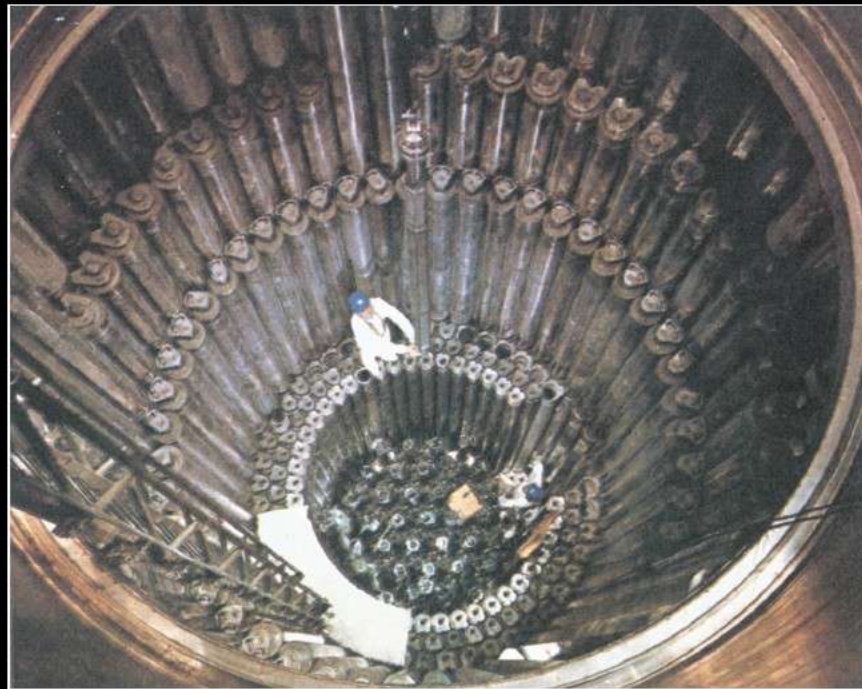
I

ХОД ЛУЧЕЙ В ПРИЗМЕ



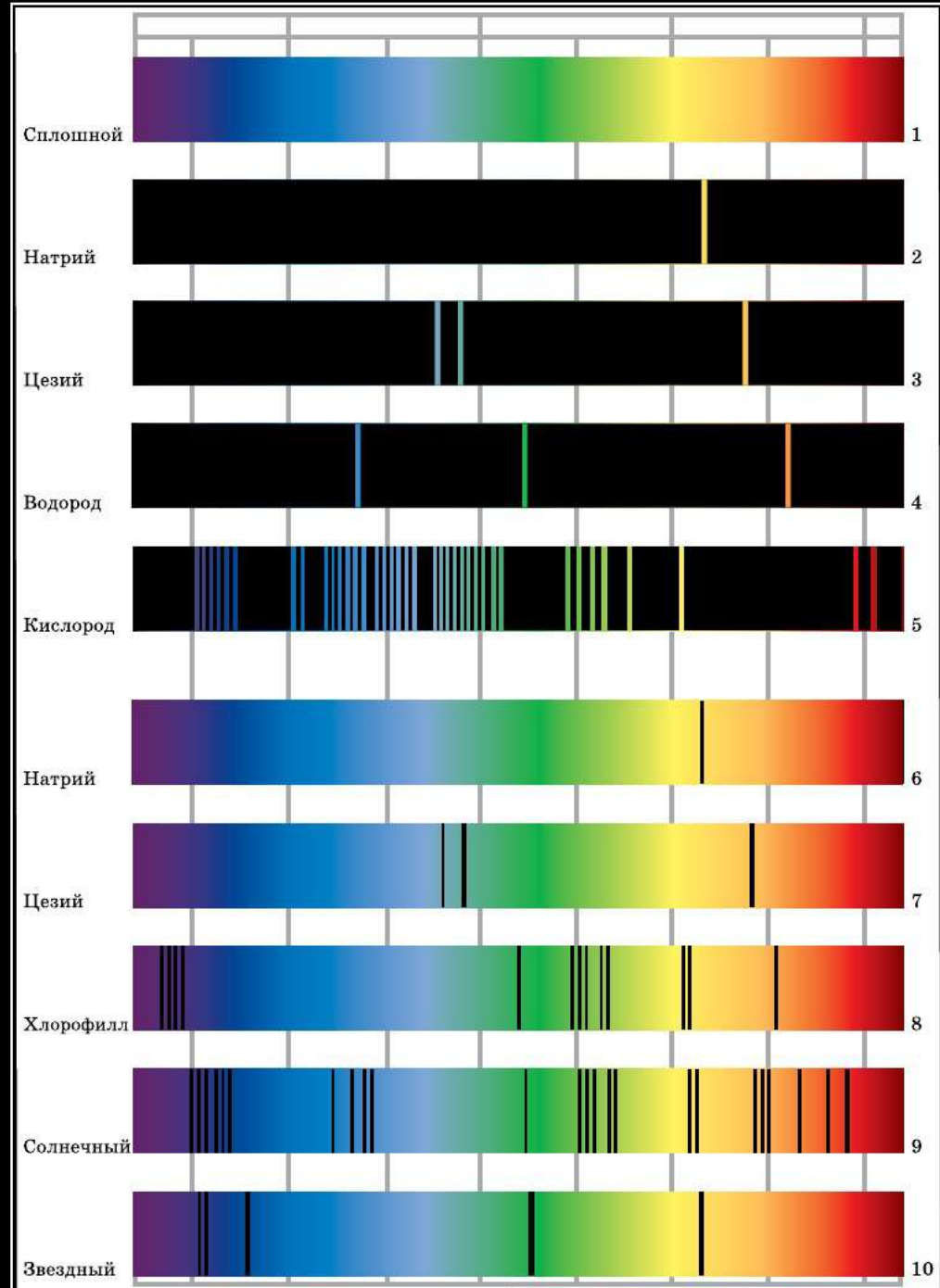
III

АКТИВНАЯ ЗОНА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА



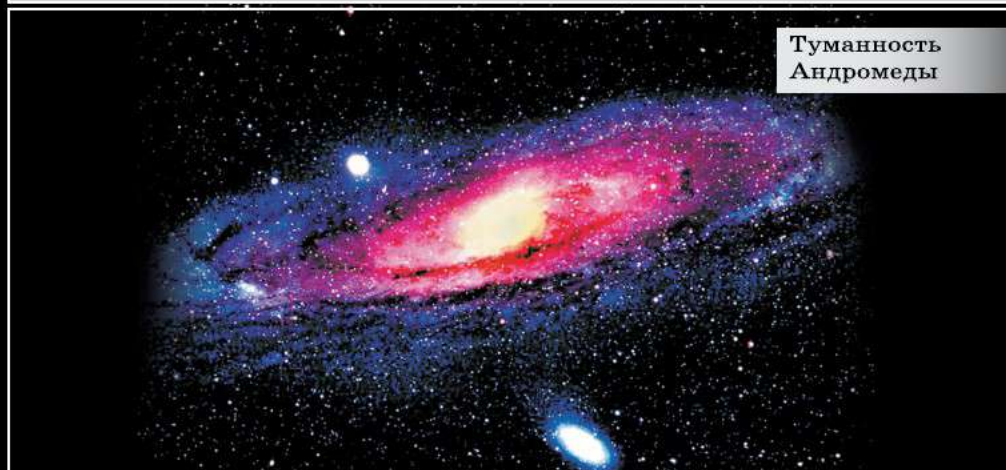
СПЕКТРЫ ИСПУСКАНИЯ (1-5) И СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ (6-10)

II



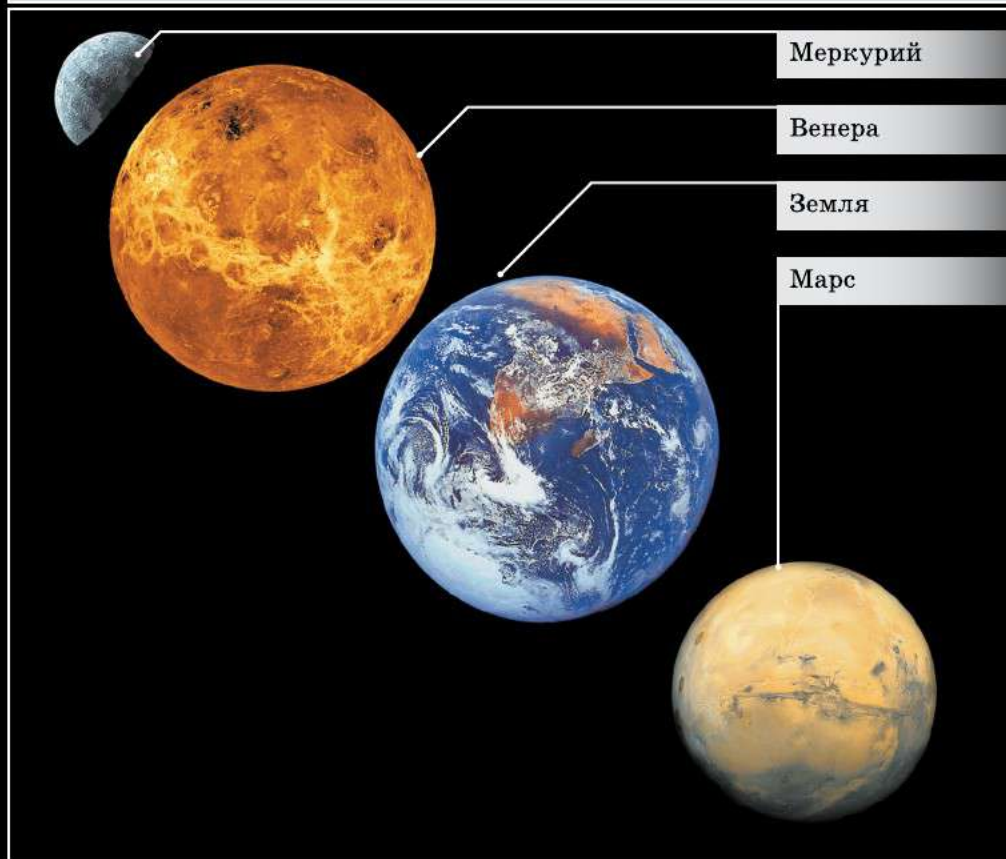
IV

СПИРАЛЬНАЯ ГАЛАКТИКА

Туманность
Андромеды

V

ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ



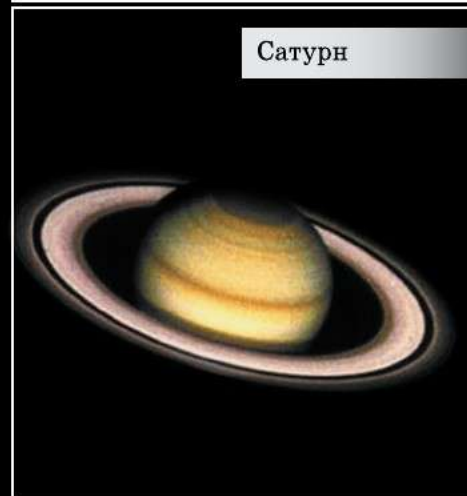
Меркурий

Венера

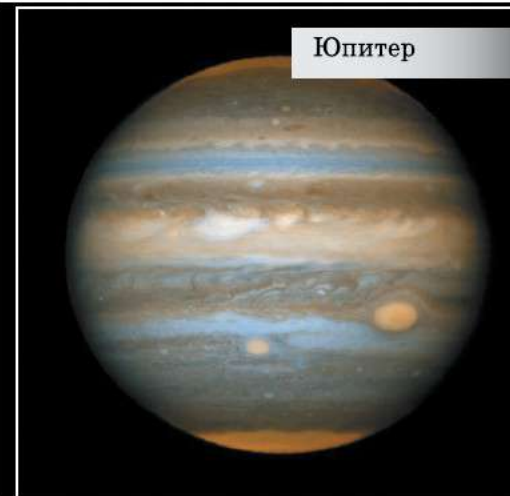
Земля

Марс

НЕКОТОРЫЕ ПЛАНЕТЫ-ГИГАНТЫ



Сатурн



Юпитер

VI

МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Астероид Ида
со спутником
ДактильКомета
Галлея

VII