

Г. Я. Мякишев, М. А. Петрова

ФИЗИКА

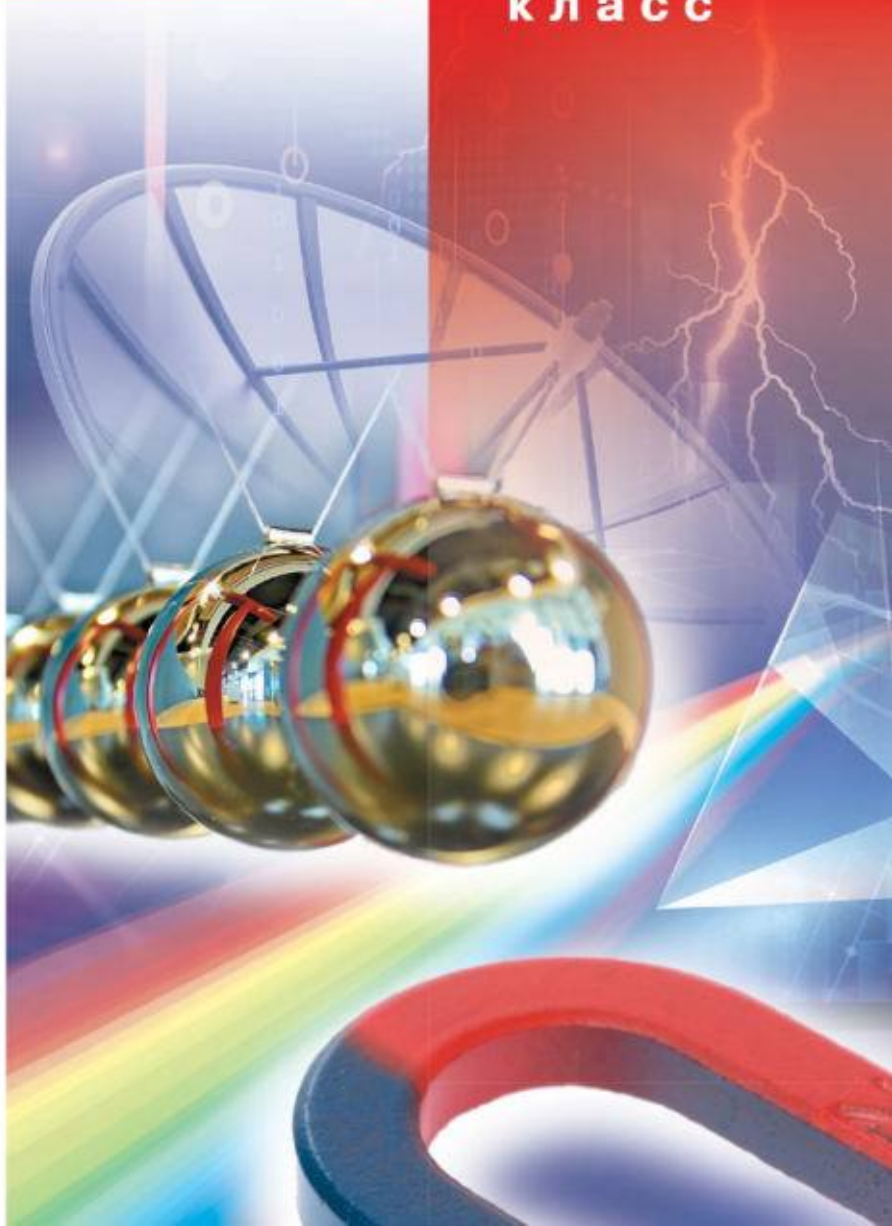


БАЗОВЫЙ УРОВЕНЬ

11

класс

 дрофа



Г. Я. Мякишев, М. А. Петрова

ФИЗИКА

Учебник

Рекомендовано
Министерством просвещения
Российской Федерации

2-е издание, стереотипное

МОСКВА

 дрофа

2020

БАЗОВЫЙ УРОВЕНЬ

11

класс

 | российский
учебник



ЭЛЕКТРОДИНАМИКА (продолжение)

Дальнейшее развитие науки об электричестве связано с изучением процессов, наблюдаемых при движении заряженных частиц. Первые работы в этом направлении связаны с именами итальянских учёных Луиджи Гальвани (1737—1798) и Алессандро Вольта (1745—1827). Гальвани обнаружил так называемое «животное электричество», а Вольта правильно истолковал его опыты и изобрёл первый в истории науки источник постоянного тока. В начале XIX в. электричество и магнетизм рассматривались как различные физические явления, хотя неоднократно высказывалась мысль об их взаимосвязи. В 1820 г. датский учёный Ханс Эрстед (1777—1851) обнаружил действие электрического тока на магнитную стрелку. В том же году французский физик Андре Мари Ампер (1775—1836) экспериментально обнаружил магнитное взаимодействие проводников с токами. Результаты опытов Эрстеда и Ампера наглядно продемонстрировали связь между электрическими и магнитными явлениями.

Основополагающий вклад в развитие электродинамики внёс английский физик Майкл Фарадей (1791—1867). В 1831 г. он экспериментально открыл явление электромагнитной индукции. Кроме того, Фарадей предложил концепцию поля, открыл законы электролиза, исследовал магнитные свойства вещества и др. Обобщая экспериментальные исследования Фарадея по электромагнитной индукции, британский физик Джеймс Клерк Максвелл (1831—1879) создал теорию электромагнитного поля. В её рамках изменяющееся магнитное поле порождает электрическое поле, а изменяющееся электрическое поле, в свою очередь, порождает магнитное поле. Эти изменяющиеся поля существуют нераздельно и представляют собой единое электромагнитное поле. Возмущения электромагнитного поля (электромагнитные колебания) распространяются в пространстве в виде электромагнитных волн.

Продолжение изучения электродинамики связано с рассмотрением законов постоянного тока, протекания электрического тока в различных средах, магнитных явлений, явления электромагнитной индукции, электромагнитных колебаний и волн.

Глава 1

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК



В данной главе мы рассмотрим физические величины, характеризующие постоянный электрический ток, а также способы их измерения. Особое внимание обратим на законы постоянного тока: закон Ома для участка электрической цепи, закон Ома для полной (замкнутой) цепи и закон Джоуля — Ленца. С их помощью мы научимся определять параметры электрических цепей, а также объяснять действия разнообразных электротехнических устройств.

§ 1

УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПРОВОДНИКАХ

ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. Движение заряженных частиц в проводнике мы не наблюдаем. Однако о существовании электрического тока можно судить по различным явлениям, которые он вызывает. Такие явления называют *действиями электрического тока*.

1. Проводник, по которому протекает электрический ток, нагревается. Это *тепловое действие тока*. Именно благодаря тепловому действию тока нагреваются спирали в электроплитке, утюге, раскаляется добела вольфрамовая нить в электрической лампочке.

2. Электрический ток может изменять химический состав проводника. В этом проявляется *химическое действие тока*. Например, при прохождении тока через раствор медного купороса из раствора выделяется медь, а при прохождении тока через подкисленную воду она разлагается на водород и кислород. Химическое действие имеет место лишь при прохождении тока через растворы или расплавы электролитов.

3. Электрический ток оказывает *магнитное действие*. Расположенная вдоль проводника с током магнитная стрелка поворачивается перпендикулярно проводнику (рис. 1.1). Это явление было обнаружено Эрстедом





Рис. 1.1



Рис. 1.2

в 1820 г. Если изолированную проволоку намотать на железный гвоздь, то он становится магнитом и притягивает железные опилки (рис. 1.2).

Магнитное действие тока, в отличие от теплового и химического действий, является основным, так как оно сопровождает ток всегда.

ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК? Дадим строгое определение тому, что называют электрическим током.

Упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц называют электрическим током.

Электрический ток существует лишь тогда, когда происходит *перенос электрических зарядов* с одного места в другое. Если заряженные частицы совершают беспорядочное тепловое движение, как, например, свободные электроны в куске металла, то переноса заряда не происходит (рис. 1.3, а). Электрический заряд перемещается через поперечное сечение проводника в определённую сторону, если наряду с беспорядочным движением электроны участвуют в упорядоченном движении заряженных частиц (рис. 1.3, б). В этом случае в проводнике устанавливается электрический ток.

Электрический ток возникает при упорядоченном движении свободных электронов в металле, положительных и отрицательных ионов в водных растворах и расплавах электролитов (солей, кислот, щелочей), ионов и электронов в газах, при падении заряженных капель дождя, при движении заряженного эбонитового стержня и т. д.



Рис. 1.3

Электрический ток имеет определённое направление. За направление тока принимают направление движения положительно заряженных частиц. Поэтому если ток образован движением отрицательно заряженных частиц, то направление тока считают противоположным направлению движения частиц.

СИЛА ТОКА. Электрический ток в проводнике характеризуется физической величиной — *силой тока*.

Силой тока называют скалярную физическую величину, равную отношению заряда Δq , переносимого через поперечное сечение проводника за промежуток времени Δt , к величине этого промежутка.

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (1)$$

Формула (1) выражает среднее за промежуток времени Δt значение силы тока. Если за любые равные промежутки времени через любое поперечное сечение проводника проходят одинаковые заряды, т. е. если сила тока и его направление не изменяются с течением времени, то электрический ток называют *постоянным*. Сила постоянного тока численно равна заряду, проходящему через поперечное сечение проводника за 1 с:

$$I = \frac{q}{t}.$$

Силу тока удобно иногда считать положительной или отрицательной величиной в зависимости от выбора положительного направления вдоль проводника. Если направление тока совпадает с условно выбранным положительным направлением, то $I > 0$, в противном случае $I < 0$. Часто под силой тока понимают её абсолютное значение, дополнительно указывая направление тока.

В СИ единица силы тока *ампер* (А) является основной. Её устанавливают на основе магнитного взаимодействия двух проводников с токами. Согласно формуле (1) можно записать: $1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/1 с}$.

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И СУЩЕСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. Рассмотрим условия, которые необходимы для возникновения и существования электрического тока.

1. Наличие свободных заряженных частиц (носителей заряда). Таковыми носителями заряда в металлах и полупроводниках являются электроны, в растворах электролитов — положительные и отрицательные ионы, в газах — электроны и ионы.

2. Наличие силы, действующей на заряженные частицы (носители заряда) в определённом направлении. На заряженные частицы, как мы знаем, действует электрическое поле с силой $\vec{F} = q\vec{E}$. Обычно именно электрическое поле внутри проводника является причиной, вызывающей и поддерживающей упорядоченное движение заряженных частиц.

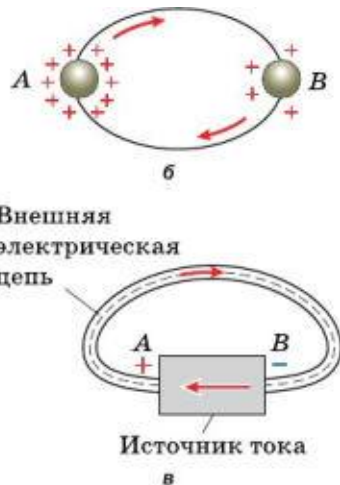
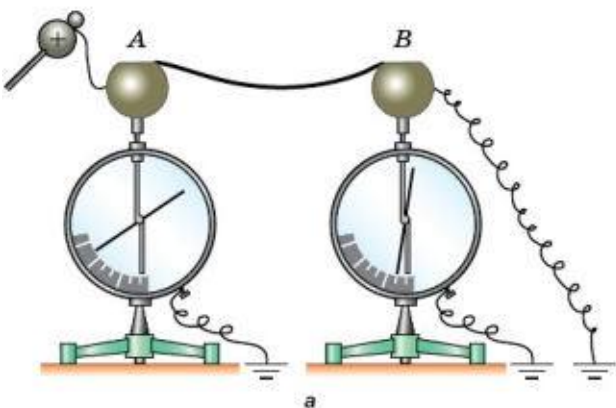


Рис. 1.4

Только в статическом случае, когда заряды покоятся, электрическое поле внутри проводника отсутствует.

Если внутри проводника имеется электрическое поле, то между концами проводника существует разность потенциалов (напряжение). Если она не изменяется с течением времени, то в проводнике устанавливается постоянный ток.

Для того чтобы ток существовал непрерывно в проводнике *AB* (рис. 1.4), необходимо поддерживать на его концах разные потенциалы. Это можно осуществить разными способами. Например, можно было бы непрерывно заряжать тело *A* и разряжать тело *B*. Можно заряжать тело *A* от электрофорной машины, а тело *B* заземлить (рис. 1.4, *a*). Но можно поддерживать непрерывный ток в проводнике, перенося обратно заряды с тела *B* на тело *A* по другому проводнику, образуя для этого замкнутую цепь (рис. 1.4, *б*).

Однако под действием сил этого же электрического поля такой перенос зарядов невозможен, так как потенциал тела *B* меньше потенциала тела *A*. Перенос зарядов с тела *B* на тело *A* может быть совершён только с помощью сил неэлектрического происхождения — *сторонних сил*.

Любые силы, действующие на электрически заряженные частицы, за исключением электростатических (кулоновских) сил, называют сторонними силами.

Наличие таких сил обеспечивает источник тока, включаемый в электрическую цепь. Силы, действующие в источнике тока, переносят заряд от тела с меньшим потенциалом к телу с большим потенциалом, т. е. *источник тока обладает энергией*. Источниками тока являются элек-

трические машины, гальванические элементы, аккумуляторы, генераторы и др. Ряд соединённых между собой проводников вместе с источником тока составляют замкнутую электрическую цепь.

На рисунке 1.4, в приведена схема электрической цепи, в которой находится источник тока. Клеммы A и B источника имеют избыточные заряды — положительный и отрицательный. На внешнем участке цепи положительные заряды движутся под действием сил электрического поля от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом. На внутреннем участке цепи BA перенос зарядов от B к A осуществляется сторонними силами, действующими в источнике тока.

Каким образом возникает электрическое поле внутри проводника при наличии источника тока? Когда проводник присоединяют к клеммам источника, свободные заряды проводника, находящиеся вблизи клемм, смещаются и действуют своим электрическим полем на соседние заряды. Со скоростью, близкой к скорости света, это взаимодействие передаётся по всей цепи, в результате чего вдоль поверхности проводника появляются заряды, создающие внутри него электрическое поле, обеспечивающее существование постоянного тока. Это поле потенциально, как и электростатическое поле.

*** СКОРОСТЬ УПОРЯДОЧЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПРОВОДНИКЕ.** Рассмотрим, как связана сила тока в однородном проводнике с величинами, характеризующими движение заряженных частиц. Выделим в среде, в которой существует электрический ток, очень малый объём в форме прямого цилиндра с площадью поперечного сечения S (рис. 1.5). Цилиндр ориентирован так, что его основания перпендикулярны скорости упорядоченного движения частиц $\vec{v}$. Под *скоростью упорядоченного движения частиц** в малом объёме ΔV (но содержащем много частиц) мы понимаем отношение геометрической суммы скоростей частиц к числу их в этом объёме:

$$\vec{v} = \frac{\sum_{i=1}^N \vec{v}_i}{N}.$$

Средняя скорость хаотически движущихся частиц равна нулю.

Пусть высота цилиндра равна пути $v\Delta t$, проходимому частицами за время Δt . Здесь v — модуль скорости упорядоченного движения частиц.

Тогда все заряженные частицы, находящиеся внутри цилиндра, за время Δt пересекут сечение цилиндра с площадью S . Если концентрация заряженных частиц в среде n , то за время Δt через сечение с площадью S будет перенесён заряд

$$\Delta q = q_0 n v \Delta t S,$$

где q_0 — заряд отдельной частицы.

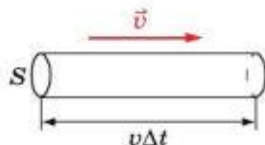


Рис. 1.5

* Эту скорость также называют *скоростью дрейфа частиц*.

Используя формулу (1), найдём силу тока в проводнике:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = q_0 n v S. \quad (2)$$

Таким образом, сила тока в проводнике прямо пропорциональна модулю заряда, переносимого каждой частицей, концентрации частиц, модулю скорости их упорядоченного движения и площади поперечного сечения проводника.

Из формулы (2) следует, что скорость упорядоченного движения частиц в проводнике равна

$$v = \frac{I}{q_0 n S}.$$

Для металлического проводника заряд q_0 , переносимый каждой частицей, — это заряд электрона: $q_0 = e$. Следовательно,

$$v = \frac{I}{enS}.$$

Скорость упорядоченного движения электронов в проводнике достаточно мала. Расчёты показывают, что в медном проводнике, площадь поперечного сечения которого равна 1 мм^2 , при силе тока 10 А эта скорость составляет примерно $7 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$. Она в сотни миллионов раз меньше средней скорости их теплового движения.



1. Приведите примеры действий электрического тока. 2. Что представляет собой электрический ток? 3. Что называют силой тока? 4. Какие условия необходимы для возникновения и существования электрического тока? 5. От каких физических величин зависит скорость упорядоченного движения электронов в металлическом проводнике?



1. Электроны в металлах движутся под действием электрического поля, напряжённость которого равна $\vec{E}$. При этом оно действует на электроны с силой $\vec{F} = q\vec{E}$. Почему же электроны не движутся равноускоренно?

2. В проводнике переменного сечения ($S_1 > S_2$) протекает электрический ток. Сила тока равна I . Одинакова ли напряжённость электрического поля на участках проводника 1—2 и 2—3 (рис. 1.6)? Одинакова ли сила тока на этих участках?

3. Почему, наступая на трамвайный рельс, по которому течёт ток, мы не подвергаем себя опасности поражения током?

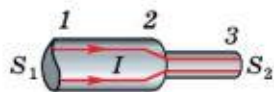


Рис. 1.6



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Сила тока в однородном металлическом проводнике изменяется по закону $I = kt$, где коэффициент пропорциональности $k = 10$ А/с. Определите модуль заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника, в интервале времени от 2 до 5 с.

Дано:

$$I = kt$$

$$k = 10 \text{ А/с}$$

$$t_1 = 2 \text{ с}$$

$$t_2 = 5 \text{ с}$$

$$q = ?$$

Решение:

Построим график зависимости силы тока I от времени t . Поскольку зависимость $I(t)$ линейная и $I(0) = 0$, графиком является прямая, выходящая из начала координат (рис. 1.7)

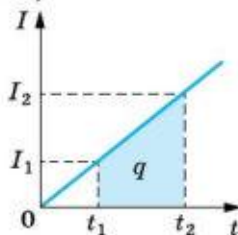


Рис. 1.7

Площадь фигуры под графиком (в данном случае трапеции) численно равна модулю заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника.

$$q = \frac{I_1 + I_2}{2} (t_2 - t_1) = \frac{kt_1 + kt_2}{2} (t_2 - t_1) = k \frac{t_2^2 - t_1^2}{2}.$$

Подставляя числовые данные, получим

$$q = 10 \cdot \frac{5^2 - 2^2}{2} \text{ Кл} = 105 \text{ Кл}.$$

Ответ: $q = 105$ Кл.



УПРАЖНЕНИЯ

1. Определите силу тока в проводнике, если через его поперечное сечение за 10 с проходит $2 \cdot 10^{20}$ свободных электронов.
2. Сила тока в лампочке карманного фонаря равна 0,32 А. Сколько электронов пройдёт через поперечное сечение нити накала за 0,1 с?
3. В электрическую цепь последовательно включены источник тока, амперметр, электрическая лампа и ключ. За 20 с через поперечное сечение нити накала лампы проходит заряд, модуль которого равен 6 Кл. Какую силу тока покажет амперметр?
4. Найдите среднюю скорость упорядоченного движения электронов в однородном металлическом проводе площадью поперечного сечения 5 мм^2 при силе тока в нём 10 А. Концентрация свободных электронов проводимости составляет $5 \cdot 10^{22} \text{ мм}^{-3}$.

ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ. В § 1 было показано, что для существования тока в проводнике необходимо создать разность потенциалов* ($\varphi_1 - \varphi_2$) на его концах. Она определяет силу тока I в проводнике:

$$I = f(\varphi_1 - \varphi_2).$$



Рис. 1.8

Эту функциональную зависимость называют *вольт-амперной характеристикой* проводника. Её установление играет первоочередную роль при изучении явлений, связанных с протеканием электрического тока.

Наиболее простой вид имеет вольт-амперная характеристика металлического проводника. На рисунке 1.8 изображён участок электрической цепи 1—2. Условимся считать положительным направление слева направо. Тогда напряжение U (разность потенциалов) на рассматриваемом участке равно $U = \varphi_1 - \varphi_2$, где φ_1 — потенциал в точке 1 (в начале участка); φ_2 — потенциал в точке 2 (в конце участка). Если $\varphi_1 > \varphi_2$, то $U > 0$ и ток течёт в направлении от точки 1 к точке 2, так как в эту сторону направлены линии напряжённости электрического поля внутри проводника (при этом $I > 0$). Немецкий физик Георг Ом (1787—1854) экспериментально установил прямую пропорциональную зависимость между силой тока в однородном металлическом проводнике и напряжением на его концах:

$$I \sim U. \quad (1)$$

Зависимость (1) можно записать в виде равенства

$$I = GU. \quad (2)$$

Это равенство называют *законом Ома для участка цепи*. В формуле (2) G — коэффициент пропорциональности (*проводимость проводника*), значение которого не зависит от напряжения между концами проводника и от силы тока в нём. Проводимость про-



Г. ОМ

* Напомним, что *разность потенциалов* между двумя точками поля — это скалярная физическая величина, равная отношению работы сил электростатического поля при перемещении пробного заряда из начальной точки в конечную, к этому заряду.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q}.$$

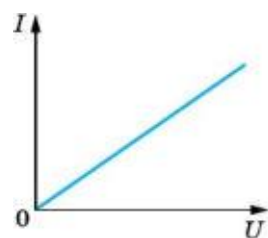


Рис. 1.9

водника зависит от материала, из которого он изготовлен, и его температуры.

Закон Ома можно сформулировать следующим образом.

Сила тока в проводнике прямо пропорциональна проводимости проводника и напряжению (разности потенциалов) на его концах.

На рисунке 1.9 приведена вольт-амперная характеристика однородного металлического проводника при постоянной температуре. Из графика видно, что при данных условиях сила тока в проводнике прямо пропорциональна напряжению на его концах.

СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКА. Физическую величину, обратную проводимости проводника $R = \frac{1}{G}$, называют *электрическим сопротивлением* или просто *сопротивлением*. Следовательно, сопротивление также является характеристикой проводника. Если проводимость G проводника выразить через его сопротивление $G = \frac{1}{R}$, то формула (2) примет вид

$$I = \frac{U}{R}. \quad (3)$$

Равенство (3) представляет собой другую форму записи закона Ома для участка цепи.

Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка.

Подчеркнём, что закон Ома в форме (2) или (3) справедлив только для участка цепи, в котором нет источника тока. Закон Ома для участка цепи выполняется в широких пределах для металлов и их сплавов, практически для любых постоянных напряжений, при применении которых проводник не плавится. Менее широки рамки применения закона Ома для растворов (и расплавов) электролитов и сильно ионизированных газов (плазмы). При больших напряжениях он не выполняется.

Закон Ома для участка цепи позволяет ввести новую электрическую характеристику проводника — сопротивление. Сопротивление проводника представляет собой как бы меру противодействия проводника установлению в нём электрического тока. Сопротивление проводника можно определить с помощью формулы (3):

$$R = \frac{U}{I}.$$

Единицей сопротивления в СИ является ом (Ом). 1 Ом — сопротивление проводника, в котором при напряжении на его концах в 1 В сила тока в нём равна 1 А*.

Термин «сопротивление» употребляют в двух смыслах. Во-первых, электрическое сопротивление — это величина, определяющая силу тока в проводнике при заданном напряжении на его концах. В этом смысле, например, говорят: «Лампа накаливания обладает сопротивлением 400 Ом» или «Провод имеет сопротивление 0,5 Ом». Во-вторых, *резистором* (или сопротивлением) называют устройство, предназначенное для включения в электрическую цепь с целью регулирования, уменьшения или ограничения тока в цепи. В качестве такого устройства может использоваться *реостат* для регулирования силы тока в цепи путём изменения сопротивления. Резисторы применяют в радиоприёмниках, телевизорах и других устройствах.

УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКА. Сопротивление зависит от материала, из которого изготовлен проводник, и от его геометрических размеров. Опыт показывает, что при неизменной температуре сопротивление R однородного металлического проводника постоянного сечения прямо пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади S поперечного сечения проводника:

$$R \sim \frac{l}{S}. \quad (4)$$

Введём коэффициент пропорциональности и запишем зависимость (4) в виде равенства

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (5)$$

Коэффициент пропорциональности ρ численно равен сопротивлению проводника единичной длины и единичного поперечного сечения и называется *удельным сопротивлением проводника*. Удельное сопротивление зависит от рода вещества и его состояния (в первую очередь от температуры). Из формулы (5) следует:

$$\rho = \frac{RS}{l}.$$

Единицей удельного сопротивления в СИ является ом · метр.

$$\frac{1 \text{ Ом} \cdot 1 \text{ м}^2}{1 \text{ м}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

1 Ом · м равен удельному сопротивлению проводника площадью поперечного сечения 1 м² и длиной 1 м, имеющего сопротивление 1 Ом.

* На практике применяют кратные и дольные единицы сопротивления, например мегаом (МОм), килоом (кОм), миллиом (мОм): 1 МОм = 10⁶ Ом; 1 кОм = 10³ Ом; 1 мОм = 10⁻³ Ом.



ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ. Изменение температуры проводника приводит к изменению его сопротивления. С одной стороны, повышение температуры проводника вызывает увеличение числа столкновений упорядоченно движущихся заряженных частиц с частицами, составляющими проводник. В результате уменьшается средняя скорость направленного движения заряженных частиц и соответственно уменьшается сила тока. Следовательно, при повышении температуры сопротивление проводника может увеличиться.

С другой стороны, повышение температуры может привести к увеличению числа свободных заряженных частиц проводника в единице объёма (например, числа ионов раствора электролита). Это приводит к увеличению силы тока в проводнике. Иначе говоря, повышение температуры проводника может привести и к уменьшению его сопротивления.

В зависимости от преобладания одного или другого фактора с увеличением температуры сопротивление проводника может или увеличиваться (металлы), или уменьшаться (растворы электролитов, уголь), или оставаться практически неизменным (специальные сплавы).

Если при температуре 0°C сопротивление проводника R_0 , а при температуре t оно равно R , то относительное изменение сопротивления, как показывает опыт, с большой степенью точности можно считать пропорциональным изменению температуры Δt :

$$\frac{R - R_0}{R_0} = \alpha \Delta t. \quad (6)$$

Коэффициент пропорциональности α называют *температурным коэффициентом сопротивления*. Он характеризует зависимость сопротивления вещества от температуры. В СИ температурный коэффициент сопротивления — *кельвин в минус первой степени* (K^{-1}). Температурный коэффициент сопротивления численно равен относительному изменению сопротивления проводника при его нагревании на 1 K . Для всех металлических проводников $\alpha > 0$ и незначительно меняется с изменением температуры. Если интервал изменения температуры небольшой, то температурный коэффициент можно считать постоянным и равным его среднему значению на этом интервале температур. У чистых (не имеющих примесей) металлов

$$\alpha \approx \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}.$$

У растворов электролитов $\alpha < 0$, так как с ростом температуры их сопротивление уменьшается.

Зависимость удельного сопротивления от температуры можно установить, если в формулу (6) подставить значения $R = \rho \frac{l}{S}$ и $R_0 = \rho_0 \frac{l}{S}$. После математических преобразований найдём:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta t).$$

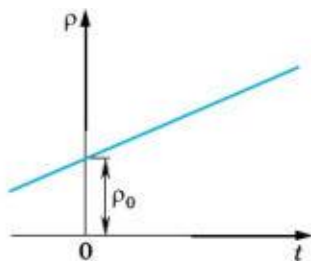


Рис. 1.10

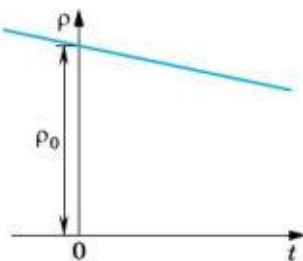


Рис. 1.11

Таким образом, *удельное сопротивление проводника линейно зависит от температуры*. На рисунке 1.10 эта зависимость изображена для металлических проводников, а на рисунке 1.11 — для растворов электролитов.

1. Какой физический смысл имеет проводимость проводника? **2.** Что характеризует сопротивление проводника? **3.** Приведите различные формулировки и формы записи закона Ома для участка цепи. **4.** При каких условиях выполняется закон Ома? **5.** Что называют удельным сопротивлением проводника? **6.** Как зависит сопротивление проводника от температуры?

1. Длину проволоки при её вытягивании увеличили в 2 раза. Как изменилось при этом её сопротивление?
2. Почему птицы могут безопасно усаживаться на провода, находящиеся под высоким напряжением?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Чему равна длина нихромовой проволоки в резисторе, если при включении его в сеть с напряжением 120 В сила тока в нём равна 2,4 А? Площадь поперечного сечения проволоки равна 0,55 мм².

Дано:

$$U = 120 \text{ В}$$

$$I = 2,4 \text{ А}$$

$$S = 0,55 \text{ мм}^2$$

$$\rho = 110 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$l = ?$

СИ:

$$0,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Решение:

Согласно закону Ома для участка цепи

$$R = \frac{U}{I}. \quad (1)$$

Для определения сопротивления нихромовой про-

волоки в резисторе используем соотношение

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (2)$$

Приравнивая правые части выражений (1) и (2), запишем:

$$\frac{U}{I} = \rho \frac{l}{S} \Rightarrow l = \frac{US}{\rho I}.$$

Подставляя числовые данные, получим

$$l = \frac{120 \cdot 0,55 \cdot 10^{-6}}{110 \cdot 10^{-8} \cdot 2,4} \text{ м} = 25 \text{ м}.$$

Ответ: $l = 25 \text{ м}$.



УПРАЖНЕНИЯ

1. Имеются два однородных проводника, один из которых в 8 раз длиннее другого. При этом площадь поперечного сечения второго проводника вдвое меньше площади поперечного сечения первого. Какой из проводников обладает большим сопротивлением и во сколько раз?
2. На рисунке 1.12 приведена зависимость силы тока от напряжения для двух резисторов при постоянной температуре. Какой резистор обладает большим сопротивлением? Найдите сопротивления резисторов.
3. Алюминиевый проводник при температуре 0°C имеет сопротивление, равное $4,25 \text{ Ом}$. Чему равно сопротивление этого проводника при температуре 200°C ?
4. Сопротивление вольфрамовой нити накаливания в холодном состоянии равно 60 Ом , при полном накале её сопротивление равно 636 Ом . Определите температуру накала нити.
5. Нихромовая спираль нагревательного элемента должна иметь сопротивление 30 Ом при температуре 900°C . Какой длины нужно взять проволоку при комнатной температуре (20°C), чтобы изготовить такую спираль, если площадь поперечного сечения проволоки равна $2,96 \text{ мм}^2$? Температурный коэффициент сопротивления нихрома равен $0,0001 \text{ K}^{-1}$.

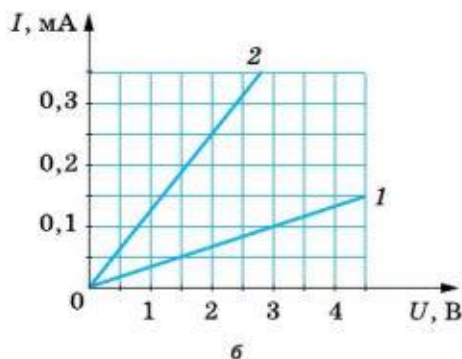
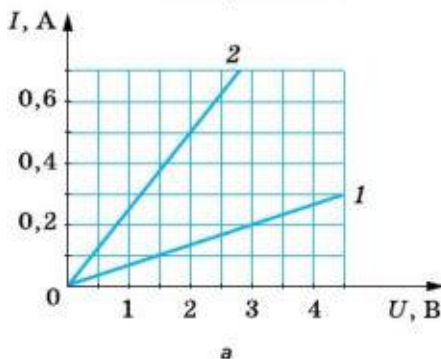


Рис. 1.12

ЯВЛЕНИЕ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ. При температурах, близких к абсолютному нулю, наблюдается явление *сверхпроводимости* — способность вещества пропускать ток, не оказывая ему сопротивления. Открытие этого явления (1911) принадлежит выдающемуся нидерландскому учёному Хейке Камерлинг-Оннесу (1853—1926). Он первым получил жидкий гелий (1908), что позволило ему работать при «гелиевых» температурах (4,2 К) и обнаружить сверхпроводимость.

Результаты экспериментов Камерлинг-Оннеса с ртутью оказались неожиданными. С понижением температуры удельное сопротивление ртути сначала плавно уменьшалось, а при температуре 4,12 К (что несколько ниже температуры кипения жидкого гелия, равной 4,2 К) резко падало и становилось неизмеримо малым. Примерная зависимость удельного сопротивления от температуры для ртути показана на рисунке 1.13.



Х. КАМЕРЛИНГ-ОННЕС

Явление сверхпроводимости состоит в исчезновении сопротивления материала при определённой температуре*, которая называется критической температурой и обозначается T_c .

СВЕРХПРОВОДНИКИ. Проводники, сопротивление которых равно нулю, называют *сверхпроводниками*. Экспериментальным путём было показано, что сверхпроводимость можно разрушить сравнительно слабым магнитным полем. Такое поле называют *критическим*. Кроме того, разрушается сверхпроводимость и током, протекающим через сверхпроводник, если он превышает критическую величину I_c .

Вскоре вслед за ртутью были открыты и другие сверхпроводники, например олово ($T_c = 3,69$ К), свинец ($T_c = 7,26$ К). На рисунке 1.14 показана хронология открытия некоторых сверхпроводников, начиная

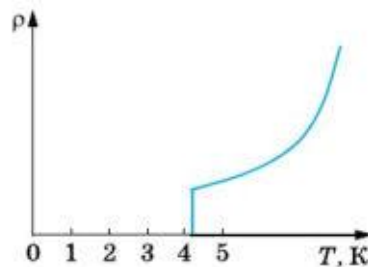


Рис. 1.13

* Отсутствие сопротивления является фундаментальным, но не единственным характерным признаком сверхпроводников. У них наблюдаются также аномалии магнитных, тепловых и других свойств. Поэтому правильнее было бы говорить не только о сверхпроводимости, но и об особом, наблюдаемом при низких температурах состоянии вещества.

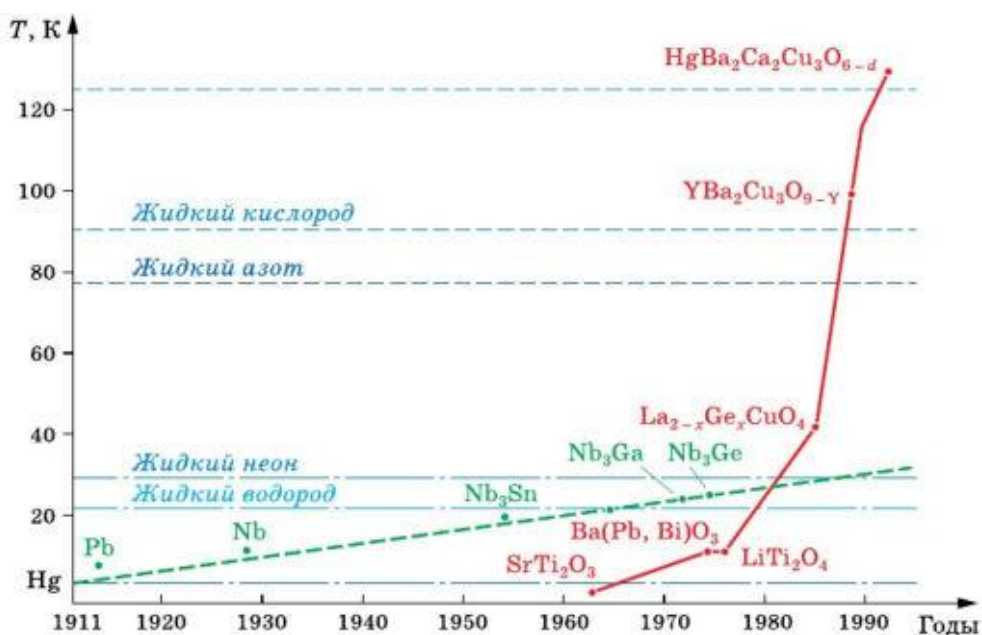


Рис. 1.14

с 1911 г. К настоящему времени известно несколько сотен чистых элементов, соединений, сплавов и керамик, переходящих в сверхпроводящее состояние при определённых условиях.

В 1960—1970-х гг. в научном сообществе шло активное обсуждение вопроса о возможности синтеза высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) — веществ, критическая температура которых выше температуры кипения азота (77 К) при нормальном атмосферном давлении. И вот в 1986 г. Йоханнес Беднорц (р. 1950) и Карл Мюллер (р. 1927) обнаружили способность керамики на основе оксидов меди, лантана и бария переходить в сверхпроводящее состояние при температуре, равной 30 К. За это открытие они были удостоены Нобелевской премии по физике в 1987 г.

В настоящее время рекордсменом по величине T_c является соединение (металлокерамика), имеющее критическую температуру 135 К. При давлении, равном 35 ГПа, его критическая температура возрастает до 164 К, что лишь на 19 К уступает минимальной температуре, зарегистрированной в природных условиях на поверхности Земли в Антарктиде. Однако разработать теоретическую модель, адекватно описывающую наблюдаемые свойства ВТСП, пока не удалось.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ. Необычные свойства сверхпроводников используют для получения сильных магнитных полей, в транс-

портных устройствах на магнитной подвеске, в сверхпроводниковой электронике, в ускорителях заряженных частиц, в установках управляемого термоядерного синтеза и др.

Отсутствие потерь на нагревание при прохождении постоянного тока через сверхпроводник делает привлекательным применение сверхпроводящих кабелей для передачи электроэнергии. Высокотемпературные сверхпроводники, изготовленные на основе медных оксидов, проводят электрический ток без всякого сопротивления при температурах выше 77 К. В Нью-Йорке был проложен первый силовой кабель на основе ВТСП, подающий электроэнергию к району, находящемуся на острове. Охлаждаемый жидким азотом кабель позволяет проводить ток силой в несколько килоампер при напряжении в сотни киловольт.

Сверхпроводящие магниты нашли применение в поездах на магнитной подвеске (рис. 1.15). Например, в Японии действует экспериментальная семикилометровая линия, на которой поезд на магнитной подушке развивает скорость около 500 км/ч.

В рамках классической физики не удалось объяснить механизм сверхпроводимости. Для этого потребовалось использовать представления квантовой физики, с элементами которой вы познакомитесь в конце курса физики старшей школы. Объяснение низкотемпературной сверхпроводимости было дано в середине 1950-х гг. американскими физиками Джоном Бардиным (1908—1991), Леоном Купером (р. 1930) и Джоном Шриффером (р. 1931), а также независимо от них российским учёным Николаем Николаевичем Боголюбовым (1909—1992).

Одной из важнейших задач современной физики является получение сверхпроводников с температурой перехода, близкой к комнатной. Если её удастся решить, то это позволит уменьшить потери энергии в линиях электропередачи, а также увеличить быстродействие компьютеров.



Рис. 1.15

- ?** 1. В чём заключается явление сверхпроводимости? 2. Какие вещества называют сверхпроводниками? 3. В чём состоит физический смысл критической температуры? 4. В каких областях техники используют свойства сверхпроводников? Приведите примеры.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ. РАЗВЕТВЛЁННЫЕ ЦЕПИ. Энергия передаётся от источника тока к потребителям (лампам, электродвигателям, радиоприёмникам и т. д.) по проводам. Источник тока, потребители (как правило, их несколько), соединительные провода и выключатели образуют электрическую цепь. Часто в цепь включают измерительные приборы — амперметры и вольтметры. Все элементы электрической цепи определённым образом соединяют между собой. На практике проводники чаще всего соединяют *последовательно* или *параллельно*.

Очень часто в электрических цепях в одной точке сходятся несколько (больше двух) проводников. Например, при включении вольтметра для измерения напряжения на зажимах лампы (рис. 1.16) в точках 1 и 2 сходятся по три проводника. Такие точки называются *точками разветвления* или *узлами*.

На рисунке 1.17 в точке разветвления A цепи сходятся пять проводников. Обозначим силу тока в них через I_1, I_2, I_3, I_4 и I_5 . Из рисунка видно, что токи I_1, I_2 и I_3 направлены к узлу и за произвольный промежуток времени Δt *приносят* в этот узел суммарный заряд $(I_1 + I_2 + I_3)\Delta t$. Токи I_4 и I_5 направлены от узла и *уносят* за это же время заряд $(I_4 + I_5)\Delta t$. Полное изменение заряда в узле за промежуток времени Δt равно

$$\Delta q = (I_1 + I_2 + I_3)\Delta t - (I_4 + I_5)\Delta t = (I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5)\Delta t.$$

В цепи постоянного тока потенциалы всех точек цепи, а следовательно, и узлов должны оставаться неизменными. Следовательно, в них не могут накапливаться ни положительные, ни отрицательные заряды. В частности, для узла A изменение заряда Δq должно равняться нулю для любого интервала времени, т. е.

$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0.$$

Рассматривая силу тока как алгебраическую величину, имеющую знак «плюс», если ток подходит к узлу, и знак «минус», если ток направлен от узла, последнее равенство можно записать в виде

$$\sum_{i=1}^5 I_i = 0.$$

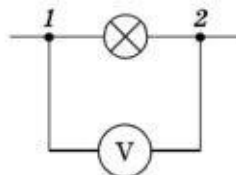


Рис. 1.16

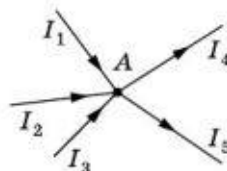


Рис. 1.17

Если в узле сходятся N токов, то

$$\sum_{i=1}^N I_i = 0.$$

Алгебраическая сумма сил токов в проводниках, сходящихся в узле, равна нулю.

Это утверждение называют *первым правилом Кирхгофа* в честь немецкого физика Густава Кирхгофа (1824—1897), который в 1847 г. установил правила расчёта электрических цепей.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ. *Последовательным соединением проводников* называют соединение, при котором конец первого проводника соединяется с началом второго проводника, конец второго проводника — с началом третьего и т. д. На рисунке 1.18 показано последовательное соединение трёх проводников, имеющих сопротивления R_1 , R_2 и R_3 .

При последовательном соединении проводников выполняются следующие соотношения.

1. Сила тока во всех последовательно соединённых проводниках одинакова:

$$I_1 = I_2 = I_3 = I.$$

2. Напряжение (или разность потенциалов) на концах рассматриваемого участка цепи равно сумме напряжений на отдельных проводниках:

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \quad (1)$$

Действительно: $U_1 = \varphi_0 - \varphi_1$; $U_2 = \varphi_1 - \varphi_2$ и $U_3 = \varphi_2 - \varphi_3$. Складывая U_1 , U_2 и U_3 , получим $\varphi_0 - \varphi_3 = U$. В справедливости равенства (1) можно убедиться и непосредственным измерением при помощи вольтметра напряжений на всём участке цепи и на отдельных проводниках.

3. Согласно закону Ома, напряжения на отдельных проводниках равны: $U_1 = IR_1$, $U_2 = IR_2$, $U_3 = IR_3$.

Отсюда следует, что

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}, \quad \frac{U_2}{U_3} = \frac{R_2}{R_3} \Rightarrow \\ \Rightarrow U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3.$$

При последовательном соединении напряжения на проводниках пропорциональны их сопротивлениям.

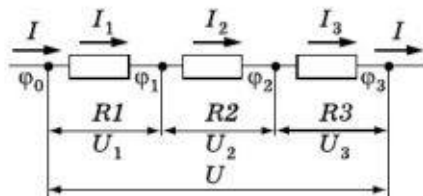


Рис. 1.18

4. Разделив равенство (1) почленно на силу тока I , получим

$$\frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} + \frac{U_3}{I}, \quad \text{или} \quad R = R_1 + R_2 + R_3,$$

где R — сопротивление всего рассматриваемого участка цепи.

Сопротивление участка цепи, состоящего из нескольких последовательно соединённых проводников (общее сопротивление), равно сумме сопротивлений отдельных проводников.

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ. Параллельным соединением проводников называют соединение, когда одни концы всех проводников соединяются в один узел (A), а другие концы — в другой узел (B) (рис. 1.19). При параллельном соединении различают *ветви* — отдельные проводники между узлами, *разветвление* — часть цепи между двумя узлами и *неразветвлённую часть цепи*, лежащую вне разветвления.

При параллельном соединении выполняются следующие соотношения.

1. Напряжения на всех ветвях и на разветвлении одинаковы, так как все они равны разности потенциалов точек A и B цепи:

$$U_1 = U_2 = U_3 = U = \phi_A - \phi_B.$$

2. Согласно первому правилу Кирхгофа, можно записать:

$$I = I_1 + I_2 + I_3. \quad (2)$$

Сила тока в неразветвлённой части цепи равна сумме сил токов в ветвях.

3. Согласно закону Ома для участка цепи,

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad I_3 = \frac{U}{R_3}.$$

Отсюда следует, что $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}, \quad \frac{I_2}{I_3} = \frac{R_3}{R_2}.$

Силы токов в ветвях обратно пропорциональны сопротивлениям этих ветвей.

4. Сопротивлением разветвления R называют сопротивление такого проводника, которым можно заменить разветвление без изменения силы тока в неразветвлённой части цепи и напряжения между узлами. Используя закон Ома, заменим в равенстве (2) значения сил токов:

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}.$$

Разделив обе части равенства на U , получим

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$

Величина, обратная сопротивлению разветвления, равна сумме величин, обратных сопротивлениям отдельных ветвей.

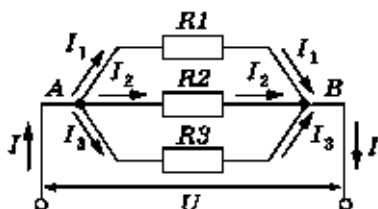


Рис. 1.19

Учитывая, что $\frac{1}{R} = G$, можно записать:

$$G = G_1 + G_2 + G_3.$$

Проводимость разветвления равна сумме проводимостей отдельных ветвей.

* Отметим, что сопротивление разветвления меньше наименьшего из сопротивлений его ветвей. В самом деле, пусть сопротивление i -й ветви является наименьшим, тогда из равенства

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_i} + \dots$$

следует, что $\frac{1}{R} > \frac{1}{R_i}$ (сумма больше каждого из отдельных слагаемых).

Отсюда $R < R_i$.

Если разветвление состоит из двух ветвей, то

$$\begin{aligned} \frac{1}{R} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \\ R &= \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \end{aligned}$$

Если сопротивления отдельных ветвей равны между собой:

$$\begin{aligned} R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_n = r, \text{ то} \\ \frac{1}{R} = \underbrace{\frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \dots + \frac{1}{r}}_{n \text{ раз}} = \frac{n}{r}. \end{aligned}$$

$$R = \frac{r}{n}.$$

Общее сопротивление n одинаковых, параллельно соединённых проводников равно сопротивлению одного проводника, делённому на их число.

СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ. Смешанным соединением проводников называют соединение в цепи, в которой имеются и последовательное, и параллельное соединения проводников. На рисунке 1.20 в качестве примера приведена схема смешанного соединения проводников. В цепи имеются два последовательно соединённых участка: участок AB , состоящий из одного резистора $R1$, и участок BC , состоящий из двух параллельных ветвей.

Так как одна параллельная ветвь имеет сопротивление $R_2 + R_3$ (ветвь содержит два последова-

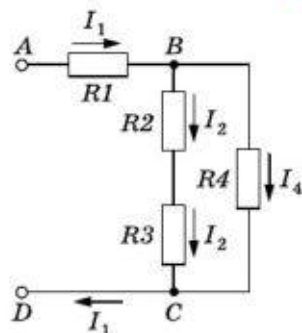


Рис. 1.20

тельно соединённых резистора R_2 и R_3), а вторая — R_4 , то сопротивление участка BC равно

$$R_{BC} = \frac{(R_2 + R_3)R_4}{R_2 + R_3 + R_4},$$

а общее сопротивление всех участков цепи

$$R = R_1 + R_{BC} = R_1 + \frac{(R_2 + R_3)R_4}{R_2 + R_3 + R_4}.$$



1. Какие точки цепи называют разветвлениями или узлами? **2.** В чём заключается первое правило Кирхгофа? **3.** Какое соединение проводников в цепи называют: а) последовательным; б) параллельным; в) смешанным? **4.** Запишите основные соотношения, которые выполняются для: а) последовательного соединения; б) параллельного соединения трёх проводников в цепи.



1. В ёлочной гирлянде электрические лампочки соединены последовательно. К ней последовательно подключили ещё две лампочки. Как изменится сила тока в цепи, если напряжение на концах гирлянды осталось тем же?

2. Три одинаковых резистора, сопротивлением R каждый, включены в цепь так, как показано на рисунке 1.21. Каким будет сопротивление между точками A и B ?

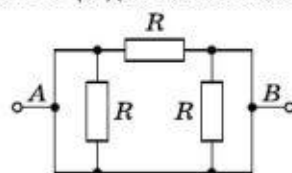


Рис. 1.21



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Напряжение между точками A и B участка цепи, схема которого изображена на рисунке 1.22, составляет 90 В. Сопротивление лампы L_2 равно сопротивлению лампы L_1 , а сопротивление лампы L_3 в 4 раза больше сопротивления лампы L_1 . Сила тока, текущего через лампу L_1 , равна 0,5 А. Найдите сопротивление каждой лампы, напряжение на лампах L_2 и L_3 и силу тока в них.

Дано:

$$U_{AB} = 90 \text{ В}$$

$$R_2 = R_1$$

$$R_3 = 4R_1$$

$$I_1 = I = 0,5 \text{ А}$$

$$R_1, R_2, R_3 — ?$$

$$U_2, U_3 — ?$$

$$I_2, I_3 — ?$$

Решение:

На рисунке 1.22 представлена схема смешанного соединения трёх ламп: L_2 и L_3 соединены параллельно и данный участок соединён последовательно с L_1 . Представим её в другом виде, заменив лампы сопротивлениями (рис. 1.23).

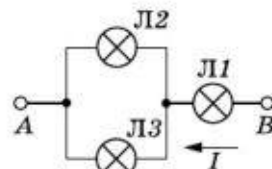


Рис. 1.22

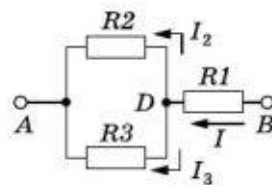


Рис. 1.23

Согласно закону Ома для участка цепи

$$U_{AB} = IR_1 + I_2 R_2, U_{AB} = IR_1 + I_3 R_3, \text{ так как } U_2 = U_3.$$

Заменим сопротивления R_2 и R_3 эквивалентным сопротивлением R_{23} :

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{R_1 \cdot 4R_1}{5R_1} = \frac{4}{5} R_1.$$

$$U_{AB} = I(R_1 + R_{23}) = I(R_1 + \frac{4}{5} R_1) = \frac{9R_1}{5} I \Rightarrow R_1 = \frac{5U_{AB}}{9I}.$$

$$U_2 = U_3 = IR_{23} = I \cdot \frac{4}{5} R_1.$$

Запишем для узла D первое правило Кирхгофа:

$$I = I_2 + I_3.$$

Так как лампы Л2 и Л3 соединены параллельно, то

$$I_2 R_2 = I_3 R_3, \quad I_2 = I_3 \frac{R_3}{R_2} = 4I_3.$$

Таким образом, $I = 4I_3 + I_3 = 5I_3 \Rightarrow I_3 = \frac{I}{5}, I_2 = \frac{4I}{5}.$

Подставляя числовые данные, получим:

$$R_1 = \frac{5 \cdot 90}{9 \cdot 0,5} \text{ Ом} = 100 \text{ Ом}; R_2 = R_1 = 100 \text{ Ом}; R_3 = 4R_1 = 400 \text{ Ом};$$

$$U_2 = U_3 = 0,5 \cdot \frac{4}{5} \cdot 100 \text{ В} = 40 \text{ В}.$$

$$I_3 = \frac{0,5}{5} \text{ А} = 0,1 \text{ А};$$

$$I_2 = \frac{4 \cdot 0,5}{5} \text{ А} = 0,4 \text{ А}.$$

Ответ: $R_1 = R_2 = 100 \text{ Ом}; R_3 = 400 \text{ Ом}; U_2 = U_3 = 40 \text{ В}; I_2 = 0,4 \text{ А}; I_3 = 0,1 \text{ А}.$

УПРАЖНЕНИЯ

1. Четыре электрические лампы, рассчитанные на напряжение 3 В и силу тока 0,1 А, нужно включить параллельно к источнику с напряжением 5,4 В. Резистор какого сопротивления следует подключить последовательно лампам?
2. В сеть с напряжением 220 В включены последовательно десять электрических ламп с сопротивлением по 24 Ом, рассчитанных на напряжение 12 В. Определите силу тока в цепи и сопротивление реостата, который необходимо включить в цепь.
3. Электрическую лампу с сопротивлением 240 Ом, рассчитанную на напряжение 120 В, нужно подключить к сети с напряжением 220 В. Какой длины нихромовый проводник с площадью поперечного сечения 0,55 мм² следует подключить последовательно с лампой?

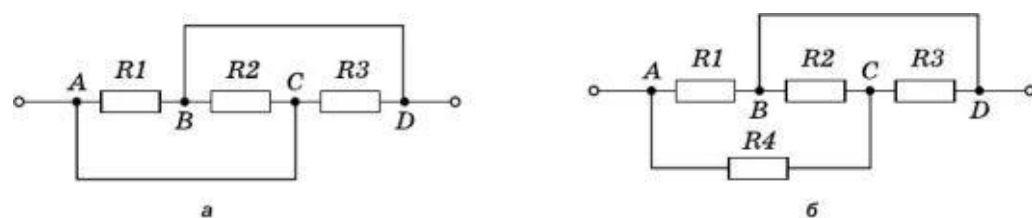


Рис. 1.24

4. Чему равно сопротивление цепи, схема которой показана на рисунке 1.24, если сопротивление каждого резистора R ?

§ 5 РАБОТА И МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. ЗАКОН ДЖОУЛЯ–ЛЕНЦА

РАБОТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. При упорядоченном движении заряженных частиц в проводнике электрическое поле совершает работу. Согласно закону сохранения энергии, изменение внутренней энергии металлического проводника равно работе силы, действующей на заряженные частицы со стороны электрического поля при их перемещении на данном участке цепи. Эту работу принято называть *работой тока*. Если за промежуток времени Δt через поперечное сечение произвольного участка проводника проходит заряд Δq , то электрическое поле за это время совершит работу

$$A = \Delta q U,$$

где U — напряжение на концах проводника.

Так как сила тока $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, то можно записать

$$A = IU \Delta t. \quad (1)$$

Работа тока на участке цепи равна произведению силы тока, напряжения на этом участке и времени, в течение которого совершалась работа.

Согласно закону сохранения энергии, работа тока должна быть равна изменению энергии рассматриваемого участка цепи за время Δt . Если в формуле (1) выразить либо напряжение через силу тока ($U = IR$), либо силу тока через напряжение ($I = \frac{U}{R}$), то можно получить ещё две формулы для определения работы тока:

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

Формула (1) является универсальной, так как для её вывода мы использовали только закон сохранения энергии, который справедлив во всех случаях. Выражения (2) получены из формулы (1) с помощью закона Ома для участка цепи. Поэтому эти формулы выполняются только в том случае, когда работа тока полностью идёт на увеличение внутренней энергии проводника.

МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. Любой электрический прибор (лампа, электродвигатель и т. д.) рассчитан на потребление определённого количества энергии в единицу времени. Поэтому наряду с работой тока вводят такую физическую величину, как *мощность тока*.

Мощность тока P равна отношению работы тока A за время Δt к этому интервалу времени.

$$P = \frac{A}{\Delta t}. \quad (3)$$

Используя формулу (1), равенству (3) можно придать следующий вид:

$$P = IU. \quad (4)$$

Формула (4) является универсальной формулой для вычисления мощности тока. С помощью закона Ома для участка цепи можно получить ещё два выражения для мощности тока:

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

В СИ единицей работы тока является *джоуль* (Дж), а мощности — *ватт* (Вт). На практике (например, в счётчиках электроэнергии) используется внесистемная единица работы тока — *киловатт-час* (кВт·ч):

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

ЗАКОН ДЖОУЛЯ—ЛЕНЦА. Работа тока приводит к изменению энергии проводника, которая может превращаться в различные формы. Если на участке цепи не совершается механическая работа и ток не производит химических действий, то происходит только нагревание проводника. При этом нагретый проводник отдаёт определённое количество теплоты окружающим телам (рис. 1.25).

Нагревание металлического проводника происходит следующим образом. Электрическое



Рис. 1.25

поле ускоряет свободные электроны, находящиеся в проводнике. После столкновения с ионами кристаллической решётки они передают ионам часть своей энергии упорядоченного движения. В результате энергия хаотического движения ионов около положений равновесия возрастает. Это означает увеличение внутренней энергии, а следовательно, и температуры проводника, который начинает передавать количество теплоты окружающим телам. Спустя небольшое время после замыкания цепи температура перестает изменяться со временем.

К проводнику за счёт работы электрического поля непрерывно поступает энергия. Но его внутренняя энергия остаётся неизменной, так как проводник передаёт окружающим телам количество теплоты, равное работе тока. Это справедливо лишь в том случае, когда работа электрического тока полностью расходуется на увеличение внутренней энергии. Тогда количество теплоты, передаваемое проводником с током другим телам, можно вычислить по любой из формул:

$$Q = IU\Delta t = I^2 R \Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t.$$

Однако если на данном участке цепи имеют место превращения энергии в механическую или химическую энергию, то количество теплоты, выделяемое проводником с током, меньше работы тока. Для вычисления количества выделяемой теплоты в этом случае пригодна только формула

$$Q = I^2 R \Delta t.$$

В этом и состоит **закон Джоуля—Ленца**, установленный опытным путём в 1842 г. русским учёным Эмилием Христиановичем Ленцем (1804—1865) и независимо от него английским физиком Дж. Джоулем. Закон Джоуля—Ленца формулируется следующим образом.

Количество теплоты, выделяемое проводником с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения тока.

Закон Джоуля—Ленца справедлив не только для металлических проводников, но и для растворов электролитов, газов.

 1. Какую физическую величину называют: а) работой электрического тока; б) мощностью электрического тока? 2. С помощью каких формул можно определить данные величины? 3. Почему формула $P = IU$ для расчёта мощности тока является универсальной? 4. Сформулируйте закон Джоуля—Ленца.

 1. По стальной проволоке пропускают ток. При этом она слегка нагревается. Почему при охлаждении одной части проволоки (например, водой) другая её часть нагревается сильнее?



2. Почему в плавких предохранителях не применяют проволоку из тугоплавких металлов?
3. Почему спирали нагревательных приборов делают из материала с большим удельным сопротивлением?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Электрический чайник имеет две спирали. При включении одной из них вода в чайнике закипит через 10 мин, а при включении другой — через 5 мин. Через какое время закипит вода в чайнике, если спирали соединить: а) последовательно; б) параллельно?

Дано:

$$t_1 = 10 \text{ мин}$$

$$t_2 = 5 \text{ мин}$$

$$t_{\text{посл}} = ?$$

$$t_{\text{пар}} = ?$$

Решение:

По закону Джоуля—Ленца количество теплоты, выделяемое при включении первой спирали,

$$Q_1 = \frac{U^2}{R_1} t_1,$$

при включении второй спирали

$$Q_2 = \frac{U^2}{R_2} t_2,$$

где R_1 и R_2 — сопротивления спиралей.

Количество теплоты, полученное водой при нагревании до температуры кипения, равно

$$Q = C \Delta T,$$

где C — теплоёмкость воды в чайнике; ΔT — разность температур.

Очевидно, что $Q_1 = Q_2 = Q$, так как в обоих случаях разность температур одинакова. Тогда

$$\frac{U^2}{R_1} t_1 = \frac{U^2}{R_2} t_2 \Rightarrow \frac{R_2}{R_1} = \frac{t_2}{t_1}. \quad (1)$$

Соединим спирали *последовательно*:

$$R_{\text{посл}} = R_1 + R_2, \quad Q_{\text{посл}} = \frac{U^2}{R_1 + R_2} t_{\text{посл}}.$$

Так как происходит нагревание той же массы воды до той же температуры кипения, то

$$Q_{\text{посл}} = Q_1 = Q_2 = Q,$$

$$\frac{U^2}{R_1 + R_2} t_{\text{посл}} = \frac{U^2}{R_1} t_1, \quad \frac{t_{\text{посл}}}{R_1 + R_2} = \frac{t_1}{R_1}.$$

Отсюда

$$t_{\text{посл}} = t_1 \frac{R_1 + R_2}{R_1} = t_1 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right).$$

С учётом выражения (1) получим

$$t_{\text{посл}} = t_1 \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) = t_1 + t_2.$$

Соединим спирали *параллельно*:

$$R_{\text{пар}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad Q_{\text{пар}} = \frac{U^2}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} t_{\text{пар}}.$$

$$Q_{\text{пар}} = Q_1 = Q_2 = Q,$$

так как энергия расходуется на нагревание той же массы воды и до той же температуры.

$$\frac{U^2}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} t_{\text{пар}} = \frac{U^2}{R_1} t_1.$$

Отсюда

$$t_{\text{пар}} = t_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} = t_1 \frac{1}{\frac{R_1}{R_2} + 1}.$$

С учётом выражения (1) получим

$$t_{\text{пар}} = t_1 \frac{1}{\frac{t_1}{t_2} + 1} = \frac{t_1 t_2}{t_1 + t_2}.$$

С учётом числовых данных запишем

$$t_{\text{посл}} = (10 + 5) \text{ мин} = 15 \text{ мин}; \quad t_{\text{пар}} = \frac{5 \cdot 10}{15 + 5} \text{ мин} \approx 3,3 \text{ мин}.$$

Ответ: $t_{\text{посл}} = 15 \text{ мин}; \quad t_{\text{пар}} \approx 3,3 \text{ мин}.$



УПРАЖНЕНИЯ

1. Определите мощность тока, потребляемую проводником с сопротивлением 100 Ом, если на проводнике с сопротивлением 150 Ом выделяется мощность тока, равная 600 Вт.
2. Два проводника с сопротивлениями 10 и 23 Ом включены в сеть с напряжением 100 В. Какое количество теплоты выделится за 1 с в каждом проводнике, если их соединить: а) последовательно; б) параллельно?
3. Для того чтобы в сеть с напряжением 220 В можно было включить рассчитанный на напряжение 110 В прибор мощностью 400 Вт, необходимо последовательно с прибором соединить резистор. Определите сопротивление резистора.



4. Плавкий предохранитель рассчитан на силу тока, равную 10 А. Можно ли включить потребитель мощностью 10 кВт в сеть постоянного тока с напряжением 220 В?
5. Четыре одинаковые электрические лампы соединены по схеме, показанной на рисунке 1.26, и подключены к источнику постоянного напряжения. Как изменится накал нити лампы Л2, если: а) замкнуть ключ К; б) лампа Л3 перегорит?
6. На электрической плитке, включённой в сеть с напряжением 120 В, нагревается медный сосуд массой 200 г, в котором налито 500 г воды при температуре 12 °С. За 5 мин температура воды поднялась до 60 °С. Чему равен КПД плитки, если сила тока в ней 5 А?
7. Какой длины необходимо взять нихромовый проводник площадью поперечного сечения 0,1 мм², чтобы изготовить нагреватель на 120 В? С его помощью за 3 мин можно нагреть 200 г воды от 20 °С до кипения? КПД нагревателя равен 90%.

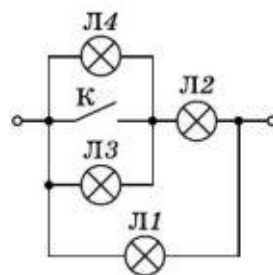


Рис. 1.26

Это любопытно...

Из истории развития физики и техники

В 1841 г. вышла статья Джоуля, посвящённая результатам исследования теплового эффекта электрического тока. Он установил, что количество теплоты, выделяемое током в проводнике, пропорционально квадрату силы тока. До Джоуля аналогичные исследования были начаты петербургским академиком Ленцем, который опубликовал свою работу в 1843 г. под названием «О законах выделения тепла гальваническим током».

Приведём небольшой фрагмент из работы Ленца. «Итак, если мы примем... что выделение тепла током зависит от природы металла, из которого состоит проволока, лишь постольку, поскольку от неё зависят сопротивления, то мы получим... следующие положения: 1) выделение тепла пропорционально сопротивлению проволоки; 2) выделение тепла пропорционально квадратам токов».

Точность и обстоятельность опытов Ленца обеспечили признание закона, который теперь известен в науке под названием закона Джоуля—Ленца.



Э. Х. ЛЕНЦ

ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА. Для измерения силы тока в проводнике применяют *амперметр*, который включают последовательно с этим проводником (рис. 1.27). При этом провод, который идёт от положительного полюса источника тока, соединяют с клеммой прибора со знаком «плюс». Провод, идущий от отрицательного полюса источника, соединяют с клеммой амперметра со знаком «минус».

Угол отклонения стрелки амперметра зависит от силы тока в его измерительном механизме. Включение амперметра не должно вызывать изменения в режиме работы цепи, поэтому сопротивление амперметра должно быть малым по сравнению с сопротивлением цепи.

Для измерения силы тока, превышающей силу тока I_a , на которую рассчитан амперметр, можно воспользоваться этим же амперметром. Для этого необходимо параллельно амперметру подключить резистор так, чтобы сила тока через амперметр не была больше величины I_a . Такой резистор называется *шунтом* (рис. 1.28).

При шунтировании амперметра измеряемый ток (I) в точке (узле) 1 делится на две части: часть тока проходит через амперметр (I_a), а остальная часть — через шунт ($I_{ш}$), т. е.

$$I = I_a + I_{ш}.$$

Напряжение между точками 1 и 2 (см. рис. 1.28) будет равно

$$U_{1,2} = I_a R_a = I \frac{R_a R_{ш}}{R_a + R_{ш}}, \tag{1}$$

где R_a — сопротивление амперметра; $R_{ш}$ — сопротивление шунта.

Из выражения (1) следует, что

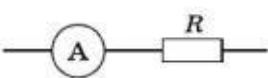


Рис. 1.27

$$I = I_a \frac{R_a + R_{ш}}{R_{ш}},$$

$$\frac{I}{I_a} = \frac{R_a}{R_{ш}} + 1. \tag{2}$$

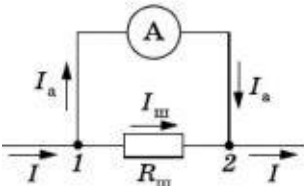


Рис. 1.28

Отношение $\frac{I}{I_a}$ (обозначим его буквой n) показывает, во сколько раз расширяется предел измерения силы тока амперметром (с применением шунта), т. е. возрастает цена деления его шкалы. Иначе говоря, при включении шунта чувствительность амперметра уменьшается

в n раз; стрелка прибора отклонится на угол, в n раз меньший, чем без шунта. Из выражения (2) с учётом того, что $\frac{I}{I_a} = n$, найдём сопротивление шунта:

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_x}{n-1}.$$

В ряде задач сопротивление амперметра принимается равным нулю. Такой амперметр называют *идеальным*.

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ. Напомним, что *вольтметр* — прибор для измерения напряжения — включается в цепь иначе, чем амперметр. Вольтметр присоединяют к тем точкам цепи, между которыми измеряют напряжение, т. е. параллельно (рис. 1.29). Для измерения напряжения на зажимах лампы клемму вольтметра со знаком «плюс» соединяют с клеммой лампы, которая соединена с положительным полюсом источника тока, а клемму со знаком «минус» — с клеммой лампы, которая соединена с отрицательным полюсом источника тока.

Напряжение на вольтметре такое же, как и на участке цепи. Однако включение вольтметра в цепь изменяет сопротивление участка, к которому он подсоединён. Оно равно не R , а $R' = \frac{RR_v}{R + R_v} < R$, где R_v — сопротивление вольтметра.

Из-за этого измеряемое напряжение на участке цепи уменьшается. Для того чтобы вольтметр не вносил заметных искажений в измеряемое напряжение, его сопротивление должно быть большим по сравнению с сопротивлением того участка цепи, параллельно которому он включается. В этом легко убедиться, если выражение для R' преобразовать следующим образом:

$$R' = \frac{R}{\frac{R}{R_v} + 1}.$$

Если $R_v \gg R$, то $\frac{R}{R_v} \approx 0$ и $R' \approx R$.

Идеальный вольтметр имеет бесконечно большое сопротивление.

Любой вольтметр рассчитан на измерение напряжения, не превышающего некоторого предела (номинального напряжения) U_n . Однако в ряде случаев измеряемое напряжение U может оказаться больше номинального напряжения используемого вольтметра. Но если к вольтметру присоединить последова-

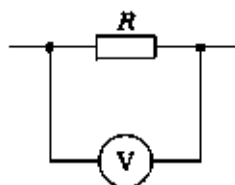


Рис. 1.29

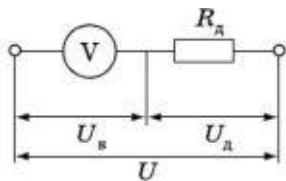


Рис. 1.30

тельно с ним дополнительный резистор с сопротивлением R_d (рис. 1.30), то предел измерения напряжения вольтметром расширится.

При включении в цепь вольтметра *добавочного сопротивления* R_d измеряемое напряжение U делится на две части: одна часть U_v приходится на вольтметр, а другая U_d — на дополнительный резистор:

$$U = U_v + U_d.$$

Сила тока в цепи вольтметра I_v :

$$I_v = \frac{U_v}{R_v} = \frac{U}{R_v + R_d}.$$

Отсюда

$$\frac{U}{U_v} = \frac{R_v + R_d}{R_v} = 1 + \frac{R_d}{R_v}. \quad (3)$$

Отношение $\frac{U}{U_v} = n$ показывает, во сколько раз расширяется предел измерения напряжения вольтметром, т. е. возрастает цена деления его шкалы. Иначе говоря, при подсоединении дополнительного резистора чувствительность вольтметра уменьшается в n раз.

Из выражения (3) с учётом того, что $\frac{U}{U_v} = n$, найдём значение добавочного сопротивления к вольтметру:

$$R_d = R_v(n - 1).$$

*** ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ АМПЕРМЕТРОМ И ВОЛЬТМЕТРОМ.** С помощью амперметра и вольтметра можно измерить сопротивление R_x резистора, соединив приборы по схемам, показанным на рисунке 1.31.

Значение сопротивления R'_x участка цепи между точками B и C (рис. 1.31, *а*) выражается через показания приборов по формуле $R'_x = \frac{U}{I}$. Однако R'_x больше искомого сопротивления R_x на сопротивление амперметра, так как вольтметр измеряет сумму напряжений на резисторе и на амперметре. Эту схему следует применять при измерении сопротивлений, значительно больших сопротивления амперметра.

Соединив приборы по схеме, представленной на рисунке 1.31, *б*, и записав их показания, можно определить значение сопротивления участка цепи BC : $R''_x = \frac{U}{I}$.

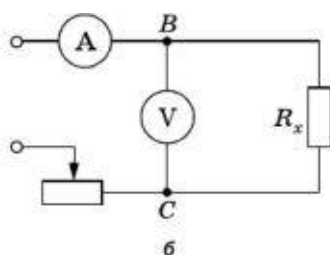
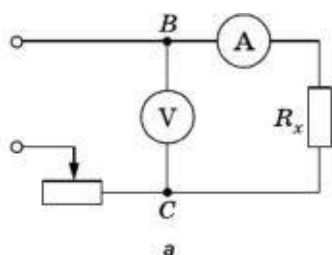


Рис. 1.31

Однако R_x^* оказывается меньше искомого сопротивления R_x , так как сила тока, измеряемая амперметром, равна сумме сил токов в резисторе и вольтметре. Эту схему целесообразно использовать при измерении сопротивлений, значительно меньших сопротивления вольтметра.



1. Для чего используют шунт? Как его включают в цепь? 2. Как можно определить сопротивление шунта? 3. Для чего используют добавочное сопротивление? Как его включают в цепь? 4. Как можно рассчитать значение добавочного сопротивления? 5. Что называют: а) идеальным амперметром; б) идеальным вольтметром?



1. Учащийся при измерении силы тока в электрической лампе по ошибке включил вольтметр вместо амперметра. Что при этом произойдёт с накалом нити лампы?
2. Учащийся по ошибке включил амперметр вместо вольтметра при измерении напряжения между выводами электрической лампы. Объясните, как изменится сила тока в цепи.



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Гальванометр с сопротивлением, равным 50 Ом, можно измерить значение силы тока до 0,1 А. Как следует включить гальванометр в цепь, чтобы он стал: а) амперметром, измеряющим силу тока до 10 А; б) вольтметром для измерения напряжения до 100 В?

Дано:

$$\begin{aligned} R_g &= 50 \text{ Ом} \\ I_{\max} &= 0,1 \text{ А} \\ I_1 &= 10 \text{ А} \\ U_2 &= 100 \text{ В} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{\text{ш}} &= ? \\ R_d &= ? \end{aligned}$$

Решение:

Чтобы измерять значения силы тока $I > I_{\max}$, параллельно гальванометру следует включить шунт (рис. 1.32). Рассчитаем сопротивление шунта.

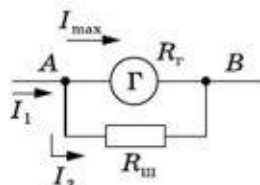


Рис. 1.32

Для узла А выполняется первое правило Кирхгофа:

$$I_1 = I_{\max} + I_2 \Rightarrow I_2 = I_1 - I_{\max}.$$

Запишем закон Ома для участков цепи:

$$I_{\max} R_{\Gamma} = U_{AB}; \quad (1)$$

$$(I_1 - I_{\max}) R_{\text{ш}} = U_{AB}. \quad (2)$$

Приравняем левые части равенств (1) и (2):

$$I_{\max} R_{\Gamma} = (I_1 - I_{\max}) R_{\text{ш}} \Rightarrow R_{\text{ш}} = \frac{I_{\max} R_{\Gamma}}{I_1 - I_{\max}}.$$

Для того чтобы измерить этим гальванометром напряжение $U > I_{\max} R_{\Gamma}$, к нему необходимо последовательно подключить добавочное сопротивление $R_{\text{д}}$ (рис. 1.33).

Запишем закон Ома для участка цепи:

$$U_2 = I_{\max} (R_{\Gamma} + R_{\text{д}}) \Rightarrow R_{\text{д}} = \frac{U_2}{I_{\max}} - R_{\Gamma}.$$

Подставляя числовые данные, получим:

$$R_{\text{ш}} = \frac{0,1 \cdot 50}{10 - 0,1} \text{ Ом} \approx 0,5 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{д}} = \left(\frac{100}{0,1} - 50 \right) \text{ Ом} = 950 \text{ Ом}.$$

Ответ: $R_{\text{ш}} \approx 0,5 \text{ Ом}$; $R_{\text{д}} = 950 \text{ Ом}$.

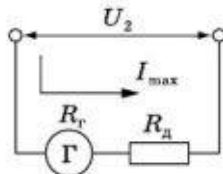


Рис. 1.33

УПРАЖНЕНИЯ

1. Сопротивление вольтметра, предназначенного для измерения напряжений до 30 В, равно 300 Ом. Какое добавочное сопротивление нужно подключить к вольтметру, чтобы измерять напряжение до 220 В?
2. Определите значение добавочного сопротивления, которое следует присоединить к вольтметру, имеющему сопротивление 100 Ом, чтобы цена деления его шкалы увеличилась в 10 раз.
3. Во сколько раз увеличится верхний предел шкалы вольтметра, сопротивление которого 1000 Ом, если последовательно с ним соединить добавочное сопротивление гальванометра 9000 Ом?
4. Гальванометр сопротивлением 0,1 Ом и ценой деления шкалы 1 мА зашунтировали стальной проволокой длиной 10 см и площадью поперечного сечения 1,2 мм². Определите новую цену деления его шкалы.
5. Чувствительность гальванометра, сопротивление которого 260 Ом, необходимо уменьшить в 10 раз. Какой для этого потребуется шунт?

ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА. Для характеристики работы сторонних сил используют физическую величину — *электродвижущую силу* (сокращённо ЭДС).

Электродвижущая сила $\mathcal{E}$ равна отношению работы $A_{\text{ст}}$ сторонних сил по перемещению положительного заряда q вдоль замкнутой цепи к этому заряду.

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \tag{1}$$

Единицей ЭДС в СИ, как и напряжения, является *вольт* (В): $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$. Можно говорить об ЭДС на любом участке цепи. Электродвижущая сила гальванического элемента, например, численно равна работе сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда внутри элемента от его отрицательно полюса к положительному.

Если на батарейке написано «1,5 В», то это означает, что сторонние силы (в данном случае химические) совершают работу 1,5 Дж при перемещении заряда в 1 Кл от одного полюса батарейки к другому.

ЭДС представляет скалярную величину, которая может быть как положительной, так и отрицательной. Знак ЭДС определяется в зависимости от произвольно выбранного направления обхода того участка электрической цепи, на котором включён данный источник тока. Если внутри источника тока обход совершается от отрицательного полюса к положительному, то ЭДС положительная ($\mathcal{E} > 0$) (рис. 1.34, а). Сторонние силы внутри источника совершают при этом положительную работу. Если обход совершается от положительного полюса к отрицательному, то ЭДС отрицательная ($\mathcal{E} < 0$) (рис. 1.34, б).



Рис. 1.34

ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ. Гальванический элемент в простейшем варианте состоит из двух химически различных электродов, опущенных в водный раствор того или иного электролита. Гальванический элемент получил своё название по имени Гальвани. Первый гальванический элемент, состоящий из медного и цинкового кружочков (электродов), пе-



А. ВОЛЬТА

реложенных смоченным солёной водой (электролитом) сукном, был изобретён Вольтой. Напряжение между металлическими кружочками оказалось небольшим (~1 В). Для того чтобы получить большие значения напряжения, Вольта положил друг на друга пары медных и цинковых кружочков, которые также были разделены смоченными солёной водой сукном. Так была изобретена первая гальваническая батарея — «вольтов столб» (1800). Схема её устройства приведена на рисунке 1.35.

На рисунке 1.36 показано устройство одного из современных гальванических элементов. Отрицательным электродом в нём является цинк. Положительный электрод состоит из угольного стержня

ка, окружённого смесью сильного окислителя — пероксида марганца MnO_2 и графита для увеличения электропроводности.

Эти электроды погружают в раствор нашатыря (хлорида аммония — NH_4Cl). В «сухих» элементах вместо жидкого раствора электролита используют густую крахмалистую массу, пропитанную нашатырём. При этом не образуется газообразный водород, так как происходит химическая реакция $\text{MnO}_2 + 2\text{H} \rightarrow \text{MnO} + \text{H}_2\text{O}$, в результате которой получается оксид марганца и вода.

В гальванических элементах ЭДС возникает за счёт действия химических сил. Однако в них происходят необратимые процессы, приводящие к расходованию электродов и раствора электролита. Несмотря на то что гальванические элементы были первыми источниками тока, они и сегодня

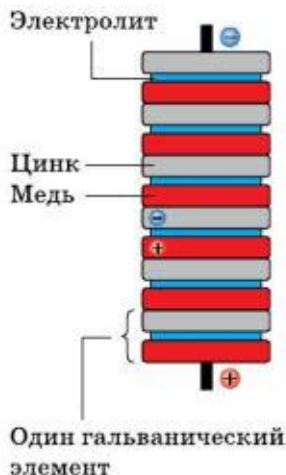


Рис. 1.35

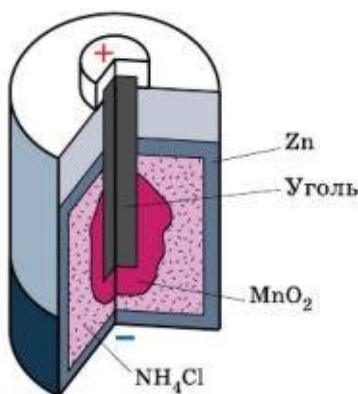


Рис. 1.36

ня находят ряд важных применений. Разнообразные «сухие» гальванические элементы применяют в электронных часах, некоторых электроизмерительных приборах, слуховых аппаратах, детских игрушках, карманных фонарях и т. д.

АККУМУЛЯТОРЫ. Существуют источники тока, работающие на принципе обратимых химических процессов. Их называют *аккумуляторами* (накопителями)*. Они способны создавать токи до нескольких сотен ампер и обладают достаточно высоким КПД (до 80%).

На рисунке 1.37 показано устройство свинцового (кислотного) аккумулятора. Элемент свинцового аккумулятора состоит из положительных и отрицательных электродов (пластин), сепараторов (разделительных решёток) и электролита. Положительные электроды представляют собой свинцовую решётку, а активным веществом является оксид свинца (PbO_2). Отрицательные электроды также представляют собой свинцовую решётку, а активным веществом является свинец (Pb). Электроды погружены в электролит, состоящий из разбавленной серной кислоты (H_2SO_4). Корпус аккумулятора обычно изготавливают из пластмассы или эбонита.

Нальём в сосуд раствор серной кислоты и опустим в него два одинаковых свинцовых электрода, поверхности которых покрыты оксидом свин-

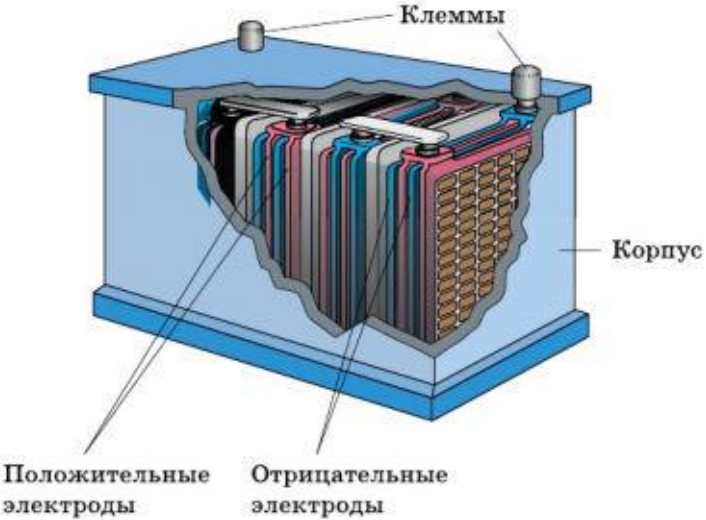


Рис. 1.37

* В 1859—1860 гг. французский учёный Гастон Планте (1834—1889) изобрёл свинцовый (кислотный) аккумулятор. В настоящее время данный тип аккумулятора широко используется на транспорте.

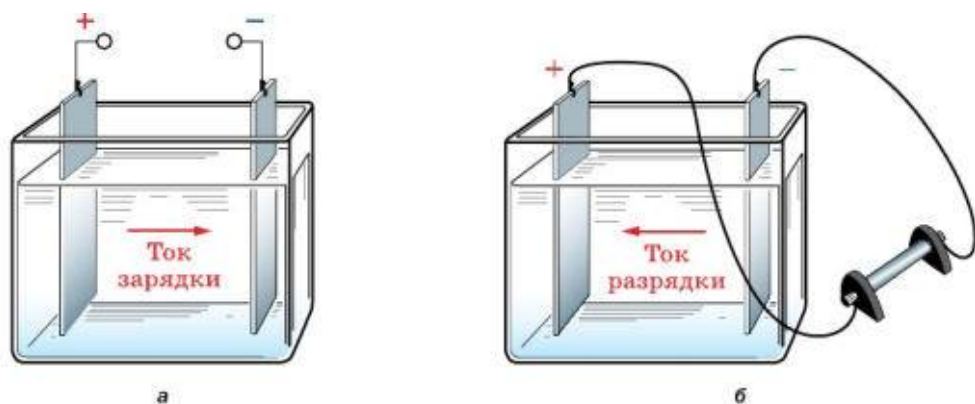


Рис. 1.38

ца (II) PbO . Элемент в таком виде не обладает ЭДС, так как оба его электрода одинаковы. Присоединим теперь к электродам внешний источник тока (рис. 1.38, а) и пропустим через элемент ток — *ток зарядки*.

Электрический ток, проходящий через водный раствор серной кислоты, вызовет разложение воды на водород и кислород. В результате на пластинке, соединённой с отрицательным полюсом источника тока (катоде), выделяется водород, который восстанавливает оксид свинца (II) в чистый свинец:



На электроде, соединённом с положительным полюсом источника тока (аноде), выделяется кислород, который окисляет оксид свинца (II) в оксид свинца (IV):



Таким образом, в результате пропускания тока через элемент, т. е. зарядки элемента, его электроды оказываются разными по химическому составу, и появляется определённая ЭДС, равная примерно 2 В.

Элемент в таком состоянии уже сам является источником тока и при замыкании его на нагрузку может создавать в цепи в течение некоторого времени электрический ток (рис. 1.38, б) — *ток разрядки*, который направлен противоположно току зарядки.

При разрядке химические реакции на электродах идут в обратном направлении. Положительная пластинка восстанавливается водородом:



а отрицательная пластинка окисляется кислородом:



Для каждого аккумулятора существуют предельные значения силы тока при зарядке и разрядке. Эти данные указываются в паспорте данно-

го устройства. ЭДС кислотного аккумулятора сразу по окончании зарядки составляет около 2,7 В. В начале работы аккумулятора она снижается до 2,1 В*. Если ЭДС аккумулятора уменьшается до 1,8 В, его необходимо зарядить. Одной из важнейших характеристик аккумулятора является его ёмкость — способность накапливать электрический заряд. Её обычно измеряют в ампер-часах (А·ч). Ёмкость аккумулятора позволяет определить, в течение какого времени аккумулятор способен обеспечить заданную силу тока в цепи.

Аккумуляторы используют для запуска автомобильного двигателя при помощи стартера (специального электродвигателя). Без аккумуляторов не могут обходиться подводные лодки (кроме атомных). Аккумуляторы применяют на электрокарах (электрических грузовых тележках), в электромобилях (автомобилях с электрическими двигателями), для питания радиоаппаратуры, рудничных ламп и во многих других случаях.

- 1.** Какая физическая величина характеризует действие сторонних сил в источнике тока? **2.** В каком случае ЭДС источника тока считают: а) положительной; б) отрицательной? **3.** За счёт чего возникает ЭДС в гальванических элементах и аккумуляторах? **4.** В чём состоит принцип работы свинцового (кислотного) аккумулятора? Как он устроен? **5.** Приведите примеры использования: а) гальванических элементов; б) аккумуляторов.

- 1.** Чему равно напряжение на клеммах гальванического элемента с ЭДС, равной $\mathcal{E}$, если цепь разомкнута?
2. На рисунке 1.39 приведён самодельный гальванический элемент. Объясните его устройство и принцип действия.
3. Объясните физический смысл такой физической величины, как ёмкость аккумулятора.



Рис. 1.39

* Стандартная аккумуляторная батарея с напряжением 12 В для легкового автомобиля объединяет в себе шесть отдельных аккумуляторов, каждый из которых вырабатывает напряжение, равное 2 В.



УПРАЖНЕНИЯ

1. При питании электрической лампочки от источника с ЭДС, равной 1,5 В, сила тока в цепи составляет 0,2 А. Найдите работу сторонних сил в источнике за 1 мин.
2. Какая работа совершена постоянным током, если через проводник, на концах которого потенциалы соответственно равны 30 и 10 В, прошёл заряд 1,5 Кл?
3. В технической спецификации устройства указано, что ёмкость аккумулятора $q = 56 \text{ А} \cdot \text{ч}$, а напряжение на его клеммах при полной зарядке $U = 15 \text{ В}$. Определите по этим данным энергию, запасаемую аккумулятором. Ответ выразите в Вт $\cdot$ ч и Дж.

Это любопытно...

Из истории развития физики и техники



Л. ГАЛЬВАНИ



Рис. 1.40

Гальвани пытался обнаружить действие атмосферного электричества на мышцы живого организма — лягушки. Для этого он подвешивал препарированную лягушку на медном крючке к железному забору. Прижимая крючок к перилам, Гальвани обнаружил сильное сокращение мышц. Сокращение наблюдалось всегда, когда к лапке лягушки прикасались двумя различными металлами, находящимися между собой в контакте. Зная, что сокращение мышц возникает при электрическом разряде, Гальвани решил, что открыл «животное электричество», вырабатываемое в организме. Правильное объяснение открытому явлению дал Вольт. Он понял, что лягушачьи лапки — это лишь чувствительный «животный электрометр». Наблюдаемое же явление связано с наличием двух разнородных металлов, соприкасающихся с электропроводящей жидкостью животных тканей. Это объяснение и привело Вольту к созданию первого источника постоянного тока — «вольтова столба» (рис. 1.40). Вскоре были изобретены другие гальванические элементы: элемент Даниэля, Грене, Лекланше, Вестона и др.

Открытия Гальвани и Вольты побудили русского учёного Василия Владимировича Петрова (1761—1834) провести серию самостоятельных опытов, описанных им в книге «Известие о гальвани-вольтовых опытах...» (1803). В частности, ему удалось создать батарею, состоявшую

из 4200 медных и цинковых кружков, или 2100 медно-цинковых элементов. Петров называл её «огромная наипаче батарея». Она располагалась в большом деревянном ящике, разделённом по длине на четыре отделения. Общая длина батареи Петрова составляла 12 м — это был крупнейший в мире источник постоянного электрического тока. Как показали современные экспериментальные исследования с моделью батареи Петрова, ЭДС этой батареи составляла 1700 В. С помощью этого прибора Петрову удалось открыть такое важное явление, как электрическая дуга, и доказать возможность её практического применения для целей плавки, сварки металлов, освещения.

§ 8

ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ

ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ. Ранее мы изучили закон Ома для участка цепи, не содержащего источник тока. Теперь рассмотрим простейшую полную (замкнутую) электрическую цепь (рис. 1.41), состоящую из источника тока (например, гальванического элемента или аккумулятора) и резистора с сопротивлением R .

Источник тока, имеющий ЭДС $\mathcal{E}$, обладает сопротивлением r . Его называют *внутренним сопротивлением источника*, в отличие от сопротивления R цепи, называемого *внешним сопротивлением*.

Например, в генераторе r — это сопротивление его обмоток (медных проводов), в гальваническом элементе или аккумуляторе это сопротивление раствора электролита и электродов.

Для вывода закона Ома для полной цепи воспользуемся законом сохранения энергии. Пусть за время Δt через поперечное сечение проводника пройдёт заряд q . Тогда, согласно формуле $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$ (см. § 7), работа сторонних сил при перемещении заряда q равна

$$A_{\text{ст}} = \mathcal{E}q.$$

Из определения силы тока I получим $q = I\Delta t$. С учётом этого

$$A_{\text{ст}} = \mathcal{E}I\Delta t.$$

Благодаря работе сторонних сил при прохождении тока в цепи на её внешнем и внутреннем участках выделяется количество теплоты, равное по закону Джоуля—Ленца

$$Q = I^2R\Delta t + I^2r\Delta t.$$

Согласно закону сохранения энергии, $A_{\text{ст}} = Q$, поэтому

$$\begin{aligned} \mathcal{E}I\Delta t &= I^2R\Delta t + I^2r\Delta t, \text{ или} \\ \mathcal{E} &= IR + Ir. \end{aligned}$$

(1)

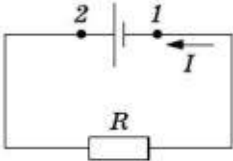


Рис. 1.41

Произведение силы тока на сопротивление участка цепи называют *падением напряжения* на этом участке. Таким образом, ЭДС источника тока равна сумме падений напряжений на внешнем и внутреннем участках замкнутой цепи:

$$\mathcal{E} = U + U_0,$$

где $U = IR$ — падение напряжения на внешнем участке; $U_0 = Ir$ — падение напряжения на внутреннем участке цепи.

Из равенства (1) запишем:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

Это и есть закон Ома для полной цепи.

Сила тока в полной цепи равна отношению ЭДС источника тока к полному сопротивлению цепи.

Внутреннее сопротивление источника тока, если оно мало по сравнению с внешним сопротивлением ($r \ll R$), оказывает незначительное влияние на силу тока. Но при коротком замыкании, когда $R \approx 0$, сила тока очень велика, так как r мало. Например, при $\mathcal{E} = 2$ В и $r = 0,1 - 0,004$ Ом сила тока короткого замыкания $I_{к.з} = 20 - 2000$ А. При такой силе тока провода могут расплавиться, а источник тока — выйти из строя*.

Если цепь содержит несколько *последовательно соединённых источников тока* (рис. 1.42), то полная ЭДС в цепи равна алгебраической сумме ЭДС отдельных элементов:



Рис. 1.42

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \dots + \mathcal{E}_N. \tag{2}$$

Определим знак ЭДС отдельных элементов. При выбранном (произвольно) направлении обхода против часовой стрелки для цепи, схема которой изображена на рисунке 1.42, $\mathcal{E}_1 > 0$, $\mathcal{E}_2 < 0$ и $\mathcal{E}_3 > 0$, поэтому

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = |\mathcal{E}_1| - |\mathcal{E}_2| + |\mathcal{E}_3|.$$

* Напомним, что при перегрузках и коротких замыканиях электрическую сеть защищает специальное устройство — предохранитель. Он состоит из проволоки, изготовленной из легкоплавкого металла. Проволока помещена в стеклянную трубку, имеющую на концах металлические наконечники, и рассчитана на определённую силу тока. Если сила тока превышает допустимое значение, то проволока плавится и цепь размыкается.

Внутреннее сопротивление батареи, состоящей из последовательно соединённых элементов, равно сумме внутренних сопротивлений элементов:

$$r = r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_N.$$

(3)

Если батарея состоит из N одинаковых последовательно соединённых элементов с одинаковыми знаками ЭДС, то из формул (2) и (3) следует, что

$$\mathcal{E}_6 = \mathcal{E}_9 N, \quad r_6 = r_9 N,$$

где $\mathcal{E}_6$ и r_6 — ЭДС и внутреннее сопротивление батареи; $\mathcal{E}_9$ и r_9 — ЭДС и внутреннее сопротивление одного элемента.

Таким образом, *последовательное соединение увеличивает общую ЭДС и увеличивает внутреннее сопротивление батареи.*

Если цепь содержит несколько *параллельно соединённых элементов* (рис. 1.43), то можно записать следующие формулы:

$$\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = \dots = \mathcal{E}_N = \mathcal{E}, \quad U_{AB} = \mathcal{E}.$$

$$r_1 = r_2 = r_3 = \dots = r_N = r,$$

$$\frac{1}{R_{\text{пар}}} = \underbrace{\frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \dots + \frac{1}{r}}_{N \text{ раз}},$$

$$R_{\text{пар}} = \frac{r}{N},$$

где N — число одинаковых ЭДС $\mathcal{E}$ в цепи.

Таким образом, *параллельное соединение N одинаковых источников тока не изменяет ЭДС батареи, если сравнивать с включённым в эту цепь одним источником тока с той же ЭДС.* Однако при таком включении внутреннее сопротивление источника уменьшается в N раз.

ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ, СОДЕРЖАЩЕГО ЭДС. Наиболее общую форму имеет закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС (иногда его называют *обобщённым законом Ома*).

Рассмотрим участок цепи, содержащий гальванические элементы или аккумулятор, т. е. участок, на котором действуют сторонние силы. Таким участком является, например, участок ab (рис. 1.44). Внутренние сопро-

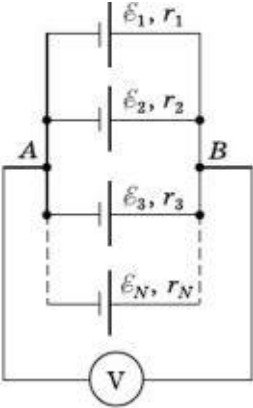


Рис. 1.43

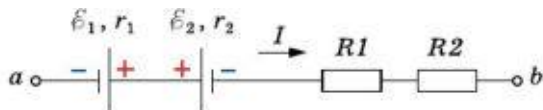


Рис. 1.44

тивления источников ε_1 и ε_2 равны соответственно r_1 и r_2 . Сила тока на участке равна I , ток течёт от точки a к точке b .

За время Δt через поперечное сечение проводника проходит заряд $q = I\Delta t$. При этом электрическое поле совершает работу $A_{\text{п}} = (\varphi_a - \varphi_b)q = (\varphi_a - \varphi_b)I\Delta t$. Источники тока совершают работу $A_{\text{ст}} = |\varepsilon_1|q - |\varepsilon_2|q = (|\varepsilon_1| - |\varepsilon_2|)I\Delta t$. За время Δt на участке цепи выделяется количество теплоты $Q = I^2(r_1 + r_2 + R_1 + R_2)\Delta t$. Согласно закону сохранения энергии $A_{\text{п}} + A_{\text{ст}} = Q$, поэтому

$$(\varphi_a - \varphi_b)I\Delta t + (|\varepsilon_1| - |\varepsilon_2|)I\Delta t = I^2(r_1 + r_2 + R_1 + R_2)\Delta t, \\ \varphi_a - \varphi_b = I(r_1 + r_2 + R_1 + R_2) - (|\varepsilon_1| - |\varepsilon_2|). \quad (4)$$

Сформулируем закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС.

Разность потенциалов на концах участка цепи равна падению напряжения на участке минус ЭДС этого участка.

Если неразветвлённый участок цепи содержит n источников тока и N резисторов, то

$$\varphi_a - \varphi_b = I(r_1 + r_2 + \dots + r_n + R_1 + R_2 + \dots + R_N) - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n). \quad (5)$$

Применяя закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС, придерживаются правила знаков.

1. Сила тока в правой части уравнения (5) считается положительной, если направление тока совпадает с направлением от a к b .

2. ЭДС считается положительной, если работа сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда на данном участке цепи в направлении от a к b положительна. В случае гальванического элемента или аккумулятора ЭДС положительна, если этот заряд внутри источника перемещается от отрицательного электрода к положительному. С учётом этого в правой части уравнения (5) записывается сумма всех ЭДС по правилу знаков.

Применив закон Ома к участку 1—2 цепи, показанной на рисунке 1.41, получим $\varphi_1 - \varphi_2 = Ir - \varepsilon$. При разомкнутой цепи $I = 0$ и, следовательно, $\varepsilon = \varphi_2 - \varphi_1$. Таким образом, ЭДС элемента равна разности потенциалов между его полюсами при разомкнутой цепи.



Рис. 1.45

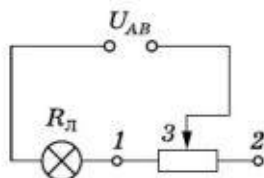


Рис. 1.46

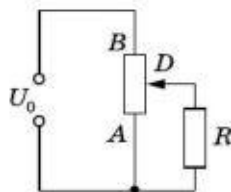


Рис. 1.47

РЕОСТАТ. *Реостат* представляет собой резистор с регулируемым сопротивлением (рис. 1.45). Пусть часть цепи состоит из электрической лампы накаливания и последовательно соединённого с ней реостата (рис. 1.46). С помощью реостата можно изменять общее сопротивление цепи: от максимального сопротивления, равного сумме сопротивлений реостата и лампы, до минимального, равного только сопротивлению лампы.

В общем случае

$$I = \frac{U_{AB}}{R_L + R_{31}}.$$

Если контакт 3 совпадает с контактом 1, то

$$I_{\max} = \frac{U_{AB}}{R_L}.$$

Если контакт 3 совпадает с контактом 2, то

$$I_{\min} = \frac{U_{AB}}{R_L + R_{12}},$$

где R_{12} — сопротивление реостата.

Таким образом, *реостат позволяет плавно регулировать значение силы тока в цепи и в данном случае изменять степень накала нити лампы, включённой в цепь.*

ПОТЕНЦИОМЕТР. *Потенциометр (делитель напряжения)* — устройство, предназначенное для получения плавно изменяемого напряжения U от источника постоянного напряжения U_0 : $U \leq U_0$ (рис. 1.47). Точка D на схеме представляет собой скользящий контакт. При этом

$U_{R_{\min}} = 0$ (когда контакт D соединён с точкой A),

$U_{R_{\max}} = U_0$ (когда контакт D соединён с точкой B).

Таким образом, *потенциометр позволяет получать различные значения напряжения на нагрузке, которой в данном случае является резистор с сопротивлением R .*



1. Какое сопротивление называют: а) внутренним; б) внешним?
2. Чем определяется падение напряжения на участке цепи? 3. Сформулируйте и запишите закон Ома для полной цепи. 4. Как опреде-

лить ЭДС и внутреннее сопротивление батареи, содержащей несколько: а) последовательно соединённых элементов; б) параллельно соединённых элементов? 5. Сформулируйте и запишите закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС. 6. Для чего используют: а) реостат; б) потенциометр?

Почему при коротком замыкании напряжение на клеммах источника тока близко к нулю, хотя сила тока в цепи имеет наибольшее значение?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Сила тока через аккумулятор в конце зарядки $I_1 = 4$ А. При этом разность потенциалов на его клеммах $U_1 = 12,6$ В. Сила тока короткого замыкания $I_{к.з} = 305$ А. В начале разрядки того же аккумулятора сила тока $I_2 = 6$ А. Какова при этом разность потенциалов U_2 на его клеммах?

Дано:

$$I_1 = 4 \text{ А}$$

$$U_1 = 12,6 \text{ В}$$

$$I_{к.з} = 305 \text{ А}$$

$$I_2 = 6 \text{ А}$$

$$U_2 = ?$$

Решение:

Схема зарядки аккумулятора показана на рисунке 1.48, а. Выберем направление обхода против часовой стрелки и запишем закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС:

$$U_1 = I_1 r - (-\mathcal{E}) = I_1 r + \mathcal{E}. \quad (1)$$

Сила тока при коротком замыкании аккумулятора (рис. 1.48, б)

$$I_{к.з} = \frac{\mathcal{E}}{r}. \quad (2)$$

Схема разрядки аккумулятора на внешнюю нагрузку показана на рисунке 1.48, в. По закону Ома для участка цепи, содержащего ЭДС:

$$U_2 = \mathcal{E} - I_2 r. \quad (3)$$

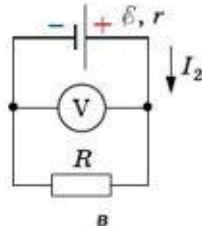
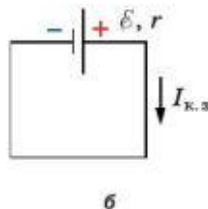
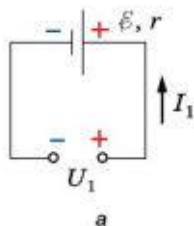


Рис. 1.48

Из уравнений (1) и (2) найдём:

$$\varepsilon = \frac{U_1 I_{к.з}}{I_1 + I_{к.з}}; \quad r = \frac{U_1}{I_1 + I_{к.з}}.$$

Подставим данные выражения в уравнение (3):

$$U_2 = \frac{U_1 I_{к.з}}{I_1 + I_{к.з}} - I_2 \frac{U_1}{I_1 + I_{к.з}} = U_1 \frac{I_{к.з} - I_2}{I_{к.з} + I_1}.$$

С учётом числовых данных получим

$$U_2 = 12,6 \cdot \frac{305 - 6}{305 + 4} \text{ В} \approx 12,2 \text{ В}.$$

Ответ: $U_2 \approx 12,2 \text{ В}$.



УПРАЖНЕНИЯ

1. К источнику тока с ЭДС 12 В и внутренним сопротивлением 1 Ом подключён резистор с сопротивлением 5 Ом. Найдите силу тока в цепи и напряжение на зажимах источника.
2. Чему равно внутреннее сопротивление источника тока, если его ЭДС составляет 1,2 В и при внешнем сопротивлении 5 Ом сила тока в цепи равна 0,2 А?
3. Определите разность потенциалов между точками А и В электрической цепи, схема которой приведена на рисунке 1.49. ЭДС каждого источника тока равна 1,5 В, внутреннее сопротивление каждого источника составляет 0,1 Ом.
4. Два одинаковых источника тока с ЭДС ε и внутренним сопротивлением r соединены так, как показано на рисунке 1.50. Определите показания приборов. Сопротивление амперметра принять равным нулю, а сопротивление вольтметра — бесконечно большим.

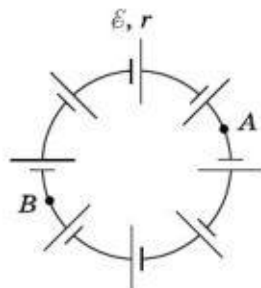


Рис. 1.49

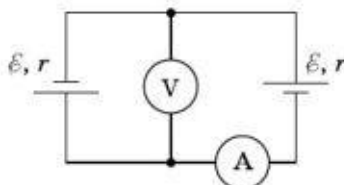


Рис. 1.50

ЗАДАНИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ И ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

1. Выполните проектную работу на тему «Гальванический элемент из подручных средств». Предложите различные химические источники тока, выполните измерения ЭДС и сделайте выводы.
2. Выполните проектную работу на тему «КПД школьных лабораторных и демонстрационных электродвигателей». Проведите их сравнительный анализ.

Примерные темы рефератов и проектов

1. Источники постоянного тока: виды, устройство, физические основы работы, применение.
2. Мостик Уитстона: схема и применение.
3. Реостаты, потенциометры, магазины сопротивлений: устройство, принцип действия, применение.
4. Явление сверхпроводимости: история открытия, свойства сверхпроводников и их применение в различных областях науки и техники.
5. Короткое замыкание. Устройства для защиты электрических цепей.



Глава 2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В СРЕДАХ



Напомним, что по способности веществ проводить электрический ток их можно разделить на несколько групп. К одной группе относят вещества, которые содержат свободные заряженные частицы и в которых поэтому легко создать электрический ток. Их называют *проводниками*. Проводниками электрического тока, кроме металлов и электролитов, при определённых условиях могут быть и другие вещества, например газы, вакуум. К другой группе относят вещества, в которых содержится мало свободных заряженных частиц. Эти вещества называют *изоляторами* или *диэлектриками*. В природе нет идеальных изоляторов. Даже лучшие из известных изоляторов имеют некоторое небольшое по сравнению с проводниками число свободных заряженных частиц.

Кроме того, существует группа веществ, проводимость которых занимает промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Они получили название *полупроводников*. К ним относятся, например, кремний, германий, селен. Удельное сопротивление полупроводников может изменяться в широких пределах при изменении температуры, освещения, внесении в них примесей.

§ 9 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБОСНОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ МЕТАЛЛОВ

ЭЛЕКТРОННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ МЕТАЛЛОВ. Основы классической электронной теории проводимости металлов были заложены немецким физиком Паулем Друдом (1863—1906) и нидерландским учёным Хендриком Лоренцем (1853—1928). Данная теория объясняет существование электрического сопротивления металлов, электронную проводимость металличе-

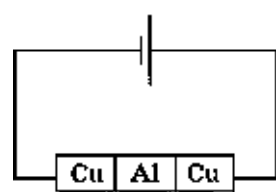


Рис. 2.1

ских проводников, а также явления электростатической индукции и поляризации диэлектриков. Приведём её основные положения:

- металлический проводник состоит из положительно заряженных ионов, колеблющихся около положения равновесия, и свободных электронов, способных перемещаться по всему объёму проводника;

- движение электронов подчиняется законам классической механики;

- электроны взаимодействуют только с ионами кристаллической решётки; это взаимодействие имеет характер соударений;

- в узлах кристаллической решётки располагаются ионы металла, между ними хаотически движутся свободные электроны, образуя своеобразный электронный газ, подобный идеальному газу.

Электрические свойства металлов обусловлены наличием в них свободных электронов с концентрацией порядка 10^{28} м^{-3} , что примерно соответствует концентрации атомов. Эти электроны называют *электронами проводимости* (свободными электронами). Они образуются путём отрыва от атомов металлов их валентных электронов. Такие электроны не принадлежат какому-то определённому атому и способны перемещаться по всему объёму тела. Ионы кристаллической решётки металла не принимают участие в создании тока. Их перемещение при прохождении тока означало бы перенос вещества вдоль проводника. Но как же это было установлено?

Немецкий физик Карл Рикке (1845—1915) составил цепь, в которую входили три прижатых друг к другу цилиндра, из которых два крайних были медные, а средний — алюминиевый (рис. 2.1). В течение года через эти цилиндры протекал ток порядка 0,1 А, так что общий заряд, прошедший через цилиндры, превысил $3,5 \cdot 10^6$ Кл. По окончании опыта цилиндры были разъединены, и обнаружилились лишь следы взаимного проникновения, не превышающие результатов обычной диффузии атомов в твёрдых телах.

На основании этого опыта можно сделать вывод о том, что перенос электрического заряда в металлах осуществляется не ионами металла.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО СУЩЕСТВОВАНИЯ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В МЕТАЛЛАХ. Доказательство того, что проводимость металлов обусловлена движением свободных электронов, было дано в опытах российских учёных Леонида Исааковича Мандельштама (1879—1944) и Николая Дмитриевича Папалекси (1880—1947) в 1913 г.

Идея опыта состояла в следующем. Если резко затормозить движущийся кусок металла, то находящиеся в нём свободные заряды, двигаясь по инерции, будут скапливаться у переднего его конца, и между концами проводника возникнет разность потенциалов. В опыте Мандельштама — Па-

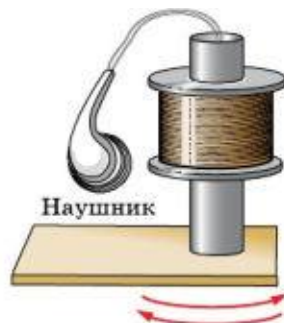


Рис. 2.2

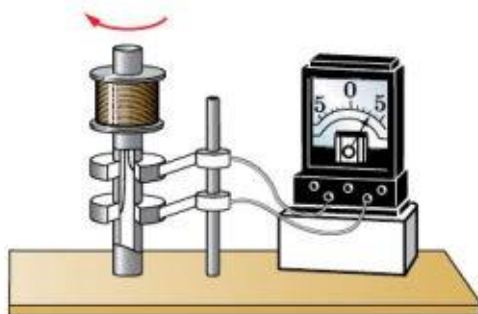


Рис. 2.3

палеки использовалась катушка с намотанным на неё проводом, концы которого были присоединены к наушнику (рис. 2.2). Катушку приводили в быстрое вращение вокруг её оси, а затем резко останавливали. При этом на концах катушки возникала переменная разность потенциалов, а в наушнике слышались щелчки.

Наблюдаемое явление можно объяснить тем, что при резком торможении быстро движущегося проводника должен наблюдаться кратковременный электрический ток, обусловленный инерцией электронов. Однако это были лишь качественные опыты. Никакие измерения и количественные расчёты не были произведены.

Опыт с количественными результатами был осуществлён в 1916 г. американскими учёными Ричардом Толменом (1881—1948) и Томасом Стюартом (1895—1958). В опыте Толмена—Стюарта катушка большого диаметра с намотанным на неё металлическим проводом приводилась в быстрое вращение и затем резко тормозилась (рис. 2.3). При торможении катушки свободные заряды в проводнике продолжали некоторое время двигаться по инерции. Вследствие движения зарядов относительно проводника в катушке возникал кратковременный электрический ток, который регистрировался гальванометром, присоединённым к концам проводника с помощью скользящих контактов.

Направление тока свидетельствовало о том, что он обусловлен движением отрицательно заряженных частиц. Переносимый при этом заряд прямо пропорционален отношению заряда q_0 частиц, создающих ток, к их массе m_0 . Поэтому, измеряя заряд, проходящий через гальванометр за всё время существования тока в цепи, удалось определить отношение $\frac{q_0}{m_0}$.

Оно оказалось равным $1,8 \cdot 10^{11}$ Кл/кг. Это значение совпадает со значением отношения заряда к массе для электрона, найденным ранее из других опытов. Таким образом, было экспериментально установлено, что носителями электрического заряда в металлах являются свободные электроны.



1. Укажите основные положения классической электронной теории проводимости металлов.
2. Какой вывод следует из опыта Рикке?
3. Каким образом Мандельштам и Папалекси доказали, что проводимость металлов обусловлена движением свободных электронов?
4. В чём состояла сущность опытов Толмена — Стюарта? Какой вывод можно сделать на их основе?

§ 10

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАСТВОРАХ И РАСПЛАВАХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ. ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОЛИЗА

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ЭЛЕКТРОЛИТОВ. К электролитам относят растворы солей, кислот и щелочей, а также расплавленные соли. Как возникает электропроводность у этих веществ?



Соединим последовательно источник тока, электрическую лампочку и два электрода (две пластинки). Электроды разъединены (цепь не замкнута), поэтому лампочка не горит. Опустим теперь электроды в сосуд с дистиллированной водой. Лампочка также не горит. Следовательно, дистиллированная вода не является проводником электрического тока. Вынем электроды из воды и поставим их на лист бумаги, на который насыпана поваренная соль NaCl . Лампочка и теперь не горит. Следовательно, и сухая соль не является проводником электрического тока.

Ещё раз опустим в дистиллированную воду электроды с прилипшей к ним солью (рис. 2.4). Мы увидим, что лампочка загорелась, что свидетельствует о появлении электрического тока в цепи.

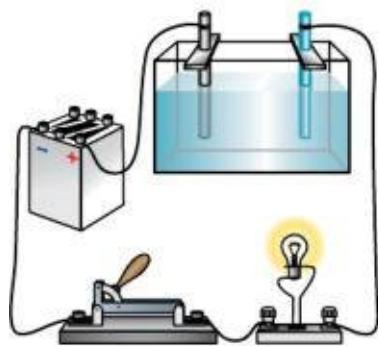


Рис. 2.4

Таким образом, хотя в отдельности дистиллированная вода и соль не являются проводниками, раствор соли в воде является хорошим проводником электрического тока. То же самое можно сказать (и на опыте в этом убедиться) о водных растворах кислот и щелочей.

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКАЯ ДИССОЦИАЦИЯ. Заряженные частицы, обеспечивающие электрический ток в растворах электролитов, образуются в результате *электролитической диссоциации*. Рассмотрим этот процесс





Рис. 2.5

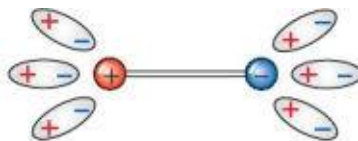


Рис. 2.6

на примере бромида калия KBr . Взаимодействие атомов брома и калия в молекуле бромида калия упрощённо можно представить как взаимодействие двух ионов: положительно заряженного иона K^+ и отрицательно заряженного иона Br^- . Объясняется это тем, что единственный валентный электрон у калия слабо связан с атомом. При образовании молекулы KBr этот электрон переходит к атому брома, превращая его в отрицательный ион Br^- .

В соответствии с этим молекулу KBr можно схематически изобразить в виде диполя (рис. 2.5). В электрическом поле, создаваемом молекулой KBr , молекулы воды ориентируются так, как показано на рисунке 2.6. При этом они растягивают молекулу KBr . В результате часть молекул KBr распадается — диссоциирует на ионы K^+ и Br^- .

Степень диссоциации (доля молекул растворённого вещества, которые распадаются на ионы) зависит от температуры, концентрации раствора и диэлектрической проницаемости растворителя. С увеличением температуры степень диссоциации возрастает и, следовательно, увеличивается концентрация положительно и отрицательно заряженных ионов.

Наряду с процессом диссоциации в растворах электролитов происходит и обратный процесс. Ионы разных знаков при встрече могут снова объединиться в нейтральные молекулы — *рекомбинировать* (воссоединиться). При неизменных условиях в растворе устанавливается динамическое равновесие, при котором число молекул, распадающихся за секунду на ионы, равно числу пар ионов, которые за то же время вновь воссоединяются в нейтральные молекулы. При наступлении динамического равновесия концентрация ионов в растворе электролита сохраняется постоянной (при неизменной температуре).

При отсутствии внешнего электрического поля ионы вместе с нераспавшимися молекулами находятся в хаотическом тепловом движении. Если сосуд с раствором электролита включить в электрическую цепь, то между электродами образуется электрическое поле и ионы в растворе придут в упорядоченное движение (рис. 2.7).

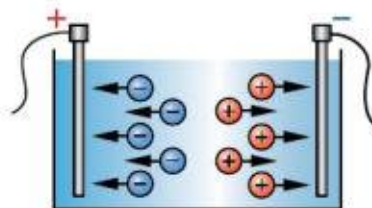


Рис. 2.7

Положительно заряженные ионы станут двигаться по направлению напряжённости поля, т. е. к *катоду* (электроду, соединённому с отрицательным полюсом источника тока), а отрицательно заряженные ионы — в противоположном направлении, т. е. к *аноду* (электроду, соединённому с положительным полюсом источника тока). Отрицательные ионы, пришедшие к аноду и называемые *анионами*, отдают свои лишние электроны аноду, а посредством его и соединительных проводников — положительному полюсу источника, возмещая на нём недостаток электронов. Положительные ионы, пришедшие к катоду и называемые *катионами*, получают недостающие им электроны из избытка их на катоде. Тем самым во внешней цепи устанавливается перемещение электронов от отрицательного полюса источника тока к положительному. При этом через раствор электролита заряд переносится вместе с частицами вещества — ионами. Такую проводимость называют *ионной*.

ЭЛЕКТРОЛИЗ. При прохождении электрического тока через раствор электролита анионы отдают свои лишние электроны на аноде (в химии это называется окислительной реакцией), а катионы на катоде получают недостающие электроны (восстановительная реакция). Таким образом, на электродах при прохождении через раствор электрического тока происходит выделение веществ, входящих в состав электролитов.

Процесс выделения на электродах веществ, связанный с окислительно-восстановительными реакциями, называют электролизом.

При постоянной температуре графиком зависимости силы тока от напряжения для растворов электролитов является, как и для металлического проводника, прямая. Однако она не проходит через начало координат, а сдвинута вправо (рис. 2.8). Это объясняется тем, что при электролизе происходит поляризация электродов*, погружённых в раствор электролита. При этом возникающая ЭДС поляризации имеет знак, противоположный знаку напряжения U на электродах. На рисунке 2.8 отрезок OA соответствует ЭДС поляризации.

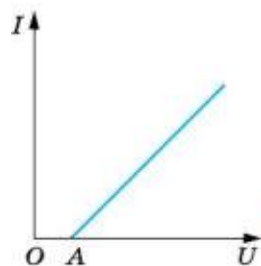


Рис. 2.8

* **ЗАКОН ЭЛЕКТРОЛИЗА ФАРАДЕЯ.** Выясним, от чего зависит масса вещества, выделяющегося за определённое время при электролизе.

* Это явление связано с тем, что на электродах выделяются вещества, которые по химическому составу отличаются от материала электродов.

Масса m выделившегося вещества равна произведению массы одного иона m_i на число ионов N_i , осевших на электроде за время Δt :

$$m = m_i N_i. \tag{1}$$

Масса иона равна

$$m_i = \frac{M}{N_A}, \tag{2}$$

где M — молярная (или атомная) масса вещества; N_A — постоянная Авогадро.

Число ионов, осевших на электроде, равно

$$N_i = \frac{\Delta q}{q_i}, \tag{3}$$

где $\Delta q = I\Delta t$ — заряд, прошедший через раствор электролита за время Δt ; q_i — заряд иона, который равен произведению элементарного заряда (заряда электрона) e на валентность n атома (или группы атомов), из которого образовался ион: $q_i = en$.

При диссоциации молекул, состоящих из одновалентных атомов ($n = 1$), возникают однозарядные ионы. Например, при диссоциации молекулы бромида калия KBr возникают ионы K^+ и Br^- , а при диссоциации молекулы медного купороса $CuSO_4$ получаются два двухзарядных иона Cu^{2+} и SO_4^{2-} , так как атом меди и кислотный остаток в данном соединении двухвалентны ($n = 2$).

Подставляя в формулу (1) выражения (2) и (3) и учитывая выражения для Δq и q_i , получим

$$m = \frac{M}{neN_A} I\Delta t. \tag{4}$$

Обозначим через k коэффициент пропорциональности между массой вещества m и зарядом $\Delta q = I\Delta t$ в формуле (4):

$$k = \frac{1}{eN_A} \frac{M}{n}. \tag{5}$$

Тогда формула (4) примет вид

$$m = kI\Delta t. \tag{6}$$

Масса вещества, выделившегося на каждом из электродов, прямо пропорциональна силе тока и времени прохождения тока через раствор электролита.

Это утверждение было экспериментально установлено в 1833 г. М. Фарадеем и носит название *закона электролиза Фарадея*.

Коэффициент k в формуле (6) называют *электрохимическим эквивалентом вещества* и выражают в килограммах на кулон (кг/Кл). Он за-

висит от рода вещества. Из формулы (6) видно, что *электрохимический эквивалент k численно равен массе вещества, выделившегося на электроде, при переносе ионами через раствор электролита заряда, равного 1 Кл.*

Произведение элементарного заряда e на постоянную Авогадро N_A носит название *постоянной Фарадея*:

$$F = eN_A.$$

Введя постоянную Фарадея в формулу (4) для массы вещества, выделившегося при электролизе на электроде, получим

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} I \Delta t. \quad (7)$$

Согласно формуле (7) постоянная Фарадея F численно равна заряду, который нужно пропустить через раствор электролита, чтобы выделить на электроде 1 моль одновалентного вещества. Постоянная Фарадея, найденная из опыта, равна $F = 9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль.

Зная постоянную Авогадро N_A и постоянную Фарадея F , можно найти заряд одновалентного иона, т. е. заряд электрона: $e = F/N_A \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Любой двухвалентный ион переносит заряд в два раза больший, трёхвалентный — в три раза больший и т. д. Никогда не бывает, чтобы ион переносил заряд, содержащий дробную часть заряда одновалентного иона. Отсюда следует вывод, что заряд одновалентного иона ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл) представляет собой наименьший (элементарный) заряд, существующий в природе. *Любой электрический заряд состоит из целого числа элементарных зарядов.*



ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИЗА. Рассмотрим некоторые примеры использования электролиза в технике.

Гальваностегия — покрытие металлических изделий тонким слоем другого металла (никелирование, хромирование, серебрение, золочение и т. д.)

с целью их предохранения от окисления и придания им привлекательного внешнего вида. Предмет, подлежащий покрытию, тщательно очищают, хорошо обезжиривают и помещают в качестве катода в электролитическую ванну, содержащую раствор соли того металла, которым должен быть покрыт данный предмет. Анодом является пластинка из того же металла. Для более равномерного покрытия обычно применяют две пластинки в качестве анода, помещая предмет между ними (рис. 2.9).

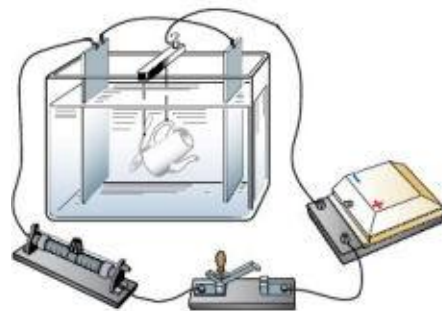


Рис. 2.9

Гальванопластика — электролитическое изготовление копий с рельефных предметов (медалей, гравюр, барельефов и т. д.). С рельефного предмета делают восковой или иной слепок. Затем поверхность слепка покрывают тонким слоем графита, чтобы она стала проводящей. В таком виде слепок используется в качестве катода, который опускают в электролитическую ванну с раствором медного купороса. Анодом является медная пластинка. Когда на слепке нарастёт достаточно толстый слой меди, электролиз прекращают и воск осторожно удаляют. Так получают точную медную копию оригинала.

Процесс получения отслаиваемых покрытий был разработан русским учёным Борисом Семёновичем Якоби (1801—1874), который в 1836 г. применил этот способ для изготовления фигур для Исаакиевского собора в Санкт-Петербурге.

1. При каком условии в электрической цепи горит электрическая лампочка (см. рис. 2.4)? **2.** В чём заключается явление электролитической диссоциации? **3.** Какие заряженные частицы обеспечивают электрический ток в растворах и расплавах электролитов? **4.** Что такое электролиз? Приведите примеры практического использования электролиза. **5.** Запишите и сформулируйте закон Фарадея для электролиза. **6.** Какой физический смысл имеет постоянная Фарадея? Чему она равна?

Электрическую лампу включили в сеть последовательно с электролитической ванной, наполненной слабым раствором поваренной соли (NaCl). Изменится ли накал нити лампы, если добавить в раствор ещё некоторое количество соли?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

* Электролитическая ванна с раствором CuSO_4 включена в цепь, сила тока в которой изменяется с течением времени так, как показано на рисунке 2.10. Сколько меди выделится на катоде спустя 8 мин после начала электролиза в каждом случае? Электрохимический эквивалент меди равен $0,33 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл.

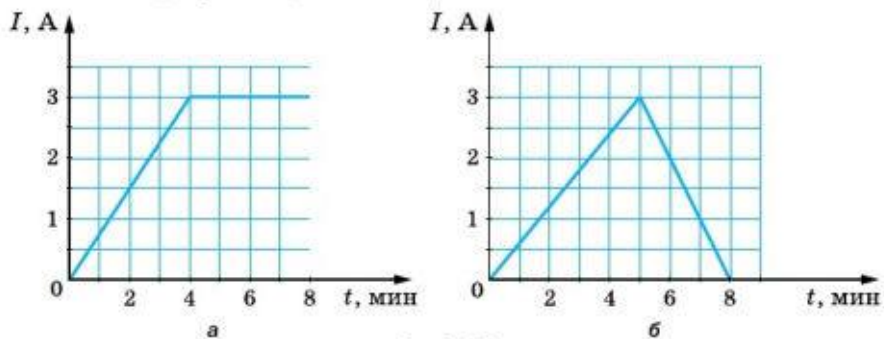


Рис. 2.10

Дано:

$$t = 8 \text{ мин}$$

$$k = 0,33 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл}$$

$$m_1 - ?$$

$$m_2 - ?$$

Решение:

По закону электролиза при прохождении через раствор заряда q на электроде выделяется масса вещества

$$m = kq,$$

где k — электрохимический эквивалент вещества.

По графику зависимости силы тока от времени (рис. 2.10, а) определим модуль заряда, прошедшего через раствор электролита за 8 мин. Для этого рассчитаем площадь фигуры под графиком. Учитывая данные и выражая время в единицах СИ, найдём:

$$q_1 = (3 \cdot 4 \cdot 60 \cdot \frac{1}{2} + 3 \cdot 4 \cdot 60) \text{ Кл} = 1080 \text{ Кл}.$$

Для графика зависимости силы тока от времени (рис. 2.10, б)

$$q_2 = \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 8 \cdot 60 \text{ Кл} = 720 \text{ Кл}.$$

Подставляя числовые данные в формулу закона электролиза, получим

$$m_1 = 0,33 \cdot 10^{-6} \cdot 1080 \text{ кг} = 0,000356 \text{ кг} \approx 0,36 \text{ г};$$

$$m_2 = 0,33 \cdot 10^{-6} \cdot 720 \text{ кг} = 0,000238 \text{ кг} \approx 0,24 \text{ г}.$$

Ответ: $m_1 \approx 0,36 \text{ г}$; $m_2 \approx 0,24 \text{ г}$.



УПРАЖНЕНИЯ

1. При электролизе водного раствора соли некоторого металла на катоде выделился 1 моль металла. Через раствор прошёл заряд, модуль которого равен $1,93 \cdot 10^5$ Кл. Найдите валентность ионов металла.
2. При силе тока 2,5 А за 20 мин в электролитической ванне выделилось 1017 мг двухвалентного металла. Чему равна его атомная масса?
3. При какой силе тока, который пропускают через раствор сернокислого цинка (ZnSO_4) в течение $1,8 \cdot 10^4$ с, на катоде выделится $3,06 \cdot 10^{-2}$ кг цинка?
4. Изделие покрывают при электролизе слоем серебра толщиной $2 \cdot 10^{-5}$ м. Сколько времени длится электролиз, если сила тока в ванне 0,525 А? Площадь поверхности изделия составляет $1,82 \cdot 10^{-2}$ м².
5. Золочение металлических изделий длилось $1,93 \cdot 10^5$ с при силе тока 1 А в цепи. Определите толщину нанесённого слоя золота, если общая площадь поверхности изделий равна 0,0034 м².

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ГАЗАХ. Все газы (в том числе и воздух) в естественном состоянии не проводят электрический ток, т. е. являются изоляторами.



Убедимся в этом на опыте. Возьмём электрометр с присоединёнными к его стержню и корпусу дисками плоского конденсатора, которые разделены воздушным промежутком (рис. 2.11). Сообщим им разноимённые заряды с помощью источника высокого напряжения.

При комнатной температуре, если воздух достаточно сухой, конденсатор заметно не разряжается — положение стрелки электрометра не изменяется. Для того чтобы заметить уменьшение угла отклонения стрелки электрометра, требуется длительное время. Следовательно, электрический ток в воздухе между дисками очень мал. Изолирующие свойства воздуха (газов) объясняются отсутствием в нём свободных электрических зарядов: атомы и молекулы газов в естественном состоянии являются нейтральными.

Внесём в пространство между дисками зажжённую спиртовку (рис. 2.12). Мы заметим, что угол отклонения стрелки электрометра быстро уменьшается, конденсатор разряжается. Таким образом, нагретый воздух между дисками стал проводником и в нём установился электрический ток.

Процесс протекания электрического тока через газы называют электрическим разрядом в газах.

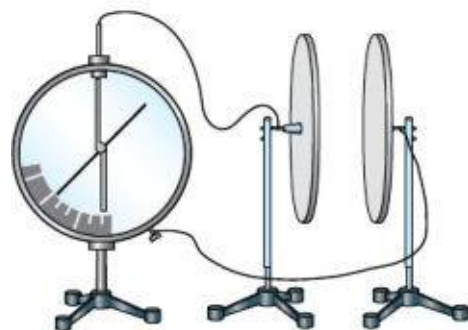


Рис. 2.11



Рис. 2.12

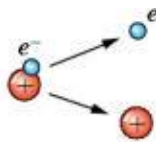


Рис. 2.13

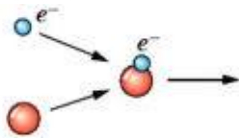


Рис. 2.14

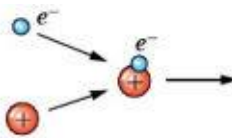


Рис. 2.15

ИОНИЗАЦИЯ ГАЗОВ. Рассмотренный опыт показывает, что в воздухе между дисками под действием пламени появились заряженные частицы. В ходе многочисленных исследований было установлено, что *носителями электрических зарядов в газах являются ионы (как положительные, так и отрицательные) и электроны*. Как они возникают?

При нагревании воздуха (газа) молекулы начинают двигаться быстрее. При этом некоторые молекулы могут двигаться так быстро, что часть из них при столкновениях распадается на положительно заряженные ионы и электроны (рис. 2.13).

Распад молекул газа на электроны и положительные ионы называют **ионизацией газа**.

Факторы, вызывающие ионизацию газа, называют *ионизаторами*. Нейтральные атомы или молекулы газа могут ионизироваться под воздействием рентгеновских и ультрафиолетовых лучей, излучения радиоактивных веществ и т. д. Чем выше температура, тем больше образуется ионов. Отрицательные ионы появляются благодаря присоединению электронов к нейтральным атомам или молекулам газа (рис. 2.14).

Процесс ионизации газа сопровождается противоположным ему процессом восстановления нейтральных молекул из разноимённо заряженных ионов (или из положительных ионов и электронов) вследствие их электрического (кулоновского) притяжения (рис. 2.15). Такой процесс называют *рекомбинацией заряженных частиц*. При этом концентрация заряженных частиц в ионизированном газе сохраняется неизменной. Если прекратить действие ионизатора, то рекомбинация начнёт преобладать над ионизацией и число ионов уменьшится почти до нуля.

МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ГАЗОВ. При отсутствии внешнего электрического поля заряженные частицы, как и нейтральные молекулы, движутся хаотически. Если ионы и свободные электроны оказываются во внешнем электрическом поле, то они приходят в направленное движение и создают электрический ток в газах (рис. 2.16).

Электрический ток в газе представляет собой направленное движение положительных ионов к катоду, а отрицательных ионов и электронов — к аноду.

На электродах происходит нейтрализация заряженных частиц, как и при прохождении электрического тока через растворы и расплавы электролитов. Однако в газах отсутствует выделение веществ на электродах. Ионы газа, достигнув электродов, отдают им свои заряды, превращаются в нейтральные молекулы и диффундируют обратно в газ.

НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯД. В том случае, когда действует ионизатор, газовый разряд называют *несамостоятельным*. При прекращении действия ионизатора такой разряд прекратится, и газ перестанет быть проводником тока.

Для исследования зависимости силы тока от напряжения при несамостоятельном разряде в газе удобно использовать стеклянную трубку с двумя впаянными в стекло металлическими электродами. Соберём цепь по схеме, изображённой на рисунке 2.17. Пусть с помощью какого-нибудь ионизатора, например за счёт воздействия рентгеновских лучей, в газе образуется ежесекундно определённое число пар заряженных частиц: электронов и положительных ионов.

При отсутствии напряжения на электродах ($U = 0$) гальванометр, включённый в цепь (см. рис. 2.17), покажет нуль ($I = 0$). При небольшой разности потенциалов между электродами трубки положительно заряженные ионы начнут перемещаться к отрицательному электроду (катоду), а электроны и отрицательно заряженные ионы — к аноду, т. е. возникнет газовый разряд. Однако вследствие рекомбинации не все образующиеся под действием ионизатора ионы достигнут электродов. Часть их, рекомбинируя, образует нейтральные молекулы.

По мере увеличения разности потенциалов между электродами трубки доля заряженных частиц, достигающих электродов, увеличивается, т. е. сила тока в цепи возрастает (рис. 2.18). Объясняется это тем, что при

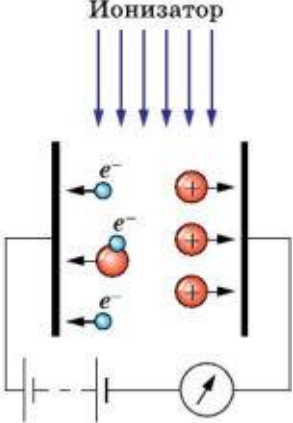


Рис. 2.16

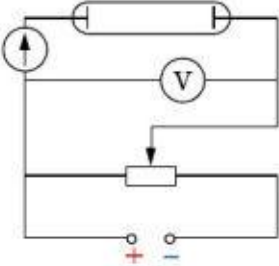


Рис. 2.17

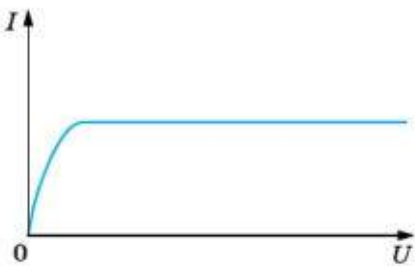


Рис. 2.18

большем напряжении между электродами ионы движутся с большей скоростью, поэтому им требуется меньше времени для воссоединения в нейтральные молекулы. Наконец, при некотором определённом напряжении наступает момент, при котором все заряженные частицы, образующиеся в газе под действием ионизатора за секунду, достигают за это же время электродов. Дальнейшее увеличение напряжения не приводит к увеличению числа переносимых ионов. Ток, как говорят, достигает *насыщения* (см. рис. 2.18, горизонтальный участок графика).

Таким образом, вольт-амперная характеристика при несамостоятельном разряде в газах является *нелинейной*, т. е. *закон Ома для газов выполняется только при малых напряжениях*.

САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯД. Если после достижения насыщения продолжать увеличивать разность потенциалов между электродами, то сила тока при достаточно большом напряжении начнёт резко возрастать (рис. 2.19). Это означает, что в газе появляются дополнительные ионы сверх тех, которые образуются за счёт действия ионизатора. Сила тока может возрасти в сотни и тысячи раз, а число заряженных частиц, возникающих в процессе разряда, может стать таким большим, что внешний ионизатор будет уже не нужен для поддержания разряда. Такой разряд называют *самостоятельным*.

* **ИОНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ.** В чём состоит причина резкого увеличения числа заряженных частиц при больших напряжениях? Электрон, ускоряясь электрическим полем, на своём пути к аноду сталкивается с ионами и нейтральными молекулами. В промежутках между двумя последовательными столкновениями энергия электрона увеличивается за счёт работы сил электрического поля. Чем больше разность потенциалов между электродами, тем больше напряжённость электрического поля.

Кинетическая энергия электрона перед очередным столкновением пропорциональна напряжённости поля и длине свободного пробега электрона (пути между двумя последовательными столкновениями):

$$\frac{m_e v^2}{2} = eEl.$$

Если кинетическая энергия электрона превосходит работу A_i , которую нужно совершить, чтобы ионизировать нейтральный атом (или молекулу), т. е.

$$\frac{m_e v^2}{2} > A_i,$$

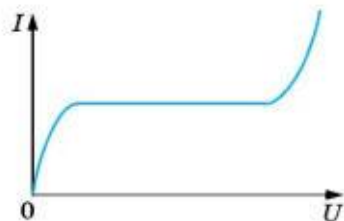


Рис. 2.19

то при столкновении электрона с атомом (или молекулой) происходит его (её) ионизация, называемая *ионизацией электронным ударом*.

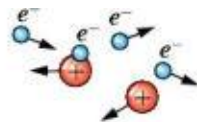


Рис. 2.20

Для её характеристики вводят *потенциал ионизации* U_i . Он представляет собой наименьшую разность потенциалов, которую должен пройти электрон в ускоряющем его электрическом поле, чтобы приобрести энергию, достаточную для ионизации невозбуждённого атома (или молекулы) электронным ударом. При этом $A_i = eU_i$, $U_i = El$. В результате столкновения электрона с атомом (рис. 2.20) образуется ещё один электрон и положительный ион.

Таким образом, вместо одной заряженной частицы появляются три — ион и два электрона. Эти электроны, в свою очередь, получают энергию в поле и ионизируют новые атомы и т. д. Вследствие этого число заряженных частиц очень быстро возрастает.

Описанный процесс имеет сходство с образованием снежной лавины в горах и поэтому получил название *электронной (или ионной) лавины*.

Но ионизация только электронным ударом не может обеспечить длительный самостоятельный разряд. Ведь все возникающие таким образом электроны движутся по направлению к аноду и по достижении анода «выбывают из игры». Для поддержания разряда необходима эмиссия (от лат. «imissio» — испускание) электронов с катода.



- ?** 1. Какое явление называют: а) электрическим разрядом в газах; б) ионизацией газа? 2. В чём состоит процесс рекомбинации заряженных частиц в газах? 3. Объясните механизм электропроводности газов. 4. Какой газовый разряд называют: а) несамостоятельным; б) самостоятельным? 5. Как возникает ионизация электронным ударом? 6. Что представляет собой потенциал ионизации? Как его можно определить?

?? Помещая пламя спиртовки в зазор между пластинами заряженного конденсатора, присоединёнными к электromетру (см. рис. 2.12), можно видеть, что заряд конденсатора уменьшается. Какой тип газового разряда при этом наблюдается? Как изменится скорость разрядки конденсатора, если: а) увеличить пламя спиртовки; б) убрать спиртовку?



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ



Электрический пробой воздуха наступает при напряжённости электрического поля, модуль которой равен 3 МВ/м. Определите потенциал ионизации воздуха и скорость электронов перед уда-

ром о молекулы, если длина свободного пробега электронов равна 5 мкм.

Дано:

$$E = 3 \text{ МВ/м}$$

$$l = 5 \text{ мкм}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$v_0 = 0$$

$$U_i = ?$$

$$v = ?$$

СИ:

$$3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$$

$$5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Решение:

Согласно определению потенциала ионизации $U_i = El$ (электрическое поле считаем однородным).

В случае ионизации электронным ударом можно записать:

$$eU_i = \frac{m_e v^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eU_i}{m_e}}.$$

С учётом числовых данных

$$U_i = 3 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \text{ В} = 15 \text{ В};$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 15}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \text{ м/с} \approx 2,3 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

Ответ: $U_i = 15 \text{ В}; v \approx 2,3 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$



УПРАЖНЕНИЯ

1. Плоский конденсатор подключён к источнику с напряжением 6 кВ. При каком расстоянии между пластинами произойдёт пробой, если ударная ионизация воздуха начинается при напряжённости электрического поля 3 МВ/м?
2. Потенциал ионизации атома ртути равен 10,4 В. Какой наименьшей скоростью должен обладать электрон, чтобы ионизировать атом ртути при ударе?
3. Электрон со скоростью $1,83 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ влетел в однородное ускоряющее электрическое поле. Какую разность потенциалов должен пройти электрон, чтобы ионизировать атом водорода, если энергия ионизации равна $2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$?
4. Молния представляет собой прерывистый разряд, состоящий из отдельных импульсов длительностью примерно 1 мс. Модуль заряда, проходящего по каналу молнии за один импульс, равен 20 Кл, а среднее напряжение на концах канала составляет 2 ГВ. Определите силу тока и мощность одного импульса. Какая энергия выделяется при вспышке молнии, если она состоит из трёх разрядов?

ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД. Электроны могут приобрести энергию, необходимую для совершения ионизации, не только при увеличении напряжения между электродами, но, как следует из формулы $\frac{m_e v^2}{2} = eEl$, и за счёт увеличения длины свободного пробега электронов. Этого можно достигнуть путём разрежения газа.



Для наблюдения разряда в разреженных газах удобно использовать стеклянную трубку длиной около полуметра с двумя электродами (анодом A и катодом K) и с патрубком для откачивания воздуха (рис. 2.21). Присоединим электроды к источнику постоянного тока с напряжением в несколько тысяч вольт (электрической машине или высоковольтному выпрямителю). Если мы начнём откачивать воздух из трубки, то вскоре появится ток, что можно обнаружить по свечению воздуха в трубке. При давлении порядка 100 мм рт. ст. между электродами возникает разряд в виде светящейся змейки (в воздухе — малинового цвета, в других газах — иных цветов), соединяющей оба электрода. По мере дальнейшей откачки воздуха светящаяся змейка расширяется, и свечение постепенно заполняет почти всю трубку.

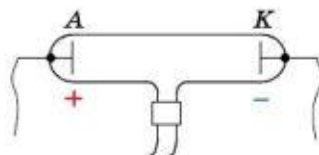


Рис. 2.21

При давлении порядка 1—2 мм рт. ст. и ниже наблюдается *тлеющий разряд*. В нём отчётливо выделяются четыре области (рис. 2.22): a — катодное тёмное пространство; b — тлеющее (отрицательное) свечение; c — фарадеево тёмное пространство; z — положительный столб разряда. Первые три области находятся вблизи катода и образуют катодную часть разряда.

Тлеющий разряд применяют в трубках для рекламы. Например, оранжево-красное свечение возникает при наполнении трубки неоном (рис. 2.23). В лампах дневного света используют раз-

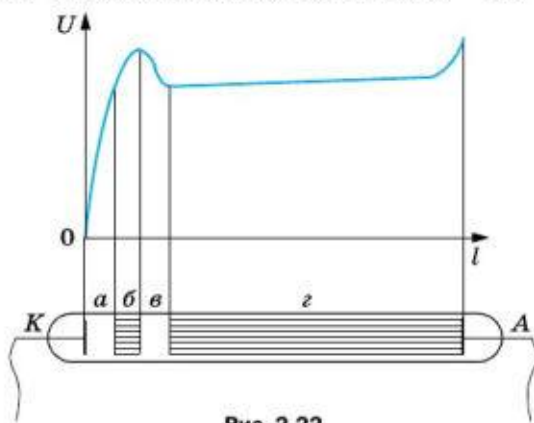


Рис. 2.22



Рис. 2.23

ряд в парах ртути. Важнейшее применение тлеющий разряд получил в газовых лазерах.

КОРОННЫЙ РАЗРЯД. При атмосферном давлении в газе, находящемся в сильно неоднородном электрическом поле (около острий, проводов линий высокого напряжения и т. д.), наблюдается разряд, светящаяся область которого часто напоминает корону. Поэтому его называют *коронным*. Плотность заряда на поверхности проводника тем выше, чем больше его кривизна. На острие плотность заряда максимальна, поэтому возле острия возникает сильное электрическое поле. Когда его напряжённость превысит $3 \cdot 10^6$ В/м, наступает газовый разряд. При такой большой напряжённости ионизация посредством электронного удара происходит при атмосферном давлении.

Заряженное грозовое облако индуцирует на поверхности Земли электрические заряды противоположного знака. Особенно большой заряд скапливается на остриях. Поэтому перед грозой или во время грозы нередко на остриях и острых углах высоко поднятых предметов (например, верхушках деревьев, мачт кораблей) вспыхивают похожие на кисточки конусы света. С давних времён это свечение называют огнями святого Эльма.

При наличии выступающих частей или очень тонких проводов может начаться коронный разряд. Это приводит к утечке электроэнергии. Чем выше напряжение высоковольтной линии, тем толще должны быть провода. Для того чтобы уменьшить потери в линии электропередачи (ЛЭП), связанные с коронным разрядом, каждый провод в ЛЭП с напряжением 500 кВ расщепляют на три. В более высоковольтных ЛЭП каждый провод расщепляют на несколько составляющих.

ИСКРОВОЙ РАЗРЯД. При большой напряжённости электрического поля между электродами (около $3 \cdot 10^6$ В/м) в воздухе при атмосферном давлении возникает *искровой разряд*. При этом в газе появляются каналы ионизированного газа — *стримеры*, имеющие вид прерывистых ярких зигзагообразных нитей. Нити пронизывают пространство между электродами и исчезают, сменяясь новыми. При этом наблюдается яркое свечение газа и выделяется значительное количество теплоты. Вследствие нагревания давление газа в стримерах сильно повышается. Расширяясь,



газ излучает звуковые волны, сопровождающие разряд. После пробоя разрядного промежутка напряжение на электродах сильно падает, так как в момент разряда проводимость газа вследствие его ионизации резко возрастает. В результате, если источник напряжения маломощный, разряд прекращается. Затем напряжение снова повышается и т. д. В образовании искрового разряда наряду с ионизацией с помощью электронного удара большую роль играют процессы ионизации газа излучением самой искры.



Рис. 2.24

В технике искровой разряд используют, например, для зажигания горючей смеси в двигателях внутреннего сгорания, для электроискровой обработки металлов и др.

Пример гигантского искрового разряда — *молния* (рис. 2.24). Молнии возникают либо между двумя облаками, либо между облаком и Землёй. Сила тока в молнии достигает 500 000 А, а разность потенциалов между облаком и Землёй — миллиарда вольт. Продолжительность молниевых разрядов составляет от миллионной доли секунды до нескольких секунд, а их протяжённость — от сотен метров до сотен километров.

ДУГОВЫЙ РАЗРЯД. Электрический разряд в воздухе при атмосферном давлении можно получить и при небольшой разности потенциалов между электродами. Если в качестве электродов взять два угольных стержня, привести в соприкосновение и приложить напряжение 30—50 В, то по получившейся замкнутой цепи будет протекать сильный ток. Так как в месте соприкосновения электродов сопротивление велико, то в соответствии с законом Джоуля—Ленца здесь выделяется наибольшее количество теплоты, и концы угольных стержней раскаляются. Вследствие этого при раздвижении угольных электродов между ними возникает столб ярко светящегося газа — *электрическая дуга** (рис. 2.25).



Рис. 2.25

Проводимость газа в этом случае высока и при атмосферном давлении, так как число электронов, испускаемых отрицательным

* Электрическая дуга может возникнуть не только между угольными, но и между металлическими электродами.



Рис. 2.26

электродом, очень велико. Сила тока в небольшой дуге достигает нескольких ампер, а в больших дугах — нескольких сотен ампер при разности потенциалов всего лишь порядка 50 В. Электрическая дуга была впервые получена в 1802 г. В. В. Петровым.

Высокая температура катода при горении дуги поддерживается бомбардирующими катод положительными ионами. Газ в самой дуге также сильно разогревается из-за соударений молекул с ионами и электронами, ускоряемыми внешним электрическим полем. Поэтому происходит термическая ионизация газа. На положительном электроде дуги под влиянием бомбар-

дировки электронами образуется углубление — кратер. Температура в кратере при атмосферном давлении достигает $4000\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при давлении $2 \cdot 10^6\text{ Па}$ — превышает $7000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Дуговой разряд имеет разнообразные технические применения. В 1876 г. русский инженер Павел Николаевич Яблочков (1847—1894) впервые применил его для уличного освещения. В настоящее время дуговой разряд используют в качестве источника света в прожекторах, проекционных и киноаппаратах, маяках. В электрометаллургии для плавки металлов применяют электропечи (рис. 2.26), в которых источником энергии является дуговой разряд.

На электрической дуге основана сварка металлических деталей — дуговая электросварка. Её технология была разработана русскими изобретателями Николаем Николаевичем Бенардосом (1842—1905) в 1885 г. и Николаем Гавриловичем Славяновым (1854—1897) в 1890 г. Электросварка находит применение в машиностроении, при прокладке трубопроводов, при строительстве зданий, мостов и других сооружений.

ПЛАЗМА. Вещество в области газового разряда находится в особом агрегатном состоянии, называемом *плазмой*. Плазма — это частично или полностью ионизированный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы. Плазма в целом является электрически нейтральной системой.

Слабоионизированной плазмой в природных условиях являются верхние слои атмосферы — *ионосфера*. Солнце, горячие звёзды и некоторые межзвёздные облака — это полностью ионизированная плазма, которая образуется при высокой температуре.

Низкотемпературной принято считать плазму с температурой $T = 10^5\text{ К}$, а высокотемпературной — с $T \approx 10^6\text{—}10^8\text{ К}$ и более. Это условное разделение связано с особой важностью использования высокотемпературной

плазмы в исследованиях по управлению термоядерному синтезу (УТС).

Плазма обладает рядом специфических свойств, что позволяет рассматривать её как особое *четвёртое агрегатное состояние вещества*. Из-за большой подвижности заряженные частицы плазмы легко перемещаются под действием электрических и магнитных полей. В отличие от нейтрального газа, между молекулами которого существуют короткодействующие силы, между заряженными частицами плазмы действуют кулоновские силы, сравнительно медленно убывающие с расстоянием. Каждая частица взаимодействует сразу с большим количеством окружающих частиц. Благодаря этому наряду с хаотическим тепловым движением частицы плазмы могут участвовать в разнообразных упорядоченных (*коллективных*) движениях. В плазме легко возбуждаются разного рода колебания и волны.

В состоянии плазмы находится подавляющая (около 99%) часть вещества Вселенной — звёзды, звёздные атмосферы, галактические туманности и межзвёздная среда. Ионизация атомов межзвёздной среды производится излучением звёзд и космическими лучами — потоками быстрых частиц, пронизывающими пространство Вселенной по всем направлениям. Около Земли плазма существует в космосе в виде солнечного ветра, заполняет магнитосферу Земли, образуя радиационные пояса Земли и ионосферу. Процессами в околоземной плазме обусловлены магнитные бури и полярные сияния (рис. 2.27).



Рис. 2.27

? 1. При каких условиях возникает: а) тлеющий разряд; б) коронный разряд; в) искровой разряд; г) дуговой разряд? 2. Где используют тлеющий разряд? 3. Приведите примеры проявления коронного разряда. 4. Как возникает молния? 5. Какие технические применения находит дуговой разряд? 6. Что называют плазмой? Какими свойствами она обладает?

? 1. Почему электроскоп, находящийся недалеко от пламени газовой горелки, разряжается очень быстро? 2. Если баллон неоновой лампы потерять, то можно заметить, что лампа некоторое время светится. Почему? 3. Почему катод электронной лампы быстро разрушается, если внутри её находится небольшое количество воздуха?

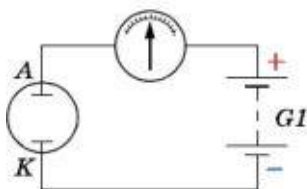


Рис. 2.28

ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ. Когда говорят об электрическом токе в вакууме*, то имеют в виду такую степень разрежения газа, при которой можно пренебречь соударениями между его молекулами. В этом случае средняя длина свободного пробега молекул больше размеров сосуда. Такой разреженный газ является изолятором, так как в нём нет (или почти нет) свободных заряженных частиц.

На рисунке 2.28 изображена схема цепи, содержащей сосуд, из которого откачан воздух. В этот сосуд впаяны два электрода, один из которых (анод *A*) соединён с положительным полюсом источника тока (батарея *GI*), другой (катод *K*) — с отрицательным.

Несмотря на достаточно большое напряжение, которое обеспечивает источник тока (около 100 В), чувствительный гальванометр, включённый в цепь, не фиксирует тока. Следовательно, в вакууме отсутствуют свободные носители заряда. Таким образом, электрический ток в вакууме будет существовать, если ввести в сосуд свободные носители заряда. Как это осуществить?

Наиболее просто проводимость межэлектродного промежутка в вакууме можно обеспечить с помощью электронной эмиссии с поверхности электродов. Например, в результате *термоэлектронной эмиссии* электроны испускаются с поверхности достаточно нагретого металла. Это же может происходить и при воздействии на поверхность металла электромагнитным излучением. Такое явление называется *фотоэлектронной эмиссией*. И наконец, с поверхности металла испускаются электроны при бомбардировке её быстрыми электронами. Это *вторичная электронная эмиссия*. Отметим, что электронная эмиссия возникает в тех случаях, когда часть электронов металла (электрода) приобретает в результате внешних воздействий энергию, достаточную для преодоления их связи с металлом (для совершения *работы выхода электронов*** $A_{\text{вых}}$).



Обсудим, как можно получить электрический ток в вакууме, используя термоэлектронную эмиссию. Рассмотрим схему цепи, изображённую на рисунке 2.29. В качестве катода в ваку-

* Под *вакуумом* (от лат. *vacuum* — пустота) понимают состояние газа при давлении существенно ниже атмосферного. Обычно вакуум создаётся в замкнутых сосудах, где давление может составлять от 100 до 0,1 Па.

** Работу выхода электронов обычно измеряют в *электрон-вольтах* (эВ). 1 эВ — это работа, которую совершает электрическое поле над электроном, который проходит разность потенциалов в 1 В. $1 \text{ эВ} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

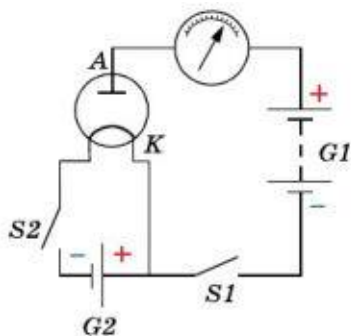


Рис. 2.29

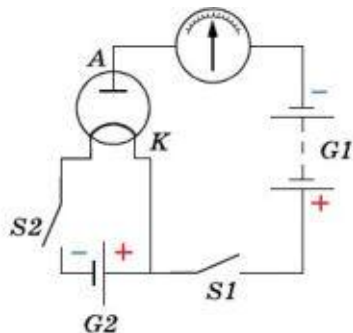


Рис. 2.30

умном баллоне впаяна вольфрамовая нить, концы которой выведены наружу и присоединены к источнику тока — батарее накала $G2$. Замкнём ключ $S2$ и, когда вольфрамовая нить накалится, замкнём и ключ $S1$. Стрелка прибора при этом отклонится, в цепи появился ток. Тем самым накалившая нить обеспечивает появление необходимых для существования тока носителей заряда — заряженных частиц. С помощью опыта нетрудно убедиться, что эти частицы заряжены отрицательно.

Изменим полярность анодной батареи $G1$ — нить станет анодом, а холодный электрод — катодом (рис. 2.30). И хотя нить накалена и испускает в вакуум заряженные частицы, тока в цепи нет. Из этого опыта следует, что частицы, испускаемые накалённой нитью, заряжены отрицательно — отталкиваются от холодного катода и притягиваются к аноду. Измерением заряда и массы было доказано, что катод испускает электроны.

Электрический ток в вакууме представляет собой направленный поток электронов.

ВАКУУМНЫЙ ДИОД. Устройства, основанные на применении явления термоэлектронной эмиссии, называют *электронными лампами*. Простейшим типом электронных ламп является двухэлектродная лампа* — *диод прямого накала*. Он представляет собой вакуумированный баллон, в котором находятся два электрода: вольфрамовая нить K , являющаяся источником электронов (катод), и металлический полуцилиндр A (анод),

* Отметим, что существуют трёхэлектродные электронные лампы — *триоды*. Баллон, анод и катод вакуумного триода имеют такую же конструкцию, как у диода. Но на пути электронов от катода к аноду в триоде расположен третий электрод — сетка. Она позволяет управлять анодным током лампы. Триоды применяют в различных радиотехнических устройствах: усилителях, генераторах и т. д.

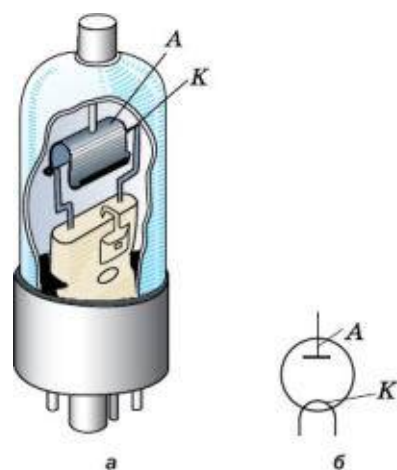


Рис. 2.31

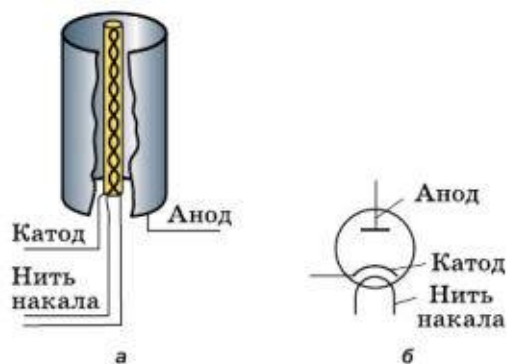


Рис. 2.32

окружающий катод (рис. 2.31, а). В других типах ламп анод может быть замкнутым цилиндром, который расположен не горизонтально, как на рисунке 2.31, а, а вертикально. В этом случае и катод, совпадающий с осью анода, тоже расположен вертикально. Условное обозначение диода показано на рисунке 2.31, б. В лампах прямого накала нить накала из вольфрама одновременно является катодом. Для получения значительной эмиссии нить нагревают до температуры около 2000—2500 К.

В настоящее время диоды прямого накала почти не применяются. Вместо них используют *диоды с подогревным катодом*, которые относятся к лампам с косвенным накалом. В лампах с косвенным накалом катод представляет собой никелевую трубочку, покрытую слоем оксидов щёлочноземельных металлов — бария, стронция, кальция. Такой катод называют *оксидным*. Работа выхода электронов с поверхности оксидного катода в несколько раз меньше, чем с поверхности вольфрама. Это позволяет снизить температуру накала до 1000 К. Подогрев катода обеспечивается небольшой спиралью, расположенной внутри трубочки (рис. 2.32, а). Условное обозначение диода с подогревным катодом изображено на рисунке 2.32, б.

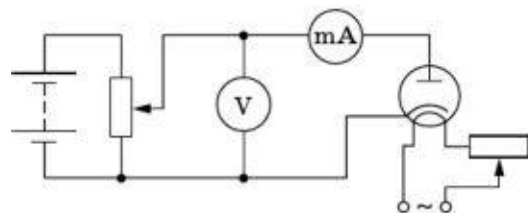


Рис. 2.33

Для получения вольт-амперной характеристики вакуумного диода можно воспользоваться цепью, схема которой изображена на рисунке 2.33. В отличие от вольт-амперной характеристики металлического проводника, эта характеристика нелинейная (рис. 2.34). Следовательно, элек-



тронная лампа представляет собой проводник, для которого не выполняется закон Ома.

Если катод не покрыт оксидным слоем, то при достаточно большом анодном напряжении все электроны, покинувшие катод, достигают анода, и при дальнейшем увеличении напряжения сила тока не изменяется. Такой ток называется *током насыщения* I_n (штриховая линия на рисунке 2.34). При повышении температуры катода (это можно сделать, увеличив при помощи реостата силу тока в цепи накала) сила тока насыщения возрастает (см. рис. 2.34).

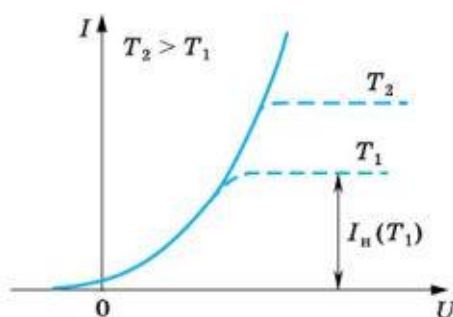


Рис. 2.34

Важным свойством вакуумного диода является его *односторонняя проводимость*: электроны в нём движутся от раскалённого катода к аноду. Обратное направление тока невозможно. Приборы, обладающие свойством проводить ток только в одном направлении, используют для выпрямления переменного тока.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА. *Электронные пучки* представляют собой направленные потоки быстро движущихся электронов. Электронные пучки отклоняются электрическим полем. Проходя между пластинами заряженного конденсатора, электроны отклоняются от отрицательно заряженной пластины к положительно заряженной. Электронные пучки отклоняются также в магнитном поле. Пролетая над северным полюсом магнита, электроны отклоняются влево, а пролетая над южным полюсом — вправо.

Возможность управления электронным пучком с помощью электрического или магнитного поля и свечение под действием пучка покрытого люминофором* экрана используются в *электронно-лучевой трубке*. Её устройство показано на рисунке 2.35. Трубка представляет собой вакуумный баллон, изготовленный в виде колбы, расширенной с одной стороны. Расширенное дно колбы покрыто люминофором и образует экран трубки. В узком конце трубки помещён источник быстрых электронов — *электронная пушка*. Она состоит из накаливаемого оксидного катода K (рис. 2.36) и трёх коаксиальных цилиндров: управляющего электрода (сетки) M , первого анода $A1$ и второго анода $A2$.

Электроны испускаются нагретым оксидным слоем торца цилиндрического катода и проходят через отверстие в цилиндрическом управляющем электроде (он регулирует число электронов в пучке).

* Люминофоры — вещества (стекло, сульфиды цинка и кадмия), которые при бомбардировке их электронами, светятся.

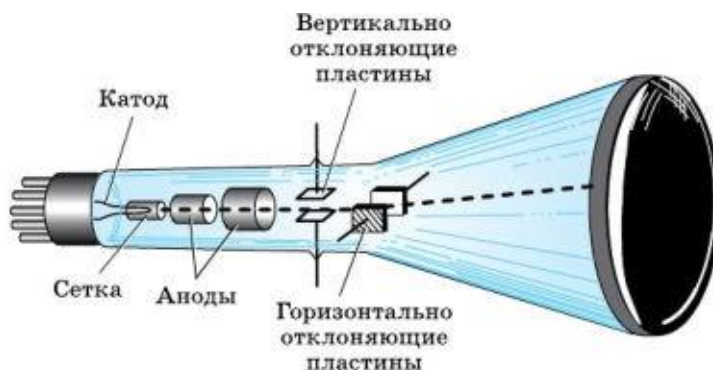


Рис. 2.35

После электронной пушки сфокусированный электронный пучок на пути к экрану проходит последовательно между двумя парами управляющих пластин. Если электрического поля между пластинами нет, то пучок не отклоняется и светящаяся точка располагается в центре экрана. При сообщении разности потенциалов вертикально расположенным пластинам пучок смещается в горизонтальном направлении, а при сообщении разности потенциалов горизонтальным пластинам он смещается в вертикальном направлении. Одновременное использование двух пар пластин позволяет перемещать светящуюся точку по экрану в любом направлении.

Малая масса электронов в электронном пучке обеспечивает малую инерционность электронно-лучевой трубки: электронный пучок практически мгновенно реагирует на изменение напряжения на управляющих пластинах.

На этом свойстве электронных пучков основано действие электронно-лучевой трубки в *электронном осциллографе* — приборе, который применяют для исследования быстропеременных процессов в электрических цепях (рис. 2.37).

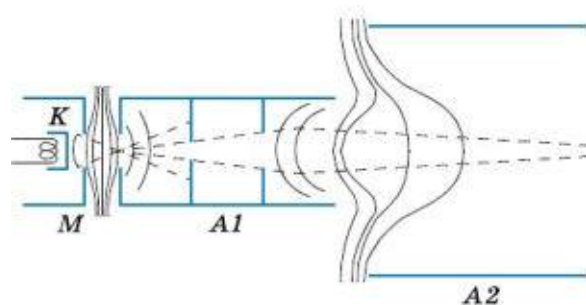


Рис. 2.36



Рис. 2.37



1. Движением каких заряженных частиц обусловлен ток в вакууме? 2. Какое явление называют эмиссией электронов? Какие виды эмиссии электронов вам известны? 3. Сравните условия возникновения тока в металлических проводниках и в вакууме. 4. Что называют работой выхода электронов? 5. Опишите устройство и принцип действия: а) вакуумного диода; б) электронно-лучевой трубки. 6. Каким важным свойством обладают вакуумные диоды?



Будет ли работать радиолампа с разбитым стеклом в космосе?



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ



В электронно-лучевой трубке ускоряющее анодное напряжение равно 16 кВ, а расстояние от анода до экрана — 30 см. За какое время электроны проходят это расстояние? Начальную скорость электронов считать равной нулю.

Дано:

$$U_a = 16 \text{ кВ}$$

$$l = 30 \text{ см}$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$v_0 = 0$$

$$t = ?$$

СИ:

$$16 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$0,3 \text{ м}$$

Решение:

При прохождении электроном ускоряющей разности потенциалов электрическое поле совершает работу по изменению кинетической энергии электрона:

$$A = eU_a,$$

где U_a — ускоряющее анодное напряжение.

Согласно теореме о кинетической энергии, $\Delta E_k = A$.

Учитывая, что $v_0 = 0$, запишем

$$\frac{m_e v^2}{2} = eU_a \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eU_a}{m_e}}.$$

Расстояние l от анода до экрана электрон, двигаясь равномерно со скоростью v , преодолевает за время

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

Учитывая выражение для скорости электрона, запишем:

$$t = \frac{l}{\sqrt{\frac{2eU_a}{m_e}}} = l \sqrt{\frac{m_e}{2eU_a}}.$$

Подставляя числовые данные, получим

$$t = 0,3 \cdot \sqrt{\frac{9,1 \cdot 10^{-31}}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 16 \cdot 10^3}} \text{ с} \approx 4 \cdot 10^{-9} \text{ с}.$$

Ответ: $t \approx 4 \cdot 10^{-9} \text{ с}$.





УПРАЖНЕНИЯ

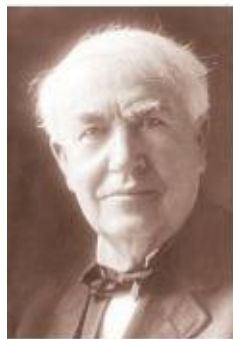
1. Максимальная анодная сила тока в диоде равна 50 мА. Сколько электронов вылетает из катода каждую секунду?
2. В диоде электрон подлетает к аноду со скоростью, модуль которой равен $8 \cdot 10^6$ м/с. Определите анодное напряжение.
3. В диоде электроны ускоряются до энергии 100 эВ. Чему равен модуль их минимальной скорости движения у анода лампы?
4. Расстояние между катодом и анодом диода равно 1 см. Сколько времени движется электрон от катода к аноду при анодном напряжении, равном 440 В? Движение электрона считать равноускоренным.

Это любопытно...

Из истории развития физики и техники

В 1879 г. знаменитый американский изобретатель Томас Алва Эдисон (1847—1931) продемонстрировал лампу накаливания с угольной нитью. Лампа горела в течение 40 ч, питаясь от специальной высоковольтной динамо-машины. Совершенствуя свою лампу, Эдисон пытался устранить такой её дефект, как внутреннее почернение колбы, вызывающее потерю до 50% светового потока.

Он предположил, что внутри лампы происходит электрический разряд и что осадок на её внутренней поверхности образуется в результате рассеяния заряженных частиц угольной пыли, отрывающихся от раскалённой нити. Если ввести внутрь колбы дополнительный положительно заряженный электрод, такие заряженные частицы будут им притягиваться. При этом Эдисон обнаружил появление электрического тока в цепи. Так было открыто явление *термоэлектронной эмиссии*, названное в ту пору *эффектом Эдисона*. Этот эффект получил исчерпывающее объяснение после открытия английским физиком Джозефом Джоном Томсоном (1856—1940) электронов (1897) как результат их эмиссии накаливаемыми металлами.



Т. ЭДИСОН

В 1904 г. английский учёный Джон Флеминг (1849—1945), изучая эффект Эдисона, предложил первую электронную лампу — *вакуумный диод* (рис. 2.38). Это устройство стало первым электронным детектором радиоволн, преобразующим радиосигналы переменного тока в постоянный ток. В 1907 г. американский инженер Ли де Форест (1873—1961) изобрёл трёхэлектродную



Рис. 2.38

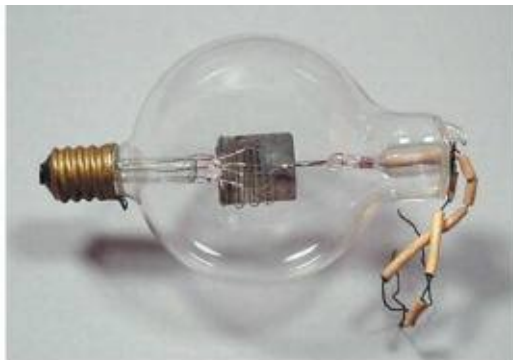


Рис. 2.39

электронную лампу — аудион (позднее известный как *триод*; рис. 2.39), которая позволила усиливать электрические сигналы, подводимые к третьему электроду — управляющей сетке.

Разработки первых электронных ламп ознаменовали зарождение вакуумной электроники.

§ 14

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

СТРОЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ. Главное отличие полупроводников от проводников состоит в характере зависимости их электропроводности от температуры. Исследования показывают, что у ряда элементов (кремний, германий, селен и др.) и соединений (PbS , CdS и др.) удельное сопротивление с увеличением температуры не растёт, как у металлов (см. рис. 1.10), а, наоборот, уменьшается (рис. 2.40). Из графика видно, что при температурах, близких к абсолютному нулю, удельное сопротивление полупроводников очень велико, т. е. при очень низких температурах полупроводник ведёт себя как диэлектрик. По мере повышения температуры удельное сопротивление полупроводника быстро уменьшается.

Рассмотрим механизм возникновения проводимости в полупроводниках на примере кристалла германия. Кристаллы германия и других полупроводников имеют атомную (ковалентную) кристаллическую решётку. Плоская схема структуры кристалла германия изображена на рисунке 2.41. Четыре валентных электрона каждого атома германия связаны с такими же электронами соседних атомов химическими парноэлектронными (ковалентными) связями.

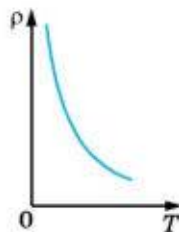


Рис. 2.40

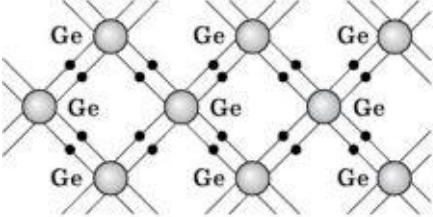


Рис. 2.41

В образовании этой связи от каждого атома участвует по одному валентному электрону, которые отщепляются от атомов и при своём движении большую часть времени проводят в пространстве между соседними атомами. Их отрицательный заряд удерживает положительные ионы германия друг возле друга. Каждый атом образует четыре связи с соседними, а данный валентный электрон

может двигаться по любой из них. Дойдя до соседнего атома, он может перейти к следующему, а затем дальше вдоль всего кристалла. Парноэлектронные связи германия достаточно прочны и при низких температурах не разрываются. Поэтому германий при низкой температуре не проводит электрический ток. Аналогичное строение имеет и кристалл кремния.

СОБСТВЕННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ. При нагревании германия энергия валентных электронов увеличивается за счёт энергии тепловых колебаний атомов решётки. При этом энергия некоторых электронов может увеличиться настолько, что связи не выдерживают и рвутся. В результате отдельные электроны становятся свободными, подобно электронам в металлах. В отсутствие внешнего электрического поля эти электроны движутся хаотически. Под действием этого поля они перемещаются упорядоченно между узлами кристаллической решётки (рис. 2.42), образуя электрический ток.

Проводимость полупроводников, обусловленная наличием у них свободных электронов, называется *электронной проводимостью*.

При повышении температуры число разорванных ковалентных связей, а следовательно, и число свободных электронов в кристаллах увеличиваются. Это и приводит к уменьшению удельного сопротивления.

Образование свободного электрона влечёт за собой появление свободного (вакантного) места — *электронной дырки* — в нарушенной ковалентной связи. В дырке имеется избыточный положительный заряд по сравнению с остальными, нормальными связями (см. рис. 2.42). Положение

дырки в кристалле не является неизменным. Один из электронов, обеспечивающих связь атомов, перескакивает на место образовавшейся дырки и восстанавливает здесь парноэлектронную связь, а там, откуда перескочил электрон, образуется новая дырка. Эту дырку может занять какой-либо другой электрон. Таким образом, благодаря перемещению электронов связи происходит перемещение дырок по всему кристаллу.

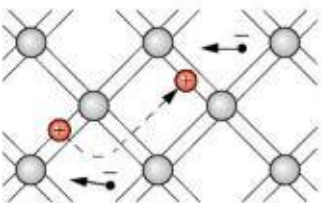


Рис. 2.42

При отсутствии внешнего электрического поля перемещение дырок, равноценное перемещению зарядов, происходит хаотически и поэтому не создаёт электрического тока. Под действием этого поля происходит упорядоченное перемещение дырок в направлении линий напряжённости поля, т. е. в направлении, противоположном перемещению электронов связи. Рассмотренный процесс называется *дырочной проводимостью*.

Таким образом, в чистых (без примесей) полупроводниках возможна электронная проводимость, обусловленная движением свободных электронов (проводимость *n*-типа^{*}), и дырочная, обусловленная движением дырок (проводимость *p*-типа^{**}). Такого рода проводимость называют *собственной проводимостью* полупроводников.

ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ. Собственная проводимость полупроводников обычно невелика, так как мало число свободных электронов. Например, в германии при комнатной температуре $n_e = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. В то же время число атомов германия в 1 см^3 порядка 10^{23} . Таким образом, число свободных электронов составляет примерно одну десятиллиардную часть от общего числа атомов.

Существенная особенность полупроводников состоит в том, что в них при наличии примесей наряду с собственной проводимостью возникает дополнительная — *примесная проводимость*. Изменяя концентрацию примеси, можно значительно изменить число носителей заряда того или иного знака в полупроводнике.

Если при выращивании монокристалла германия в расплав добавить небольшое количество мышьяка или сурьмы, то при кристаллизации атомы примеси вытесняют отдельные атомы германия из их мест в кристаллической решётке (рис. 2.43). Мышьяк (и сурьма) имеют по пять валентных электронов. Поэтому атомы примеси, образовав ковалентные связи с четырьмя ближайшими атомами германия и использовав для этого четыре валентных электрона, будут иметь по одному лишнему электрону, слабо связанному с атомным ядром. Вследствие теплового движения практически все лишние электроны атомов примеси оказываются свободными (см. рис. 2.43).

При добавлении всего одной десятиллионной доли атомов мышьяка концентрация свободных электронов становится равной 10^{16} см^{-3} ! Это в тысячу раз больше концентрации свободных электронов в чистом полупроводнике. Примеси, легко отдающие электроны и, следовательно, увели-

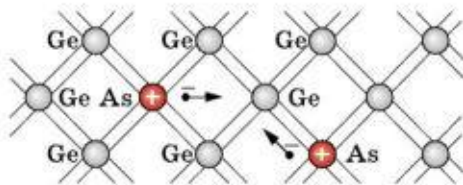


Рис. 2.43

* От лат. negativus — отрицательный.

** От лат. positivus — положительный.

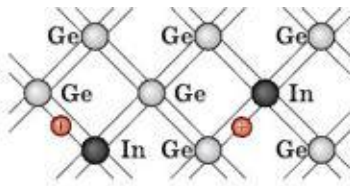


Рис. 2.44

чивающие число свободных электронов, называют *донорными*. При наличии электрического поля свободные электроны приходят в упорядоченное движение в кристалле полупроводника, и в нём возникает *электронная примесная проводимость*. Полупроводники с такой проводимостью называют *электронными* или *полупроводниками n-типа*. Поскольку

в полупроводнике *n*-типа число электронов значительно больше числа дырок, то электроны являются основными носителями заряда, а дырки — неосновными.

Если при выращивании монокристалла германия в расплав добавить некоторое количество трёхвалентных атомов, например индия или галлия, то при образовании кристалла атомы примеси вытеснят из своих мест отдельные атомы германия. При замещении в кристаллической решётке атома германия атомом примеси, имеющим три валентных электрона, три связи атома примеси с атомами германия окажутся заполненными, а одна связь четвёртого атома германия (соседа атома примеси) — незаполненной. Следовательно, в решётке образуется дырка (рис. 2.44). Каждый атом трёхвалентной примеси образует в кристалле полупроводника одну дырку. Такого рода примеси называют *акцепторными*.

Под действием внешнего электрического поля дырки перемещаются в направлении вектора напряжённости поля, и в полупроводнике возникает *дырочная примесная проводимость*. Полупроводники с преобладанием дырочной проводимости над электронной называют *полупроводниками p-типа*. В них основными носителями заряда являются дырки, а неосновными — электроны.

Если в полупроводник одновременно вводятся и донорные, и акцепторные примеси, то характер проводимости полупроводника определяется примесью с более высокой концентрацией носителей заряда — электронов или дырок.

*** ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД.** При контакте двух полупроводников с различными типами проводимости вследствие теплового движения происходит взаимная диффузия носителей заряда через границу соприкосновения (контакт) полупроводников. Электроны из *n*-области, где они являются основными носителями заряда, переходят в *p*-область, где их концен-



Рис. 2.45

трация значительно меньше. Точно так же дырки переходят из *p*-области в *n*-область. Поэтому *n*-область вблизи границы раздела оказывается заряженной положительно, а *p*-область — отрицательно (рис. 2.45). Диффузия прекращается после того, как электрическое поле (его напряжённость $\vec{E}$), возникающее в обла-

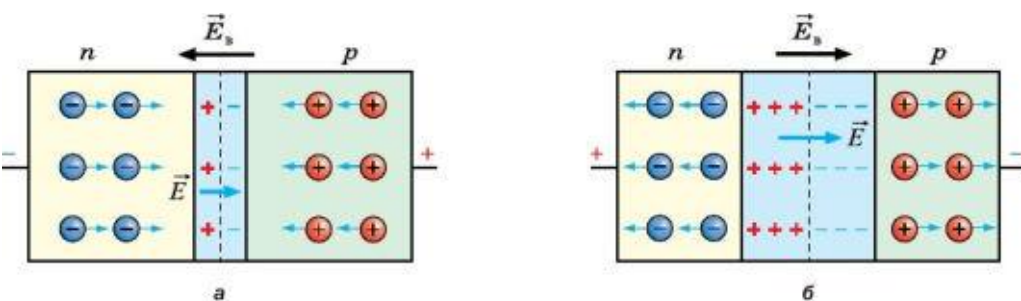


Рис. 2.46

сти перехода, начинает препятствовать дальнейшему перемещению электронов и дырок.

Включим полупроводник с p — n -переходом в электрическую цепь так, чтобы потенциал n -области был отрицательным, а p -области — положительным. При этом ток через p — n -переход осуществляется основными носителями: из области n в область p — электронами, а из области p в область n — дырками (рис. 2.46, а). Вследствие этого проводимость всего образца велика, а сопротивление мало. В этом случае вектор напряжённости $\vec{E}_в$ внешнего электрического поля, создаваемого источником тока, направлен против вектора напряжённости $\vec{E}$ запирающего поля.

Переключим полюсы батареи. Тогда при той же разности потенциалов сила тока в цепи окажется значительно меньше, чем при прямом переходе. Электроны через контакт идут теперь из области p в область n , а дырки — из области n в область p . Но ведь в полупроводнике p -типа мало свободных электронов, а в полупроводнике n -типа мало дырок. Вектор напряжённости $\vec{E}_в$ направлен так же, как и вектор $\vec{E}$. Переход через контакт осуществляется неосновными носителями, число которых мало (рис. 2.46, б). Вследствие этого проводимость образца оказывается незначительной, а сопротивление — большим.

Таким образом, n — p -переход обладает односторонней проводимостью. Электронно-дырочные переходы полупроводников широко применяют в современных полупроводниковых приборах.



1. Как зависит удельное сопротивление полупроводника от температуры?
2. Охарактеризуйте строение полупроводника на примере кристалла германия.
3. Какую проводимость полупроводников называют: а) электронной; б) дырочной?
4. Какими заряженными частицами обусловлена собственная проводимость полупроводника?
5. Какую проводимость полупроводника называют примесной?
6. Какой особенностью обладает p — n -переход?



1. Какого типа (электронная или дырочная) будет проводимость германия, если к нему добавить в небольших количествах: а) фосфор; б) цинк; в) галлий; г) сурьму?
2. В полупроводнике *n*-типа концентрация свободных электронов значительно превосходит концентрацию дырок. Означает ли это, что полупроводник *n*-типа заряжен отрицательно?

Это любопытно...

На переднем крае науки

По окончании Второй мировой войны основательным изучением электропроводности полупроводников занималось несколько научно-исследовательских коллективов, в том числе специалисты фирмы Лаборатории Белла («Bell Labs», США). Именно там под руководством Уильяма Шокли (1910—1989) был создан первый транзистор. 16 декабря 1947 г. сотрудники Шокли Джон Бардин (1908—1991) и Уолтер Браттейн (1902—1987) продемонстрировали полупроводниковый усилитель, названный позже *точечно-контактным транзистором* (рис. 2.47). В 1956 г. Шокли, Бардин и Браттейн получили Нобелевскую премию по физике «за исследование полупроводников и открытие транзисторного эффекта».

Следующее важное изобретение — создание в конце 1950-х гг. *интегральной схемы* (ИС). Возможность её создания продемонстрировали независимо друг от друга два американских инженера — Джек Килби (1923—2005) и Роберт Нойс (1927—1990). Изобретение и начавшееся в 1960-х гг. серийное производство ИС стали возможными в результате разработки технологии производства сверхминиатюрных транзисторов. Интегральная схема без

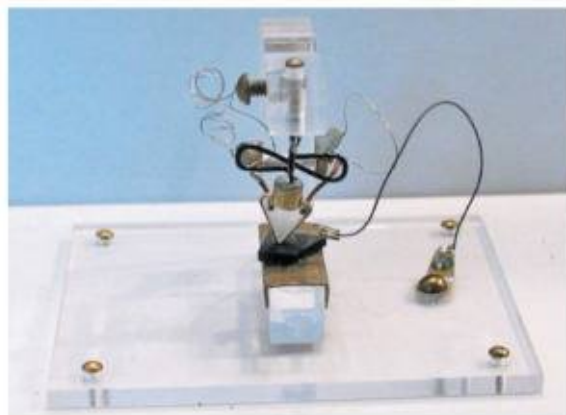


Рис. 2.47

корпуса и выводов, так называемый *чип* (от англ. chip — обломок, осколок), имеет очень небольшие объём ($0,2\text{—}50\text{ мм}^3$) и массу ($0,5\text{—}50\text{ мг}$) и может непосредственно устанавливаться в аппаратуру. Изобретение ИС, способных объединить на одном чипе миллионы транзисторов, прочно закрепило их преимущество перед электронными лампами. Микроэлектроника стала основой цифровых технологий: на чипах выпускается широчайший ассортимент электронных приборов — от часов до глобальных систем спутниковой связи.

В начале 1970-х гг. в ИС научились соединять достаточное количество элементов, чтобы собрать на отдельном чипе первый *микропроцессор*. Это новое устройство привело к появлению персональных компьютеров. Затем компьютеры были соединены в информационные сети, позволяющие им взаимодействовать друг с другом. С повышением требований к скорости обработки данных и передачи информации стало важным не только количество элементов, размещаемых в чипе, но и их быстродействие. В итоге пришлось обратиться к новым полупроводниковым материалам.

Структуру, состоящую из нескольких (двух и более) тонких слоёв различных полупроводников, называют *гетероструктурным полупроводником*. Толщина его слоёв варьируется в диапазоне от нескольких нанометров до нескольких микрометров. Как правило, слои изготавливают из арсенида галлия (GaAs) и алюминия-галлия арсенида (AlGaAs). Материалы подбирают таким образом, чтобы их кристаллические структуры соответствовали друг другу, а носители заряда могли практически свободно перемещаться через границы слоёв. Именно это свойство гетероструктур широко используется в практических приложениях.

Первый детально разработанный проект гетероструктурного транзистора (гетеротранзистора) предложил немецкий учёный Герберт Крёмер (р. 1928) в 1957 г. Он показал, что по ряду параметров гетеротранзистор может значительно превосходить обычный транзистор как при усилении тока, так и в высокочастотных схемах.

Гетероструктуры удалось создать российскому физiku Жоресу Ивановичу Алфёрову (1930—2019). Именно он использовал для их изготовления такие соединения, как GaAs и AlGaAs. Эти материалы обладают необходимым набором физических и химических свойств.

Разработка гетероструктур и исследование их свойств привели к разработке ряда высокоэффективных полупроводниковых приборов. В 1970 г. на основе гетероструктур были сконструированы солнечные батареи, промышленное производство которых позволило оснастить ими космические спутники и орбитальную станцию «Мир». Гетероструктуры являются неотъемлемой составляющей высокочастотных транзисторов, полупроводниковых лазеров, светодиодов, фотоэлементов, волоконно-оптических систем связи.



Ж. И. АЛФЁРОВ

В 2000 г. Алфёрову и Крёмеру была присуждена половина Нобелевской премии «за исследование полупроводниковых гетероструктур, которые нашли применение в высокочастотной и оптической электронике». Вторая половина этой премии досталась Килби «за вклад в изобретение интегральной схемы».

Нашу жизнь уже невозможно представить без таких микроэлектронных и полупроводниковых приборов, как персональные и планшетные компьютеры, мобильные телефоны, флеш-накопители и др. Удивительно, но ещё полвека назад мы не могли и мечтать о подобных устройствах!

ЗАДАНИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ И ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

1. Неоновая лампа характеризуется определённой разностью потенциалов, при которой она начинает светиться. Эту разность потенциалов называют потенциалом зажигания. Какими способами можно её изменить при конструировании лампы? Предложите решение данного вопроса и сконструируйте соответствующее устройство.
2. На рисунке 2.48 изображена вольт-амперная характеристика некоторого прибора. Начертите схемы электрических цепей, которые дают возможность проверить эту зависимость. Укажите, от каких причин в каждом случае будет зависеть сила тока насыщения I_n .

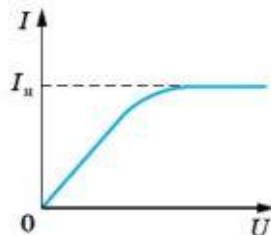


Рис. 2.48

Примерные темы рефератов и проектов

1. Б. С. Якоби — изобретатель гальванопластики.
2. Практическое применение плазмы.
3. От гигантских кинескопов до плазменных экранов. Современный телевизор.
4. Устройство, принцип действия и практическое применение термисторов, болометров и фоторезисторов.

Глава 3

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ



Магнитные явления были известны ещё в Древнем мире. Впервые способность притягивать к себе металлические предметы была обнаружена у некоторых кусков железной руды. Впоследствии их назвали естественными магнитами (от греч. *Maqnetise hos* — камень из Магнесии — древнего города в Малой Азии). Позже люди начали создавать тела со свойствами, присущими естественным магнитам. Но только в XIX в. была обнаружена связь между электрическими и магнитными явлениями. Наличие магнитного поля обнаруживается по силовому действию на внесённые в него проводники с токами или постоянные магниты. Магнитные взаимодействия обусловлены не особыми магнитными зарядами, а движением электрических зарядов — электрическим током.

В этой главе мы познакомимся с магнитными свойствами токов и магнитными свойствами веществ. Значительное внимание уделим описанию технических устройств, в основе действия которых лежат магнитные явления.

§ 15 МАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТОКОВ

МАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ. Притяжение магнитов напоминает притяжение на расстоянии наэлектризованных тел. Недаром на протяжении многих веков эти явления часто путали. Лишь в конце XVI в. английский учёный и врач королевы Елизаветы Уильям Гильберт (1544—1603) доказал, что это не одно и то же. В 1600 г. он издал сочинение «О магните, магнитных телах и большом магните — Земле», в котором описал результаты своих исследований магнитных и электрических явлений. Укажем некоторые свойства магнитов, которые были установлены Гильбертом:

- любой магнит имеет два полюса; в разных частях любого магнита сила притяжения, действующая на другой магнит, различна, наибольшей она оказывается на полюсах магнита;

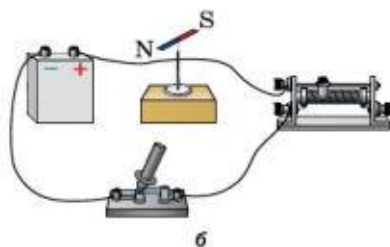
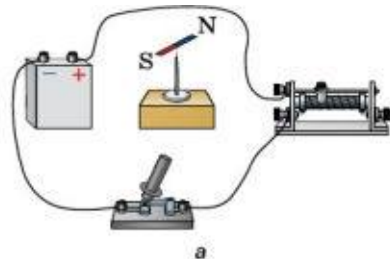


Рис. 3.1

- намагничивание железа и стали происходит и на расстоянии от магнита;
- разноимённые полюсы двух магнитов притягиваются, одноимённые — отталкиваются;
- железные предметы под влиянием магнита приобретают магнитные свойства;
- в отсутствие других магнитов любой магнит на Земле ориентируется так, что один его полюс будет указывать на Северный полюс Земли, а другой — на Южный.

Кроме того, Гильберт первым догадался, что земной шар является огромным магнитом. Он сумел подтвердить свою догадку экспериментально, намагнитив большой железный шар (он назвал его «терелла» — маленькая Земля) и наблюдая его действие на стрелку компаса.



Связь между электрическими и магнитными явлениями была установлена в 1820 г. Эрстедом. Он экспериментально обнаружил, что магнитная стрелка поворачивается при пропускании электрического тока через проводник, находящийся около неё (рис. 3.1, а). Если разомкнуть цепь и расположить проводник вдоль стрелки под ней, то при замыкании цепи магнитная стрелка снова поворачивается на угол 90° (рис. 3.1, б). Однако положение её концов по сравнению с предыдущим опытом изменилось.

Отметим, что электрический ток действует не только на магнитную стрелку, но и на любые магниты. Результаты опытов показывают, что проводник с током и магнит взаимодействуют между собой. Идею о взаимосвязи электрических и магнитных явлений развил Ампер, рассмотрев взаимодействие двух проводников с токами.



Для того чтобы наблюдать магнитное взаимодействие токов, необходимо использовать два гибких параллельных проводника, укрепить их вертикально и присоединить к источнику тока



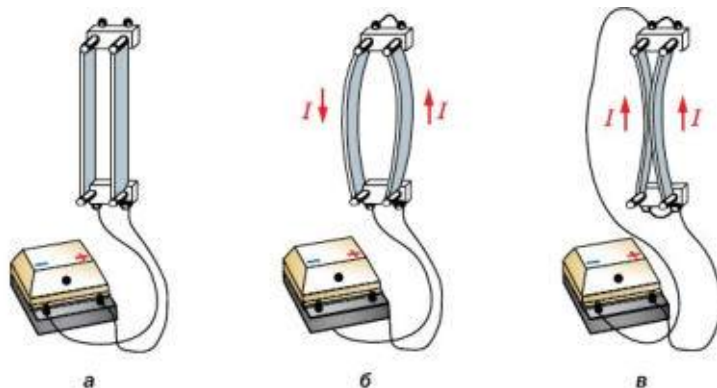


Рис. 3.2

(рис. 3.2, а). При этом заметного притяжения или отталкивания не обнаружится. Но если другие концы проводников соединить так, чтобы в проводниках возникли токи противоположного направления, то проводники начнут отталкиваться (рис. 3.2, б).

В случае токов одного направления между проводниками возникают силы притяжения (рис. 3.2, в). При изменении направления тока в одном из проводников притяжение между ними сменяется отталкиванием, и наоборот. Опыт показывает, что если ток протекает только по одному проводнику, то силы взаимодействия между проводниками отсутствуют (рис. 3.3). Точно так же не обнаружится взаимодействия, если один из проводов свит из двух проводов, по которым одинаковые токи текут в противоположных направлениях (рис. 3.4). Такой провод не оказывает влияния на магнитную стрелку, расположенную вблизи него.

Таким образом, из опытов Ампера можно сделать вывод, что *между проводниками с токами действуют силы, подобные силам взаимодействия магнитов.*

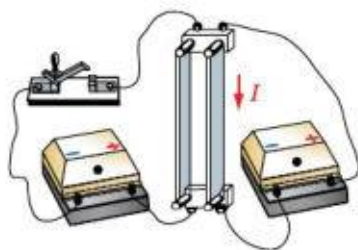


Рис. 3.3

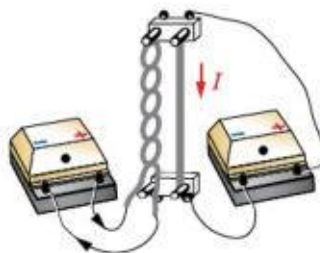


Рис. 3.4

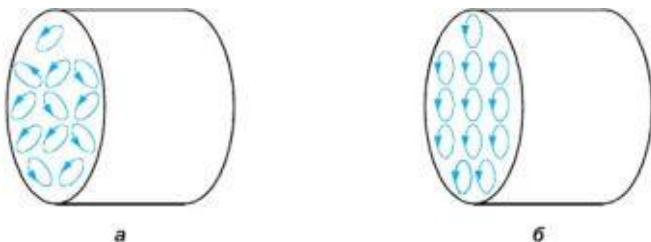


Рис. 3.5

ГИПОТЕЗА АМПЕРА. Анализируя результаты опытов, Ампер выдвинул гипотезу: *действие магнита объясняется замкнутыми электрическими токами внутри его*. Иначе говоря, внутри молекул вещества циркулируют элементарные электрические токи.

Если эти токи расположены хаотически по отношению друг к другу (рис. 3.5, а), то их действие взаимно компенсируется и никаких магнитных свойств тело не обнаруживает. В намагниченном состоянии элементарные токи в теле ориентированы строго определённым образом (рис. 3.5, б), так что их действия складываются. Отсюда следует, что магнитные взаимодействия обусловлены движением электрических зарядов — током.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. Согласно теории близкодействия, токи не могут непосредственно действовать друг на друга. Подобно тому как в пространстве, окружающем электрические заряды, возникает электрическое поле, в пространстве, окружающем токи, возникает поле, называемое *магнитным*.

Каждый элемент тока в одном из проводников создаёт вокруг себя магнитное поле, которое действует на все элементы тока во втором проводнике.

Магнитное поле представляет собой особую форму материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между движущимися заряженными частицами.

Что же такое магнитное поле? Во-первых, поле материально: оно существует независимо от нас, от наших знаний о нём. Во-вторых, поле обладает определёнными свойствами, которые могут быть установлены экспериментально.

Сформулируем *основные свойства магнитного поля*: магнитное поле порождается током (движущимися зарядами) и обнаруживается по действию на ток (движущиеся заряды).



А. АМПЕР



1. Какие свойства магнитов были установлены Гильбертом? 2. Как Гильберту удалось подтвердить догадку о том, что Земля является огромным магнитом? 3. Какой вывод можно сделать на основе результатов опыта: а) Эрстеда; б) Ампера? 4. В чём состоит гипотеза Ампера? 5. Сформулируйте основные свойства магнитного поля.



1. Почему магнитная стрелка компаса устанавливается в направлении «север — юг»? 2. Имеются два одинаковых стальных стержня, один из которых намагничен. Как узнать, какой из стержней намагничен, не используя ничего, кроме самих стержней?

§ 16

ИНДУКЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

ЗАМКНУТЫЙ КОНТУР С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ. Нам предстоит изучить свойства магнитного поля и ввести его количественные характеристики. Для исследования магнитного поля лучше всего подойдёт контур малых (по сравнению с расстояниями, на которых магнитное поле заметно изменяется) размеров. Например, можно взять маленькую плоскую проволочную рамку произвольной формы (рис. 3.6). Проводники, подводящие ток, нужно расположить близко друг к другу или сплести вместе. Так как по этим проводникам течёт равный по силе ток в противоположных направлениях, то на них в магнитном поле не будут действовать силы и сами они не окажут магнитного действия на другие проводники с токами.



Выясним характер взаимодействия магнитного поля и контура с током с помощью опыта. На расстоянии, значительно большем размеров рамки, вертикально расположим провод (рис. 3.7). При пропускании электрического тока через провод и рамку она поворачивается и располагается так, что провод оказывается в плоскости рамки (рис. 3.8). При изменении направления тока в проводе она

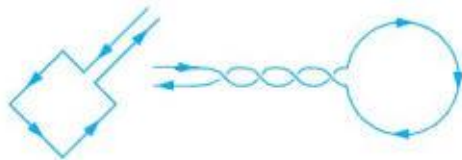


Рис. 3.6

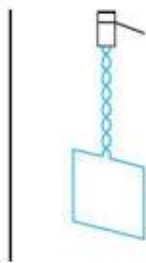


Рис. 3.7

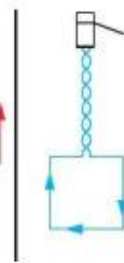


Рис. 3.8

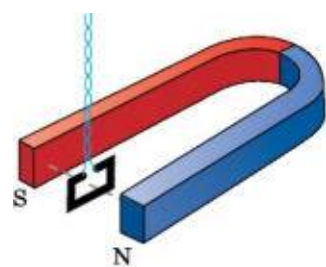


Рис. 3.9

повернётся на угол 180° . Это означает, что магнитное поле оказывает на рамку с током *ориентирующее действие*.

Его можно наблюдать и на другом опыте. Если мы подвесим на гибких проводах рамку с током между полюсами магнита, то рамка будет поворачиваться до тех пор, пока её плоскость не установится перпендикулярно линии, соединяющей полюсы магнита (рис. 3.9).

Результирующая сила, действующая на рамку с током в магнитном поле, равна нулю, если поле одинаково во всех точках пространства, где расположена рамка (*однородное поле*). В однородном магнитном поле на рамку действует лишь момент сил, который поворачивает рамку, располагая её определённым образом по отношению к току или магниту, создающему поле.

ВЕКТОР МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. Введём физическую величину, характеризующую магнитное поле. На основании опытов (см. рис. 3.7 и 3.8) можно сделать вывод, что такая величина должна быть векторной и её направление связано с ориентацией рамки.

Векторную величину, характеризующую магнитное поле, называют *вектором магнитной индукции* или *индукцией магнитного поля*. Её обозначают буквой $\vec{B}$.

За направление вектора магнитной индукции в том месте, где расположена рамка с током, принимают направление положительной нормали (перпендикуляра) к рамке. Положительная нормаль направлена в сторону поступательного перемещения буравчика с правой нарезкой, если вращать рукоятку буравчика по направлению тока в рамке (рис. 3.10).

Таким образом, имея небольшую рамку с током и предоставив ей возможность свободно поворачиваться в магнитном поле, можно определить направление вектора магнитной индукции в любой точке.

Направление вектора $\vec{B}$ можно также установить с помощью магнитной стрелки. Стрелка представляет собой маленький продолговатый постоянный магнит с двумя полюсами на концах: южным S и северным N.

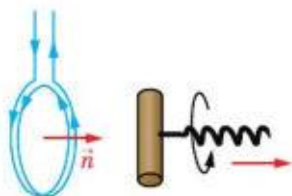


Рис. 3.10

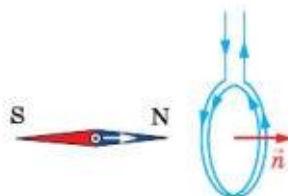


Рис. 3.11

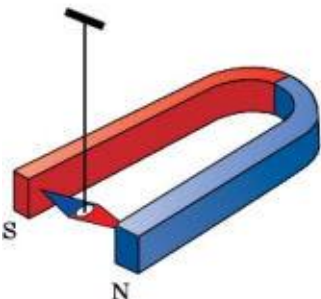


Рис. 3.12

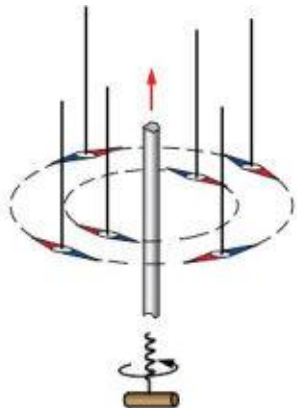


Рис. 3.13

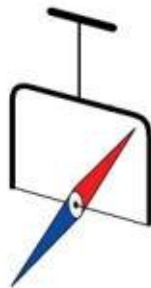


Рис. 3.14

Если стрелка может свободно ориентироваться в пространстве, то в магнитном поле направление линии, проведённой через центр стрелки от южного полюса S к северному N (рис. 3.11), совпадает с направлением нормали к рамке. Но направление этой нормали, связанное правилом правого винта с направлением тока в рамке, принято за направление вектора, характеризующего магнитное поле. Следовательно, и *направление от южного полюса S к северному N свободно устанавливающейся стрелки можно принять за направление вектора магнитной индукции*.

Используя стрелку, можно повторить опыты, которые были проделаны с рамкой в магнитном поле постоянного магнита (рис. 3.12) и прямого провода с током. В магнитном поле прямолинейного проводника с током магнитная стрелка устанавливается по касательной к окружности (рис. 3.13). Плоскость окружности перпендикулярна проводу, а центр её лежит на оси провода. Направление вектора магнитной индукции тока устанавливают с помощью *правила буравчика*.

Если ввинчивать буравчик по направлению тока в проводнике, то направление вращения его рукоятки в данной точке указывает направление вектора магнитной индукции в этой точке.

Опыт по определению направления вектора индукции магнитного поля Земли делает каждый, кто ориентируется на местности по компасу. Если магнитная стрелка может поворачиваться не только вокруг вертикальной, но и вокруг горизонтальной оси, то в магнитном поле Земли она расположится наклонно (рис. 3.14).

МОДУЛЬ ВЕКТОРА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. Ориентирующее действие магнитного поля на замкнутый контур (рамку) с током может быть использовано не только для определения направления вектора магнитной индукции, но и для расчёта его модуля.



Пусть рамка состоит из одного витка и по ней протекает ток. Сила тока равна I . Рамка в этом опыте закреплена на упругом подвесе. Если плоскость рамки перпендикулярна вектору магнитной индукции, то вращающий момент сил, действующий на рамку со стороны магнитного поля, равен нулю и подвес не закручивается. Магнитное поле лишь растягивает рамку (рис. 3.15). Повернём теперь подвес в верхней точке на некоторый угол. Рамка тоже повернётся, но на меньший угол (рис. 3.16, а). При равновесии рамки подвес окажется закрученным, и на рамку будут действовать силы упругости. Вращающий момент этих сил уравнивает равный ему вращающий момент магнитных сил, стремящихся вернуть рамку в положение, изображённое на рисунке 3.15.

Рис. 3.15

Вращающий момент сил, действующих на рамку с током со стороны магнитного поля, будет максимальным, если мы расположим рамку перпендикулярно тому положению, которое рамка занимала вначале (см. рис. 3.15). В этом случае вектор магнитной индукции лежит в плоскости рамки, а нормаль к рамке перпендикулярна линиям, соединяющим полюсы магнита (рис. 3.16, б).

Для того чтобы удержать рамку в этом положении, придётся закрутить подвес на наибольший угол. Меняя силу тока в рамке и экспериментируя с рамками различной площади, можно установить следующий факт: максимальный вращающий момент сил $M_{\max}$, действующий на рамку с током, пропорционален площади S рамки и силе тока I в ней независимо от формы рамки.

Поскольку наибольший вращающий момент сил пропорционален силе тока в рамке и её площади, то отношение $\frac{M_{\max}}{IS}$ не зависит от свойств рамки и характеризует магнитное поле в данной точке пространства.

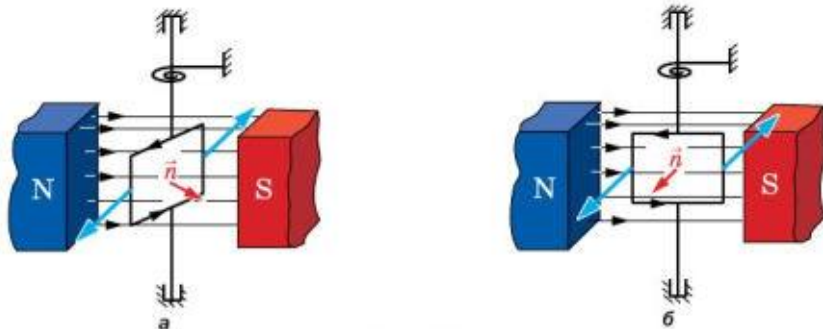


Рис. 3.16

Модулем вектора магнитной индукции называют физическую величину, равную отношению максимального вращающего момента сил, действующих на рамку, к произведению силы тока в ней и её площади.

$$B = \frac{M_{\max}}{IS}.$$

В СИ за единицу модуля вектора магнитной индукции поля принимается *тесла* (Тл).

$$1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н} \cdot \text{м}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

Эта единица названа в честь сербского учёного Николы Теслы (1856—1943).

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ. Магнитные индукции полей, создаваемых в данной точке пространства двумя или бóльшим числом токов, складываются векторно (геометрически). Для магнитного поля, как и для электрического, выполняется *принцип суперпозиции*.

Если в данной точке пространства различные токи создают магнитные поля, магнитные индукции которых $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \vec{B}_3, \dots, \vec{B}_n$, то результирующая магнитная индукция в этой точке равна

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots + \vec{B}_n.$$

1. Что выбирают за направление вектора магнитной индукции? **2.** От каких физических величин зависит максимальный вращающий момент сил, действующих на рамку с током? **3.** Какую физическую величину называют модулем вектора магнитной индукции? С помощью какой формулы его можно определить? **4.** Сформулируйте принцип суперпозиции магнитных полей.

1. Можно ли установить направление вектора магнитной индукции с помощью буравчика с левой резьбой вместо правой?

2. К небольшому латунному диску подвесили несколько стальных иголок (рис. 3.17). Если снизу к иголкам медленно подносить сильный магнит (например, южным полюсом), то сначала иголки



Рис. 3.17

разойдутся, а затем, когда магнит приблизится почти вплотную, снова вернуться в вертикальное положение. Почему?

3. Как, используя компас, можно определить знаки полюсов источника постоянного тока?

§ 17 ЛИНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

ЛИНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. Подобно тому как распределение электрического поля в пространстве можно наглядно представить с помощью линий напряжённости (или силовых линий) электростатического поля, распределение магнитного поля можно изобразить *линиями магнитной индукции* (или *линиями магнитного поля*).

Линиями магнитной индукции называют линии, по касательным к которым направлен вектор магнитной индукции $\vec{B}$ в каждой точке поля (рис. 3.18).

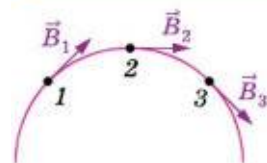


Рис. 3.18

Построим линии магнитной индукции для магнитного поля, созданного прямолинейным проводом с током. Из приведённых ранее описаний опытов с контуром и магнитной стрелкой, а также из соображений симметрии следует, что линии магнитной индукции в данном случае представляют собой концентрические окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной этому проводу с током. Центр окружностей находится на оси проводника (рис. 3.19).

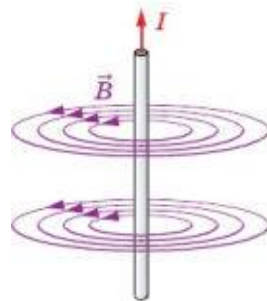


Рис. 3.19

Как и в случае линий напряжённости электрического поля, линии магнитной индукции условились проводить так, чтобы их густота характеризовала модуль вектора $\vec{B}$ в данном месте. На рисунке 3.19 концентрические окружности сгущаются к центру. Это означает, что магнитная индукция вблизи провода больше, чем вдали от него.

Направление линии магнитной индукции можно определить, используя *правило правой руки*.

Если большой палец правой руки расположить так, чтобы он указывал направление тока в проводнике, то остальные согнутые пальцы, охватывающие провод, укажут направление линий магнитной индукции поля, создаваемого током в этом проводе.

Очевидно, что правило правой руки даёт такой же результат, как и правило буравчика (рис. 3.20).

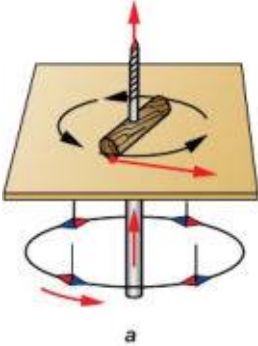


Рис. 3.20

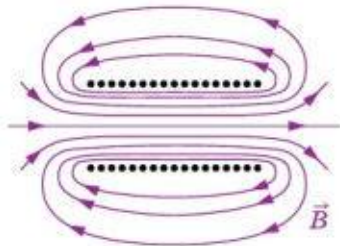


Рис. 3.21

Картина линий магнитной индукции катушки с током (соленоид^{*}) показана на рисунке 3.21 (соленоид дан в разрезе). Если длина соленоида много больше его диаметра, то поле внутри соленоида можно считать однородным. Линии магнитной индукции такого поля параллельны, их густота везде одинакова.

НАБЛЮДЕНИЕ ЛИНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. Точно так же как и с электрическим полем, линии магнитного поля можно сделать «видимыми». Для этого необходимо использовать мелкие железные опилки. Некоторые из картин магнитного поля приведены на рисунке 3.22.

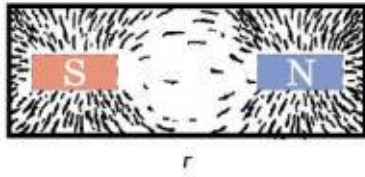
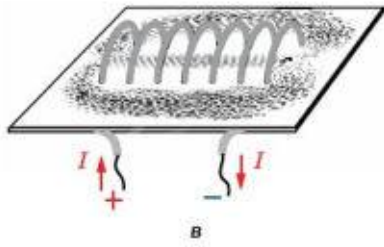
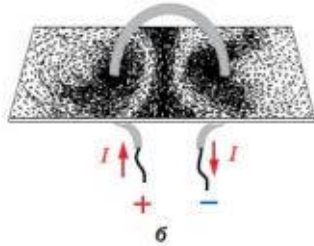
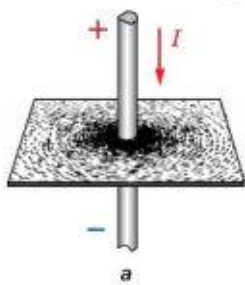


Рис. 3.22

^{*} Соленоид — цилиндрическая катушка, которая состоит из витков провода, плотно намотанного по спирали.

В магнитном поле каждый из насыпанных на лист картона кусочков железа намагничивается и ведёт себя как маленькая магнитная стрелка. Наличие такого большого количества стрелок позволяет в большом числе точек определить направление вектора магнитной индукции магнитного поля и, следовательно, более точно выяснить расположение линий магнитной индукции.

ВИХРЕВОЕ ПОЛЕ. Исследования магнитного поля позволяют сделать вывод о том, что *линии магнитной индукции не имеют ни начала, ни конца; они всегда замкнуты*. Поля с замкнутыми силовыми линиями называют *вихревыми*. Таким образом, магнитное поле — вихревое поле.

Замкнутость линий магнитной индукции представляет собой фундаментальное свойство магнитного поля. Оно заключается в том, что магнитное поле не имеет источников. Другими словами, *магнитных зарядов, подобных электрическим, не обнаружено*.

Кроме того, замкнутость линий магнитного поля означает, что работа магнитных сил на замкнутом пути может быть не равна нулю. Таким образом, магнитные силы, в отличие от электростатических, непотенциальны.

Отметим ещё одно свойство магнитных взаимодействий — его *нецентральный характер*. Полюс магнита не притягивает и не отталкивает проводники с током, а заставляет их поворачиваться вокруг себя. Сила, действующая со стороны магнита, не направлена вдоль линии, соединяющей полюс магнита с отдельными участками проводника с током.



1. Нарисуйте и охарактеризуйте картину линий магнитного поля: а) прямолинейного провода; б) катушки с током.
2. Какое правило можно использовать для определения направления линии магнитной индукции?
3. Как можно линии магнитной индукции сделать «видимыми»?
4. Какое поле называют вихревым? Опишите его особенности.



1. Сравните линии напряжённости электростатического поля и линии индукции магнитного поля.

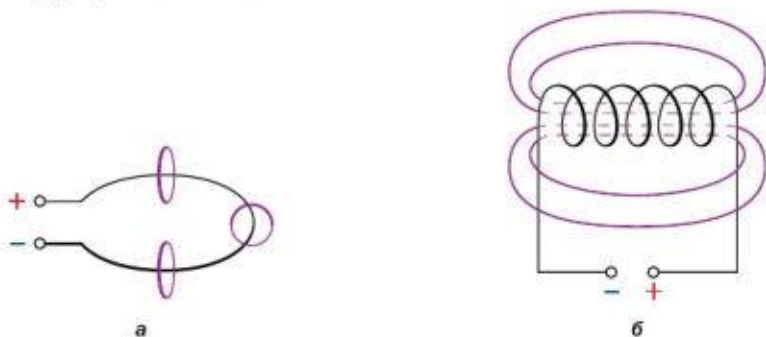


Рис. 3.23



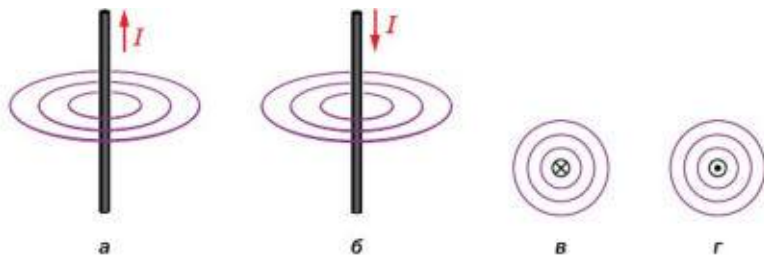


Рис. 3.24

2. Определите направление линий магнитного поля витка с током и катушки с током в случаях, изображённых на рисунке 3.23.
3. Определите направление линий магнитного поля* прямого проводника с током в случаях, изображённых на рисунке 3.24.



УПРАЖНЕНИЯ

1. Рамка площадью 400 см^2 помещена в однородное магнитное поле с индукцией $0,1 \text{ Тл}$ так, что нормаль к рамке перпендикулярна линиям магнитной индукции (рис. 3.25). При какой силе тока на рамку будет действовать вращающий момент, равный $20 \text{ мН} \cdot \text{м}$?
2. Плоская прямоугольная катушка из 200 витков со сторонами 10 и 5 см находится в однородном магнитном поле с индукцией $0,05 \text{ Тл}$. Какой максимальный вращающий момент может действовать на катушку в этом поле, если сила тока в катушке 2 А ?

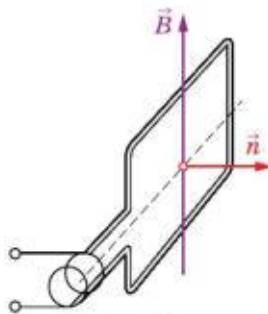


Рис. 3.25

§ 18

ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ. ЗАКОН АМПЕРА

СИЛА АМПЕРА. ЗАКОН АМПЕРА. Выясним, как определить силу, действующую со стороны магнитного поля на проводник с током.

Силу, действующую на проводник с током, помещённый в магнитное поле, называют силой Ампера $\vec{F}_A$.

* Если ток в проводнике или вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости рисунка, то для указания направления используют специальные символы. Направление за плоскость рисунка, от читателя, изображают символом $\otimes$ (хвост улетающей стрелы). Направление из плоскости рисунка, к читателю, изображают символом $\odot$ (острие приближающейся стрелы).

Как мы уже знаем, Ампер установил, что параллельные токи одинакового направления притягиваются, а противоположного направления — отталкиваются. Взаимно перпендикулярные токи не действуют друг на друга. Экспериментально можно установить, что модуль силы F_A прямо пропорционален силе тока в проводнике ($F_A \sim I$), длине проводника ($F_A \sim \Delta l$) и модулю магнитной индукции ($F_A \sim B$). Кроме того, модуль силы F_A зависит от угла α между направлениями вектора магнитной индукции и тока в проводнике.

Формула для определения модуля силы Ампера в общем случае имеет вид

$$F_A = B I \Delta l \sin \alpha. \quad (1)$$

Формулу (1), выражающую связь этой силы с индукцией поля, называют *законом Ампера*.

Модуль силы, с которой однородное магнитное поле действует на помещённый в него прямолинейный проводник с током, равен произведению модуля вектора магнитной индукции этого поля, силы тока, длины отрезка проводника и синуса угла между направлением тока и вектора магнитной индукции.

Если угол между вектором магнитной индукции и направлением тока в проводнике равен нулю ($\alpha = 0^\circ$), то модуль силы Ампера равен нулю. Если же угол между вектором $\vec{B}$ и направлением тока равен 90° ($\alpha = 90^\circ$), то модуль силы Ампера имеет максимальное значение.

Направление силы Ампера определяют по *правилу левой руки* (рис. 3.26).

Если расположить кисть левой руки так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а четыре пальца были направлены по току, то отогнутый под прямым углом большой палец левой руки покажет направление силы Ампера.

В задачах мы будем схематически изображать направления силы Ампера и вектора индукции магнитного поля так, как показано на рисунке 3.27. На этом рисунке вектор магнитной индукции направлен от нас, а ток течёт по прямолинейному участку вправо. Вектор силы $\vec{F}_A$ перпендикулярен и вектору $\vec{B}$, и направлению тока в проводнике.

Отметим, что с помощью закона Ампера можно вычислить модуль силы и момент сил, действующих на замкнутый проводник с током произвольной формы. Справедливость закона Ампера подтверждается тем, что вычисленное с его помощью значение результирующей силы для любого замкнутого проводника с током (она равна сумме сил, действующих на участки малой длины) совпадает с экспериментально полученным значением силы.



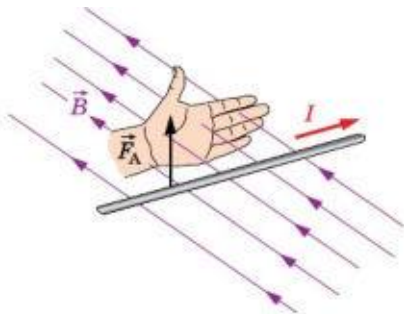


Рис. 3.26

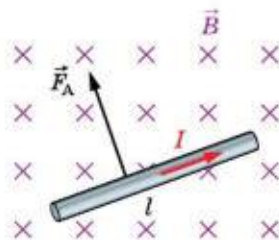


Рис. 3.27

МАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОВОДНИКОВ С ТОКАМИ. Рассмотрим притяжение или отталкивание проводников с токами. Опыты Ампера показали, что магнитные поля, созданные токами I_1 , I_2 , протекающими по бесконечно длинным параллельным проводникам, находящимся на расстоянии r друг от друга, приводят к возникновению на каждом отрезке проводников длиной Δl силы взаимодействия:

$$F_{21} = F_{12} = F = k \frac{2I_1 I_2 \Delta l}{r},$$

где k — коэффициент пропорциональности, равный $1 \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$. В единицах СИ $k = \frac{\mu_0}{4\pi}$ (μ_0 — магнитная постоянная).

На рисунке 3.28 по правилу правой руки (или правилу буравчика) определено направление вектора индукции магнитных полей, созданных токами I_1 и I_2 соответственно. По правилу левой руки можно установить направление силы Ампера, действующей на проводники с токами. В случае, когда направления токов совпадают, проводники притягиваются друг к другу. Если же направление одного из токов (например, I_1) изменить на противоположное, то и направление силы $\vec{F}_{12}$ изменится на противоположное. Так как от направления тока I_1 зависит направление вектора $\vec{B}_1$, то и направление силы $\vec{F}_{21}$ изменится на противоположное. Таким образом, токи, текущие в противоположных направлениях, будут отталкиваться друг от друга.

Магнитное взаимодействие проводников с токами используется в СИ для определения единицы силы тока — ампера (А).

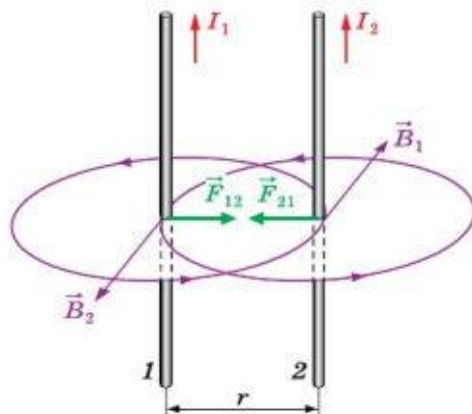


Рис. 3.28

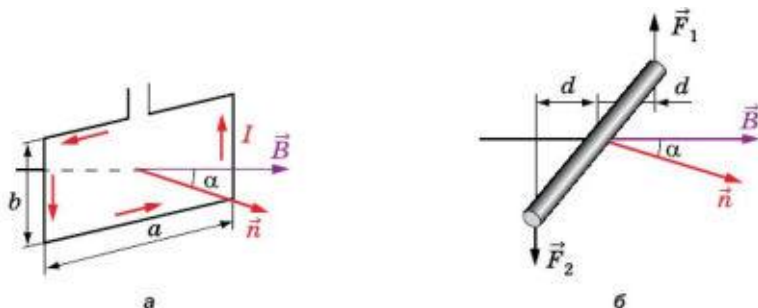


Рис. 3.29

Ампер — это сила постоянного тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РАМКУ С ТОКОМ. Определим момент сил, действующий на прямоугольную рамку с током в однородном магнитном поле с индукцией $\vec{B}$. Стороны рамки имеют размеры a и b , сила тока, текущего в ней, равна I . Вектор индукции $\vec{B}$ магнитного поля составляет с нормалью к рамке угол α (рис. 3.29, а). На рисунке 3.29, б показан вид сверху на сечение рамки горизонтальной плоскостью.

По правилу левой руки на стороны рамки длиной b действует пара сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, перпендикулярных вектору $\vec{B}$, которая создаёт момент сил относительно оси, проходящей через середину рамки. Силы, действующие на стороны рамки длиной a , лишь растягивают рамку.

По закону Ампера $F_1 = F_2 = IBb$. Плечо каждой из этих сил $d = \frac{a}{2} \sin \alpha$.

Суммарный момент сил равен

$$M = 2F \frac{a}{2} \sin \alpha = IBS \sin \alpha,$$

где $S = ab$ — площадь прямоугольной рамки.

При $\alpha = 90^\circ$ момент сил максимален.

ПРИМЕНЕНИЯ ЗАКОНА АМПЕРА. На практике закон Ампера используют для вычисления сил, действующих на проводники с токами, во многих технических устройствах, в частности в электродвигателях.

Рассмотрим устройство электродвигателя. По обмотке вращающейся части электродвигателя — якоря (ротора) 3 (рис. 3.30) — протекает электрический ток. Мощные электромагниты создают магнитное поле, кото-

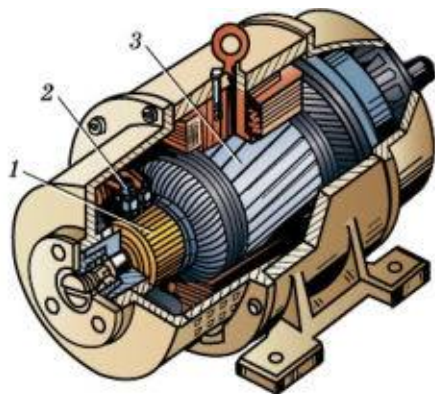


Рис. 3.30

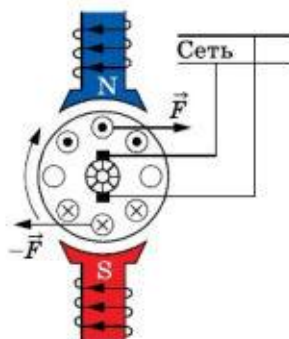


Рис. 3.31

рое действует на проводники с током в обмотке якоря и заставляет их двигаться (рис. 3.31). Якорь изготавливается из стальных пластин, а полюсам электромагнита придаётся специальная форма с тем, чтобы сконцентрировать магнитное поле в местах, где располагается обмотка ротора. Выводы обмотки якоря припаяны к медным коллекторным полукольцам. Коллектор 1 состоит из двух полуколец, к которым прижимаются скользящие по ним контакты — щётки 2. Коллектор изменяет направление тока в обмотке. К щёткам от источника тока подводится напряжение, питающее обмотку ротора. Когда по виткам обмотки проходит ток, на них со стороны магнитного поля действуют силы Ампера, благодаря которым якорь приходит во вращение. Вращательное движение якоря передаётся валу, от него — различным механизмам.

Создание электродвигателей связано с именем Б. С. Якоби. Он сконструировал первый в мире практически пригодный электродвигатель постоянного тока в 1834 г. и применил его для движения судна по реке Неве. В настоящее время электродвигатели устанавливают на электропоездах, троллейбусах, трамваях, лифтах и многих других устройствах. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с тепловыми двигателями. Электродвигатели не загрязняют окружающую среду, так как им не нужен запас топлива. Кроме того, электродвигатели удобны в эксплуатации и надёжны в работе. КПД мощных электрических двигателей может достигать 90%, что невозможно для других типов двигателей.

* **ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ.** Действие магнитного поля на контур с током используется в *стрелочных электроизмерительных приборах магнитоэлектрической системы* для измерения силы тока и напряжения. Измерительный прибор такой системы устроен следующим образом. На лёгкой (обычно алюминиевой) рамке прямоугольной формы с прикреплённой к ней стрелкой намотана катушка 1, имеющая N витков



Рис. 3.32

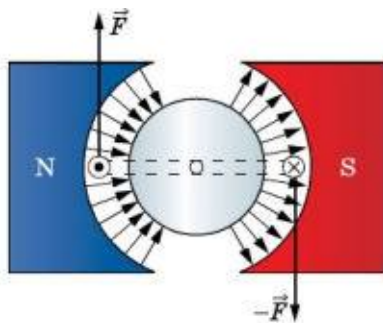
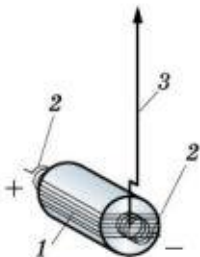


Рис. 3.33

(рис. 3.32). Рамка укреплена на двух полуосях. В положении равновесия её удерживают две тонкие спиральные пружины 2. Момент сил упругости $M_{\text{мех}}$, действующий со стороны пружины и возвращающий катушку в положение равновесия, пропорционален углу φ отклонения стрелки 3 от положения равновесия:

$$M_{\text{мех}} = f\varphi,$$

где f — постоянный коэффициент пропорциональности.

Катушку помещают между полюсами постоянного магнита специальной формы 4 (см. рис. 3.32). Внутри катушки расположен цилиндр из мягкого железа*. Такая конструкция обеспечивает радиальное направление линий магнитной индукции в той области, где находятся витки катушки (рис. 3.33). В результате при любом положении катушки момент сил, действующий на неё со стороны магнитного поля, максимален и при неизменной силе тока один и тот же. Катушка с током поворачивается до тех пор, пока момент сил упругости, действующий со стороны пружины, не уравнивает момент сил, действующий на рамку со стороны магнитного поля:

$$M_{\text{мех}} = f\varphi = NIBS.$$

Отсюда следует, что измеряемая сила тока прямо пропорциональна углу отклонения стрелки:

$$I = \frac{f}{NSB}\varphi.$$

Здесь коэффициент $\frac{f}{NSB}$ — постоянная для данного прибора величина.

* Мягкое железо остаётся намагниченным только до тех пор, пока оно подвержено действию магнитной силы.

Прибор можно проградуировать так, чтобы угол поворота определял силу тока в амперах или других единицах. Согласно закону Ома, сила тока в приборе $I = \frac{U}{R}$. Поэтому прибор можно проградуировать и так, чтобы определённому углу φ отклонения стрелки соответствовало напряжение U на зажимах прибора в вольтах или других единицах. Таким образом, прибор может служить как амперметром, так и вольтметром. *



1. Сформулируйте закон Ампера. Связь между какими физическими величинами устанавливает этот закон? **2.** Приведите определение единицы силы тока в СИ. **3.** Расскажите об устройстве и принципе действия: а) электродвигателя; б) стрелочного электроизмерительного прибора магнитоэлектрической системы.



- 1.** Какое положение займёт подвижный соленоид относительно магнита (рис. 3.34) при прохождении по соленоиду тока? Что произойдёт с соленоидом, если изменить направление: а) тока; б) линий магнитного поля?
- 2.** Над соленоидом (рис. 3.35) подвешен полюсовый магнит. Что произойдёт с магнитом, если: а) по соленоиду пропустить постоянный ток; б) изменить направление тока в соленоиде?

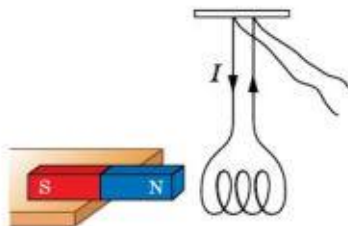


Рис. 3.34

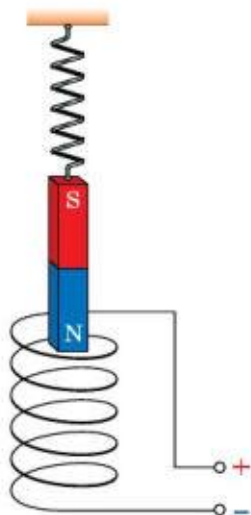


Рис. 3.35



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

На горизонтальных рельсах, находящихся в вертикальном однородном магнитном поле, лежит стальной брусок перпендикулярно рельсам. Расстояние между рельсами равно 15 см. Масса бруска составляет 300 г, коэффициент трения бруска о рельсы равен 0,2. Для того чтобы брусок сдвинулся с места, по нему необходимо пропустить ток. Определите индукцию магнитного поля, если минимальная сила тока, при которой брусок приходит в движение, равна 40 А.

Дано:	СИ:
$d = 15 \text{ см}$	$0,15 \text{ м}$
$m = 300 \text{ г}$	$0,3 \text{ кг}$
$\mu = 0,2$	
$I = 40 \text{ А}$	
$B = ?$	

Решение:
 На брусок действуют сила реакции опоры $\vec{N}$ со стороны рельсов, сила тяжести $m\vec{g}$, сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ и сила Ампера $\vec{F}_A$. Перенесём все силы в центр масс (геометрический центр) бруска (рис. 3.36). Определим по правилу левой руки направление $\vec{F}_A$.

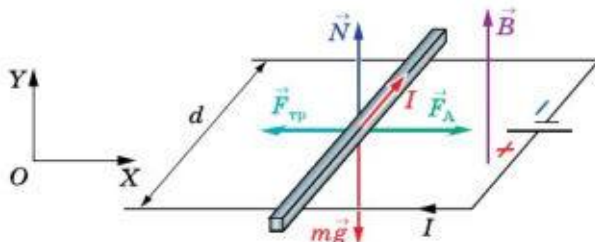


Рис. 3.36

Запишем условие равновесия бруска:

$$\vec{N} + m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{F}_A = 0$$

и спроецируем его на оси OX и OY .

$$\begin{cases} OX: F_A - F_{\text{тр}} = 0 \Rightarrow F_A = F_{\text{тр}}, \\ OY: N - mg = 0 \Rightarrow N = mg. \end{cases}$$

Учитывая, что

$$F_A = IBd, \quad F_{\text{тр}} = \mu N,$$

получим

$$IBd = \mu mg \Rightarrow B = \frac{\mu mg}{Id}.$$

С учётом числовых данных

$$B = \frac{0,2 \cdot 0,3 \cdot 9,8}{40 \cdot 0,15} \text{ Тл} = 0,098 \text{ Тл} = 98 \text{ мТл}.$$

Ответ: $B = 98 \text{ мТл}$.

УПРАЖНЕНИЯ

- Чему равна индукция магнитного поля, в котором на проводник с длиной активной части 5 см действует сила 50 мН? Сила тока в проводнике равна 25 А. Проводник расположен перпендикулярно линиям индукции магнитного поля.



2. С какой силой действует магнитное поле с индукцией 10 мТл на проводник с длиной активной части $0,1 \text{ м}$, сила тока в котором 50 А ? Направление тока в проводнике перпендикулярно вектору магнитной индукции.
3. Какая сила действует на проводник длиной 10 см в однородном магнитном поле с индукцией $2,6 \text{ Тл}$, если сила тока в проводнике 12 А , а угол между направлением тока и линиями магнитной индукции составляет: а) 90° ; б) 30° ?
4. В однородном магнитном поле, индукция которого равна 2 Тл , вертикально вверх движется прямой проводник массой 2 кг , по которому течёт ток. Через 3 с после начала движения проводник имеет скорость 10 м/с . Определите длину проводника, если сила тока в нём равна 4 А . Вектор индукции магнитного поля образует с осью проводника угол 30° .
5. На рисунке 3.37 представлены различные случаи взаимодействия магнитного поля с током. Сформулируйте задачу для каждого из представленных случаев и решите её.

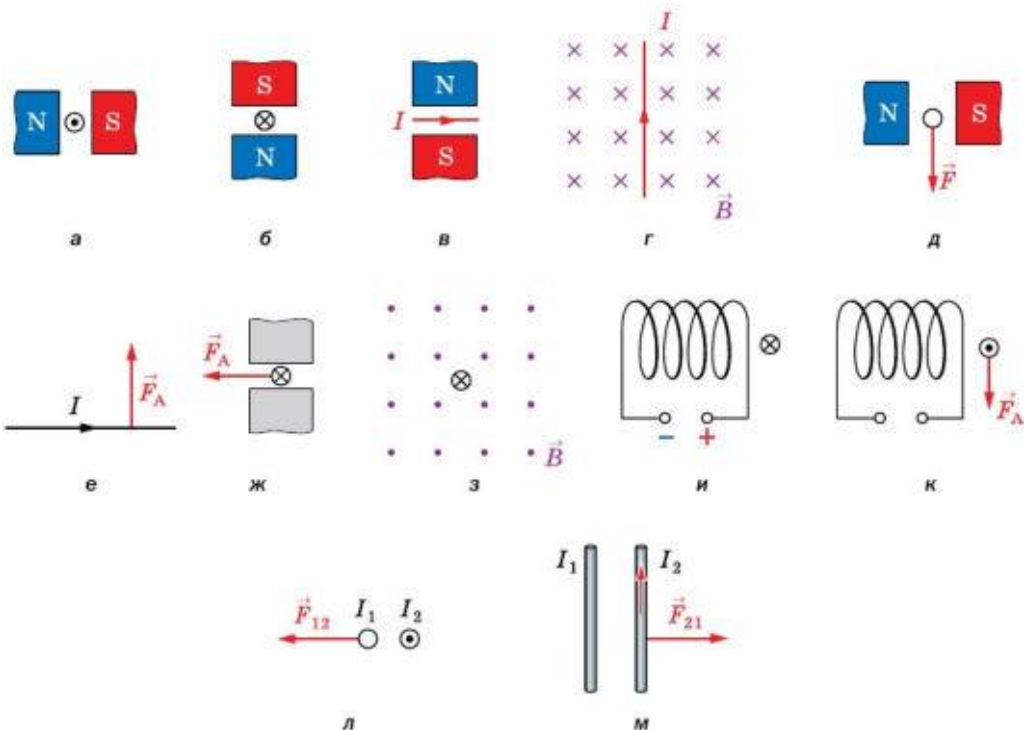


Рис. 3.37

СИЛА ЛОРЕНЦА. Значительный интерес представляет движение заряженных частиц в области пространства, где одновременно имеются электрическое и магнитное поля. Для этого случая Лоренц получил выражение для силы, которую в честь него называют *силой Лоренца*. Она представляет собой сумму сил, действующих на заряженную частицу, которая движется в электрическом и магнитном полях.

Пусть заряженная частица с зарядом q движется со скоростью $\vec{v}$ в однородном магнитном поле с индукцией $\vec{B}$ и в однородном электрическом поле с напряжённостью $\vec{E}$. Электрическое поле действует на заряд q с силой, модуль которой равен $F_E = qE$. Эта составляющая силы Лоренца получила название *электрической составляющей*. В магнитном поле на движущуюся частицу действует *магнитная составляющая* силы Лоренца.

Её модуль можно найти с помощью закона Ампера. Предположим, что проводник с током находится в однородном магнитном поле. Вдоль проводника движутся заряженные частицы. Рассмотрим отрезок проводника длиной Δl и площадью поперечного сечения S (рис. 3.38). На него со стороны магнитного поля действует сила Ампера. В § 1 была выведена формула, определяющая силу тока в проводнике:

$$I = qnvS.$$

Подставив это выражение в формулу для модуля силы Ампера $F_A = BI\Delta l \sin \alpha$, получим

$$F_A = BqnvS\Delta l \sin \alpha,$$

где $N = nS\Delta l$ — число заряженных частиц в рассматриваемом объёме $S\Delta l$.

Магнитная составляющая силы Лоренца равна по модулю

$$F_L = \frac{F_A}{N} = qvB \sin \alpha,$$

где α — угол между векторами $\vec{v}$ и $\vec{B}$.

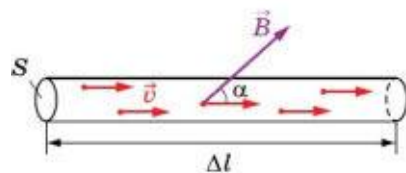


Рис. 3.38

Магнитная составляющая силы Лоренца всегда перпендикулярна плоскости, в которой располагаются вектор скорости $\vec{v}$ заряженной частицы и вектор индукции $\vec{B}$ магнитного поля. В силу того что данная сила перпендикулярна скорости частицы, она не совершает работы.

Следовательно, если есть и электрическое поле, и магнитное, то полная сила $\vec{F}$, действующая на движущуюся частицу, равна

$$\vec{F} = \vec{F}_э + \vec{F}_л.$$

Для определения направления магнитной составляющей силы Лоренца используют *правило левой руки*.

Если левую руку расположить так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца показывали направление скорости движения положительно заряженной частицы, то отогнутый (в плоскости ладони) на 90° большой палец покажет направление действующей на заряженную частицу магнитной составляющей силы Лоренца.

Если в магнитном поле движутся отрицательно заряженные частицы, то пальцы левой руки следует располагать противоположно направлению вектора скорости. Для иллюстрации применения правила левой руки приведём рисунок 3.39. На нём штриховыми линиями указаны траектории движения зарядов (на рис. 3.39, *а* — положительного заряда, на рис. 3.39, *б* — отрицательного заряда).

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ. Рассмотрим наиболее простой случай движения заряженной частицы в магнитном поле — это движение в однородном магнитном поле с индукцией, перпендикулярной начальной скорости частицы (рис. 3.40).

Так как магнитное поле не изменяет модуля скорости заряженной частицы, то остаётся неизменным и модуль магнитной составляющей силы Лоренца. Поскольку эта сила перпендикулярна скорости, то частица движется с центростремительным ускорением. Неизменность по модулю центростремительного ускорения частицы, движущейся с постоянной по модулю скоростью, означает, что радиус кривизны R траектории части-

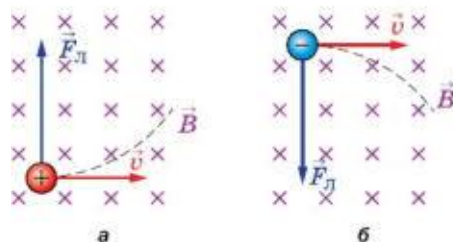


Рис. 3.39

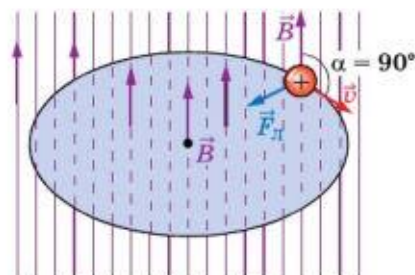


Рис. 3.40

Батарея,
создающая
ускоряющее
напряжение

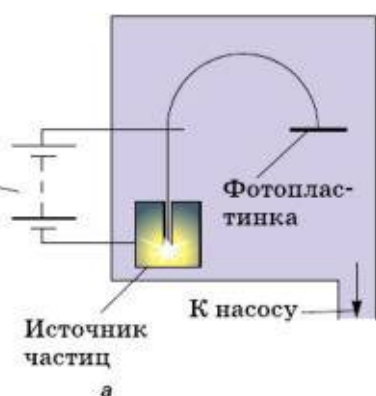


Рис. 3.41

цы постоянен. Частица движется равномерно по окружности радиусом R . Согласно второму закону Ньютона,

$$\frac{mv^2}{R} = qvB, \text{ откуда}$$

$$R = \frac{mv}{qB}.$$

Следовательно, измерив R при известных v и B , мы можем определить удельный заряд $\frac{q}{m} = \frac{v}{BR}$ различных частиц.

*** МАСС-СПЕКТРОГРАФ.** С помощью магнитного поля можно разделять заряженные частицы по их удельным зарядам и точно определять массы частиц. Разделение частиц осуществляется в *масс-спектрографах*^{*}. На рисунке 3.41, а изображена схема простейшего масс-спектрографа, а на рисунке 3.41, б — внешний вид современного прибора. Вакуумная камера масс-спектрографа помещена в магнитное поле (вектор магнитной индукции перпендикулярен рисунку). Ускоренные электрическим полем заряженные частицы (электроны или ионы), описав дугу, попадают на фотопластинку, где оставляют след, позволяющий с большой точностью измерить радиус траектории R . По этому радиусу можно определить удельный заряд иона и, следовательно, его массу.

ЦИКЛОТРОН. Используя формулу для радиуса траектории, найдём время прохождения заряженной частицей полуокружности:

$$\Delta t = \frac{\pi R}{v} = \frac{\pi m}{qB},$$

т. е. Δt зависит только от свойств частицы и индукции магнитного поля.

^{*} Масс-спектрограф был впервые сконструирован в 1919 г. учеником Дж. Дж. Томсона — Фрэнсисом Астоном (1877—1945). С помощью этого прибора он произвёл точные измерения масс и дефектов масс ряда изотопов.

Этот факт был использован американским физиком Эрнестом Лоуренсом (1901—1958), который в 1931 г. создал *циклотрон*. Это устройство позволяет ускорять заряженные частицы сравнительно небольшим электрическим полем в течение ряда циклов.

Рассмотрим устройство циклотрона (рис. 3.42). Два электрода специальной формы — *дуанты* находятся в камере, где поддерживается вакуум (рис. 3.43). Дуанты помещают между полюсами сильного магнита, и к ним подводится переменная разность потенциалов. В центре камеры между дуантами располагают источник заряженных частиц. В тот момент, когда между дуантами существует высокая разность потенциалов, электрическое поле в промежутке между ними ускоряет заряженные частицы.

Ускоренные частицы влетают во внутреннюю часть дуанта, где электрическое поле практически отсутствует. Двигаясь под действием магнитной составляющей силы Лоренца по окружности, заряженные частицы через половину оборота снова появляются в щели между дуантами.

Те из частиц, которые двигались с подходящей скоростью, пройдут через щель как раз в тот момент (через половину периода изменения приложенного к дуантам напряжения), когда там электрическое поле успеет сменить своё направление на противоположное. Такие частицы снова ускоряются, описывают внутри другого дуанта полуокружность ещё большего радиуса и снова в необходимый момент подходят к ускоряющему промежутку (время прохождения частицами полуокружности остаётся неизменным, так как оно не зависит от скорости частицы) и т. д. Остальные частицы ускоряются незначительно или совсем не ускоряются.

Циклотроны и другие более мощные ускорители заряженных частиц (например, фазотроны, синхротроны, синхрофазотроны) находят широкое применение в ядерной физике и физике элементар-

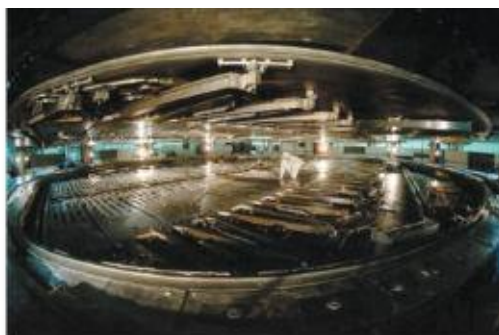


Рис. 3.42



Рис. 3.43

ных частиц. Изучая столкновения ускоренных частиц с частицами мишени, физики получают возможность исследовать строение микрочастиц, действующие между ними силы, взаимные превращения элементарных частиц.



МАГНИТНЫЙ ЩИТ ЗЕМЛИ. Магнитное поле Земли оказывает существенное влияние на поток заряженных частиц из космоса (космические лучи). Оно образует третий «защитный пояс» наряду с атмосферой и ионосферой, защищающий живые организмы на Земле от губительного действия космических лучей.

На большой высоте магнитное поле Земли невелико, но захватывает громадные области пространства. Действуя на заряженную частицу длительное время,

оно существенно изменяет её траекторию. Вместо прямой линии получается спираль, навивающаяся на линии индукции магнитного поля (рис. 3.44). На летящую вдоль линии магнитной индукции частицу сила Лоренца не действует. Вот почему частицы свободно могут приближаться к полюсам, откуда веером расходятся линии магнитной индукции.

Кроме того, магнитное поле Земли удерживает на большой высоте заряженные частицы не слишком больших энергий. Эти области с повышенной концентрацией заряженных частиц, окружающих земной шар, называют *радиационными поясами*. Большинство частиц внешнего радиационного пояса Земли составляют электроны, а её внутреннего радиационного пояса — протоны (рис. 3.45). Протоны задерживаются более

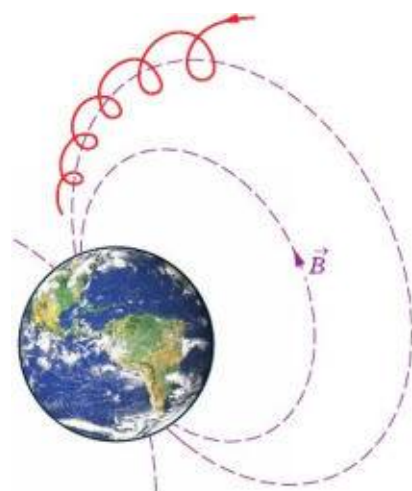


Рис. 3.44



Рис. 3.45

сильным магнитным полем во внутреннем радиационном поясе. В радиационных поясах заряженные частицы движутся от одного полюса к другому, оставаясь в «магнитной ловушке».



1. Что называют: а) электрической составляющей силы Лоренца; б) магнитной составляющей силы Лоренца? **2.** В каком случае магнитная составляющая силы Лоренца будет максимальной? **3.** Как можно определить направление магнитной составляющей силы Лоренца, действующей: а) на положительно заряженную частицу; б) на отрицательно заряженную частицу? **4.** Для чего используют: а) масс-спектрограф; б) циклотрон? **5.** Как влияет магнитное поле Земли на потоки космических лучей?



1. Действует ли магнитная составляющая силы Лоренца: а) на незаряженную частицу в однородном магнитном поле; б) на заряженную частицу, покоящуюся в магнитном поле; в) на заряженную частицу, движущуюся вдоль линий магнитного поля?
2. Как будет двигаться положительно заряженная частица в параллельных электрическом и магнитном полях, если её начальная скорость $\vec{v}$ направлена под некоторым углом к $\vec{E}$ и к $\vec{B}$?



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ



Электрон влетает в однородное магнитное поле с индукцией 10^{-3} Тл перпендикулярно линиям магнитной индукции и под углом $\alpha = \pi/4$ к границе поля (рис. 3.46, а). Модуль скорости электрона равен 10^6 м/с. В направлении осей X и Y магнитное поле безгранично. На каком расстоянии от точки влёта электрон вылетит из поля? Отношение заряда электрона к его массе $e/m = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

Дано:

$$B = 10^{-3} \text{ Тл}$$

$$\alpha = \pi/4$$

$$v = 10^6 \text{ м/с}$$

$$e/m = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$$

$l = ?$

Решение:

Определим направление магнитной составляющей силы Лоренца $\vec{F}_L$ по правилу левой руки (рис. 3.46, б). При этом учтём, что в поле влетает электрон.

В магнитном поле под действием магнитной составляющей силы Лоренца электрон опишет дугу окружности. Найдём её радиус R . Запишем второй закон Ньютона:

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

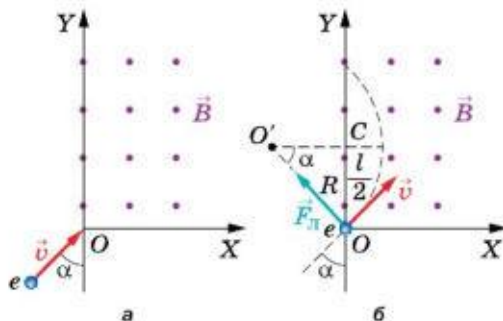


Рис. 3.46

Поскольку центростремительное ускорение $a = \frac{v^2}{R}$, то

$$\frac{mv^2}{R} = evB \Rightarrow R = \frac{mv}{eB}.$$

Из $\triangle O'OC$ (см. рис. 3.46) видно, что

$$OC = \frac{l}{2} = R \sin \alpha, \quad l = 2R \sin \alpha = 2 \frac{mv \sin \alpha}{eB}.$$

Подставляя числовые данные, получим

$$l = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot \sin \frac{\pi}{4}}{1,76 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-3}} \text{ м} = 0,008 \text{ м} = 8 \text{ мм}.$$

Ответ: $l = 8 \text{ мм}$.



УПРАЖНЕНИЯ

1. Протон в магнитном поле с индукцией 0,01 Тл описал окружность радиусом 10 см. Чему равна скорость протона?
2. Найдите ускорение протона, который движется со скоростью 2 м/с в магнитном поле с индукцией 3 мТл перпендикулярно линиям магнитной индукции.
3. Определите кинетическую энергию электрона, движущегося по окружности радиусом 1 см в однородном магнитном поле с индукцией 0,03 Тл. Приведите ответ в Дж и в эВ.
4. Протон с энергией 600 эВ влетает в однородное магнитное поле с индукцией 0,33 Тл перпендикулярно линиям магнитной индукции. Найдите радиус траектории протона. Будет ли изменяться кинетическая энергия протона при движении в этом магнитном поле?
5. Электрон влетает в однородное магнитное поле с индукцией 9,4 мТл так, что вектор его скорости составляет угол 30° с направлением линий магнитной индукции (рис. 3.47). Определите радиус витков траектории электрона и расстояние, пройденное им вдоль линии магнитной индукции за три витка. Скорость электрона равна $2,5 \cdot 10^6$ м/с.
6. Электрон, влетающий в однородное магнитное поле под углом 60° к линиям магнитной индукции, движется по спирали диаметром 10 см с периодом обращения $6 \cdot 10^{-5}$ с. Определите скорость электрона, индукцию магнитного поля и шаг спирали.

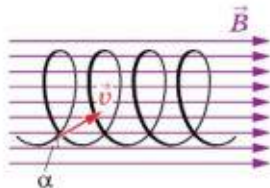


Рис. 3.47



§ 20

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ СРЕДЫ. Благодаря тому что все вещества, находящиеся в магнитном поле, создают собственное магнитное поле, вектор магнитной индукции $\vec{B}$ в однородной среде отличается от вектора $\vec{B}_0$ в той же точке пространства в отсутствие среды, т. е. в вакууме.

Отношение $\frac{B}{B_0} = \mu$ называют *магнитной проницаемостью среды*.

В однородной среде магнитная индукция равна

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0.$$

Эта формула справедлива только для однородной среды, заполняющей всё пространство, или для случаев особой симметрии тела, например для однородного стержня внутри длинной катушки с током — соленоида.

Если тело имеет произвольную форму, то зависимость между $\vec{B}$ и $\vec{B}_0$ будет определяться формой тела и его ориентацией по отношению к вектору $\vec{B}_0$.

По своим магнитным свойствам все вещества можно разделить на слабомагнитные и сильномагнитные. К слабомагнитным веществам относятся *парамагнетики* и *диамагнетики*, к сильномагнитным — *ферромагнетики*. Рассмотрим их свойства.

ПАРАМАГНЕТИКИ. *Парамагнетики втягиваются в сильное магнитное поле.* Линии индукции создаваемого ими собственного магнитного поля и намагничивающего поля направлены одинаково, поэтому поле *усиливается*. Таким образом, у парамагнетиков $\mu > 1$. Но от единицы μ отличается крайне незначительно, всего на величину порядка 10^{-5} — 10^{-6} . Магнитная проницаемость парамагнетиков, как показывает опыт, зависит от температуры и уменьшается при её увеличении. При не очень сильных магнитных полях μ не зависит от значения индукции намагничивающего поля.

К числу парамагнетиков относятся некоторые металлы (алюминий, натрий, калий, марганец, платина и др.), кислород и многие другие элементы, а также различные растворы электролитов. Без намагничивающего поля парамагнетики не создают собственного магнитного поля, т. е. постоянных парамагнетиков не бывает.

ДИАМАГНЕТИКИ. *Диамагнетики выталкиваются из магнитного поля.* Если подвесить диамагнитный стержень возле полюса сильного электромагнита, то он будет отталкиваться от него. Следовательно, линии индукции созданного им поля направлены противоположно линиям индукции намагничивающего поля, т. е. поле *ослабляется*. Соответственно у диамагнетиков $\mu < 1$, причём отличается от единицы на величину порядка 10^{-6} . Магнитные свойства у диамагнетиков выражены слабее, чем у парамагнетиков.

К диамагнетикам относят висмут, медь, серу, ртуть, хлор, инертные газы и практически все органические соединения. Диамагнитным является, например, пламя свечи (главным образом за счёт углекислого газа).



Рис. 3.48

Поэтому пламя выталкивается из магнитного поля (рис. 3.48).

Для всех диамагнитных веществ магнитная проницаемость практически не зависит от индукции намагничивающего поля. В отличие от парамагнетиков, она не зависит и от температуры. При вынесении диамаг-

нетика из внешнего намагничивающего поля он полностью размагничивается и магнитного поля не создаёт.

ФЕРРОМАГНЕТИКИ. Вещества, у которых, подобно железу, $\mu \gg 1$, называют ферромагнетиками. Кроме железа, ферромагнетиками являются кобальт и никель, а также ряд редкоземельных элементов и многие сплавы. Важнейшее свойство ферромагнетиков — существование у них *остаточного магнетизма*. Ферромагнитное вещество может находиться в намагниченном состоянии и без внешнего намагничивающего поля.

Все ферромагнетики при нагревании до определённой, характерной для каждого вещества температуры теряют свои ферромагнитные свойства и становятся парамагнетиками.

Температуру, при которой вещество теряет ферромагнитные свойства, называют температурой или точкой Кюри*.

При нагревании постоянного магнита выше этой температуры он перестаёт притягивать железные предметы. Температура Кюри для железа составляет 770°C , для никеля — 365°C , для кобальта — 1000°C .

* **КРИВАЯ НАМАГНИЧИВАНИЯ.** Магнитное состояние ферромагнетика удобно характеризовать физической величиной, называемой *намагниченностью* J . Если длинный однородный стержень поместить внутрь соленоида, то магнитная индукция внутри его станет равной $B = \mu B_0$. Разность между B и B_0 может служить мерой намагничивания материала J :

$$J = B - B_0,$$

или

$$J = (\mu - 1)B_0.$$

Если образец не был предварительно намагничен, то график зависимости J от B_0 имеет вид, показанный на рисунке 3.49. Зависимость не является линейной, поскольку для ферромагнетиков μ зависит от B_0 . Уже при

* В 1894 г. французский физик Пьер Кюри (1859—1906) открыл это явление у железа.

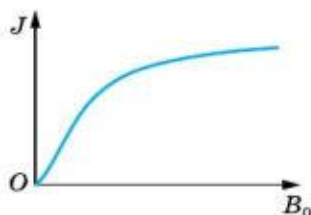


Рис. 3.49

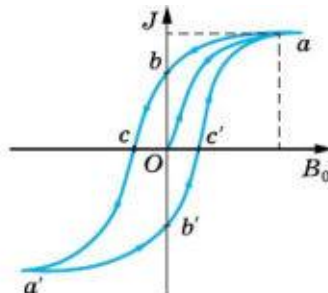


Рис. 3.50

сравнительно небольших значениях B_0 наступает *насыщение* — намагниченность остаётся неизменной, несмотря на рост B_0 .

Намагниченность зависит не только от значения индукции в данный момент, но и от того, какой она была в предыдущие моменты времени. При уменьшении индукции намагничивающего поля после достижения насыщения намагниченность J уменьшается медленнее, чем происходил её рост. Это явление называют *магнитным гистерезисом* (от греч. *hysteresis* — отставание).

Общий характер зависимости J от B_0 показан на рисунке 3.50. Участок Oa представляет собой кривую намагничивания, подобную представленной на рисунке 3.49. В точке a достигается насыщение. При уменьшении значения B_0 до нуля намагниченность уменьшается в соответствии с участком кривой ab . При $B_0 = 0$ намагниченность отлична от нуля. Её значение $J = Ob$ представляет собой *остаточную намагниченность*. Образец создаёт магнитное поле без внешнего намагничивающего поля. Он является, следовательно, постоянным магнитом. При увеличении магнитной индукции B_0 , направленной уже в противоположную сторону, намагниченность уменьшается и лишь при $B_{0c} = Oc$ становится равной нулю. В точке a' образец опять намагничен до насыщения, но в обратном направлении. Уменьшая индукцию магнитного поля до нуля и опять увеличивая её до достижения состояния насыщения (точка a), получают замкнутую симметричную относительно точки O кривую, называемую *петлёй гистерезиса*.

Отметим, что первые детальные исследования намагничивания ферромагнитных материалов были выполнены выдающимся русским учёным Александром Григорьевичем Столетовым (1839—1896). В 1872 г. им была получена и исследована кривая намагничивания железа.

Форма петли является важнейшей магнитной характеристикой материала. В этой связи различают *магнитно-мягкие* и *магнитно-жесткие материалы*. У магнитно-мягких материалов площадь петли мала, а у магнитно-жестких — велика. К магнитно-мягким материалам относятся

некоторые сорта стали, например сплав железа с никелем (70% Ni и 30% Fe), называемый пермаллоем, и др. Их используют в качестве сердечников электромагнитов, трансформаторов и др.

К магнитно-жестким материалам с широкой петлей гистерезиса относятся некоторые сорта стали и многие сплавы. Они применяются для изготовления постоянных магнитов.

СТРОЕНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ВЕЩЕСТВ. Любой кажущийся немагнитным кусок ферромагнитного вещества в действительности состоит из небольших областей, намагниченных до насыщения. Эти области называют *доменами*. Их размеры зависят от многих причин: от химического состава вещества, его размеров и формы, дефектов кристаллической структуры, температуры и т. д. Объем домена имеет порядок 10^{-6} см³, а его длина может достигать 2—3 мм.

Домены — это макроскопические образования, содержащие огромное число атомов. Причина образования доменов — стремление системы к состоянию с наименьшей потенциальной энергией. При отсутствии внешнего магнитного поля векторы индукции собственных магнитных полей доменов имеют различные направления (рис. 3.51, а). В результате ферромагнетик оказывается макроскопически немагнитным, магнитные поля доменов компенсируют друг друга.

При внесении ферромагнетика во внешнее магнитное поле происходит смещение границ отдельных доменов (рис. 3.51, б). Как следствие, объем доменов, ориентированных по внешнему полю, увеличивается. В слабых магнитных полях такой рост имеет обратимый характер. В очень сильном внешнем магнитном поле домены, в которых собственное магнитное поле совпадает по направлению с внешним полем, поглощают все остальные домены, и наступает насыщение. Поэтому с увеличением индукции B_0 внешнего магнитного поля магнитная индукция ферромагнетика возрастает (рис. 3.51, в).

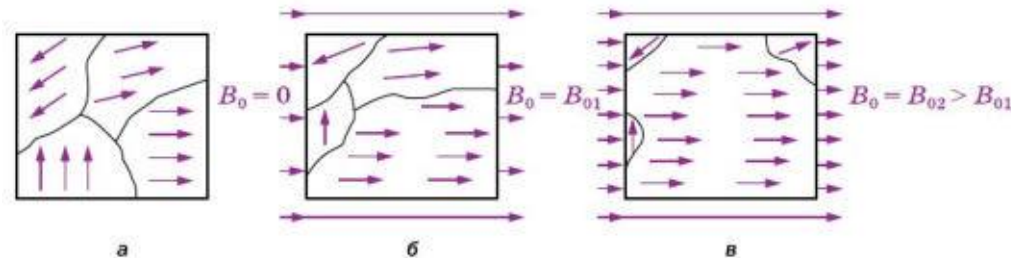


Рис. 3.51



1. Какой физический смысл имеет магнитная проницаемость среды?
2. Какие вещества относят: а) к сильномагнитным; б) к слабомагнитным?
3. Приведите примеры: а) парамагнетиков; б) диамагнетиков; в) ферромагнетиков.
4. Охарактеризуйте и сравните магнитные свойства парамагнетиков и диамагнетиков.
5. Что называют точкой Кюри?
6. Какое строение имеют ферромагнитные вещества?



1. Существует ли остаточная намагниченность: а) у парамагнетиков; б) у диамагнетиков?
2. Если взять никелевую фольгу, свёрнутую в трубочку, и подвесить её вблизи сильного постоянного магнита, то фольга притянется к магниту. При поднесении к фольге зажжённой газовой горелки фольга нагреется выше температуры $360\text{ }^{\circ}\text{C}$, перестанет притягиваться, отойдёт от магнита и выйдет из пламени горелки. Через некоторое время фольга остынет и снова притянется к магниту.
 - а) В чём состоит причина колебаний никелевой фольги?
 - б) Будут ли продолжаться колебания фольги, если выключить горелку?

Это любопытно...

Интересные факты

Долгое время считалось, что сверхпроводник — это идеальный металл с сопротивлением, равным нулю. Однако в 1933 г. немецкие физики Вальтер Мейсснер (1882—1974) и Роберт Оксенфельд (1901—1993) показали, что сверхпроводник является идеальным диамагнетиком, т. е. он полностью вытесняет из своего объёма магнитное поле (рис. 3.52), независимо от пути перехода к условию $T < T_c$.

Эффект Мейсснера—Оксенфельда заключается в «выталкивании» сверхпроводником магнитного поля из занимаемой им части пространства. Это вызвано существованием незатухающих токов внутри сверхпроводника, которые создают внутреннее магнитное поле, противоположно направленное приложенному внешнему магнитному полю и компенсирующее его. При охлаждении сверхпроводника, находящегося во внешнем постоянном магнитном поле, в момент перехода в сверхпроводящее состояние магнитное поле полностью вытесняется из его объёма.

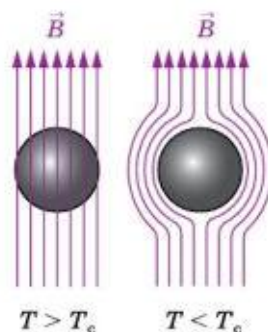


Рис. 3.52

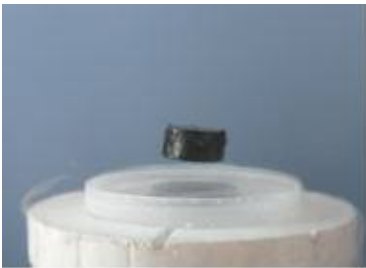


Рис. 3.53

В настоящее время для демонстрации эффекта Мейсснера—Оксенфельда (рис. 3.53) можно использовать высокотемпературную сверхпроводящую керамику и магнит. Для того чтобы керамика перешла в сверхпроводящее состояние, её охлаждают с помощью жидкого азота. После этого к ней подводится ток и сверху размещают магнит. В магнитных полях с индукцией 0,001 Тл магнит смещается вверх и парит над сверхпроводником.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ И ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

1. Измерьте горизонтальную и вертикальную составляющие магнитного поля Земли, если в вашем распоряжении имеются компас, медный провод в изоляции, амперметр, реостат и батарейка карманного фонаря.
2. Сконструировать магнитный дефектоскоп — прибор для проверки однородности стальных стержней.
3. Подвесьте подковообразный магнит на нити над диском из алюминиевой фольги, способным вращаться вокруг оси, проходящей через его центр. Если раскрутить магнит, то диск начнёт крутиться. В какую сторону? Почему? Снимите учебный фильм на основе этого эксперимента.

Примерные темы рефератов и проектов

1. Электромагниты: устройство, физические основы работы, применение.
2. Масс-спектрограф и циклотрон: устройство, принцип действия, применение.
3. Движение заряженных частиц в магнитном поле Земли: радиационные пояса, полярные сияния, магнитосфера Земли.
4. Применение магнитных материалов.



Глава 4

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ



Ранее мы показали, что между электрическими и магнитными полями существует тесная взаимосвязь. Так, из опытов Эрстеда следует, что движущиеся электрические заряды (электрический ток) создают магнитное поле. Учёные задались вопросом: нельзя ли, наоборот, с помощью магнитного поля создать электрический ток? Более 10 лет никто не мог решить эту задачу. Лишь в 1831 г. Фарадей, выполнив множество опытов, открыл явление *электромагнитной индукции*: возникновение электрического тока в замкнутом проводящем контуре, находящемся в переменном магнитном поле. Кроме того, он сформулировал и закон электромагнитной индукции, вывод которого был получен Максвеллом на основе разработанной им теории электромагнитного поля. Явление электромагнитной индукции лежит в основе действия индукционных генераторов, трансформаторов, микрофонов, громкоговорителей и других технических устройств.

§ 21 ОПЫТЫ ФАРАДЕЯ. МАГНИТНЫЙ ПОТОК

ОПЫТЫ ФАРАДЕЯ. Открытие электромагнитной индукции было сделано 29 августа 1831 г.* Фарадей описывал свой первый опыт следующим образом: «На широкую деревянную катушку была намотана медная проволока длиной в 203 фута**, и между витками её намотана проволока такой же длины, но изолированная от первой хлопчатобумажной нитью. Одна из этих спиралей была соединена с гальванометром, а другая — с сильной батареей, состоящей из 100 пар пластин... При замыкании це-

* Независимо от Фарадея явление электромагнитной индукции открыл в 1832 г. американский физик Джозеф Генри (1797—1878).

** 1 фут = 304,8 мм.

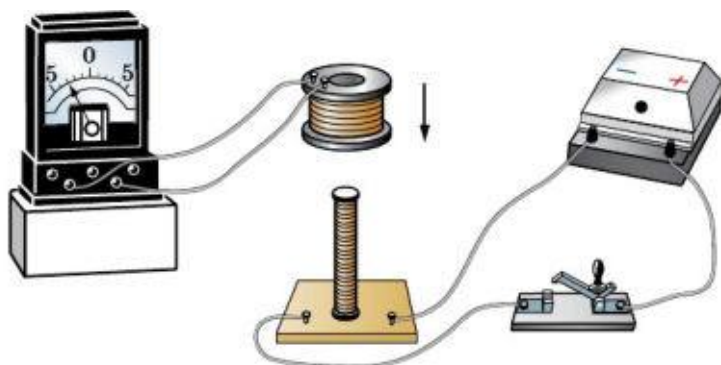


Рис. 4.1

пи удалось заметить внезапное, но чрезвычайно слабое действие на гальванометр, и то же самое замечалось при прекращении тока. При непрерывном же прохождении тока через одну из спиралей не удавалось отметить ни действия на гальванометр, ни вообще какого-либо индукционного действия на другую спираль, несмотря на то что нагревание всей спирали, соединённой с батареей, и яркость искры, проскакивающей между углями, свидетельствовали о мощности батареи».

Первоначально электромагнитная индукция была открыта в неподвижных относительно друг друга проводниках при замыкании и размыкании цепи. Понимая, что сближение или удаление проводников с токами должно приводить к тому же результату, что и замыкание и размыкание цепи, Фарадей с помощью опытов доказал, что ток возникает при перемещении катушек относительно друг друга (рис. 4.1).

17 октября 1831 г., как зарегистрировано в лабораторном журнале Фарадея, был обнаружен электрический ток в катушке во время вдвигания (или выдвигания) магнита (рис. 4.2).

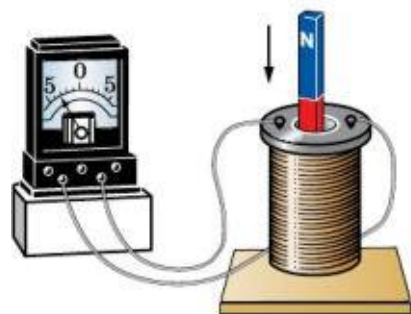


Рис. 4.2

Явление возникновения электрического тока в замкнутом контуре, находящемся в переменном (во времени) магнитном поле или движущемся в постоянном магнитном поле, называют электромагнитной индукцией.

В течение одного месяца Фарадей опытным путём открыл все существенные особенности этого явления. Оставалось только придать закону строгую количественную форму и раскрыть физиче-

скую природу явления. Фарадей выявил то общее, от чего зависит появление индукционного тока в опытах. *В замкнутом проводящем контуре возникает ток (его называют индукционным) при изменении числа линий магнитной индукции*, пронизывающих поверхность, ограниченную этим контуром.*

Чем быстрее меняется число линий магнитной индукции, тем больше сила индукционного тока**. При этом причина изменения числа линий магнитной индукции не важна. Это может быть изменение числа линий магнитной индукции, пронизывающих неподвижный проводник, вследствие изменения силы тока в соседней катушке или вследствие движения контура в неоднородном магнитном поле, густота линий которого меняется в пространстве (рис. 4.3).

Фарадей не только открыл явление электромагнитной индукции, но и первым сконструировал модель генератора электрического тока, превращающего механическую энергию вращения в ток. Это был массивный медный диск, вращающийся между полюсами сильного магнита. Присоединив ось и край диска к гальванометру, Фарадей обнаружил отклонение стрелки. Ток был, правда, слаб, но обнаруженный принцип позволил впоследствии построить мощные генераторы.

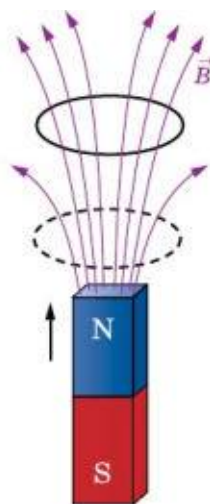


Рис. 4.3

ПОНЯТИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА. Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ характеризует магнитное поле в каждой точке пространства. Введём физическую величину, зависящую от значения вектора магнитной индукции не в одной точке, а во всех точках произвольно выбранной поверхности. Эту величину называют *поток вектора магнитной индукции* или *магнитным потоком*.

Поместим плоский замкнутый контур в однородное магнитное поле. Пусть площадь, ограниченная этим контуром, равна S . Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ этого поля составляет угол α с нормалью $\vec{n}$ к плоскости контура (рис. 4.4).



Рис. 4.4

* Линию магнитной индукции можно провести через любую точку пространства, где есть магнитное поле.

** Существуют различные способы получения индукционного тока в замкнутой цепи: 1) перемещение магнита и катушки относительно друг друга; 2) перемещение катушки относительно другой катушки с током; 3) изменение силы тока в одной из катушек; 4) замыкание и размыкание цепи; 5) вращение контура в магнитном поле или вращение магнита относительно контура.

Потоком вектора магнитной индукции Φ через плоскую поверхность площадью S называют величину, равную произведению модуля вектора магнитной индукции $\vec{B}$ на площадь S и косинус угла α между вектором $\vec{B}$ и нормалью к поверхности $\vec{n}$.

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (1)$$

Единица магнитного потока в СИ — *вебер* (Вб). $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$.

Эта единица названа в честь немецкого физика Вильгельма Вебера (1804—1891).

Поток вектора магнитной индукции наглядно может быть интерпретирован как величина, пропорциональная числу линий вектора $\vec{B}$, пронизывающих данную площадку (рис. 4.5). Чем больше линий магнитной индукции пронизывает контур, тем больше значение магнитного потока.

Если $\alpha = 0^\circ$, т. е. векторы $\vec{B}$ и $\vec{n}$ сонаправлены, магнитный поток положителен и имеет максимальное значение:

$$\Phi_{\max} = BS.$$

Если линии магнитной индукции параллельны плоскости контура ($\alpha = 90^\circ$), они не пронизывают контур. Но так как $\cos 90^\circ = 0$, то магнитный поток $\Phi = 0$. Если линии магнитной индукции образуют с нормалью к поверхности контура угол, равный 180° , то магнитный поток через контур будет отрицательным: $\Phi = -BS$.

В тех случаях, когда магнитное поле не является однородным или рассматриваемая поверхность имеет произвольные размеры и форму, поток магнитной индукции определяют следующим образом. Всю поверхность разбивают на малые, почти плоские площадки и строят к каждой такой площадке нормаль $\vec{n}$. После этого определяют магнитный поток через каждую такую площадку:

$$\Delta\Phi_i = B_i \Delta S_i \cos \alpha_i.$$

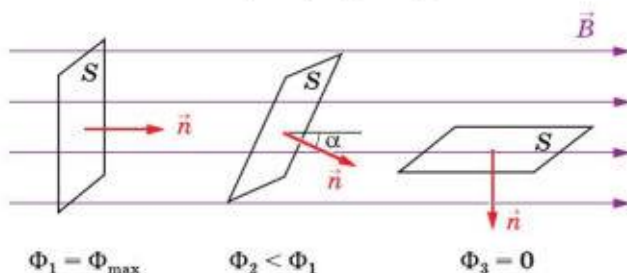


Рис. 4.5

Суммируя элементарные потоки $\Delta\Phi_i$, находят полный поток через поверхность:

$$\Phi = \sum_i \Delta\Phi_i = \sum_i B_i \Delta S_i \cos \alpha_i.$$

Линии магнитной индукции замкнуты, что означает равенство нулю потока вектора магнитной индукции через замкнутую поверхность. Это фундаментальное свойство магнитного поля связано с отсутствием магнитных зарядов. Выходящие из поверхности линии магнитной индукции дают положительный поток, а линии магнитной индукции, входящие в эту поверхность, — отрицательный.

ПРАВИЛО ЛЕНЦА. Индукционный ток, возникший в замкнутом проводнике, немедленно начинает взаимодействовать с породившим его током или магнитом. Если магнит (или катушку с током) приближать к замкнутому проводнику, то появляющийся индукционный ток своим магнитным полем обязательно отталкивает магнит (катушку). Для сближения магнита и катушки нужно совершить работу. При удалении магнита возникает притяжение катушки к магниту.

Отталкивание или притяжение магнита катушкой зависит от направления индукционного тока в ней. В чём состоит различие двух опытов: приближения магнита к катушке и его удаления? В первом случае магнитный поток (или число линий магнитной индукции, пронизывающих витки катушки) увеличивается (рис. 4.6, а), а во втором случае — уменьшается (рис. 4.6, б). Причём в первом случае линии индукции $\vec{B}'$ магнит-

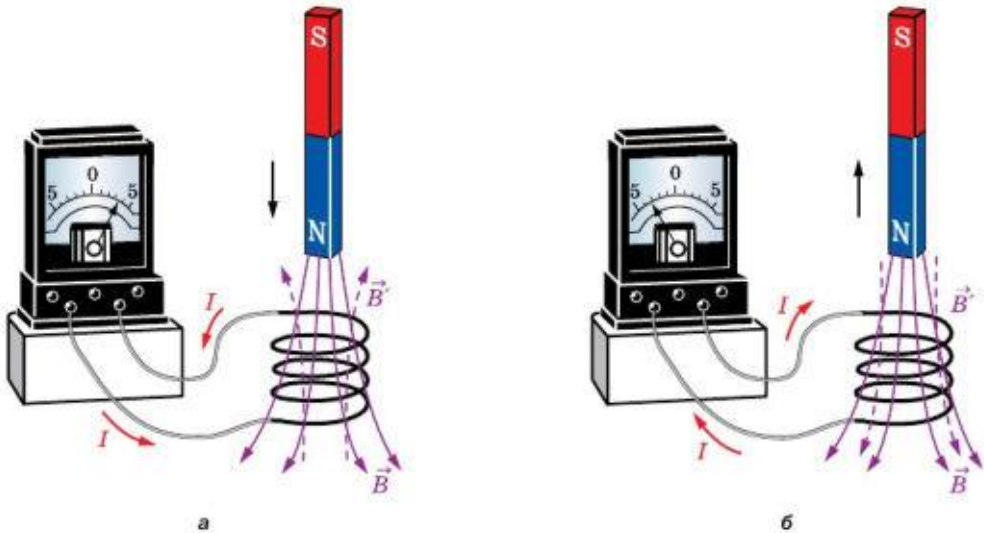


Рис. 4.6

ного поля, созданного возникшим в катушке индукционным током, выходят из верхнего конца катушки (показаны штриховой линией), так как катушка отталкивает магнит, а во втором случае, наоборот, входят в этот конец.

При увеличении магнитного потока через витки катушки индукционный ток имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует нарастанию магнитного потока через витки катушки. Ведь вектор индукции $\vec{B}'$ этого поля направлен против вектора индукции $\vec{B}$ поля, изменение которого порождает электрический ток. Если же магнитный поток через катушку ослабевает, то индукционный ток создаёт магнитное поле с индукцией $\vec{B}'$, увеличивающее магнитный поток через витки катушки.

В этом и состоит сущность общего правила определения направления индукционного тока, которое применимо во всех случаях. Это правило было установлено Ленцем (*правило Ленца*).

Возникающий в замкнутом контуре индукционный ток имеет такое направление, что созданный им магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, стремится препятствовать тому изменению потока, которое порождает данный ток.

-  1. Каким образом Фарадей открыл явление электромагнитной индукции? 2. В чём состоит явление электромагнитной индукции? 3. Что называют индукционным током? Какие способы его получения в замкнутой цепи вам известны? 4. От чего зависит сила индукционного тока? 5. Какую физическую величину называют магнитным потоком? 6. Запишите формулу для определения магнитного потока. 7. Сформулируйте правило Ленца.

-  1. Северный полюс магнита удаляется от металлического кольца, как показано на рисунке 4.7. Возникает ли при этом в кольце индукционный ток? Если да, то определите его направление.
2. В вертикальной плоскости подвешено на двух нитях медное кольцо (рис. 4.8). В опыте в него вдвигают магнит. Влияет ли движение магнита на положение кольца?
3. На рисунке 4.9 приведена установка по проверке правила Ленца. Северный полюс магнита находится вблизи сплошного алюминиевого кольца. Коромысло с алюминиевыми кольцами, одно из которых сплошное, а другое разрезанное, может свободно вращаться вокруг вертикальной опоры. Что произойдёт, если магнит: а) вносить в сплошное кольцо северным полюсом; б) вносить в сплошное





Рис. 4.7

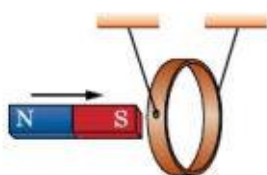


Рис. 4.8



Рис. 4.9

кольцо южным полюсом; в) вынимать из сплошного кольца; г) вносить в разрезанное кольцо северным полюсом?

§ 22

ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. Опыты Фарадея показали, что сила индукционного тока I_i в проводящем контуре пропорциональна скорости изменения числа линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность, ограниченную этим контуром. Более точно это утверждение можно сформулировать, используя понятие магнитного потока.

Скорость изменения линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность площадью S , представляет собой скорость изменения магнитного потока. Если за малый промежуток времени Δt магнитный поток меняется на $\Delta\Phi$, то скорость изменения магнитного потока равна $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Поэтому утверждение, которое следует из результатов опытов Фарадея, можно сформулировать следующим образом: *сила индукционного тока пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром.*

Электрический ток в цепи появляется в том случае, когда на свободные заряды действуют сторонние силы. Работу этих сил при перемещении единичного положительного заряда вдоль замкнутого контура называют ЭДС. Следовательно, при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, в нём появляются сторонние силы, действие которых характеризуется ЭДС индукции $\mathcal{E}_i$.

Сформулируем закон электромагнитной индукции.

ЭДС индукции в замкнутом контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром.

$$|\mathcal{E}_i| = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|.$$

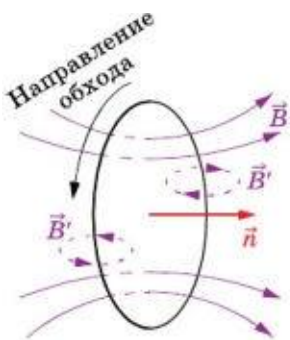


Рис. 4.10

Как в законе электромагнитной индукции учесть направление индукционного тока (или знак ЭДС индукции) в соответствии с правилом Ленца? На рисунке 4.10 изображён замкнутый контур. Будем считать положительным направление обхода контура против часовой стрелки. Нормаль к контуру образует правый винт с направлением обхода. Знак ЭДС зависит от направления сторонних сил по отношению к направлению обхода контура. Если эти направления совпадают, то $\mathcal{E}_i > 0$ и соответственно $I_i > 0$. В противном случае ЭДС индукции и сила индукционного тока отрицательны.

Пусть вектор индукции $\vec{B}$ внешнего магнитного поля направлен вдоль нормали к контуру и возрастает со временем. Тогда $\Delta\Phi > 0$ и $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$. Согласно правилу Ленца, индукционный ток создаёт магнитный поток $\Phi' < 0$. Линии индукции $\vec{B}'$ магнитного поля индукционного тока направлены противоположно $\vec{B}$. Следовательно, индукционный ток I_i направлен по часовой стрелке (против положительного направления обхода) и ЭДС индукции отрицательна. Поэтому в математической записи закона электромагнитной индукции обычно ставят знак «минус»:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

ЕДИНИЦЫ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И МАГНИТНОГО ПОТОКА. В СИ закон электромагнитной индукции используют для установления единицы магнитного потока. Так как ЭДС индукции $\mathcal{E}_i$ выражают в вольтах, а время — в секундах, то, согласно закону электромагнитной индукции, вебер можно определить следующим образом: *магнитный поток через поверхность, ограниченную замкнутым контуром, равен 1 Вб, если при равномерном убывании этого потока до нуля за 1 с в контуре возникает ЭДС индукции, равная 1 В.*

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ с}.$$

Единицу магнитной индукции — тесла (см. § 16) устанавливают на основе соотношения $\Phi = BS \cos \alpha$. Если вектор $\vec{B}$ однородного магнитного поля перпендикулярен поверхности площадью S , то $\Phi_{\max} = BS$. Тесла равна магнитной индукции, при которой максимальный магнитный поток через поперечное сечение площадью 1 м^2 равен 1 Вб.

$$1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Вб}}{1 \text{ м}^2} = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{Кл} \cdot \text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. Пусть у нас имеются две обмотки (катушки), надетые на сердечник. Включив одну обмотку в сеть, мы получим ток в другой обмотке, если она замкнута (рис. 4.11). Электроны в проводах второй обмотки придут в движение. Но какие силы заставляют их двигаться? Само магнитное поле, пронизывающее катушку, этого сделать не может, так как магнитное поле действует исключительно на движущиеся заряды, а проводник с находящимися внутри него электронами неподвижен.

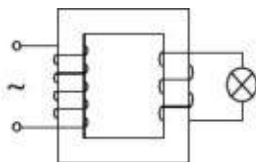


Рис. 4.11

Электроны в неподвижном проводнике приводятся в движение электрическим полем, и это поле непосредственно порождается переменным магнитным полем. Тем самым утверждается новое фундаментальное свойство электромагнитного поля: *изменяясь во времени, магнитное поле порождает электрическое поле* (к этому выводу пришёл Максвелл). Тогда сущность явления электромагнитной индукции в неподвижном проводнике состоит не столько в появлении индукционного тока, сколько в возникновении электрического поля, которое приводит в движение электрические заряды.

Электрическое поле, возникающее при изменении магнитного поля, не связано непосредственно с зарядами, и его линии напряжённости не могут на них начинаться и кончаться. Они нигде не начинаются и не кончаются, а представляют собой замкнутые линии, подобные линиям индукции магнитного поля. Такое электрическое поле называют *вихревым*.

Почему это поле называется электрическим, ведь оно имеет иное происхождение и другую конфигурацию, чем электростатическое поле? Ответ прост: вихревое поле действует на заряд q так же, как и электростатическое, а это считается главным свойством поля. Сила, действующая на заряд, по-прежнему равна $\vec{F} = q\vec{E}$, где $\vec{E}$ — напряжённость вихревого поля.

В отличие от электростатического поля, работа вихревого поля по замкнутому контуру не равна нулю. Ведь при перемещении заряда вдоль замкнутой линии напряжённости электрического поля работа на всех участках контура имеет один и тот же знак, так как сила и перемещение совпадают по направлению.

Вихревое электрическое поле, так же как и магнитное поле, не потенциальное. *Работа вихревого электрического поля по перемещению единичного положительного заряда вдоль замкнутого неподвижного проводника численно равна ЭДС индукции в этом проводнике.*

*** ЭДС ИНДУКЦИИ В ДВИЖУЩЕМСЯ ПРОВОДНИКЕ.** При движении проводника его свободные заряды движутся вместе с ним. Поэтому на заряды со стороны магнитного поля действует магнитная составляющая силы Лоренца, которая и вызывает перемещение зарядов внутри проводника. ЭДС индукции, следовательно, имеет «магнитное происхождение». Вы-

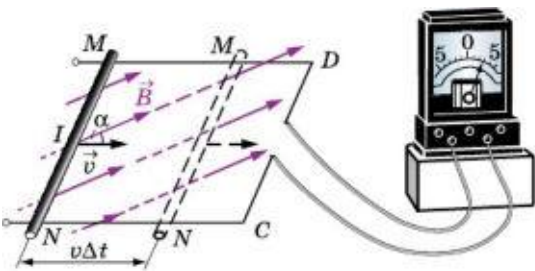


Рис. 4.12

числим ЭДС индукции в прямоугольном контуре, помещённом в однородное магнитное поле (рис. 4.12).

Пусть сторона контура MN длиной l скользит с постоянной скоростью $\vec{v}$ вдоль сторон NC и MD , оставаясь всё время параллельной стороне CD . Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ одно-

родного поля перпендикулярен проводнику MN и составляет угол α с вектором скорости $\vec{v}$. Магнитная составляющая силы Лоренца, с которой магнитное поле действует на движущуюся заряженную частицу, равна

$$F_{\text{Л}} = qvB \sin \alpha.$$

Согласно правилу левой руки, магнитная составляющая силы Лоренца направлена вдоль проводника MN .

Работа этой силы при перемещении заряда вдоль проводника от M к N

$$A_{\text{Л}} = F_{\text{Л}} l \cos 0^\circ = qvB \sin \alpha.$$

ЭДС индукции в проводнике MN равна

$$\mathcal{E}_i = \frac{A_{\text{Л}}}{q} = vBl \sin \alpha.$$

Эта формула справедлива для любого проводника длиной l , движущегося со скоростью $\vec{v}$ в однородном магнитном поле. В других проводниках контура ЭДС равна нулю, так как проводники неподвижны.

ЭДС индукции можно вычислить с помощью закона электромагнитной индукции. Действительно, магнитный поток через контур $MNCD$ равен

$$\Phi = BS \cos(90^\circ - \alpha) = BS \sin \alpha,$$

где угол $90^\circ - \alpha$ — угол между вектором $\vec{B}$ и нормалью $\vec{n}$ к плоскости контура; S — площадь контура $MNCD$. Если считать, что в начальный момент времени ($t = 0$) проводник MN находился на расстоянии NC от проводника CD (см. рис. 4.12), то при перемещении проводника площадь S изменяется со временем следующим образом:

$$S = l(NC - vt).$$

За время Δt площадь контура изменяется на $\Delta S = -lv\Delta t$. Знак «минус» указывает на то, что она уменьшается. Изменение магнитного потока за время Δt равно $\Delta\Phi = -Blv\Delta t \sin \alpha$. Следовательно,

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = Blv \sin \alpha$$

(как это и было получено ранее).



1. Как связаны между собой сила индукционного тока и скорость изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром? **2.** Запишите и сформулируйте закон электромагнитной индукции. **3.** Почему в математической записи закона электромагнитной индукции стоит знак «минус»? **4.** Укажите основные свойства вихревого электрического поля. **5.** Почему в проводнике, движущемся в магнитном поле, появляется ЭДС индукции?



1. Между любыми двумя точками некоторого контура разность потенциалов равна нулю, а ток в контуре существует. Когда это возможно? **2.** При каких положениях рамки, вращающейся с постоянной скоростью около прямолинейного проводника с током, возникающая в ней ЭДС будет: а) максимальной; б) минимальной? **3.** Два одинаковых самолёта летят горизонтально с одинаковыми скоростями $\vec{v}$ (один — вблизи экватора, другой — у полюса). У какого самолёта возникнет большая разность потенциалов на концах крыльев?



ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Виток медного провода помещён в изменяющееся во времени однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции (рис. 4.13). Радиус витка равен 10 см, диаметр провода — 2 мм. Определите скорость изменения магнитной индукции, если сила индукционного тока в витке составляет 5 А. Удельное сопротивление меди равно $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

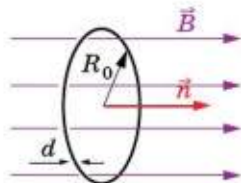


Рис. 4.13

Дано:

$$R_0 = 10 \text{ см}$$

$$d = 2 \text{ мм}$$

$$I_i = 5 \text{ А}$$

$$\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$\left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| = ?$$

СИ:

$$0,1 \text{ м}$$

$$2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Решение:

По закону электромагнитной индукции

$$|\mathcal{E}_i| = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|,$$

где $\Delta\Phi = S\Delta B$, $S = \pi R_0^2$ — площадь витка; R_0 — радиус витка.

Согласно закону Ома для полной цепи

$$I_i = \frac{|\mathcal{E}_i|}{R},$$

где $R = \rho \frac{l}{S_1}$ — сопротивление витка; ρ — удельное сопротивление меди; l — длина витка; S_1 — площадь сечения провода, из которого сделан виток.

$$l = 2\pi R_0; S_1 = \frac{\pi d^2}{4}.$$

Тогда

$$I_i = \frac{S}{R} \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| = \frac{\pi R_0^2 \cdot \pi d^2}{\rho \cdot 2\pi R_0 \cdot 4} \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right|,$$

$$I_i = \frac{\pi R_0 d^2}{8\rho} \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right|.$$

Отсюда выразим скорость изменения магнитной индукции $\left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right|$:

$$\left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| = \frac{8\rho I_i}{\pi R_0 d^2}.$$

С учётом числовых данных получим

$$\left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| = \frac{8 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 5}{3,14 \cdot 0,1 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2} \frac{\text{Тл}}{\text{с}} \approx 0,54 \frac{\text{Тл}}{\text{с}}.$$

Ответ: $\left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| \approx 0,54 \text{ Тл/с}.$



Задача 2. На двух горизонтальных рельсах, расстояние между которыми равно 1 м, лежит проводник с сопротивлением 1 Ом и массой 0,5 кг. Коэффициент трения проводника о рельсы равен 0,1. Вся система находится в однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл, вектор которой направлен вертикально. Рельсы подключают к источнику тока с ЭДС, равной 10 В. Пренебрегая внутренним сопротивлением источника тока и сопротивлением рельсов, определите установившуюся скорость движения проводника.

Дано:

$l = 1 \text{ м}$
 $R = 1 \text{ Ом}$
 $m = 0,5 \text{ кг}$
 $\mu = 0,1$
 $B = 0,1 \text{ Тл}$
 $\mathcal{E} = 10 \text{ В}$

$v_y = ?$

Решение:

Так как цепь замкнута и в ней имеется источник тока, то по проводнику потечёт ток. Согласно закону Ома для полной цепи:

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R}.$$

На рисунке 4.14, а показаны действующие на проводник силы. Сила тяжести и сила реакции опоры взаимно уравновешиваются, т. е. $N = mg$.

Сравним значения модулей силы Ампера $F_{A0} = I_0 Bl = \mathcal{E} N l / R$ и максимальной силы трения $F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mg$.

Подставляя числовые данные, найдём

$$F_{A0} = \frac{10 \cdot 0,1 \cdot 1}{1} \text{ Н} = 1 \text{ Н},$$

$$F_{\text{тр}} = 0,1 \cdot 0,5 \cdot 10 \text{ Н} = 0,5 \text{ Н}.$$

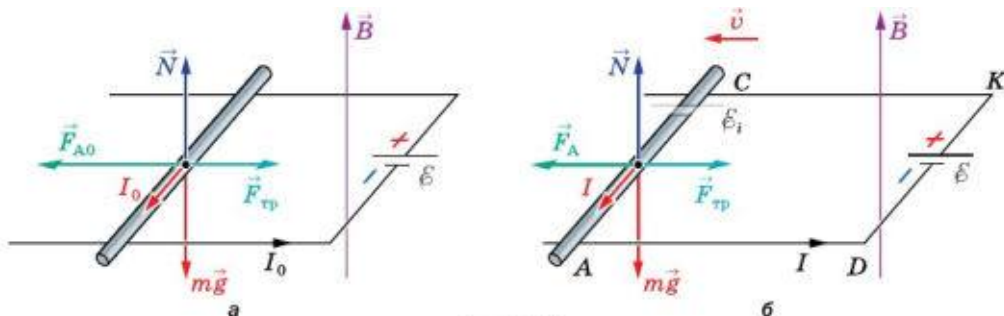


Рис. 4.14

Поскольку $F_{A0} > F_{\text{тр}}$, после замыкания цепи проводник придёт в движение.

При движении проводника магнитный поток через контур $ACKD$ увеличивается (рис. 4.14, б), и в контуре возникает ЭДС индукции $\varepsilon_i = Bvl$, направленная навстречу ЭДС источника. По закону Ома для полной цепи

$$I = \frac{\varepsilon - \varepsilon_i}{R} = \frac{\varepsilon - Bvl}{R}.$$

По мере увеличения модуля скорости v проводника сила тока I уменьшается, а значит, уменьшается и модуль силы Ампера $F_A = IBl$. В результате устанавливается движение проводника с постоянной скоростью, при котором сила Ампера и сила трения уравновешивают друг друга, т. е. $F_{Ay} = F_{\text{тр}}$. Поскольку в установившемся режиме $F_{Ay} = I_y Bl = \frac{(\varepsilon - Bv_y l)Bl}{R}$, $F_{\text{тр}} = \mu mg$, то

$$\frac{(\varepsilon - Bv_y l)Bl}{R} = \mu mg, \text{ откуда}$$

$$v_y = \frac{1}{Bl} \left(\varepsilon - \frac{\mu mg R}{Bl} \right).$$

Подставляя числовые данные, найдём:

$$v_y = \frac{1}{0,1 \cdot 1} \cdot \left(10 - \frac{0,1 \cdot 0,5 \cdot 10 \cdot 1}{0,1 \cdot 1} \right) \frac{\text{м}}{\text{с}} = 50 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ: $v_y = 50 \text{ м/с}$.



УПРАЖНЕНИЯ

1. В витке, выполненном из алюминиевого провода длиной 10 см и площадью поперечного сечения 1,4 мм², скорость изменения магнитного потока равна 10 мВб/с. Найдите силу индукционного тока.
2. Квадратная рамка, сделанная из медной проволоки, со стороной 6,8 мм и площадью поперечного сечения 1 мм², помещена в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции.

Индукция магнитного поля равномерно изменяется на 2 Тл за 0,1 с. Определите силу индукционного тока.

3. Какой по модулю заряд пройдёт через поперечное сечение витка, сопротивление которого 0,03 Ом, при уменьшении магнитного потока внутри витка на 12 мВб?
4. Найдите ЭДС индукции в проводнике с длиной активной части 0,25 м, перемещающемся в однородном магнитном поле с индукцией 8 мТл со скоростью 5 м/с под углом 30° к вектору магнитной индукции.
5. Перпендикулярно линиям магнитной индукции перемещается проводник длиной 1,8 м со скоростью 6 м/с. ЭДС индукции в проводнике равна 1,44 В. Найдите модуль индукции магнитного поля.
6. Прямолинейный проводник с длиной активной части 0,7 м пересекает однородное магнитное поле под углом 30° со скоростью 10 м/с. Определите модуль индукции магнитного поля, если ЭДС, индуцируемая в проводнике, равна 4,9 В.
7. С какой скоростью нужно перемещать проводник, длина активной части которого 1 м, под углом 60° к линиям индукции магнитного поля, чтобы в проводнике возникла ЭДС индукции 1 В? Модуль вектора магнитной индукции магнитного поля равен 0,2 Тл.
8. Прямой проводник движется со скоростью 36 км/ч под углом 45° к линиям индукции однородного магнитного поля. Модуль вектора магнитной индукции магнитного поля равен 0,2 Тл. Определите длину проводника, если в нём индуцируется ЭДС, равная 1,4 В.

§ 23

САМОИНДУКЦИЯ. ИНДУКТИВНОСТЬ. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКА

САМОИНДУКЦИЯ. Рассмотрим частный случай явления электромагнитной индукции. Если по катушке течёт ток, сила которого изменяется, то магнитный поток, пронизывающий катушку, изменяется. Поэтому возникает ЭДС индукции в том же самом проводнике, по которому идёт такой ток.

Явление возникновения вихревого электрического поля в замкнутом проводящем контуре при изменении силы тока в нём называют самоиндукцией, а ЭДС индукции — ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_{is}$.

При самоиндукции проводящий контур играет двойную роль: по нему протекает ток, вызывающий индукцию, и в нём же появляется ЭДС индукции. Изменяющееся магнитное поле индуцирует ЭДС в том самом проводнике, по которому течёт ток, создающий это поле.

По правилу Ленца в момент нарастания силы тока напряжённость вихревого электрического поля направлена против тока. В этот момент вихревое поле препятствует увеличению силы тока. Наоборот, в момент уменьшения силы тока вихревое поле поддерживает его.



Это приводит к тому, что при замыкании цепи, содержащей источник постоянной ЭДС, определённое значение силы тока устанавливается не сразу, а постепенно с течением времени (рис. 4.15). При отключении источника ток в замкнутых контурах прекращается не мгновенно. Возникающая при этом ЭДС самоиндукции может превышать ЭДС источника, так как изменение силы тока и его магнитного поля при отключении источника происходит очень быстро.

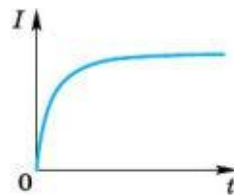


Рис. 4.15



Явление самоиндукции можно наблюдать на простых опытах. На рисунке 4.16 показана схема параллельного включения двух одинаковых электрических ламп. Лампу 1 подключают к источнику через резистор R , а лампу 2 — последовательно с катушкой L с железным сердечником. При замыкании ключа первая лампа вспыхивает практически сразу, а вторая — с заметным запазданием. ЭДС самоиндукции в цепи этой лампы велика, и сила тока не сразу достигает своего максимального значения.

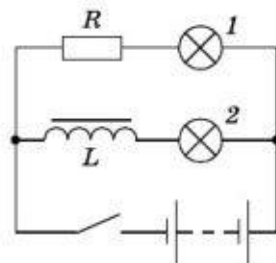


Рис. 4.16

Появление ЭДС самоиндукции при размыкании можно наблюдать на опыте с цепью, схематически показанной на рисунке 4.17. При размыкании ключа в катушке L возникает ЭДС самоиндукции, поддерживающая первоначальный ток. В результате в момент размыкания ключа через гальванометр течёт ток (штриховая стрелка), направленный против начального тока до размыкания (сплошная стрелка). Причём сила тока при размыкании цепи превосходит силу тока, проходящего через гальванометр при замкнутом ключе*. Это означает, что ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_{is}$ больше ЭДС $\mathcal{E}$ батареи элементов.

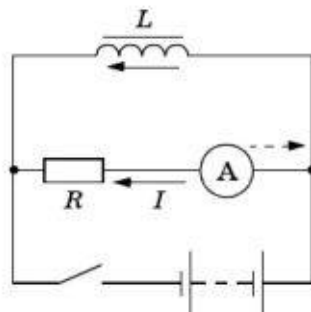


Рис. 4.17

ИНДУКТИВНОСТЬ КОНТУРА. Модуль индукции B магнитного поля, создаваемого током в любом замкнутом контуре, пропорционален силе тока. Так как магнитный поток Φ пропорционален B , то $\Phi \sim B \sim I$.

$$\Phi = LI,$$

где L — коэффициент пропорциональности (*индуктивность контура*, или *коэффициент самоиндукции*) между силой тока в проводящем контуре и созданным им магнитным потоком, пронизывающим этот контур.

* Это утверждение справедливо при условии, что сопротивление катушки пренебрежимо мало.

Индуктивностью контура (или коэффициентом самоиндукции) называют физическую величину, равную отношению магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, к силе тока в этом контуре.

$$L = \frac{\Phi}{I}.$$

Используя закон электромагнитной индукции, можно записать формулу для ЭДС самоиндукции:

$$\mathcal{E}_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

При этом необходимо учесть, что форма контура остаётся неизменной и магнитный поток изменяется только за счёт изменения силы тока.

Из последней формулы следует, что индуктивность — это физическая величина, численно равная ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении силы тока на 1 А за 1 с. Индуктивность, подобно ёмкости конденсатора, зависит от размеров проводника и его формы, но не зависит непосредственно от силы тока в проводнике. Кроме геометрии проводника, индуктивность определяется магнитными свойствами среды, в которой находится проводник.

Единицу индуктивности в СИ называют *генри* (Гн). *Индуктивность проводника равна 1 Гн, если в нём при изменении силы тока на 1 А за 1 с возникает ЭДС самоиндукции 1 В.*

$$1 \text{ Гн} = \frac{1 \text{ В}}{1 \frac{\text{А}}{\text{с}}} = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{с}.$$

ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКА. Магнитное поле тока обладает энергией. В этом можно убедиться, рассмотрев процесс спадания тока в катушке при отсоединении её от источника тока (рис. 4.18).

До размыкания ключа в катушке течёт некоторый ток I_0 , который создаёт магнитное поле вокруг проводника. При размыкании цепи фактически остаётся последовательная цепь, состоящая из катушки индуктивности и резистора. Ток в катушке благодаря самоиндукции спадает постепенно, и при этом на сопротивлении R продолжает выделяться количество теплоты (в соответствии с законом Джоуля—Ленца). За счёт чего выделяется это количество теплоты, ведь источник питания уже отключён? При этом в цепи ток убывает, и индукция создаваемого им магнитного поля тоже уменьшается. Тем самым можно вполне говорить об энергии магнитного поля тока.

При замыкании цепи, когда сила тока начинает увеличиваться, в проводнике появляется вихревое электрическое поле, действующее против того электрического поля, которое создаётся в проводнике

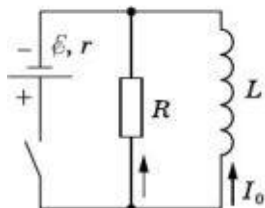


Рис. 4.18

благодаря источнику тока. Для того чтобы сила тока стала равной I , источник тока должен совершить работу против сил вихревого поля. Эта работа идёт на увеличение энергии магнитного поля тока. Вихревое поле совершает отрицательную работу. При размыкании цепи ток исчезает, и вихревое поле совершает положительную работу. Запасённая током энергия выделяется. Это обнаруживается по мощной искре, возникающей при размыкании цепи с большой индуктивностью.

Выражение для энергии магнитного поля тока можно записать, используя аналогию между индуктивностью L в электродинамике и массой m в механике. Для того чтобы изменить скорость тела на определённую величину, требуется время. При постоянной силе это время тем больше, чем больше масса m тела. Для изменения силы тока в катушке на определённую величину также требуется время — оно тем больше, чем больше индуктивность L катушки. Согласно законам механики, для увеличения скорости тела нужно совершить работу. При торможении тело само совершает положительную работу. Для создания тока нужно совершить работу по преодолению вихревого электрического поля, а при исчезновении тока это поле само совершает работу.

Индуктивность L является аналогом массы m , а сила тока I — аналогом скорости v (как величина, характеризующая движение электрических зарядов). Поэтому естественно предположить, что энергию магнитного поля тока W_m можно считать величиной, подобной кинетической энергии тела $\frac{mv^2}{2}$ в механике, и записать в виде

$$W_m = \frac{LI^2}{2}.$$

Именно такое выражение можно получить в результате расчётов.

При изучении электростатики мы познакомились с понятием объёмной плотности энергии электрического поля. По аналогии можно ввести понятие *объёмной плотности энергии магнитного поля*. Вычисления показывают, что плотность энергии магнитного поля w_m (т. е. энергия единицы объёма) пропорциональна квадрату магнитной индукции, подобно тому как плотность энергии электрического поля пропорциональна квадрату напряжённости электрического поля. Расчёты, выполненные для вакуума, приводят к следующему выражению (оно приведено в единицах СИ):

$$w_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}.$$

-  1. В чём заключается явление самоиндукции? 2. В каких опытах можно наблюдать явление самоиндукции? 3. Что называют индуктивностью контура? От каких факторов она зависит? 4. От каких физических величин зависит ЭДС самоиндукции? 5. Как можно определить энергию магнитного поля тока?



1. Объясните явления, описанные Ленцем в следующем фрагменте: «Искра при открытии цепи является сильнее тогда, когда употребляют для закрытия длинную проволоку, нежели короткую, хотя самый ток в первом случае бывает слабее по причине плохой проводимости длинной проволоки. Искра при открытии цепи будет сильнее, когда длинную соединительную проволоку наматывают на цилиндр в виде спирали, а ещё сильнее, когда цилиндр будет железный».

2. К батарее аккумуляторов присоединены параллельно две цепи. Одна из них содержит лампы накаливания, а другая — большой электромагнит. Сила тока в обеих цепях одна и та же. При размыкании какой из цепей будет наблюдаться более сильная искра?

3. Объясните превращения энергии, происходящие при следующих процессах: а) магнитная стрелка поворачивается вблизи провода, по которому пустили ток; б) электромагнит притягивает к себе якорь; в) от электромагнита, по обмотке которого идёт ток, отрывают якорь; г) постоянный магнит притягивает к себе кусок железа.



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Магнитное поле создаётся протекающим по катушке постоянным током. Магнитный поток этого поля через катушку равен 0,2 Вб, индуктивность катушки равна 0,06 Гн. Чему равна энергия магнитного поля катушки?

Дано:

$$\Phi = 0,2 \text{ Вб}$$

$$L = 0,06 \text{ Гн}$$

$$W_m = ?$$

Решение:

Пусть сила тока, протекающего через катушку, равна I . Магнитный поток через катушку можно определить по формуле $\Phi = LI$, а энергию её магнитного поля — $W_m = \frac{LI^2}{2}$. Исключая из этих

двух выражений силу тока I , определим энергию магнитного поля катушки:

$$W_m = \frac{\Phi^2}{2L}.$$

Подставляя числовые данные, получим

$$W_m = \frac{0,2^2}{2 \cdot 0,06} \text{ Дж} \approx 0,3 \text{ Дж}.$$

Ответ: $W_m \approx 0,3 \text{ Дж}$.



УПРАЖНЕНИЯ

1. Сила тока в катушке из 150 витков равна 7,5 А. При этом создаётся магнитный поток 2 мВб. Чему равна индуктивность катушки?
2. При помощи реостата равномерно увеличивают силу тока в катушке со скоростью 100 А/с. Какая ЭДС самоиндукции возникает в катушке, если её индуктивность равна 200 мГн?

3. Какая ЭДС самоиндукции возникает в обмотке электромагнита индуктивностью $0,4 \text{ Гн}$ при равномерном изменении силы тока в ней на 5 А за $0,02 \text{ с}$?
4. Сила тока в катушке сопротивлением 5 Ом равна 17 А , индуктивность катушки — 50 мГн . Каким будет напряжение на зажимах катушки, если сила тока в ней равномерно возрастает со скоростью 1000 А/с ?
5. В катушке индуктивностью $0,6 \text{ Гн}$ сила тока равна 20 А . Чему равна энергия магнитного поля этой катушки? Как изменится эта энергия, если сила тока уменьшится вдвое?
6. Сила тока в катушке уменьшилась с 12 А до 8 А . При этом энергия магнитного поля катушки уменьшилась на 2 Дж . Определите индуктивность катушки. Чему равна энергия её магнитного поля в обоих случаях?

Это любопытно...

Интересные факты

Сопротивление массивных проводников мало, поэтому возбуждаемая в них ЭДС индукции способна создать индукционные токи очень большой силы. Эти токи, называемые *токами Фуко** или *вихревыми токами*, можно использовать для нагрева проводников. На этом принципе основано устройство индукционных электропечей. Особенно широкое применение эти печи получили для разогрева металлов перед их ковкой, штамповкой, для поверхностной закалки металлов, для их плавки в вакууме. Кроме того, созданы индукционные кухонные плиты (рис. 4.19) для приготовления и разогревания пищи.



Рис. 4.19

Во многих электротехнических устройствах возникновение токов Фуко приводит к бесполезным потерям энергии на выделение количества теплоты. Поэтому железные сердечники трансформаторов, электродвигателей делают не сплошными, а состоящими из отдельных пластин, изолированных друг от друга. Причём поверхности пластин должны быть перпендикулярны направлению вектора напряжённости вихревого электрического поля. В этом случае сопротивление пластин электрическому току будет максимальным.

* По имени исследовавшего их французского физика Жана Фуко (1819—1860).



Рис. 4.20

Любопытные явления возникают при взаимодействии токов Фуко с вызвавшим их магнитным полем. На рисунке 4.20 изображён массивный медный маятник, колеблющийся между полюсами сильного электромагнита. При приближении маятника к зазору магнита в нём возникает индукционный ток, который, согласно правилу Ленца, имеет такое направление, что созданное им поле направлено против поля магнита. В результате происходит торможение маятника. При выходе маятника из зазора магнита поток, пронизывающий маятник, уменьшается и (согласно правилу Ленца) возникает притяжение маятника к магниту, и он опять тормозится. Этот эффект используют для успокоения колебаний стрелок измерительных

приборов. Для этого на оси стрелки прибора закрепляют алюминиевую пластинку, движущуюся в зазоре постоянного магнита.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ И ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

1. В вашем распоряжении имеются круглый неодимовый магнит, стальной шуруп, гальванический элемент и кусок многожильного провода. Сконструируйте с их помощью простейший электродвигатель и испытайте его в действии.
2. Придумайте конструкцию механической модели циклотрона, используя в качестве модели заряженной частицы металлический шарик. Сделайте эскиз модели и объясните принцип её действия.

Примерные темы рефератов и проектов

1. Опыты Фарадея по наблюдению и исследованию явления электромагнитной индукции.
2. Частные случаи электромагнитной индукции и их техническое применение.
3. Индукционные токи в массивных проводниках.





КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Колебания — движения или процессы, которые характеризуются определённой степенью повторяемости во времени. В физике различают колебания механические, электромагнитные и их комбинации. Механические колебания часто встречаются в природе и в технике. Так, колеблются маятники часов, грузы на пружинах, качели, отклонённые от вертикали, струны музыкальных инструментов. На практике мы имеем дело и с электромагнитными колебаниями — периодическими или почти периодическими изменениями заряда, силы тока, напряжения в колебательном контуре. Кроме того, внутри любого живого организма непрерывно происходят ритмично повторяющиеся процессы, например биение сердца.

В природе широко распространены волновые процессы: существуют волны на поверхности воды и внутри твёрдых и газообразных тел. Звук — это волновой процесс. Радиосвязь, телевидение, мобильная телефония осуществляются посредством электромагнитных волн, а свет является частной формой этих волн.

В результате теоретических и экспериментальных исследований было установлено, что колебания и волны независимо от их природы можно описать количественно одними и теми же величинами, законами и уравнениями. В связи с этим колебания и волны целесообразно рассматривать совместно и применять к ним единый подход. Эту идею предложили и развили Л. И. Мандельштам и его ученики.

Аналогия между механическими и электромагнитными колебательными процессами используется в современных научных исследованиях, при решении многих задач по механике и электродинамике.

Глава 5

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ



По характеру физических процессов в системе, которые вызывают колебательные движения, различают три основных вида колебаний: свободные, вынужденные и автоколебания.

Механические колебания способны распространяться в пространстве. Процесс их распространения представляет собой механическую волну. При распространении волн происходит передача энергии от одной точки упругой среды к другой без переноса вещества. В этой главе будут рассмотрены условия возникновения механических колебаний и волн, а также их важнейшие характеристики.

§ 24 УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ. ДВЕ МОДЕЛИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ. При колебаниях движение тела *периодически повторяется*.

Минимальный промежуток времени T , через который движение тела полностью повторяется, называют **периодом колебаний**.

В СИ период колебаний измеряют в *секундах* (с).

Зная период, можно определить *частоту колебаний*, т. е. число колебаний в единицу времени. Если одно колебание совершается за время T , то число колебаний ν за единицу времени (например, секунду) равно:

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

В СИ частоту колебаний принято считать равной единице, если в секунду совершается одно полное колебание. Единицу частоты в СИ на-

зывают *герцем* (Гц) в честь немецкого физика Генриха Герца (1857—1897). $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$.

СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ. Самым простым видом колебаний являются *свободные колебания*. Они возникают в системе под действием внутренних сил после того, как система выведена из положения устойчивого равновесия. Такие колебания совершают, например, груз, подвешенный на пружине (рис. 5.1, а), или шарик на нити (маятник) (рис. 5.1, б).

Системы тел, в которых возможны свободные колебания, называют колебательными системами.

Каждая колебательная система имеет состояние устойчивого равновесия, относительно которого совершаются колебания. Если колебательную систему вывести из состояния устойчивого равновесия, то появляется сила, направленная в противоположную отклонению сторону. Такую силу называют *возвращающей*. Под действием этой силы система стремится вернуться в исходное устойчивое состояние.

Модель, изображённую на рисунке 5.1, а, называют *пружинным маятником*. Он состоит из маленького шарика (материальной точки), прикреплённого к лёгкой пружине. При этом пренебрегают массой пружины по сравнению с массой шарика, его деформацией по сравнению с деформацией пружины. Предполагается также, что деформация пружины подчиняется закону Гука, т. е. является упругой.

Модель, показанная на рисунке 5.1, б, представляет собой шарик, подвешенный на длинной прочной нити. Если размеры шарика много меньше длины нити, его можно рассматривать как материальную точку. При использовании этой модели пренебрегают растяжением нити и её массой по сравнению с массой шарика.

Таким образом, вместо реального маятника — шарика определённого размера на нити, которая, конечно, немного деформируется при движении и имеет массу, мы вправе работать с его моделью. Она представляет собой материальную точку, подвешенную на нерастяжимой

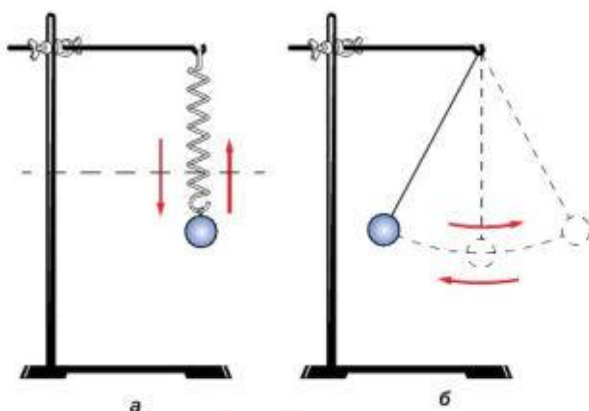


Рис. 5.1

невесомой нити, другой конец которой закреплён. Такую модель маятника называют *математическим маятником*. Хорошим примером математического маятника является небольшой тяжёлый шарик, подвешенный на тонкой длинной нити.

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ В КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ. Пружинный и математический маятники обладают устойчивым положением равновесия, в котором действующие на тело силы взаимно уравновешены. Сила тяжести $\vec{F}$, действующая на шарик, уравновешена или силой упругости $\vec{F}_0$ растянутой пружины (рис. 5.2, а), или силой натяжения $\vec{F}_0$ нити маятника (рис. 5.2, б).

Рассмотрим, почему возникают колебания, например, шарика, подвешенного на пружине. Если сместить шарик вниз так, чтобы длина пружины увеличилась на x (рис. 5.3, а), то на шарик начнёт действовать дополнительная сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$, модуль которой пропорционален удлинению пружины (согласно закону Гука).

Эта сила направлена вверх, и под её воздействием шарик с ускорением начнёт двигаться вверх, постепенно увеличивая скорость. Сила при этом будет уменьшаться, так как пружина сокращается. В момент, когда шарик достигнет положения равновесия, сумма всех сил, действующих на него, станет равной нулю. Следовательно, и ускорение шарика, согласно второму закону Ньютона, станет равным нулю. Но к этому моменту скорость шарика уже достигнет некоторого значения. Поэтому, не останавливаясь в положении равновесия, он будет по инерции продолжать подниматься вверх. Пружина при этом сжимается, и в результате появляется сила, направленная уже вниз и тормозящая движение шарика (рис. 5.3, б).

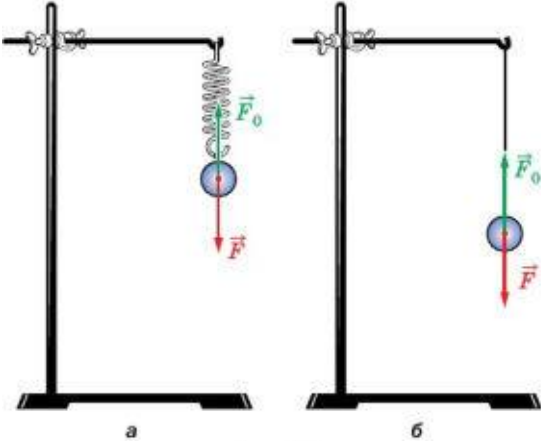


Рис. 5.2

Эта сила, а следовательно, и направленное вниз ускорение увеличиваются прямо пропорционально модулю смещения x шарика относительно положения равновесия. При этом скорость уменьшается до тех пор, пока в самой верхней точке не обратится в нуль. Затем шарик с ускорением начнёт двигаться вниз. С уменьшением x модуль силы $\vec{F}_{\text{упр}}$ убывает и в положении равновесия сумма всех сил, действующих на шарик, снова обращается в нуль. Но шарик уже успевает к этому моменту на-



брать скорость и продолжает двигаться вниз. Это движение приводит к дальнейшему растяжению пружины и к появлению силы, направленной вверх. Движение шарика тормозится до полной остановки в крайнем нижнем положении, после чего весь процесс повторяется сначала.

Если бы в колебательной системе не существовало трения, то движение шарика не прекратилось бы никогда. Однако трение присутствует в системе, причём сила трения как при движении шарика вверх, так и при его движении вниз всё время направлена против скорости. Сила трения тормозит движение шарика, и поэтому размах его колебаний постепенно уменьшается, пока движение не прекратится совсем.

Итак, чтобы в колебательной системе могли происходить свободные колебания, необходимо выполнение двух условий.

Во-первых, при выведении тела из положения равновесия в системе должна возникать сила, направленная к положению равновесия и, следовательно, стремящаяся вернуть тело в положение равновесия. Именно так действует в рассмотренной нами системе сила упругости пружины и сила тяжести: и при перемещении шарика вверх, и при его перемещении вниз результирующая сила направлена к положению равновесия.

Во-вторых, трение в системе должно быть достаточно мало, иначе колебания быстро затухнут или даже не возникнут. Незатухающие колебания возможны лишь при отсутствии трения.

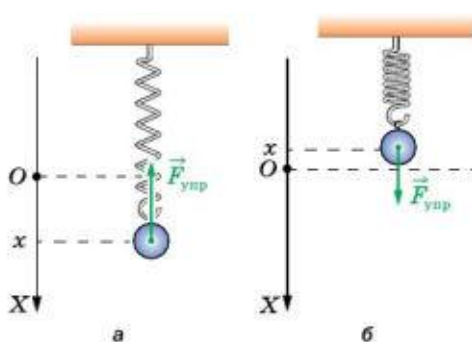


Рис. 5.3

1. Какие движения представляют собой колебания? Приведите примеры. **2.** Что называют: а) периодом колебаний; б) частотой колебаний? **3.** Охарактеризуйте такие модели колебательных систем, как: а) пружинный маятник; б) математический маятник. **4.** Как возникают свободные колебания пружинного маятника? **5.** При каких условиях в колебательной системе возникают и поддерживаются свободные колебания?

1. Можно ли назвать колебательным движение по окружности, ведь при таком движении тоже повторяются значения координат, скорости и ускорения тела через определённый промежуток времени?

2. Будут ли продолжаться колебания пружинного маятника, если всю систему переместить в положение невесомости?



1. Груз, колеблющийся на пружине, за 8 с совершил 32 колебания. Найдите период и частоту колебаний.
2. Материальная точка колеблется с частотой 10 кГц. Определите период колебаний и число колебаний в минуту.
3. Частота колебаний крыльев комара 600 Гц, а период колебаний крыльев шмеля 5 мс. Какое из насекомых и на сколько больше сделает при полёте взмахов крыльями за 1 мин?



§ 25

КИНЕМАТИКА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ.
ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

СВЯЗЬ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С РАВНОМЕРНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ПО ОКРУЖНОСТИ. Прикрепим к равномерно вращающемуся диску небольшой шарик на стержне и осветим его сбоку. При вращении диска тень шарика будет совершать колебания на стене вдоль одной прямой. В данном случае положение колеблющейся точки (тени шарика) определяется единственной координатой x . Установим, какой вид имеет функция $x(t)$, задающая закон движения точки.

На рисунке 5.4 буквами O, O_1, O_2 и т. д. обозначены различные положения шарика, а буквами P_0, P_1, P_2 и т. д. — положения его тени на стене MN . Точки P_0, P_1, P_2 и т. д. являются ортогональными проекциями точек O, O_1, O_2 и т. д. окружности на прямую MN .

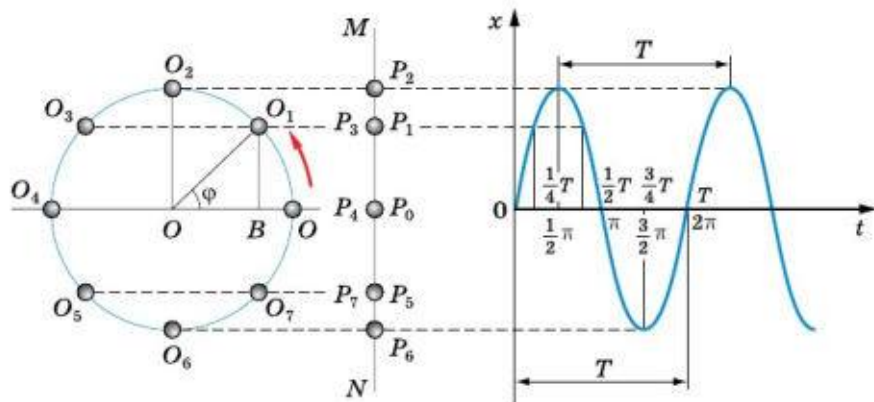


Рис. 5.4

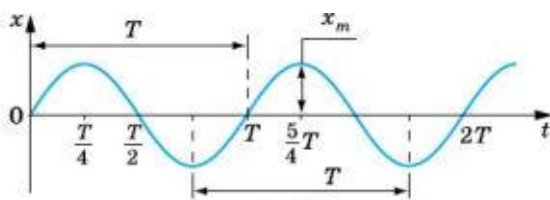


Рис. 5.5

В некоторый момент времени величина отклонения колеблющейся точки от положения равновесия по оси x будет равна $x = P_0P_1 = BO_1$. Наибольшую величину отклонения точки обозначим через x_m :

$$x_m = P_0P_2 = OO_2 = OO_1.$$

Из треугольника OBO_1 следует, что $BO_1 = OO_1 \sin \varphi$.

Таким образом,

$$x = x_m \sin \varphi. \quad (1)$$

В выражение (1) входит величина φ . При описании вращательного движения φ — угол, характеризующий угловое перемещение шарика за время t , прошедшее с момента прохождения им начального нулевого положения.

$$\varphi = \varphi_0 + \omega t,$$

где $\omega = \frac{2\pi}{T}$ — угловая скорость; φ_0 — начальный угол.

С учётом этого можно записать:

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{2\pi t}{T}. \quad (2)$$

Для случая $\varphi_0 = 0$ по формуле (1) определим положение колеблющейся точки в любой момент времени:

$$x = x_m \sin \omega t. \quad (3)$$

График зависимости координаты колеблющейся точки от времени, согласно уравнению (3), представляет собой синусоиду (рис. 5.5).

ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ. Проекция точки, равномерно вращающейся по окружности, совершает простейший вид колебательного движения, называемый *гармоническими колебаниями*.

При гармонических колебаниях величина x изменяется с течением времени по закону синуса или косинуса.

$$x(t) = x_m \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (4)$$

Обсудим смысл величин, входящих в закон гармонических колебаний (4). Величину x , характеризующую отклонение колеблющейся точки от

положения равновесия, называют *смещением*. Положительная величина x_m — это модуль наибольшего смещения от положения равновесия (в силу того что наибольшее значение модуля синуса равно единице). Её называют *амплитудой колебаний*. Аргумент синуса $\varphi = \omega t + \varphi_0$ в законе (4) называют *фазой колебаний*.

Фаза колебаний выражается в угловых единицах — *радианах* или *градусах*. При заданной амплитуде фаза определяет состояние колебательной системы в любой момент времени.

В начальный момент времени $t = 0$ фаза $\varphi = \omega t + \varphi_0$ имеет значение φ_0 . Его называют *начальной фазой колебаний*.

В данное выражение входит величина ω — *циклическая (круговая) частота гармонических колебаний*, равная $\frac{2\pi}{T}$. Циклическая частота равна числу колебаний тела, совершаемых за 2π секунд. В СИ единицей циклической частоты является *радиан в секунду*, или с^{-1} .

Циклическую частоту можно было бы не вводить, а использовать только частоту колебаний ν . Однако в этом случае пришлось бы в формулы, характеризующие колебательные процессы, вводить множитель 2π , что неудобно при проведении расчётов. В дальнейшем мы будем называть циклическую частоту просто частотой. Частоту свободных колебаний называют также *собственной частотой колебательной системы*.

СКОРОСТЬ И УСКОРЕНИЕ ТЕЛА ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ. Определим зависимости от времени проекций скорости и ускорения тела (точки), гармонически колеблющегося вдоль оси x по закону (4).

Проекция скорости гармонически колеблющейся точки на ось X представляет собой производную координаты по времени:

$$v_x(t) = x'(t) = x_m \omega \cos(\omega t + \varphi_0).$$

Амплитуда скорости $v_{xm} = x_m \omega$.

Проекция ускорения рассматриваемой точки на ось X — это производная по времени проекции её скорости на эту ось (или вторая производная координаты x по времени).

$$a_x(t) = x''(t) = v'(t) = -x_m \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0).$$

Амплитуда ускорения $a_{xm} = -x_m \omega^2$.

Сопоставив выражения для координаты и проекции ускорения, можно установить, что проекция ускорения отличается от координаты только множителем $-\omega^2$:

$$a_x = -\omega^2 x. \quad (5)$$

Это соотношение называют *уравнением гармонических колебаний*.

Графики зависимостей $x(t)$, $v_x(t)$, $a_x(t)$ приведены на рисунке 5.6. Видно, что координата, скорость и ускорение точки, колеблющейся по гармоническому закону, принимают максимальные и минимальные значения в различные моменты времени. Это означает, что эти характеристики колебательного движения имеют различные фазы.

Из приведённых графиков следует, что колебания координаты отстают от колебаний проекций скорости на четверть периода, а график проекции скорости отстаёт от колебаний проекции ускорения на четверть периода. Амплитуды этих функций различны, и фазы колебаний тоже. Изменение времени колебаний на четверть периода соответствует изменению фазы на $\frac{\pi}{2}$.

Из графиков колебаний можно сделать выводы: при гармонических колебаниях точки вдоль оси X колебания проекции скорости опережают колебания координаты по фазе на $\frac{\pi}{2}$. При этом колебания проекции ускорения опережают колебания координаты по фазе на π .

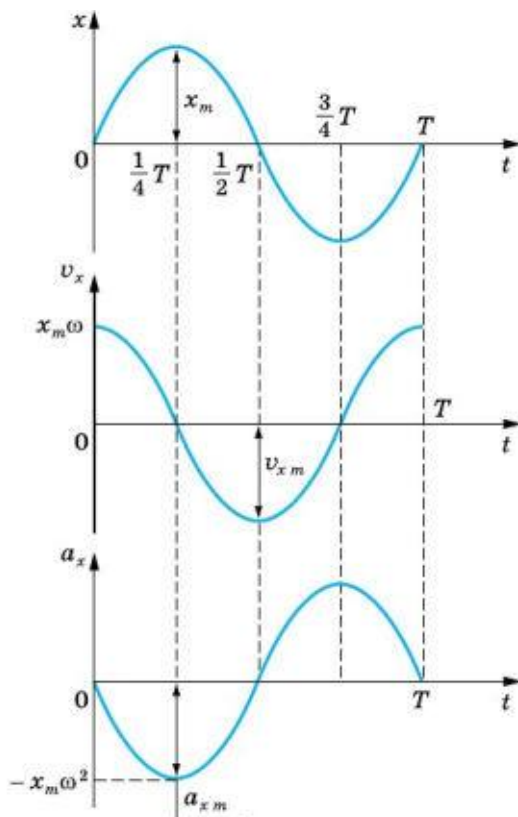


Рис. 5.6

1. Какую физическую величину называют: а) смещением; б) амплитудой колебаний; в) фазой колебаний; г) начальной фазой колебаний; д) циклической частотой? **2.** Какие колебания являются гармоническими? При каких условиях они возникают в колебательной системе? **3.** Запишите закон гармонических колебаний. **4.** Используя рисунок 5.6, запишите зависимость: а) координаты; б) проекции скорости; в) проекции ускорения гармонически колеблющейся точки от времени.

1. По какой траектории будет двигаться шарик математического маятника, если его нить пережечь в момент, когда он достигнет максимального отклонения от положения равновесия?

2. В каких точках траектории шарик, совершающий гармонические колебания по закону синуса, будет обладать максимальной скоростью, а в каких — максимальным ускорением?



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Движение гармонически колеблющегося тела задано законом $x(t) = 0,4 \cos 5\pi t$ (м). Определите амплитуду колебаний, период колебаний, амплитуду скорости, амплитуду ускорения и смещение точки от положения равновесия при $t_1 = 0,1$ с.

Дано:

$$x(t) = 0,4 \cos 5\pi t \text{ (м)}$$

$$t_1 = 0,1 \text{ с}$$

$$x_m = ?$$

$$T = ?$$

$$v_{xm} = ?$$

$$a_{xm} = ?$$

$$x(t_1) = ?$$

Решение:

Согласно закону гармонических колебаний,

$$x(t) = x_m \cos \omega t.$$

В рассматриваемом случае

$$x_m = 0,4 \text{ м}, \quad \omega = 5\pi \text{ с}^{-1}.$$

Запишем законы изменения проекций скорости $v_x(t)$ и ускорения $a_x(t)$ тела от времени.

$$v_x(t) = x'(t) = -0,4 \cdot 5\pi \sin 5\pi t,$$

$$v_x(t) = -2\pi \sin 5\pi t \text{ (м/с)}, \quad v_{xm} = 2\pi \text{ м/с} \approx 6,28 \text{ м/с}.$$

$$a_x(t) = v'_x(t) = -2\pi \cdot 5\pi \cos 5\pi t,$$

$$a_x(t) = -10\pi^2 \cos 5\pi t \text{ (м/с}^2\text{)}, \quad a_{xm} = 10\pi^2 \text{ м/с}^2 \approx 98,6 \text{ м/с}^2.$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad T = \frac{2\pi}{5\pi} \text{ с} = 0,4 \text{ с}.$$

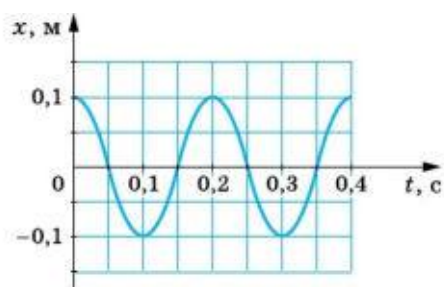
$$x(t_1) = 0,4 \cos (5\pi \cdot 0,1) = 0,4 \cos 0,5\pi = 0.$$

Ответ: $x_m = 0,4$ м; $v_{xm} = 6,28$ м/с; $a_{xm} \approx 98,6$ м/с²; $T = 0,4$ с; $x(t_1) = 0$.

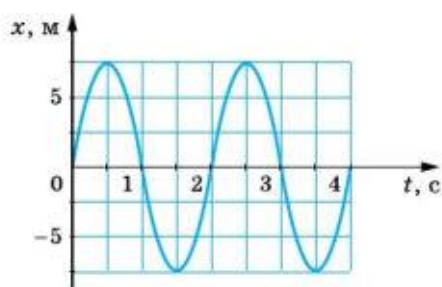


УПРАЖНЕНИЯ

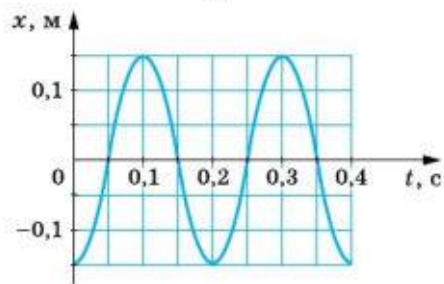
1. Амплитуда колебаний гармонически колеблющейся точки струны равна 1 мм, частота колебаний — 1 кГц. Какой путь пройдёт точка за 0,2 с?
2. Чему равна амплитуда, частота и период колебаний, если координата колеблющегося тела изменяется по закону: а) $x(t) = 5 \cos (2\pi/3)t$ (м); б) $x(t) = 0,1 \sin \pi t$ (м); в) $x(t) = \cos 628t$ (м)?
3. Напишите закон гармонических колебаний груза, если амплитуда его колебаний равна 0,1 м, а частота колебаний — 0,2 Гц.
4. Напишите закон гармонических колебаний, если за 1 мин совершается 60 колебаний. Амплитуда колебаний равна 8 см.
5. По графикам, приведённым на рисунке 5.7, найдите амплитуду, период и частоту колебаний. Запишите для каждого графика уравнение зависимости координаты от времени $x(t)$, проекции скорости от времени $v_x(t)$ и проекции ускорения от времени $a_x(t)$.



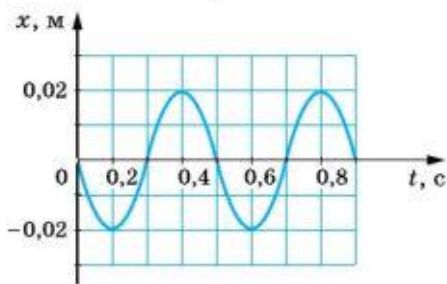
а



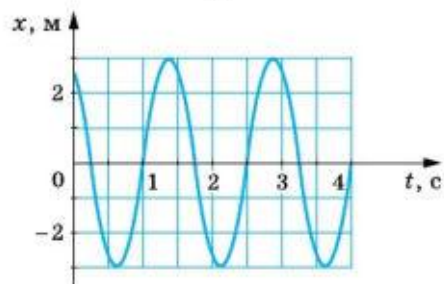
б



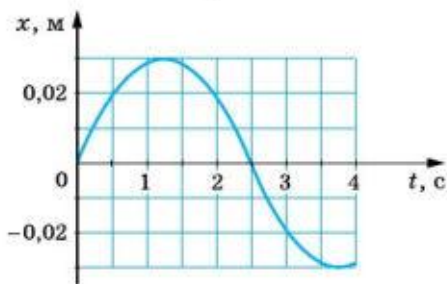
в



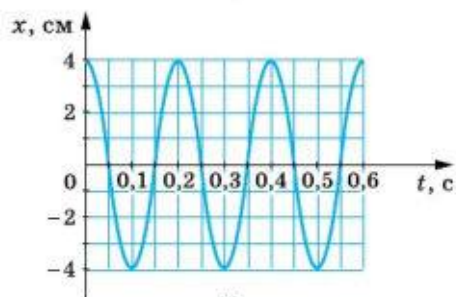
г



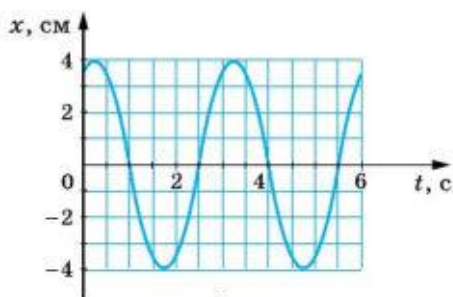
д



е



ж



з

Рис. 5.7

УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗА НА ПРУЖИНЕ. Чтобы описать свободные колебания тела, например груза на пружине или шарика на нити, количественно, т. е. получить уравнение движения, нужно воспользоваться законами механики Ньютона. В этом заключается *динамический подход* к решению задачи о колебаниях системы.

Получим уравнение движения груза на пружине. На груз действует сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$ и сила тяжести $\vec{F} = m\vec{g}$. Действием сил трения в колебательной системе пренебрежём. Направим ось X вертикально вниз (рис. 5.8). Начало отсчёта (точку O) выберем на уровне положения равновесия. В этом положении пружина растянута на величину x_0 , значение которой определяется из закона Гука: $kx_0 = mg$. Отсюда

$$x_0 = \frac{mg}{k}. \quad (1)$$

Проекция силы упругости

$$(F_{\text{упр}})_x = -k(x_0 + x),$$

где x — координата груза относительно положения равновесия. Величина $x_0 + x$ представляет собой удлинение пружины (см. рис. 5.8).

Запишем уравнение движения груза:

$$ma_x = -k(x + x_0) + mg. \quad (2)$$

Подставляя в уравнение (2) значение x_0 из выражения (1), получим

$$ma_x = -kx. \quad (3)$$

Уравнение движения (3) не содержит силы тяжести. Она, действуя на груз, вызывает растяжение пружины на постоянную величину. Но это не влияет на характер движения груза. Колебания происходят относительно положения равновесия тела при растянутой на x_0 пружине. В отсутствие тяготения уравнение (3) имело бы такую же форму, но только колебания происходили бы относительно конца нерастянутой пружины. Наличие силы тяжести несущественно для колебаний груза на пружине, в отличие от колебаний математического маятника.

Масса m и жёсткость пружины k — постоянные величины. Разделив левую и правую части уравнения (3) на m , запишем:

$$a_x = -\frac{k}{m}x. \quad (4)$$

Это уравнение движения груза на пружине.

Проекция a_x ускорения груза прямо пропорциональна его смещению от положения равновесия x , взятому с противоположным знаком.

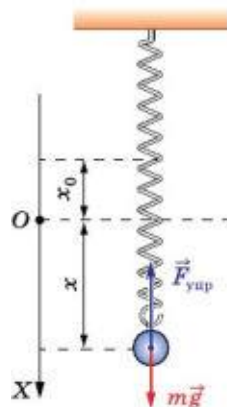


Рис. 5.8

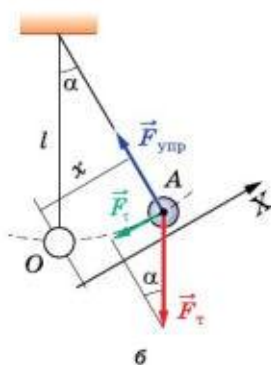
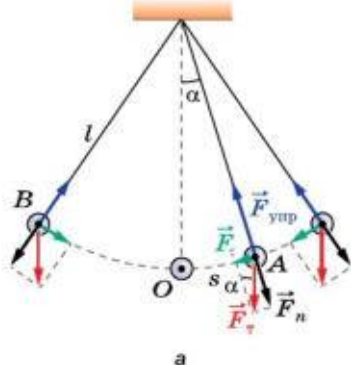


Рис. 5.9

УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА. Рассмотрим свободные колебания математического маятника. Будем считать, что силы трения в системе пренебрежимо малы.

Если отклонить маятник из положения равновесия на малый угол и отпустить, то сила тяжести $\vec{F}_т$ и сила упругости нити $\vec{F}_упр$ будут направлены под углом друг к другу, и они не уравновешиваются (рис. 5.9, а).

Разложим силу тяжести на две составляющие: силу $\vec{F}_н$, направленную вдоль нити, и силу $\vec{F}_τ$, направленную по касательной к траектории движения шарика.

Векторы силы упругости нити $\vec{F}_упр$ и нормальной составляющей силы тяжести $\vec{F}_н$ перпендикулярны вектору скорости движения шарика. Они сообщают ему нормальное (центростремительное) ускорение. Действие этих сил не изменяет модуля скорости движения шарика, а приводит лишь к изменению направления его скорости. Вектор скорости непрерывно поворачивается, так что в любой момент времени скорость направлена по касательной к дуге окружности — траектории маятника. Под действием составляющей* силы тяжести $\vec{F}_τ$ маятник будет двигаться к положению равновесия с нарастающей по модулю скоростью. В положении равновесия составляющая $\vec{F}_τ$ равна нулю, а скорость достигает максимального значения, и маятник движется дальше, поднимаясь в крайнее левое положение — в точку В. Под действием возвращающей силы маят-

* Эту составляющую силы тяжести называют *тангенциальной*. Тангенциальная составляющая $\vec{F}_τ$ силы тяжести создаёт тангенциальное ускорение, характеризующее изменение скорости по модулю.

ник снова будет двигаться к положению равновесия. Тем самым он будет совершать колебательное движение.

Найдём проекцию на направление касательной силы тяжести $\vec{F}_T$ в момент времени, когда нить маятника отклонена от положения равновесия на угол α (см. рис. 5.9, б):

$$F_{\tau x} = F_{\tau x} = -mg \sin \alpha.$$

Если обозначить через x смещение маятника от положения равновесия по дуге окружности радиусом l , то угол отклонения маятника $\alpha = \frac{x}{l}$. Второй закон Ньютона, записанный в проекциях на направление касательной, даёт:

$$ma_x = F_{\tau x} = -mg \sin \alpha = -mg \sin \frac{x}{l}.$$

В том случае, если углы отклонения нити от вертикали являются малыми, $\sin \frac{x}{l}$ можно приближённо заменить на $\frac{x}{l}$. Тогда

$$ma_x = -mg \frac{x}{l},$$

$$a_x = -\frac{g}{l}x. \quad (5)$$

Это уравнение движения математического маятника.

Проекция ускорения математического маятника прямо пропорциональна смещению маятника от положения равновесия, взятому с противоположным знаком.

Мы пришли к важному выводу: уравнения движения, описывающие колебания таких различных систем, как груз на пружине и математический маятник, одинаковы. Кроме того, согласно уравнению $a_x = -\omega^2 x$ (см. § 25), малые колебания и пружинного, и математического маятников являются гармоническими с собственными частотами:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (6)$$

для пружинного маятника и

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (7)$$

для математического маятника.

Если воспользоваться формулами (6) и (7), а также выражением

$T = \frac{2\pi}{\omega}$, то можно записать:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

— период колебаний пружинного маятника;

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

— период колебаний математического маятника.

Собственная частота колебаний груза на пружине определена согласно выражению (6). Она тем больше, чем больше жёсткость пружины, и тем меньше, чем больше масса тела. Это понятно: более жёсткая пружина сообщает телу большее ускорение, т. е. быстрее меняет его скорость и, следовательно, уменьшает время одного колебания. А чем массивнее тело, тем медленнее оно изменяет скорость под действием данной силы.

Собственная частота колебаний математического маятника [см. формулу (7)] при малых углах отклонения нити от вертикали зависит от длины нити и ускорения свободного падения. Период колебаний такого маятника возрастает с увеличением длины его нити, но при этом он не зависит от массы маятника и амплитуды колебаний.

Зависимость периода колебаний математического маятника от ускорения свободного падения можно обнаружить экспериментально. Чем меньше ускорение свободного падения, тем больше период колебаний маятника и, следовательно, тем медленнее идут часы с маятником. Так, часы с маятником в виде груза на стержне отстанут в сутки почти на 7 с, если их поднять на вершину Останкинской телебашни (высота 500 м^{*}).



1. Какая сила вызывает свободные колебания: а) пружинного маятника; б) математического маятника? **2.** Запишите формулу определения периода колебаний: а) математического маятника; б) пружинного маятника. **3.** Почему собственная частота колебаний груза на пружине тем больше, чем больше жёсткость пружины? **4.** Как изменится (уменьшится или увеличится) период колебаний математического маятника, если уменьшить длину его нити? **5.** Зависит ли период колебаний математического маятника от массы груза?



1. Изменится ли период колебаний качелей, если вместо одного человека на качели сядут двое?

* Точное значение высоты Останкинской телебашни составляет 540,1 м. Но в данном расчёте удобно использовать её приближённое значение.

2. Как будет изменяться период колебаний ведра с водой, подвешенного на длинном шнуре, если из отверстия в его дне постепенно будет вытекать вода?

3. Допустим, нам известен период колебаний одного из двух маятников разной длины. Как, не используя секундомер и линейку, определить период колебаний другого маятника?



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

За одно и то же время один математический маятник совершил 50 полных колебаний, а другой маятник — 30. Найдите их длины, если один из них короче другого на 32 см.

Дано:
 $N_1 = 50$
 $N_2 = 30$
 $\Delta l = 32 \text{ см}$

СИ:
 $0,32 \text{ м}$

$l_1 = ?$
 $l_2 = ?$

Решение:

По условию задачи за одно и то же время t маятники совершили N_1 и N_2 колебаний. Следовательно, по определению периода колебаний

$$T_1 = \frac{t}{N_1}, \quad T_2 = \frac{t}{N_2}.$$

Очевидно, что $T_1 < T_2$ при $N_1 > N_2$.

Составим систему уравнений:

$$\begin{cases} T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{l_1}{g}}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{l_2}{g}}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} l_2 - l_1 = \Delta l, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} T_1 = \frac{t}{N_1}, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} T_2 = \frac{t}{N_2}. \end{cases} \quad (5)$$

Подставим выражения (1) и (2) для T_1 и T_2 в формулы (4) и (5):

$$\begin{cases} 2\pi\sqrt{\frac{l_1}{g}} = \frac{t}{N_1}, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} 2\pi\sqrt{\frac{l_2}{g}} = \frac{t}{N_2}. \end{cases} \quad (7)$$

Разделим почленно равенства (6) и (7):

$$\sqrt{\frac{l_1}{l_2}} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (8)$$

Используя формулу (3), равенство (8), можно записать в виде:

$$\sqrt{\frac{l_1}{l_1 + \Delta l}} = \frac{N_2}{N_1}.$$

Возведя его в квадрат, получим:

$$\frac{l_1}{l_1 + \Delta l} = \frac{N_2^2}{N_1^2},$$
$$l_1 = \Delta l \frac{N_2^2}{N_1^2 - N_2^2}, \quad l_2 = l_1 + \Delta l = \Delta l \frac{N_1^2}{N_1^2 - N_2^2}.$$

С учётом числовых данных

$$l_1 = 0,32 \cdot \frac{30^2}{50^2 - 30^2} \text{ м} = 0,18 \text{ м};$$

$$l_2 = 0,32 \cdot \frac{50^2}{50^2 - 30^2} \text{ м} = 0,5 \text{ м}.$$

Ответ: $l_1 = 0,18 \text{ м}$; $l_2 = 0,5 \text{ м}$.



УПРАЖНЕНИЯ

1. Груз массой 0,25 кг колеблется на пружине с жёсткостью 100 Н/м. Чему равен период колебаний? За какое время груз совершает 10 колебаний?
2. За одну минуту груз на пружине совершает 15 колебаний. Определите массу груза, если жёсткость пружины равна 9,86 Н/м.
3. Чему равно ускорение свободного падения на Луне, если там маятник длиной 1 м имеет период колебаний 4,9 с?
4. Как изменится период колебаний математического маятника, если его длину: а) увеличить в 4 раза; б) уменьшить в 9 раз?
5. Как относятся длины математических маятников, если за одно и то же время один совершает 10, а второй — 30 колебаний?



§ 27

ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ. ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ

ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ. При механических колебаниях пружинного и математического маятников происходят изменения кинетической и потенциальной энергий.

Рассмотрим свободные колебания пружинного маятника (силами трения в системе пренебрежём). Оттянув груз, подвешенный на пружине, вниз, мы сообщаем грузу некоторый запас потенциальной энергии. При движении груза вверх пружина сокращается и потенциальная энергия системы уменьшается. Но одновременно увеличивается кинетическая

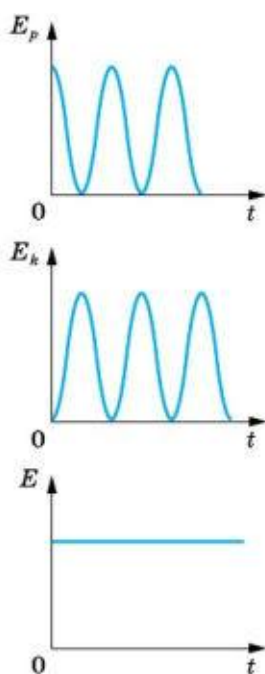


Рис. 5.10

энергия груза. В момент прохождения грузом положения равновесия потенциальная энергия системы становится минимальной. Кинетическая же энергия груза достигает максимального значения (рис. 5.10).

После прохождения положения равновесия скорость движения груза начинает уменьшаться. Следовательно, уменьшается и его кинетическая энергия, а потенциальная энергия системы снова возрастает. В самой верхней точке она достигает максимума, а кинетическая энергия груза становится равной нулю.

Таким образом, *при гармонических колебаниях периодически происходит переход потенциальной энергии в кинетическую энергию и обратно*. При этом частота колебаний потенциальной и кинетической энергий в 2 раза больше частоты колебаний груза.

Полный период колебаний кинетической и потенциальной энергий вдвое меньше периода колебаний груза. Кроме того, в момент обращения в нуль одной из энергий другая энергия достигает максимального значения. Именно эта особенность и обеспечивает возможность колебаний в системе.

Механическая энергия при отсутствии трения в колебательной системе остаётся постоянной (см.

рис. 5.10). При колебаниях груза на пружине она равна сумме кинетической и потенциальной энергий:

$$E = E_k + E_p = \frac{mv_x^2}{2} + \frac{kx^2}{2}.$$

Кинетическая и потенциальная энергии периодически изменяются, но механическая энергия в системе без трения, согласно закону сохранения энергии, остаётся неизменной (сохраняется). Она равна либо потенциальной энергии системы в момент максимального отклонения маятника от положения равновесия, либо кинетической энергии груза в момент, когда он проходит положение равновесия.

* Докажем это. Подставим в формулу для механической энергии выражения для v_x и x , полученные в § 25:

$$v_x(t) = x_m \omega \cos(\omega t + \varphi_0),$$

$$x(t) = x_m \sin(\omega t + \varphi_0).$$

$$E = \frac{m\omega^2 x_m^2}{2} \cos^2(\omega t + \varphi_0) + \frac{kx_m^2}{2} \sin^2(\omega t + \varphi_0).$$

Заменяя в первом члене последнего уравнения ω^2 на $\omega^2 = \frac{k}{m}$, получим

$$E = \frac{kx_m^2}{2} [\sin^2(\omega t + \varphi_0) + \cos^2(\omega t + \varphi_0)] = \frac{kx_m^2}{2}.$$

Если же во второй член уравнения (2) подставить $k = m\omega^2$ и учесть, что $\omega x_m = v_m$, то

$$E = \frac{mv_m^2}{2} [\sin^2(\omega t + \varphi_0) + \cos^2(\omega t + \varphi_0)] = \frac{mv_m^2}{2}.$$

Такие же изменения кинетической и потенциальной энергий происходят при гармонических колебаниях математического маятника. *

ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ. В природе не существует колебательных систем, в которых бы не было трения. Силы трения совершают отрицательную работу и уменьшают механическую энергию системы. Поэтому амплитуда колебаний с каждым периодом уменьшается. В итоге после того, как запас механической энергии исчерпается, колебания прекратятся совсем. Другими словами, колебания при наличии трения являются *затухающими*. Только в пределах небольшого интервала времени уменьшением амплитуды колебаний можно пренебречь и считать (приблизённо) колебания незатухающими.

В реальных колебательных системах обязательно происходят потери энергии. Если произвести графическую запись колебаний реальной колебательной системы, то она окажется подобной той, что изображена на рисунке 5.11. Эту зависимость координаты тела от времени можно заставить «вычерчивать» само колеблющееся тело, например маятник. На рисунке 5.12 изображён маятник с песочницей. На равномерно движущемся листе картона он струйкой песка вычерчивает график зависимости координаты от времени. Данный метод «временной развёртки» колебаний позволяет получить представление о процессе движения. Чем быстрее движется лист картона, тем большими оказываются расстояния между соседними максимумами смещения.

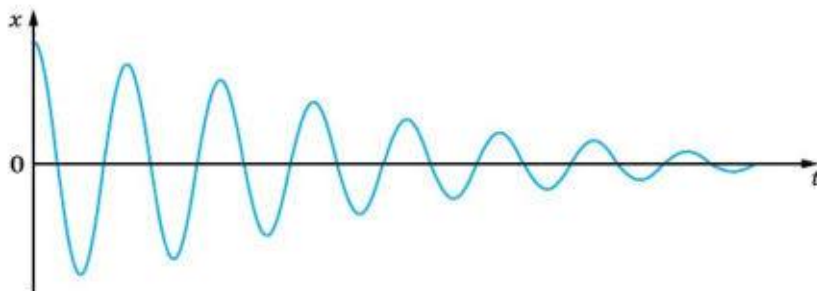


Рис. 5.11



Рис. 5.12

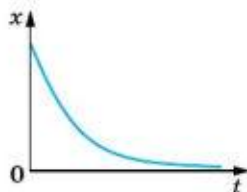


Рис. 5.13

С увеличением силы трения колебания затухают быстрее. При большом трении они не возникают совсем. Тело, выведенное из положения равновесия, останавливается, не переходя через положение равновесия (рис. 5.13). Всё это можно наблюдать, постепенно увеличивая трение маятника с песочницей, прикрепляя к нитям подвеса листы плотной бумаги всё большей площади поверхности (сопротивление воздуха зависит от площади листа).

При трении механическая энергия колебательной системы будет постепенно расходоваться на нагревание окружающей среды, именно поэтому амплитуда колебаний будет убывать с течением времени. Трение приводит к торможению колебаний в системе, поэтому следует ожидать и некоторого уменьшения частоты колебаний. При затухающих колебаниях движение является *непериодическим*. Соответственно понятие периода колебаний утрачивает свой непосредственный смысл.

1. Как изменяются с течением времени кинетическая и потенциальная энергии пружинного маятника при гармонических колебаниях? 2. Изменяется ли механическая энергия колебательной системы при гармонических колебаниях? 3. Как влияют силы трения, действующие в колебательной системе, на её механическую энергию и амплитуду колебаний? 4. Что является причиной затухания свободных колебаний в колебательной системе?

1. Изобразите и проанализируйте графики зависимости от времени кинетической энергии, потенциальной энергии и механической энергии математического маятника, совершающего гармонические колебания.

2. Шарик, закреплённый на упругой пружине жёсткостью k , совершает свободные колебания с амплитудой, равной x_m . Чему равна кинетическая энергия шарика в момент прохождения им положения равновесия?

3. Шарик колеблется на пружине, подвешенной вертикально к потолку. При этом максимальное расстояние от потолка до центра шарика равно H , минимальное расстояние — h . Какая энергия будет максимальной в точке, удалённой от потолка на расстояние H ?





ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Груз массой 470 г совершает горизонтальные колебания с амплитудой 4,2 см на упругой пружине с жёсткостью, равной 56 Н/м. Найдите: а) механическую энергию системы; б) потенциальную энергию системы в точке с координатой 2,1 см; в) кинетическую энергию груза в этой точке; г) скорость прохождения грузом этой точки.

Дано:

$$\begin{aligned} m &= 470 \text{ г} \\ k &= 56 \text{ Н/м} \\ x_m &= 4,2 \text{ см} \\ x_2 &= 2,1 \text{ см} \end{aligned}$$

E — ?

$E_p(x_2)$ — ?

$E_k(x_2)$ — ?

v_2 — ?

СИ:

$$0,47 \text{ кг}$$

$$4,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$2,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

Решение:

Механическая энергия колебательной системы равна максимальной потенциальной энергии:

$$E = E_p = \frac{kx_m^2}{2}.$$

Найдём потенциальную энергию деформированной пружины при x_2 .

$$E_p(x_2) = \frac{kx_2^2}{2}.$$

Вычислим кинетическую энергию $E_k(x_2)$ в этой точке. По закону сохранения механической энергии

$$E = E_p(x_2) + E_k(x_2) \Rightarrow E_k(x_2) = E - E_p(x_2) = \frac{k(x_m^2 - x_2^2)}{2}.$$

Поскольку $E_k(x_2) = \frac{mv_2^2}{2}$, то

$$v_2 = \sqrt{\frac{2E_k(x_2)}{m}} = \sqrt{\frac{k(x_m^2 - x_2^2)}{m}}.$$

С учётом числовых данных получим

$$E = \frac{56 \cdot (4,2 \cdot 10^{-2})^2}{2} \text{ Дж} \approx 0,049 \text{ Дж};$$

$$E_p(x_2) = \frac{56 \cdot (2,1 \cdot 10^{-2})^2}{2} \text{ Дж} \approx 0,012 \text{ Дж};$$

$$E_k(x_2) = \frac{56 \cdot (4,2^2 - 2,1^2) \cdot (10^{-2})^2}{2} \text{ Дж} \approx 0,037 \text{ Дж};$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{56 \cdot (4,2^2 - 2,1^2) \cdot (10^{-2})^2}{0,47}} \text{ м/с} \approx 0,4 \text{ м/с}.$$

Ответ: $E \approx 0,049 \text{ Дж}$; $E_p(x_2) \approx 0,012 \text{ Дж}$; $E_k(x_2) = 0,037 \text{ Дж}$; $v_2 \approx 0,4 \text{ м/с}$.



УПРАЖНЕНИЯ

1. На рисунке 5.14 представлен график зависимости потенциальной энергии математического маятника (относительно его положения рав-

новесия) от времени. Чему будет равна кинетическая энергия маятника в момент времени $t = 2$ с?

2. Груз массой 400 г совершает колебания на пружине с жёсткостью 250 Н/м. Амплитуда колебаний 15 см. Найдите полную механическую энергию и частоту колебаний груза.
3. С какой скоростью колеблющееся тело, подвешенное на пружине, проходит положение равновесия, если масса тела равна 1 кг, жёсткость пружины — 100 Н/м, а амплитуда колебаний — 0,5 м?
4. Тело массой 5 кг совершает гармонические колебания с амплитудой 10 см. Максимальная кинетическая энергия тела равна 2,5 Дж. Найдите период колебаний.
5. Чему равна масса груза, колеблющегося на пружине с жёсткостью 0,5 кН/м, если при амплитуде колебаний 6 см он имеет максимальную скорость, равную 53 м/с?

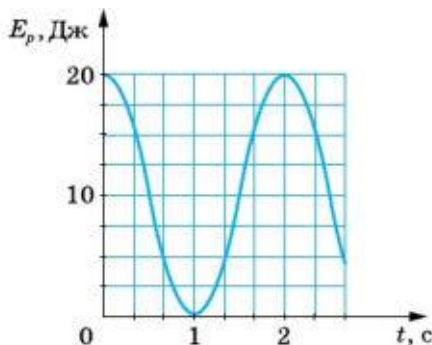


Рис. 5.14

Это любопытно...

Из истории развития физики и техники

В 1851 г. французский физик Жан Бернар Леон Фуко (1819—1868) провёл в здании Пантеона в Париже (усыпальница выдающихся людей Франции) опыт, который наглядно продемонстрировал факт суточного вращения Земли (рис. 5.15). К куполу Пантеона была прикреплена стальная проволока длиной 67 м, а к ней был подвешен массивный металлический шар. По разным источникам, масса шара составляла от 25 до 28 кг.



Рис. 5.15

Проволока крепилась к куполу таким образом, чтобы получившийся маятник мог качаться в любой плоскости. При этом на груз маятника действовали сила тяжести, направленная вертикально вниз, и сила натяжения проволоки, направленная вдоль проволоки вверх. Таким образом, равнодействующая сил, дейст-

вующих на маятник, лежала в вертикальной плоскости, проходящей через проволоку, т. е. в плоскости качаний маятника.

Маятник совершал колебания над круглым постаментом диаметром 6 м, по краю которого был насыпан валик из песка. При каждом качании маятника острый стержень, укрепленный на шаре снизу, оставлял на валике отметку, сметая с ограждения песок. Для того чтобы исключить влияние подвеса на маятник Фуко, применялись специальные подвесы. При запуске маятника принимались меры для устранения толчков в направлении, перпендикулярном к начальной плоскости качаний. Период колебаний маятника в опыте Фуко составлял примерно 16,4 с. По прошествии каждого периода колебаний новая отметка, наносимая остриём стержня на песок, оказывалась примерно в 3 мм от предыдущей. За первый час наблюдений плоскость качаний маятника повернулась на угол около 11° по часовой стрелке. Полный же оборот плоскость маятника совершила примерно за 32 ч, после чего вернулась в прежнее положение.

В России маятник Фуко длиной 98 м был установлен в Исаакиевском соборе в Ленинграде (в 1986 г. маятник был демонтирован). Обычно показывался такой удивительный эксперимент — на полу устанавливался спичечный коробок чуть поодаль от плоскости вращения маятника. Пока гид рассказывал о маятнике, плоскость его вращения поворачивалась и стержень, укрепленный на шаре, сбивал коробок.

§ 28

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. РЕЗОНАНС

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. Наиболее простой способ возбуждения незатухающих колебаний состоит в том, что на колебательную систему действует внешняя периодически изменяющаяся сила. Колебания под действием такой силы называют *вынужденными*.

Работа вынужденной силы над системой обеспечивает приток энергии к системе извне, который и не даёт колебаниям затухать, несмотря на действие сил трения.



Рассмотрим вместо маятника груз, подвешенный на пружине. Но теперь верхний конец пружины будет прикреплен к «колену» изогнутой оси (рис. 5.16). Если вращать ось с помощью рукоятки, то на груз, прикрепленный к пружине, начнёт действовать периодически изменяющаяся внешняя сила. Ещё лучше вращать ось с помощью электродвигателя. Это обеспечит большую стабильность частоты внешней силы.



Рис. 5.16

Груз начнёт раскачиваться, амплитуда его колебаний будет увеличиваться. Спустя некоторое время колебания приобретут установившийся характер: их амплитуда со временем перестанет изменяться. При этом можно обнаружить, что частота колебаний груза будет в точности равна частоте колебаний точки подвеса пружины, т. е. частоте изменения внешней силы.

Установившиеся вынужденные колебания происходят с частотой ω и амплитудой x_m по гармоническому закону:

$$x = x_m \cos(\omega t + \varphi_c),$$

где φ_c — разность (сдвиг) фаз между колебаниями координаты и внешней силы.

Внешне вынужденные установившиеся колебания выглядят так же, как и свободные колебания в системе без трения. Но если при свободных колебаниях амплитуда x_m и начальная фаза φ_0 определяются начальными условиями, то при вынужденных колебаниях x_m и φ_c определяются параметрами самой системы и внешней силой.

Выясним, от чего и как зависят амплитуда x_m вынужденных колебаний и сдвиг фаз φ_c . Для этого запишем и исследуем *уравнение движения для вынужденных колебаний*.

Пусть на колебательную систему (груз на пружине) действует внешняя периодически изменяющаяся сила $F_x = F_m \cos \omega t$. Кроме того, на груз маятника действует сила упругости $(F_{\text{упр}})_x = -kx$ и сила сопротивления, пропорциональная скорости*: $(F_c)_x = -k_1 v_x$, где k_1 — коэффициент сопротивления.

Тогда уравнение движения запишется следующим образом:

$$ma_x = -kx - k_1 v_x + F_m \cos \omega t.$$

Перенеся в левую часть уравнения все силы, кроме внешней, получим

$$ma_x + k_1 v_x + kx = F_m \cos \omega t.$$

Разделим правую и левую части данного уравнения на m и обозначим

собственную частоту системы через $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$:

$$a_x + \frac{k_1}{m} v_x + \omega_0^2 x = \frac{F_m}{m} \cos \omega t. \quad (1)$$

Если частота ω внешней периодической силы много меньше частоты собственных колебаний системы ($\omega \ll \omega_0$), происходит почти то же самое, что и при действии на пружину постоянной силы. Согласно закону Гука, смещение увеличивается пропорционально внешней силе, и в любой мо-

* При малых скоростях движения тела силу сопротивления можно считать пропорциональной скорости.

мент времени внешняя сила почти точно уравнивается силой упругости пружины. С энергетической точки зрения условия для перекачки энергии в колебательную систему от внешних тел, действующих на систему с периодической силой, в данном случае неблагоприятны.

Рассмотрим случай, при котором $\omega \gg \omega_0$. Амплитуда колебаний будет мала. Внешняя сила столь быстро меняет направление, что груз на пружине, обладающий инертиостью, не успевает заметно сдвинуться относительно положения равновесия. Половину периода внешняя сила совершает положительную работу, а другую половину — отрицательную. Половину периода сила и перемещение направлены в одну сторону, а другую его половину — в противоположные стороны. Энергия опять почти не поступает в систему.

РЕЗОНАНС. Самый интересный случай вынужденных колебаний наблюдается при совпадении частоты колебаний внешней периодически изменяющейся силы с собственной частотой колебаний системы ($\omega \approx \omega_0$).

С учётом этого первый член уравнения (1) можно записать так (см. § 25): $a_x = -\omega_0^2 x$.

Он взаимно уничтожается с третьим членом данного уравнения, равным $\omega_0^2 x$. Эти два члена в любой момент времени одинаковы по модулю, но имеют противоположные знаки, так как ускорение и координата при любом гармоническом колебании сдвинуты по фазе на π . В результате уравнение (1) принимает вид

$$k_1 v_x = F_m \cos \omega t. \quad (2)$$

При $\omega \approx \omega_0$ в любой момент времени внешняя сила как бы исключает из игры силу сопротивления. В результате ускорение телу сообщается только силой упругости пружины. Гармонические колебания существуют в системе длительное время, несмотря на действие силы сопротивления. Из уравнения (2) видно, что при $\omega \approx \omega_0$ фаза колебаний скорости совпадает с фазой колебаний внешней силы. Работа внешней силы при этих условиях положительна в течение большей части периода*. Тем самым создаются оптимальные условия для перекачки энергии от внешних тел к колебательной системе: положительная работа внешней силы равна по модулю отрицательной работе силы сопротивления. Из-за этого механическая энергия системы за счёт работы силы сопротивления переходит во внутреннюю энергию (пружина с грузом и окружающий воздух нагреваются).

Амплитуда колебаний при $\omega \approx \omega_0$ равна

$$x_m = \frac{v_m}{\omega_0} = \frac{F_m}{k_1 \omega_0}.$$

* Если собственная частота колебательной системы и частота внешней силы существенно различаются, то внешняя сила совершает положительную работу лишь в течение части периода, а в другой его части — отрицательную работу.

При $k_1 \rightarrow 0$ $x_m \rightarrow \infty$, т. е. очевидно, что при $\omega \approx \omega_0$ амплитуда максимальна.

Резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты изменения внешней силы, действующей на систему, с частотой свободных колебаний называют резонансом.

Явление резонанса можно наблюдать с помощью установки, изображённой на рисунке 5.16. Плавное увеличение частоты внешней силы, мы заметим, что амплитуда колебаний растёт. Она достигает максимума, когда внешняя сила действует в такт со свободными колебаниями ($\omega \approx \omega_0$). При дальнейшем увеличении частоты амплитуда установившихся колебаний опять уменьшается (рис. 5.17).

Существенное влияние на резонанс оказывает сопротивление в системе. Если коэффициент сопротивления k_1 имеет достаточно большое значение, то, согласно уравнению (2), резонансная амплитуда колебаний невелика. Чем меньше сила сопротивления, тем больше амплитуда установившихся вынужденных колебаний.

Изменение амплитуды колебаний в зависимости от частоты при различных коэффициентах сопротивления ($k_1 < k'_1 < k''_1$) и одной и той же амплитуде внешней силы графически изображено на рисунке 5.18. Кривой 1 соответствует минимальный коэффициент сопротивления, а кривой 3 — максимальный.

С одной стороны, явление резонанса может быть полезным, так как оно позволяет получать с помощью небольшой силы значительное увеличение амплитуды колебаний. С другой стороны, резонанс может оказаться вредным и даже опасным. Он может привести к разрушению колеблющихся конструкций. При работе двигателей нередко возникают периодические усилия, связанные с движением частей двигателя (например, поршней) или же с недостаточно точной центровкой их вращающихся деталей (например, валов). Если частота периодических усилий совпадает с частотой

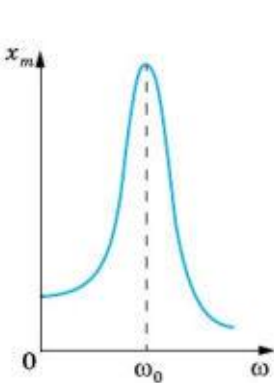


Рис. 5.17

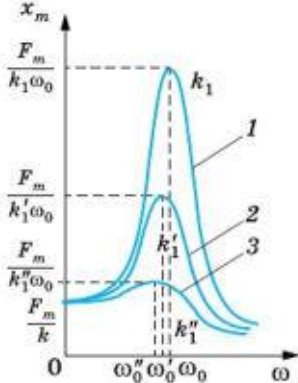


Рис. 5.18

свободных колебаний, то возникает резонанс. Амплитуда колебаний может возрасти настолько, что возможна поломка машин. Во всех этих случаях принимаются специальные меры, чтобы не допустить наступления резонанса или ослабить его действие. Для этого увеличивают затухание в системе или же добиваются того, чтобы собственные частоты колебаний не совпадали с частотой внешней силы.



Рис. 5.19

***АВТОКОЛЕБАНИЯ.** Колебания в системе могут быть незатухающими и без действия внешней периодически изменяющейся силы. Если внутри системы, способной совершать свободные колебания, имеется источник энергии и система сама может регулировать поступление энергии к колеблющемуся телу для компенсации потерь на трение, то в ней могут возникнуть незатухающие колебания.

Примером системы такого типа являются часы с маятником и гирями. Система обладает определённым запасом энергии — потенциальной энергией гири, поднятой над Землёй, или энергией сжатой пружины. Гиря приводит во вращение храповое колесо с косыми зубцами (рис. 5.19). С маятником скреплена дугообразная планка *ab* — анкер* с двумя выступами по краям. С помощью анкера маятник управляет вращением храпового колеса и связанной с ним стрелки часов. При этом энергия от гири порциями поступает к маятнику. В изображённом на рисунке положении зубец давит на скос выступа *b* анкера и толкает маятник влево.

После прохождения маятником положения равновесия выступ *b* соскальзывает с зубца, но почти сразу же анкер внешним скосом выступа *a* упирается в другой зубец храпового колеса, и маятник испытывает толчок в другую сторону. В результате дважды за период маятник получает энергию, сам открывая и закрывая доступ энергии от источника. Незатухающие колебания маятника происходят с частотой, почти точно равной частоте его свободных колебаний, если трение в системе мало. Именно поэтому часы обладают регулярным ходом.

Системы, подобные часам, в которых генерируются незатухающие колебания за счёт поступления энергии от источника, называют *автоколебательными системами*. Незатухающие колебания, которые могут существовать в системе без воздействия на неё внешних периодических сил, называются *автоколебаниями*.

Автоколебания отличаются от свободных колебаний тем, что, во-первых, они не затухают с течением времени и, во-вторых, их амплитуда не зависит от начального кратковременного воздействия («толчка»), ко-

* Немецкое слово «анкер» означает «якорь».

торое возбуждает колебания. Частота и амплитуда автоколебаний определяются свойствами самой системы.

К автоколебательным системам относят также электрический звонок с прерывателем, органную трубу, свисток и многое другое. Наше сердце и лёгкие тоже можно рассматривать как автоколебательные системы. *



1. Какие колебания называют вынужденными? **2.** Как записывается уравнение движения для вынужденных колебаний? **3.** В чём состоит явление резонанса? **4.** Почему при резонансе создаются оптимальные условия для перекачки энергии от внешних тел к системе? **5.** Какое влияние оказывает сопротивление в системе на резонанс? **6.** Какие колебания называют автоколебаниями? Чем они отличаются от свободных колебаний?



1. Если длину математического маятника уменьшать, когда он проходит положение равновесия, и увеличивать в те моменты, когда его отклонение максимально, то амплитуда колебаний маятника начинает возрастать. Как это можно объяснить?

2. Почему при некоторой скорости движения оконные стёкла в пассажирском автобусе начинают дребезжать?

3. Для того чтобы отвести качели с сидящим на них человеком на больший угол, необходимо приложить значительную силу. Почему же раскачать качели до такого же угла отклонения можно с помощью значительно меньшего усилия?



УПРАЖНЕНИЯ

1. Груз массой 200 г на пружине с жёсткостью 100 Н/м совершает колебания, график которых представлен на рисунке 5.20. Почему при этом уменьшается амплитуда колебаний? Чему равна механиче-

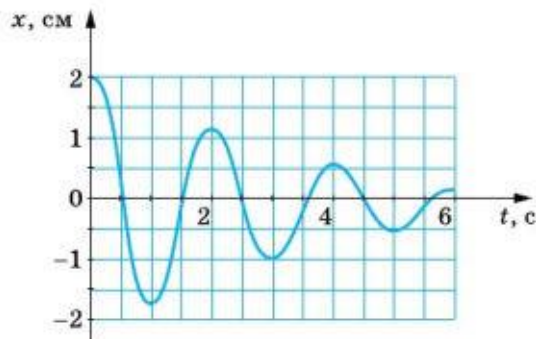


Рис. 5.20

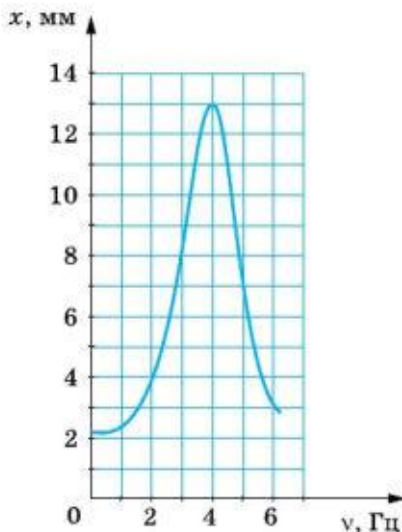


Рис. 5.21

ская энергия колебательной системы в начальный момент времени? Через какое время эта энергия уменьшится в 4 раза?

2. На рисунке 5.21 приведена резонансная кривая для балки, на которой укреплен электродвигатель. При какой частоте вращения ротора будут наблюдаться сильные колебания балки?
3. При какой скорости поезда возникает резонанс, если длина железнодорожного рельса между стыками равна 25 м, а период собственных колебаний вагона составляет 1,25 с?

§ 29

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВОГО ДВИЖЕНИЯ. Каждый из нас наблюдал, как от камня, брошенного на спокойную поверхность пруда или озера, кольцами разбегаются волны (рис. 5.22). Многие следили за морскими волнами, набегающими на берег.

Почему возникают волны? Отдельные частицы любого тела (твёрдого, жидкого или газообразного) взаимодействуют друг с другом. Если в каком-либо участке упругой среды возникнет деформация, то по прекращении внешних воздействий она не останется на месте, а начнёт распространяться в среде во всех направлениях.

Изменение состояния среды, распространяющееся в пространстве с течением времени, называют волной.

В воздухе, в твёрдых телах и внутри жидкостей механические волны возникают благодаря силам упругости (*упругие волны*). Эти силы осуществляют связь между отдельными частями тела. Главная особенность волнового движения состоит в том, что *при распространении волны происходит передвижение формы (перемещение определённого состояния колеблющейся среды), но не перенос вещества, в котором распространяется волна*. Возникшие в одном месте возмущения воды, например от брошенного камня, передаются соседним участкам и постепенно распространяются во все стороны. Но течения воды не возникает: перемещается лишь форма её поверхности.

При распространении волны происходит передача движения от одного участка тела к другому. С передачей движения волной связана передача энергии. Энергия поступает от источника, возбуждающего колебания начала шнура, струны и т. д., и распространяется вместе с волной.



Рис. 5.22

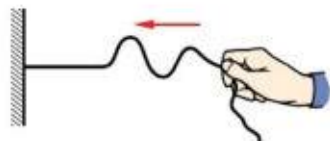


Рис. 5.23



Рис. 5.24

ПОПЕРЕЧНЫЕ И ПРОДОЛЬНЫЕ ВОЛНЫ. Будем наблюдать волны, распространяющиеся вдоль резинового шнура. Если один конец шнура закрепить и, слегка натянув шнур рукой, привести другой его конец в колебательное движение, то по шнуру побежит волна (рис. 5.23). Волна добежит до точки закрепления, отразится и побежит назад. При распространении волны происходят изменения формы шнура. Каждый же участок шнура колеблется относительно своего неизменного положения равновесия. Обратите внимание на то, что при распространении волны вдоль шнура отдельные его участки совершают колебания в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны (рис. 5.24). Такие волны называют *поперечными*.

Колебания могут происходить и вдоль направления распространения волны (рис. 5.25). Такую волну называют *продольной*. Продольную волну удобно наблюдать с помощью длинной мягкой пружины большого диаметра. Ударив ладонью по одному из концов пружины (рис. 5.26, а), можно заметить, как сжатие (упругий импульс) бежит по пружине. С помощью серии последовательных ударов можно возбудить в пружине волну, представляющую собой последовательные сжатия и растяжения пружины, бегущие друг за другом (рис. 5.26, б). Колебания любого витка пружины происходят в направлении распространения волны.



Рис. 5.25

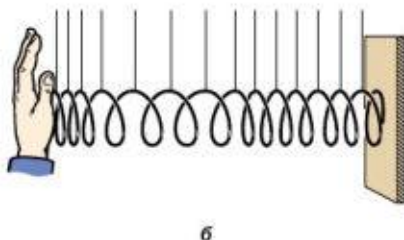
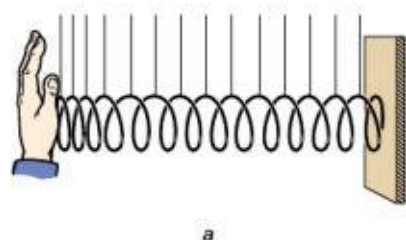


Рис. 5.26

МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ ВОЛНЫ. Рассмотрим процесс распространения поперечной волны более детально. Для этого вместо реального шнура возьмём цепочку одинаковых металлических шаров, подвешенных на тонких нитях. Шары связаны между собой пружинами. Масса пружин много меньше массы шаров*.

Допустим, цепочка содержит 18 шаров. В начальный момент времени все они покоятся (рис. 5.27, а). Шар 1 приводится в колебательное движение в горизонтальной плоскости перпендикулярно всей цепочке шаров с периодом T и амплитудой s_m . По истечении времени $T/4$ он отклонится от положения равновесия на расстояние s_m . При этом он вовлекает в движение шар 2, который, в свою очередь, вовлекает шар 3 и т. д. Когда шар 1 достигает максимального отклонения от положения равновесия, шар 2 его ещё не достигнет, а шар 3 сместится от положения равновесия лишь на небольшое расстояние, шар 4 вообще ещё не успеет сдвинуться с места (рис. 5.27, б). В момент времени $t = T/4$ он только начнёт движение. На рисунке 5.27, б и на всех последующих рисунках стрелки у шаров — это векторы скорости движения шаров в соответствующие моменты времени (вид сверху). При этом не обязательно, чтобы именно шар 4 начинал своё движение спустя четверть периода. Мы условно считаем, что в рассматриваемой модели колебания за время $T/4$ распространяются от шара 1 до шара 4.

Если подобным образом проследить далее за распространением колебаний (рис. 5.27, в, г), то можно убедиться в том, что спустя время T после начала процесса шар 1 окажется опять в положении равновесия, а колебания уже достигнут шара 13 (рис. 5.27, д). После этого начнётся второй период колебаний (рис. 5.27, е).

ДЛИНА ВОЛНЫ. СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ. За один период колебания распространились от шара 1 до шара 13 (см. рис. 5.27, д).

Расстояние, на которое распространяются колебания за один период, называют длиной волны.

После того как колебания достигнут шара 13, шары 1 и 13 колеблются совершенно одинаково. Когда шар 1 находится в положении равновесия и движется влево (см. рис. 5.27, д), то и шар 13 находится в положении равновесия и тоже движется влево. Спустя ещё четверть периода шар 1 оказывается максимально отклонённым влево и в таком же положении

* Эту же модель можно использовать для объяснения возникновения продольной волны. В этом случае шары подвешены так, что могут колебаться вдоль цепочки.

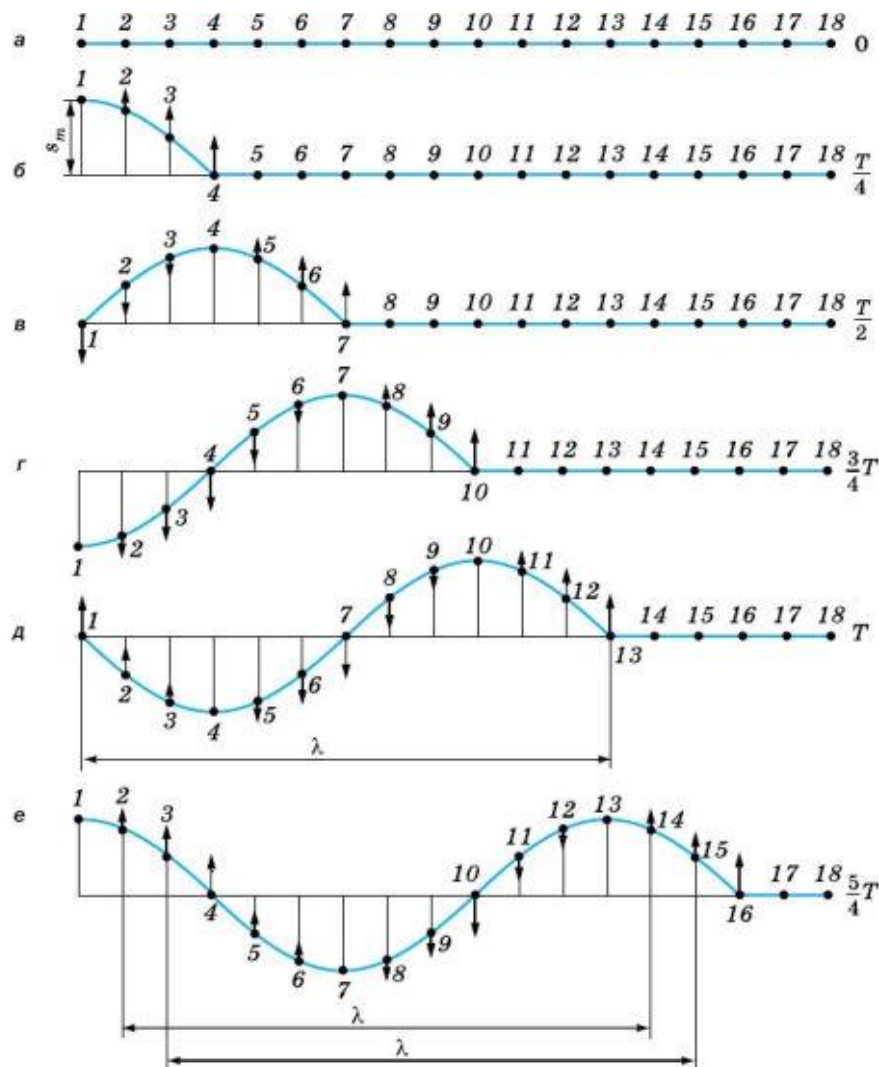


Рис. 5.27

находится шар 13 (см. рис. 5.27, е). Колебания этих шаров происходят с одинаковыми фазами*.

* Точнее, колебаний шара 13 отстают по фазе от колебаний шара 1 на 2π . Но так как $\sin(\omega t - 2\pi) = \sin \omega t$, то такая разность фаз не приводит к различию в состояниях колеблющихся шаров, и можно говорить, что колебания шаров происходят в одинаковых фазах.

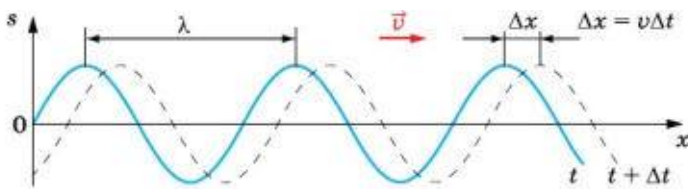


Рис. 5.28

Поэтому длиной волны можно назвать также наименьшее расстояние между точками, колеблющимися с одинаковыми фазами.

Поскольку за один период волна распространяется на расстояние, равное длине волны λ , то её скорость определяется формулой

$$v = \frac{\lambda}{T}.$$

Так как период T и частота ν связаны соотношением $T = \frac{1}{\nu}$, то

$$v = \lambda \nu.$$

Скорость распространения волны равна произведению её длины на частоту колебаний.

При распространении волны мы имеем дело с периодичностью двоякого рода. Во-первых, каждая частица среды совершает периодические колебания во времени. Во-вторых, в данный момент времени форма волны повторяется в пространстве через отрезки длиной λ вдоль линии распространения волны. На рисунке 5.28 показан профиль волны в определённый момент времени (сплошная линия). С течением времени эта картина перемещается со скоростью $\vec{v}$ слева направо. Спустя промежуток времени $\Delta t = \frac{\Delta x}{v}$ волна будет иметь вид, изображённый на рисунке 5.28 пунктиром.

- ?** 1. Что называют волной? 2. Какая волна является: а) поперечной; б) продольной? 3. Приведите примеры продольных и поперечных волн. 4. Какую физическую величину называют: а) длиной волны; б) скоростью распространения волны? 5. Как связаны между собой длина волны и скорость её распространения?

- ??** 1. Осуществляется ли в механической волне перенос: а) вещества; б) энергии? Почему? 2. На рисунке 5.29 показан моментальный снимок участка шнура, по которому в указанном направлении бежит поперечная волна. Как направлена в данный момент времени скорость точки В?

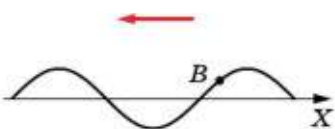


Рис. 5.29

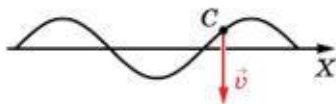


Рис. 5.30

3. На рисунке 5.30 изображён профиль поперечной волны в определённый момент времени и показано направление мгновенной скорости точки C . Определите направление распространения волны.



УПРАЖНЕНИЯ

1. Определите длину волны при частоте колебаний источника 200 Гц, если скорость её распространения равна 340 м/с.
2. В океане длина волны равна 250 м, а период колебаний составляет 20 с. С какой скоростью распространяется волна?
3. По поверхности воды в озере волна распространяется со скоростью, равной 6 м/с. Чему равны период и частота колебаний бакена, если длина волны 3 м?
4. Волны в первой среде имеют длину $\lambda_1 = 2$ м, а после перехода во вторую среду — $\lambda_2 = 4$ м. Определите скорость распространения волн во второй среде, если их скорость в первой среде $v_1 = 100$ м/с.
5. Мимо неподвижного наблюдателя за 10 с прошло 5 гребней волн, начиная с первого со скоростью 4 м/с. Чему равны длина волны и частота колебаний источника?

§ 30

ВОЛНЫ В СРЕДЕ. ЗВУК

ПЛОСКАЯ ВОЛНА. Волна при своём распространении от источника в сплошной среде постепенно захватывает всё большие области пространства. Энергия, которую несут с собой волны от источника, с течением времени распределяется по всё большей поверхности. Поэтому энергия, переносимая через данную площадку за данный промежуток времени, уменьшается по мере удаления от источника. Следовательно, и амплитуда колебаний уменьшается по мере удаления от источника. Исключение составляет так называемая *плоская волна*. Такую волну можно получить, если поместить в упругую среду пластину и заставить её колебаться в направлении нормали к пластине. Все точки среды, примыкающие к пластине, будут совершать колебания с одинаковыми амплитудами и в одной и той же фазе. Эти колебания будут распространяться в виде волн в направле-

лярном распространению волны. При этом происходит деформация сдвига. Отдельные слои вещества сдвигаются друг относительно друга, объём тела не изменяется. При деформации сдвига в твёрдом теле возникают силы упругости, стремящиеся вернуть тело в исходное состояние. Именно эти силы и вызывают колебания среды.

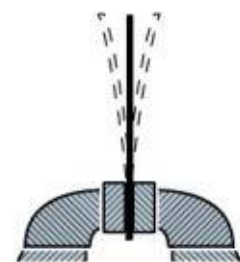
Сдвиг слоёв относительно друг друга в газах и жидкостях не приводит к появлению сил упругости. Поэтому в газах и жидкостях не могут существовать поперечные волны. *Поперечные волны возникают только в твёрдых телах.*

В продольной волне происходит деформация сжатия и растяжения. Силы упругости, связанные с этой деформацией, возникают как в твёрдых телах, так и в жидкостях и газах. Эти силы вызывают колебания отдельных участков среды, поэтому *продольные волны могут распространяться во всех средах.*

ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ. Звуковые волны занимают особое место среди всех видов упругих волн. Чтобы услышать звук, необходимы источник звука, передающая среда, приёмник.



Обратимся к опыту. Если длинную железную линейку зажать в тисках или плотно прижать к краю стола, то, отклонив конец линейки от положения равновесия, мы возбудим её колебания (рис. 5.34, а). Но эти колебания не будут восприниматься нашим ухом. Если укоротить выступающий конец линейки (рис. 5.34, б), то колеблющаяся линейка становится источником звука.



а



б

Рис. 5.34

Пластина сжимает прилегающий к одной из её сторон слой воздуха и одновременно создаёт разрежение с другой стороны. Эти сжатия и разрежения чередуются во времени и распространяются в обе стороны в виде упругой продольной волны. Она достигает нашего уха и вызывает вблизи него периодические колебания давления, которые воздействуют на слуховой аппарат.

Наше ухо воспринимает в виде звука колебания, частота которых лежит в пределах от 16 до 20 000 Гц. Если говорить о звуковых волнах, создаваемых при игре на рояле, то нижняя граница нашего слуха будет чуть ниже звучания самой басовой клавиши, а верхняя — намного выше самой высокой. Такие колебания называются *акустическими*.

Чем короче выступающий конец линейки, тем больше частота его колебаний. Поэтому мы начинаем

слышать звук, когда конец линейки становится достаточно коротким. Любое тело (твёрдое, жидкое или газообразное), колеблющееся со звуковой частотой, создаёт в окружающей среде звуковую волну. *Звуковые волны могут быть как поперечными, так и продольными, в зависимости от среды.*

СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН. Звуковые волны распространяются в пространстве не мгновенно, а с определённой скоростью. Скорость распространения звука в различных средах имеет разные значения. Так, при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ скорость звука в воздухе равна 331 м/с . В воде скорость звука больше, чем в воздухе. При температуре $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ скорость звука в воде равна 1435 м/с . В твёрдых телах скорость звука больше, чем в жидкостях, и, естественно, больше, чем в воздухе. Например, скорость звука в стали при $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ лежит в диапазоне $5800\text{—}6100\text{ м/с}$.

Скорость звука в газе не зависит от давления газа, но возрастает с повышением абсолютной температуры. Чем больше масса молекул газа, тем меньше скорость звука в нём. Так, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ скорость звука в водороде равна 1270 м/с , а в углекислом газе — 258 м/с .

МУЗЫКАЛЬНЫЕ ЗВУКИ. Чем с точки зрения физики отличаются музыкальные звуки от шума и по какой причине столь несхожими могут быть музыкальные звуки между собой? Чистый музыкальный звук можно получить с помощью камертона. На рисунке 5.35 показан камертон, который закреплён на деревянном ящике, открытом с одной стороны. Ударив молоточком по одной из ветвей камертона, мы услышим музыкальный звук. Постепенно звук ослабевает вследствие затухания колебаний ветвей камертона.

Звуковая волна возбуждается колеблющимися ветвями камертона. Характер этих колебаний можно установить, если прикрепить к ветви камертона иглу и провести ею с постоянной скоростью по поверхности закопчённой стеклянной пластинки. На пластинке появится линия, очень близкая к синусоиде (рис. 5.36).

Это временная развёртка колебаний, подобная той, которую получают с помощью маятника с песочницей. Отсюда можно заключить, что колебания ветвей камертона очень близки к гармоническим.

Звук, издаваемый гармонически колеблющимся телом, называют музыкальным тоном или просто тоном.



Рис. 5.35

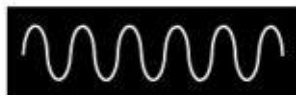


Рис. 5.36

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКА. Музыкальные тоны различаются на слух громкостью и высотой.

Громкость характеризует субъективное звуковое ощущение. Опыты показывают, что чем больше амплитуда колебаний ветвей камертона, тем громче звук. Для того чтобы определить, с чем связана определённая *высота тона*, нужно располагать несколькими камертонами различных размеров. Проводя иглой, прикреплённой к ветви звучащего камертона, вдоль закопчённой пластинки, можно заметить, что чем выше звук, издаваемый камертоном, тем меньше период появляющейся на пластинке синусоиды и, следовательно, тем больше частота колебаний камертона. Высота звука (точнее, высота тона) показывает, является ли звук высоким, как у скрипки, или низким, как звук большого барабана. Физической величиной, характеризующей высоту тона, является частота колебаний звуковой волны.

Музыкальные тоны отличаются друг от друга не только громкостью и высотой. Струна гитары издаёт вполне определённый тон. Но если вы попробуете возбудить её колебания, сначала оттянув струну в средней части, а затем на расстоянии $1/4$ длины от конца, то звуки будут не совсем одинаковыми. Имея одинаковую частоту и примерно одинаковую громкость, эти звуки отличаются друг от друга специфическим оттенком. Это особое качество звука называют *тембром*. Колебание с наименьшей частотой называют *основным тоном*, а остальные колебания (с большими частотами) — *обертонами* (или *гармониками*).

В обсуждаемом примере на струне укладывается половина длины волны, и возникают колебания основной частоты. Во втором случае наряду с основным тоном заметную амплитуду будет иметь и первый обертон*. В произвольном же случае колебаний струны вместе с основным тоном возбуждается много различных обертонов.

Тембр звука определяется числом обертонов и их амплитудами. Именно по тембру мы различаем звуки одинаковой высоты: человеческий голос, свист, звук струны рояля или кларнета.

ШУМ. В отличие от музыкальных звуков, шуму не соответствует какая-либо определённая частота колебаний и, следовательно, определённая высота тона. В шуме присутствуют колебания всевозможных частот. Источниками шумов являются промышленные предприятия, бытовые приборы, машины. Шумы вредно влияют на человека и животных. Длительное воздействие шумов на человека приводит к повреждению, например, центральной нервной системы, головокружению, нарушению нормальной работы сердца.

В населённых пунктах для борьбы с шумовым загрязнением среды используют такие меры, как замена шумных видов городского транспорта

* В отличие от основного тона, для колебаний первого обертона характерно то, что на струне укладывается не половина, а целая длина волны.

менее шумными, запрещение звуковых сигналов транспорта (за исключением охранной сигнализации и специальной техники), звукоизоляция жилых зданий, ограничение бытовых шумов и др.



1. Почему амплитуда колебаний уменьшается по мере удаления от источника? **2.** Что называют: а) плоской волной; б) лучом; в) фронтом волны? **3.** В каких средах распространяются поперечные и продольные волны? **4.** В каком диапазоне частот ухо человека воспринимает колебания в виде звука? **5.** В какой среде (воздухе или воде) скорость распространения звука больше? **6.** Приведите основные характеристики звуковых волн. От каких физических величин они зависят?



1. Известно, что если источник звука и человек находятся на одной высоте, то в направлении ветра звук слышен лучше, чем в противоположном. Как это можно объяснить?

2. Почему иногда, когда мы идём по снегу, он скрипит под ногами?



УПРАЖНЕНИЯ

1. Длина звуковой волны в воздухе для самого низкого мужского голоса достигает 4,3 м, а для самого высокого женского голоса — 25 см. Найдите частоту колебаний этих голосов.
2. Частота колебаний камертона равна 440 Гц. Чему равна длина волны, распространяющейся от камертона: а) в воздухе; б) в воде? Скорость звука при 0 °С в воздухе равна 330 м/с, в воде — 1400 м/с.
3. Во время грозы человек услышал гром через 15 с после вспышки молнии. Как далеко от него произошёл разряд?
4. Расстояние между двумя железнодорожными станциями равно 8,3 км. Сколько времени распространяется звук от одной станции к другой: а) по воздуху; б) по рельсам? Температура воздуха равна 0 °С, скорость распространения звука в стали — 5500 м/с.
5. Звук взрыва, произведённого в воде вблизи поверхности, приборы, установленные на корабле и принимающие звук в воде, зарегистрировали на 45 с раньше, чем он пришёл по воздуху. На каком расстоянии от корабля произошёл взрыв? Скорость звука в воздухе равна 330 м/с, скорость звука в воде — 1400 м/с.

Это любопытно...

Интересные факты

Шепчущая галерея — помещение, обладающее следующей особенностью: шёпот в нём хорошо распространяется вдоль стен, но не слышен в остальной части помещения. Обычно такие помещения имеют круглую или эллиптическую форму.





Рис. 5.37

В помещениях круглой формы шёпот стоящего у стены человека будет слышен вдоль стен, но не в центре помещения. В помещениях эллиптической формы слова, произнесённые шёпотом в одном из фокусов эллипса, будут услышаны только в другом фокусе, но не в остальном помещении. Шёпот будет услышан, даже если расстояние между фокусами весьма существенно.

Английский физик Джон Уильям Стрэтт (лорд Рэлей) (1843—1919) пер-

вым объяснил загадку шепчущей галереи, расположенной под куполом лондонского собора Святого Павла (рис. 5.37). Непрерывно отражаясь от стен купола, звуковые волны распространяются в узком «поясе» вдоль стены. Если наблюдатель стоит внутри этого пояса, он слышит шёпот. За пределами этого «пояса», дальше от стены, шёпот не слышен.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ И ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

1. Соберите экспериментальную установку и выполните проект на тему «Изучение стоячих волн в струне».
2. Выполните проектную работу на тему «Связанные колебания». Соберите экспериментальную установку, проведите видео- и фотосъёмку экспериментов.
3. Проведите измерения скорости распространения звуковой волны в твёрдом теле.

Примерные темы рефератов и проектов

1. Экспериментальное исследование различных колебательных систем.
2. Стетоскоп, фонендоскоп, фонограф: устройство и принцип действия.
3. Наблюдение и исследование акустического резонанса.
4. Ультразвук и инфразвук: основные свойства и применение.



Глава 6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ



Колебания, при которых происходят периодические или почти периодические изменения заряда, силы тока и напряжения в электрической цепи, называют *электромагнитными колебаниями* (используется также термин «электрические колебания»).

Периодические изменения силы тока (или напряжения) в зависимости от времени, происходящие по закону синуса или косинуса, называют *гармоническими электромагнитными колебаниями*. Среди периодических токов наибольшее распространение на практике получил *переменный ток*.

Согласно теории электромагнитного поля Максвелла, изменяющееся во времени электромагнитное поле способно распространяться в пространстве в виде *электромагнитных волн*. С помощью них осуществляется радиосвязь, телевидение, мобильная телефония, радиолокация и др. Знакомству с особенностями электромагнитных колебаний, распространения электромагнитных волн и их свойств посвящена данная глава.

§ 31

СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР

НАБЛЮДЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ. Возбудить электромагнитные колебания, как и заставить тело колебаться, подвесив его на пружине, не составляет большого труда. Но наблюдать электромагнитные колебания уже не так просто, так как они обычно происходят с очень большой частотой.



Для наблюдения и исследования электрических колебаний используют электронный осциллограф. Если присоединить вертикально отклоняющие пластины осциллографа к конденса-



Рис. 6.1

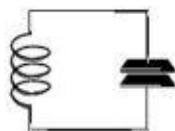


Рис. 6.2

тору, то колебания напряжения при его перезарядке вызовут колебания электронного луча в вертикальном направлении.

В результате на экране осциллографа образуется временная развёртка затухающих колебаний (рис. 6.1), подобная той, которую «вычерчивает» маятник с песочницей на равномерно движущемся листе картона.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ. Простейшая система, в которой могут возникнуть свободные электромагнитные колебания, состоит из конденсатора и катушки, соединённых последовательно (рис. 6.2). Такую систему называют *колебательным контуром*.

Рассмотрим, почему в этой системе возникают колебания. Для наглядности будем сравнивать процессы в контуре с колебаниями шарика на пружине. Зарядим конденсатор, присоединив его к батарее с помощью переключателя (рис. 6.3, а).

При этом конденсатору сообщается энергия

$$W_a = \frac{q_m^2}{2C},$$

где q_m — амплитуда колебаний заряда на обкладках конденсатора; C — его ёмкость.

Между обкладками конденсатора возникает разность потенциалов U_m . В случае шарика на пружине это эквивалентно тому, что мы увеличили длину пружины на x_m , сообщив системе потенциальную энергию, но держим пока шарик рукой, не позволяя ему двигаться (рис. 6.3, б). Переведём переключатель в положение 2 (рис. 6.3, в). Конденсатор при этом начнёт разряжаться через катушку индуктивности, и в цепи появится электрический ток. Возникновение тока эквивалентно появлению у шарика скорости, когда мы его отпускаем.



Рис. 6.3

На рисунке 6.4 изображены последовательные фазы перезарядки конденсатора и рядом для сравнения фазы колебания шарика на пружине (положение равновесия шарика отмечено горизонтальной линией).

Начальному моменту после перевода переключателя в положение 2 соответствует рисунок 6.4, *а*. Вследствие явления самоиндукции сила тока в катушке контура увеличивается постепенно (рис. 6.4, *б*). Точно так же вследствие инертности шарика его скорость движения увеличивается постепенно. По мере разрядки конденсатора энергия электрического поля уменьшается, но одновременно возрастает энергия магнитного поля тока

$$W_m = \frac{Li^2}{2},$$

где L — индуктивность катушки контура.

В момент, когда конденсатор полностью разрядится ($q = 0$), энергия электрического поля станет равной нулю. Но энергия магнитного поля в этот момент будет максимальной. Следовательно, сила тока также достигнет максимального значения I_m (рис. 6.4, *в*). Этому моменту соответствует прохождение шарика через положение равновесия с максимальной скоростью $\vec{v}_m$. В момент прохождения положения равновесия шарик не обладает потенциальной энергией, но при этом его кинетическая энергия максимальна. К этому моменту разность потенциалов между выводами катушки становится равной нулю, но электрический ток в контуре не прекращается сразу. Этому препятствует самоиндукция. Как только сила тока и созданное током магнитное поле начнут уменьшаться, воз-

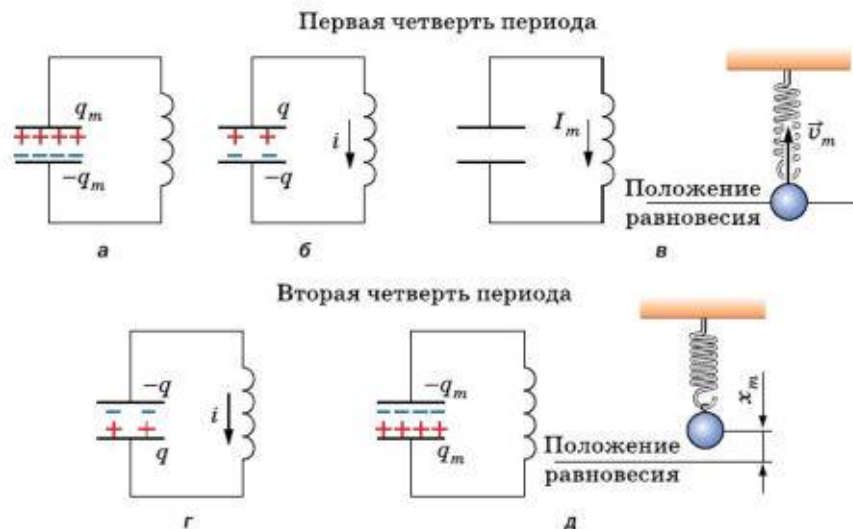


Рис. 6.4

никнет вихревое электрическое поле, которое направлено по току и под-
держивает его, в результате чего конденсатор начнёт перезаряжаться
(рис. 6.4, *г*).

Конденсатор перезаряжается до тех пор, пока сила тока, постепенно
уменьшаясь, не станет равной нулю. Энергия магнитного поля в этот мо-
мент также равна нулю, а энергия электрического поля конденсатора
снова станет максимальной (рис. 6.4, *д*). При колебаниях шарика это-
му моменту соответствует остановка его в крайнем верхнем положении,
когда максимальна потенциальная энергия. Далее процесс протекает
в обратном порядке и конденсатор опять перезаряжается.

Если бы в контуре не было потерь энергии, то этот процесс продолжал-
ся бы сколь угодно долго: колебания были бы незатухающими. Через
промежутки времени, равные периоду колебаний, состояния системы
в точности повторялись бы. Контур, в котором не происходит потерь
энергии, называют *идеальным*. Но в действительности потери энергии
неизбежны. Катушка и соединительные провода обладают сопротивле-
нием R , и это приводит к выделению количества теплоты. Аналогично
действие сил трения ведёт к убыли механической энергии шарика и зату-
ханию его колебаний.

Аналогия между механическими и электрическими величинами иллю-
стрируется таблицей 1.

Соответствие между m и L , k и $\frac{1}{C}$ видно из сопоставления выражений
для энергии.

Таблица 1

Механические величины	Электрические величины
Координата x	Заряд q
Скорость $v_x = x'$	Сила тока $i = q'$
Ускорение $a_x = v'_x$	Скорость изменения силы тока i'
Масса m	Индуктивность L
Жёсткость пружины k	Величина, обратная ёмкости, $\frac{1}{C}$
Коэффициент сопротивления k_1	Сопротивление R
Потенциальная энергия $\frac{kx^2}{2}$	Энергия электрического поля $\frac{q^2}{2C}$
Кинетическая энергия $\frac{mv_x^2}{2}$	Энергия магнитного поля $\frac{Li^2}{2}$

ФОРМУЛА ТОМСОНА. Используя аналогию между свободными механическими и свободными электрическими колебаниями, можно записать выражения для частоты и периода свободных электрических колебаний. Так как в формуле для циклической частоты свободных колебаний шарика на пружине $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ величина k аналогична $\frac{1}{C}$, а m — индуктивности L , то частота свободных электрических колебаний должна быть равна

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Для периода свободных колебаний можно записать:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (1)$$

Формула (1) называется *формулой Томсона* в честь английского физика У. Томсона, который её впервые получил в 1853 г.



1. Какие колебания называют электромагнитными? **2.** Из каких элементов состоит колебательный контур? **3.** Почему свободные электромагнитные колебания в контуре затухают со временем? **4.** Какие преобразования энергии происходят в идеальном колебательном контуре? **5.** Между какими физическими величинами устанавливает связь формула Томсона?



1. В колебательном контуре изменили начальную величину заряда на обкладках конденсатора. Какие характеристики возникающих в контуре свободных электромагнитных колебаний при этом изменятся, а какие нет?

2. Сравните процессы, происходящие в колебательном контуре, с колебаниями математического маятника.



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

При изменении ёмкости конденсатора колебательного контура на 0,72 мкФ период свободных электромагнитных колебаний увеличился в 14,1 раза. Найдите первоначальную ёмкость конденсатора, если индуктивность катушки осталась неизменной.

Дано:

$$\Delta C = 0,72 \text{ мкФ}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = 14,1$$

$$L_1 = L_2 = L$$

$$C_1 = ?$$

СИ:

$$0,72 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

Решение:

Запишем формулу Томсона для двух рассматриваемых случаев:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{LC_1}, \quad T_2 = 2\pi\sqrt{LC_2},$$

$$\text{где } C_2 = C_1 + \Delta C.$$

Найдём отношение периодов колебаний

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{2\pi\sqrt{LC_2}}{2\pi\sqrt{LC_1}} = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} = \sqrt{\frac{C_1 + \Delta C}{C_1}}$$

и возведём его в квадрат:

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^2 = \frac{C_1 + \Delta C}{C_1} = 1 + \frac{\Delta C}{C_1}.$$

Отсюда

$$C_1 = \frac{\Delta C}{\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^2 - 1}.$$

Подставляя числовые данные, получим

$$C_1 = \frac{0,72 \cdot 10^{-6}}{14,1^2 - 1} \Phi = 3,64 \cdot 10^{-9} \Phi = 3,64 \text{ нФ}.$$

Ответ: $C_1 = 3,64 \text{ нФ}$.

УПРАЖНЕНИЯ

1. Найдите период свободных электромагнитных колебаний в колебательном контуре с параметрами: а) $C = 5 \text{ мкФ}$, $L = 15 \text{ Гн}$; б) $C = 4 \text{ мкФ}$, $L = 0,49 \text{ Гн}$; в) $C = 6 \text{ нФ}$, $L = 15 \text{ мкГн}$; г) $C = 8 \cdot 10^{-5} \Phi$, $L = 2 \text{ мГн}$.
2. Чему равна частота колебаний в колебательном контуре, состоящем из конденсатора ёмкостью 2 пФ и катушки индуктивностью $0,5 \text{ мкГн}$?
3. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью 3 мГн и плоского конденсатора ёмкостью $13,4 \text{ пФ}$. Определите период свободных электромагнитных колебаний в контуре. Каким будет период колебаний, если пространство между обкладками конденсатора заполнить стеклом?
4. Индуктивность катушки, входящей в колебательный контур, равна 500 мкГн . Контур требуется настроить на частоту 1 МГц . Какой должна быть ёмкость конденсатора?
5. Катушку какой индуктивности следует включить в колебательный контур, чтобы при ёмкости 2 мкФ получить свободные электромагнитные колебания с периодом 10^{-3} с ?



ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ЗАРЯДА, СИЛЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ. Подобно тому как координата при механических колебаниях меняется по гармоническому закону, точно так же заряд конденсатора меняется по закону синуса или косинуса:

$$q = q_m \sin(\omega t + \varphi_0) \text{ или } q = q_m \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

где q_m — амплитуда колебаний заряда; φ_0 — начальная фаза колебаний.

Эти величины определяются начальными условиями, т. е. значениями заряда и силы тока в начальный момент времени: $q(0) = q_0$ и $i(0) = i_0$.

Если в начальный момент времени $q(0) = q_0$, а $i(0) = 0$, то колебания совершаются по косинусоидальному закону с нулевой начальной фазой $\varphi_0 = 0$ и амплитудой $q_m = q_0$:

$$q = q_0 \cos \omega t.$$

Точно так же изменяется координата груза на пружине, если вывести груз из положения равновесия и не сообщать ему начальной скорости. Сила тока в контуре $i = q'$ (q' — производная заряда по времени) также совершает гармонические колебания.

Если $q = q_m \cos(\omega t + \varphi_0)$, то

$$i = q' = -q_m \omega \sin(\omega t + \varphi_0) = I_m \cos\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right), \quad (2)$$

где $I_m = \omega q_m$ — амплитуда колебаний силы тока.

Сопоставив уравнения (1) и (2), можно сделать вывод, что *колебания силы тока опережают колебания заряда по фазе на $\frac{\pi}{2}$* (рис. 6.5).

Напряжение на обкладках конденсатора также изменяется по гармоническому закону:

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{q_m}{C} \cos \omega t,$$

$$U_C = U_m \cos \omega t,$$

где $U_m = \frac{q_m}{C}$ — амплитуда колебаний напряжения на обкладках конденсатора.

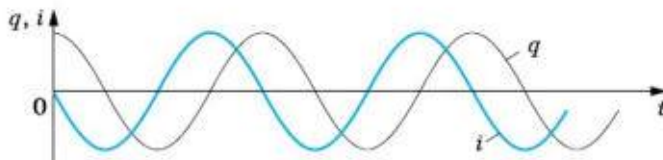


Рис. 6.5

ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ. Как изменяются энергии электрического и магнитного полей в идеальном колебательном контуре? Для ответа на этот вопрос воспользуемся рисунком 6.6. Поскольку потерь энергии в рассматриваемом контуре нет, энергия всей колебательной системы (контра) постоянно перераспределяется между конденсатором и катушкой.

Рассмотрим момент, когда заряд конденсатора максимален и равен q_m , а ток отсутствует. В данном случае энергия магнитного поля катушки в этот момент времени равна нулю. Вся энергия W контра сосредоточена в конденсаторе:

$$W = W_{\text{э}} = \frac{q_m^2}{2C}.$$

Теперь, наоборот, рассмотрим момент, когда ток максимален и равен I_m , а конденсатор полностью разряжен. Энергия электрического поля конденсатора в этот момент времени равна нулю. Вся энергия W контра запасена в катушке:

$$W = W_{\text{м}} = \frac{LI_m^2}{2}.$$

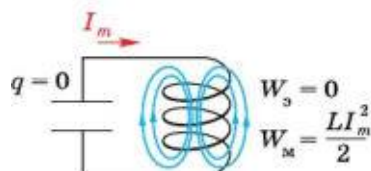
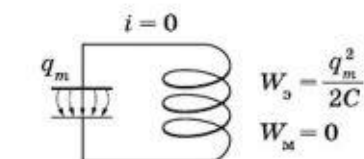
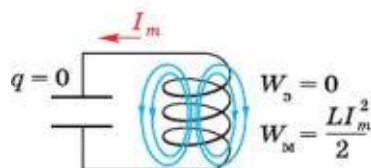
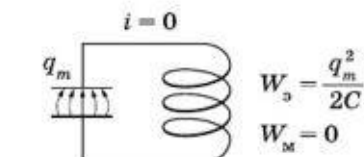


Рис. 6.6

При отсутствии потерь на нагревание вещества и излучение электромагнитных волн максимальное значение энергии электрического поля конденсатора контра равно максимальному значению энергии магнитного поля катушки:

$$\frac{CU_m^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2},$$

где U_m — максимальное значение напряжения на конденсаторе; I_m — максимальное значение силы тока в катушке. Согласно закону сохранения энергии, сумма мгновенных значений энергий электрического и магнитного полей в колебательном контуре в любой момент времени остаётся неизменной:

$$\frac{Cu^2}{2} + \frac{Li^2}{2} = \frac{CU_m^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2},$$

где u — мгновенное значение напряжения на конденсаторе; i — мгновенное значение силы тока в катушке.

Итак, в идеальном колебательном контуре в отдельные моменты времени энергия всей колебательной системы может сосредоточиться либо только в катушке индуктивности, либо только в конденсаторе. В действительности из-за энергетических потерь колебания будут затухающими. При достаточно большом сопротивлении колебания не возникают. Конденсатор разрядится, но его перезарядки при этом не произойдет.



1. По какому закону изменяются сила тока, напряжение и заряд при свободных электромагнитных колебаниях в контуре?
2. Как можно определить амплитуду колебаний: а) силы тока; б) напряжения на обкладках конденсатора?
3. Чему равна разность фаз между колебаниями силы тока и заряда в идеальном колебательном контуре?
4. В какие моменты времени энергия всей колебательной системы равна максимальному значению: а) энергии электрического поля; б) энергии магнитного поля?



На рисунке 6.7 показаны процессы, происходящие в идеальном колебательном контуре за один период, а на рисунке 6.8 — графики, выражающие зависимости мгновенных значений силы тока и напряжения от времени. а) Какому моменту времени соответствуют процессы в колебательном контуре, представленные на рисунке 6.7, в? Чему равна сила тока в катушке? б) Какому моменту времени соот-

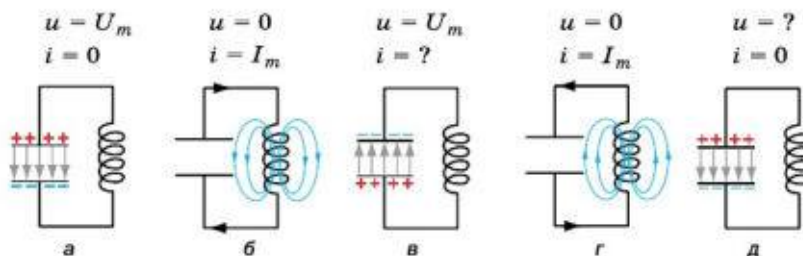


Рис. 6.7

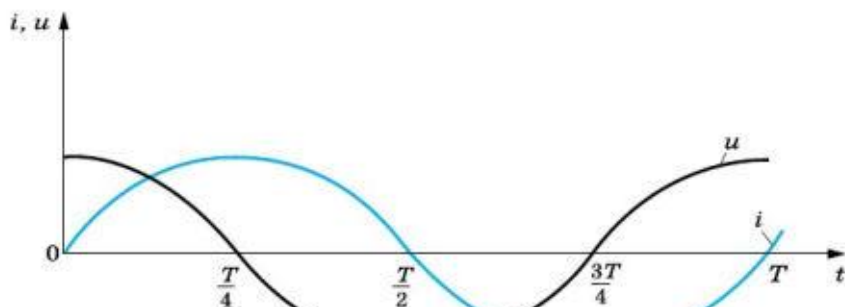


Рис. 6.8

ветствуют процессы в колебательном контуре, изображённые на рисунке 6.7, ∂ ? Чему равно напряжение на обкладках конденсатора? в) Какие преобразования энергии происходят в рассматриваемом контуре?



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Сила тока в идеальном колебательном контуре изменяется по гармоническому закону $i(t) = 0,02 \sin 500\pi t$ (А). Индуктивность контура равна 0,1 Гн. Определите период колебаний, ёмкость конденсатора, максимальную энергию магнитного поля, максимальную энергию электрического поля.

Дано:

$$i(t) = 0,02 \sin 500\pi t \text{ (А)}$$

$$L = 0,1 \text{ Гн}$$

$$T = ?$$

$$C = ?$$

$$W_m = ?$$

$$W_e = ?$$

Решение:

Запишем закон изменения силы тока в колебательном контуре $i(t) = I_m \sin \omega t$. Учитывая данные задачи, получаем, что $\omega = 500\pi \text{ с}^{-1}$, $I_m = 0,02 \text{ А}$.

Найдём максимальную энергию магнитного поля:

$$W_m = \frac{LI_m^2}{2}.$$

Эта энергия по закону сохранения энергии равна энергии колебательного контура W и максимальной энергии W_e электрического поля:

$$W_m = W_e.$$

Определим период колебаний в контуре:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Для определения ёмкости конденсатора воспользуемся формулой Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \Rightarrow C = \frac{T^2}{4\pi^2 L} = \frac{1}{\omega^2 L}.$$

Подставляя числовые данные, получим:

$$W_m = \frac{0,1 \cdot 0,02^2}{2} \text{ Дж} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}; \quad W_e = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Дж};$$

$$T = \frac{2\pi}{500\pi} \text{ с} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$C = \frac{1}{(500\pi)^2 \cdot 0,1} \text{ Ф} \approx 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 4 \text{ мкФ}.$$

Ответ: $W_e = W_m = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$; $T = 4 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; $C = 4 \text{ мкФ}$.



УПРАЖНЕНИЯ

1. Чему равны амплитуда колебаний, период и циклическая частота, если заряд конденсатора колебательного контура изменяется с те-



ВЫНУЖДЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ. Незатухающие вынужденные электромагнитные колебания имеют гораздо большее практическое значение, чем вынужденные механические колебания.

Вынужденными электромагнитными колебаниями называют периодические изменения силы тока и напряжения в электрической цепи, происходящие под действием переменной ЭДС от внешнего источника.

Вынужденные электромагнитные колебания обеспечивают работу электрических двигателей в станках на заводах и фабриках, приводят в действие осветительные приборы в наших квартирах и на улицах, холодильники и пылесосы, отопительные приборы и т. п.

Переменный ток в обычной осветительной цепи квартиры, в электродвигателях станков, применяемых на заводах и фабриках, представляет собой вынужденные электромагнитные колебания. При этом периодически меняется по гармоническому закону напряжение на концах цепи, и это вызывает гармонические колебания силы тока.

Переменный ток — ток, сила которого изменяется с течением времени по гармоническому закону.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕРАТОРА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. Простейшим генератором переменного тока является проводник в виде рамки, вращающейся вокруг оси в магнитном поле между полюсами постоянного магнита или электромагнита (рис. 6.11).



Рис. 6.11

Пусть в однородном магнитном поле с индукцией $\vec{B}$ находится замкнутая рамка, имеющая N витков. При вращении рамки с постоянной угловой скоростью ω в ней возникает ЭДС, изменяющаяся по гармоническому закону, — синусоидальная ЭДС индукции.

Для соединения рамки с внешней частью цепи используются контактные кольца, укрепленные на той же оси, на которой укреплена вращающаяся рамка. Кольца изолированы от оси и друг от друга. К ним припаиваются концы рамки, а над каждым кольцом устанавливаются неподвижные пружинящие скользящие контакты — щетки.

В результате в цепи под действием ЭДС индукции, изменяющейся с течением времени по гармоническо-



му закону, возникнут вынужденные электромагнитные колебания.

Запишем выражение для магнитного потока, пронизывающего один виток рамки (рис. 6.12):

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

При $t = 0$ угол $\alpha = 0$, при $t \neq 0$ угол $\alpha = \omega t$.

С учётом этого закон изменения магнитного потока имеет вид

$$\Phi(t) = BS \cos \omega t.$$

По закону электромагнитной индукции

$$e_i = -\Phi'(t) = -(BS \cos \omega t)',$$

$$e_i = BS \omega \sin \omega t,$$

где $\mathcal{E}_{im} = BS\omega$ — амплитуда ЭДС индукции e_i в одном витке.

Если вращающаяся рамка состоит из N витков, то в каждом из них возникнет ЭДС индукции. В силу того что между собой эти ЭДС соединены последовательно, то результирующая ЭДС получится в N раз больше, чем ЭДС в одном витке. Для N витков можно записать:

$$e_i = BSN\omega \sin \omega t.$$

Графики, выражающие зависимости $\Phi(t)$ и $e_i(t)$, приведены на рисунке 6.13.

КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЙ ТОК. При изменении напряжения на концах цепи электрическое поле не меняется мгновенно во всей цепи. Изменения поля распространяются хотя и с очень большой, но не бесконечно большой скоростью. Однако если время распространения изменения поля в цепи много меньше периода T колебаний напряжения, можно считать, что электрическое поле во всей цепи сразу же меняется при изменении напряжения на концах цепи. При этом сила тока в данный момент времени имеет практически одно и то же значение

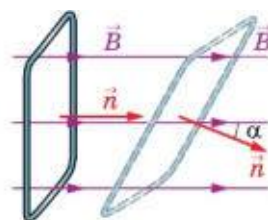


Рис. 6.12

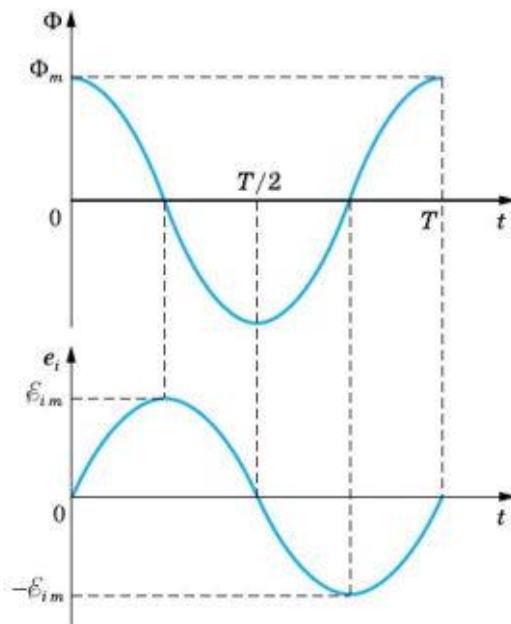


Рис. 6.13

во всех сечениях неразветвлённой цепи. Такой медленно меняющийся переменный ток называют *квазистационарным*.

Период колебаний квазистационарного тока должен быть много больше времени распространения в цепи электромагнитных возмущений. При стандартной частоте промышленного переменного тока $\nu = 50$ Гц длина цепи должна быть много меньше расстояния: $l \ll 6000$ км. Поэтому во всех случаях, кроме передачи электроэнергии по проводам на очень большие расстояния, промышленный ток можно считать квазистационарным.

В дальнейшем мы будем изучать вынужденные квазистационарные электромагнитные колебания, происходящие в цепях под действием напряжения, гармонически меняющегося с частотой ω по синусоидальному или косинусоидальному закону:

$$u = U_m \sin \omega t \text{ или } u = U_m \cos \omega t.$$

Если напряжение меняется с частотой ω , то и сила тока в цепи будет меняться с той же частотой, но колебания силы тока не обязательно должны совпадать по фазе с колебаниями напряжения. Поэтому в общем случае

$$i = I_m \sin (\omega t + \varphi_c),$$

где φ_c — разность (сдвиг) фаз между колебаниями силы тока и напряжения.



1. Что называют вынужденными электромагнитными колебаниями? **2.** Что представляет собой переменный ток? **3.** Опишите принцип действия генератора переменного тока. **4.** Почему поток вектора магнитной индукции при вращении рамки в однородном магнитном поле меняется по гармоническому закону? **5.** Как получить ЭДС индукции в рамке, помещённой в однородное магнитное поле? **6.** С какой частотой изменяются сила тока и напряжение в электрической сети?



1. Проанализируйте графики зависимости $\Phi(t)$ и $e_i(t)$, показанные на рисунке 6.13. **2.** Почему для освещения квартир не применяют переменный ток с частотой 10—15 Гц? **3.** Для чего на гидроэлектростанциях используют генераторы, роторы которых имеют несколько пар полюсов (рис. 6.14)?

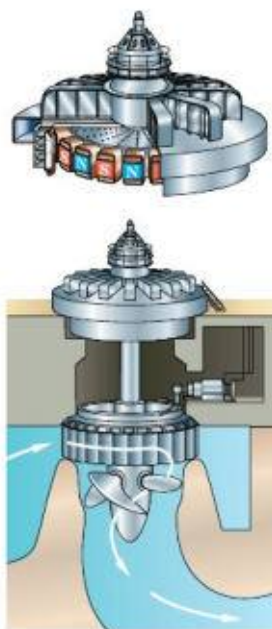


Рис. 6.14



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Сколько витков имеет рамка площадью 500 см^2 , если при её вращении с частотой 20 Гц в однородном магнитном поле с индукцией $0,1 \text{ Тл}$ амплитуда ЭДС равна 63 В ?

Дано:

$$S = 500 \text{ см}^2$$

$$\nu = 20 \text{ Гц}$$

$$B = 0,1 \text{ Тл}$$

$$\mathcal{E}_{im} = 63 \text{ В}$$

$$N = ?$$

СИ:

$$500 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Решение:

Магнитный поток, пронизывающий один виток рамки, равен

$$\Phi_0 = BS \cos \omega t.$$

Учитывая, что рамка имеет N витков и используя выражение $\omega = 2\pi\nu$,

получим формулу для ЭДС индукции:

$$e_i = -N\Phi'(t) = -N(BS \cos 2\pi\nu t)',$$

$$e_i(t) = NBS \cdot 2\pi\nu \sin 2\pi\nu t = \mathcal{E}_{im} \sin 2\pi\nu t.$$

Из этого выражения видно, что амплитуда ЭДС $\mathcal{E}_{im}$:

$$\mathcal{E}_{im} = NBS \cdot 2\pi\nu \Rightarrow N = \frac{\mathcal{E}_{im}}{2\pi\nu BS}.$$

Подставляя числовые данные, найдём:

$$N = \frac{63}{2 \cdot 3,14 \cdot 20 \cdot 0,1 \cdot 500 \cdot 10^{-4}} = 100 \text{ витков}.$$

Ответ: $N = 100$ витков.



УПРАЖНЕНИЯ

1. Рамка площадью $3 \cdot 10^3 \text{ см}^2$ имеет 200 витков и вращается в однородном магнитном поле с индукцией $0,15 \text{ мТл}$. Определите период обращения рамки, если в ней возникает ЭДС индукции с амплитудой $1,5 \text{ В}$.
2. В рамке, равномерно вращающейся в магнитном поле, амплитуда ЭДС индукции равна 100 В . Определите мгновенные значения ЭДС, соответствующие отклонению рамки (в процессе её вращения) от нейтрального положения на углы: а) 30° ; б) 60° .
3. По графику, приведённому на рисунке 6.15, найдите амплитуду ЭДС индукции, период

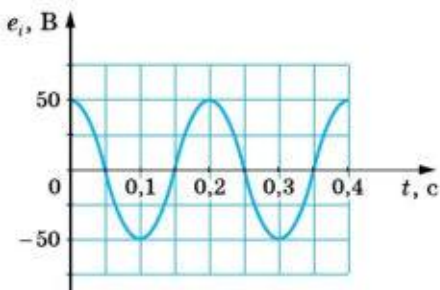


Рис. 6.15

и частоту обращения рамки. Запишите уравнение зависимости ЭДС индукции от времени: $e_i = e_i(t)$.

4. По графику, изображенному на рисунке 6.16, определите амплитуду ЭДС индукции, период и частоту обращения рамки. Запишите уравнение зависимости ЭДС индукции от времени: $e_i = e_i(t)$. В каком положении была рамка в начальный момент времени?

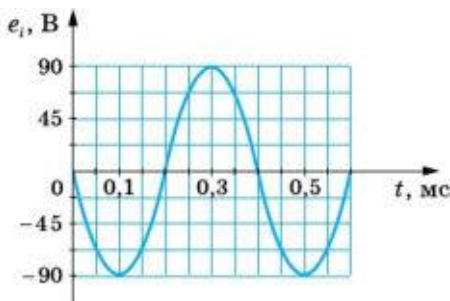


Рис. 6.16

§ 34 РЕЗИСТОР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЗНАЧЕНИЯ СИЛЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

РЕЗИСТОР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. Пусть электрическая цепь состоит из проводников (резисторов) с малой индуктивностью и большим сопротивлением R . Например, такой цепью может быть нить накаливания электрической лампы и подводящие к ней провода. Величину R , которую мы до сих пор называли сопротивлением, теперь будем называть *активным сопротивлением*. Итак, в цепи имеется резистор, активное сопротивление которого R , а катушка индуктивности и конденсатор отсутствуют (рис. 6.17).

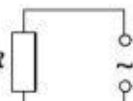


Рис. 6.17

Напряжение на концах цепи меняется по гармоническому закону:

$$u = U_m \sin \omega t.$$

Как и в случае постоянного тока, мгновенное значение силы тока прямо пропорционально мгновенному значению напряжения. Поэтому можно считать, что мгновенное значение силы тока определяется законом Ома:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R} = I_m \sin \omega t. \quad (1)$$

Следовательно, в проводнике с активным сопротивлением *колебания силы тока по фазе совпадают с колебаниями напряжения* (рис. 6.18), а амплитуда колебаний силы тока:

$$I_m = \frac{U_m}{R}.$$

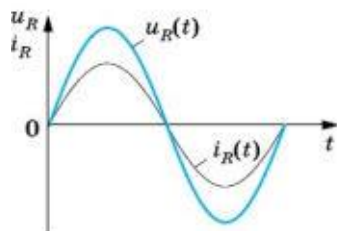


Рис. 6.18

При небольших значениях частоты переменного тока активное сопротивление проводника не зависит от частоты. Можно считать, что оно практически совпадает с сопротивлением в цепи постоянного тока.

ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЗНАЧЕНИЯ СИЛЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ. При совпадении фазы колебаний силы тока и напряжения мгновенная мощность переменного тока равна

$$p = i^2 R.$$

С учётом формулы (1) можно записать:

$$p = I_m^2 R \sin^2 \omega t.$$

Понятно, что мгновенная мощность с течением времени непрерывно изменяется. Определим среднюю мощность переменного тока, выделяемую на резисторе за период:

$$\bar{p} = I_m^2 R \overline{\sin^2 \omega t}.$$

Среднее значение функции $\sin^2 \omega t$ за период равно $\frac{1}{2}$, поэтому

$$\bar{p} = \frac{I_m^2 R}{2} = \frac{U_m^2}{2R}.$$

Данная формула позволяет ввести физические величины, характеризующие переменный ток с точки зрения мощности.

Действующим значением I силы переменного тока называют квадратный корень из среднего квадрата силы тока:

$$I = \sqrt{i^2} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (2)$$

Действующее значение переменного напряжения определяется подобным образом:

$$U = \sqrt{u^2} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) I_m и U_m — амплитудные значения силы переменного тока и переменного напряжения.

Средняя мощность переменного тока при совпадении фаз колебаний силы тока и напряжения равна произведению действующих значений силы тока и напряжения:

$$\bar{p} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (4)$$

Формулы (4), полученные через действующие значения, полностью аналогичны формулам для мощности постоянного тока (см. § 5).

Отметим, что амперметр может измерять силу тока только в цепях постоянного тока. При включении его в цепь переменного тока он покажет нуль. Это связано с тем, что стрелка обладает инертностью и не успевает отклоняться в такт с изменением силы тока. Поэтому амперметры и вольтметры градуируют таким образом, чтобы они показывали действующее значение силы тока и напряжения. Конечно, можно было бы охарактеризовать силу тока и напряжение амплитудами, а не действующими значениями. Но действующие значения непосредственно определяют мощность переменного тока в цепи.

Действующее значение силы переменного тока равно силе постоянного тока, выделяющего в цепи такое же количество теплоты, что и переменный ток за то же время.



1. Какое сопротивление называют активным? **2.** Как соотносятся между собой фазы колебаний силы переменного тока в резисторе и переменного напряжения между его выводами? **3.** Чем определяется мощность в цепи переменного тока? **4.** Что называют действующим значением: а) силы переменного тока; б) переменного напряжения? **5.** Почему амперметры и вольтметры градуируют в действующих значениях силы тока и напряжения?



1. Что покажет вольтметр при его включении в цепь переменного тока?
2. В чём состоит отличие амперметров и вольтметров для переменного и постоянного токов?



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Сила переменного тока в электрической цепи изменяется по закону $i(t) = 0,564 \sin 4\pi t$ (А). Какое количество теплоты выделится в проводнике с активным сопротивлением 15 Ом за время, равное 10 периодам колебаний тока?

Дано:

$$i(t) = 0,564 \sin 4\pi t \text{ (А)}$$

$$R = 15 \text{ Ом}$$

$$\Delta t = 10T$$

$Q = ?$

Решение:

Из закона $i(t) = I_m \sin \omega t$ следует, что $\omega = 4\pi \text{ с}^{-1}$. Тогда период колебаний силы тока в цепи:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{4\pi} \text{ с} = 0,5 \text{ с}.$$

Таким образом, нас интересует количество теплоты, выделившееся в проводнике за $\Delta t = 10T = 5 \text{ с}$.

В проводнике выделится такое же количество теплоты, как если бы по нему протекал не переменный, а постоянный ток, такой что

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$



По закону Джоуля—Ленца:

$$Q = I^2 R \Delta t = \left(\frac{I_m}{\sqrt{2}} \right)^2 R \Delta t.$$

Подставляя числовые данные, получим:

$$Q = \left(\frac{0,564}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot 15 \cdot 5 \text{ Дж} = 12 \text{ Дж}.$$

Ответ: $Q = 12 \text{ Дж}$.



УПРАЖНЕНИЯ

1. В цепь переменного тока стандартной частоты с действующим значением напряжения 220 В включено активное сопротивление, равное 50 Ом. Найдите действующее и амплитудное значения силы тока. Запишите уравнения зависимости напряжения и силы тока от времени.
2. На участке цепи с активным сопротивлением 4 Ом сила тока изменяется по закону $i(t) = 6,4 \sin 10\pi t$ (А). Определите действующее значение силы тока и мощность, выделяющуюся на этом участке. Запишите уравнение зависимости $u = u(t)$.
3. Напряжение в сети изменяется по закону $u(t) = 310 \sin 10\pi t$ (В). Какое количество теплоты отдаёт за 1 мин электрическая плитка с активным сопротивлением 60 Ом, включённая в эту сеть?



§ 35

КОНДЕНСАТОР И КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

КОНДЕНСАТОР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. Возьмём источники постоянного и переменного напряжения, причём постоянное напряжение на зажимах источника пусть будет равно действующему значению переменного напряжения. Цепь состоит из конденсатора и лампы накаливания (рис. 6.19), соединённых последовательно. При включении с помощью переключателя постоянного напряжения лампа не светится. Но при включении переменного напряжения лампа начинает светиться, если ёмкость конденсатора достаточно велика.

Как же переменный ток может течь по разомкнутой цепи? В этом случае происходит периодическая перезарядка конденсатора под действием переменного напряжения. Ток, те-

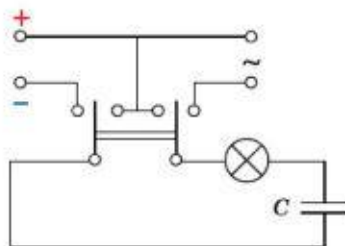


Рис. 6.19

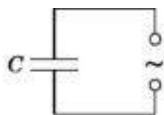


Рис. 6.20

кущий при перезарядке, нагревает нить лампы. Найдём, как изменяется со временем сила тока в цепи, содержащей только конденсатор, если сопротивлением проводников и обкладок конденсатора можно пренебречь (рис. 6.20).

Напряжение на конденсаторе $u = \frac{q}{C}$ равно напряжению на зажимах цепи. Следовательно,

$$\frac{q}{C} = U_m \sin \omega t.$$

Заряд конденсатора меняется по гармоническому закону:

$$q = CU_m \sin \omega t. \quad (1)$$

Сила тока представляет собой производную заряда по времени. Если заряд q в формуле

(1) — это заряд той пластины конденсатора, которая встречается первой при выбранном направлении обхода контура, то

$$i = q' = U_m C \omega \cos \omega t = U_m C \omega \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Таким образом, колебания силы тока опережают по фазе колебания напряжения на $\frac{\pi}{2}$ (рис. 6.21). Это означает, что в момент, когда конденсатор начинает заряжаться, сила тока максимальна, а напряжение равно нулю. После того как напряжение достигает максимума, сила тока становится равной нулю и т. д. Амплитуда колебаний силы тока равна

$$I_m = U_m \omega C. \quad (2)$$

Если ввести обозначение $\frac{1}{\omega C} = X_C$, то можно записать:

$$I_m = \frac{U_m}{X_C}.$$

Физическую величину X_C , обратную произведению циклической частоты на ёмкость конденсатора, называют ёмкостным сопротивлением.

Роль этой величины подобна роли активного сопротивления R в законе Ома. Амплитудное значение силы тока связано с амплитудным значением напряжения на конденсаторе так же, как связаны согласно закону Ома сила тока и напряжение на участке цепи постоянного тока. Это и позволяет рассматривать величину X_C как сопротивление конденсатора переменному току — ёмкостное сопротивление.

Чем больше ёмкость конденсатора, тем больше, согласно формуле (2), сила тока перезарядки. Это легко обнаружить по увеличению накала ни-

ти лампы при увеличении ёмкости конденсатора. В то время как сопротивление конденсатора постоянному току бесконечно велико, его сопротивление переменному току имеет конечное значение X_C . Оно уменьшается с увеличением ёмкости и увеличением частоты. Это можно установить, если для питания цепи, изображённой на рисунке 6.19, использовать генератор переменного тока регулируемой частоты. Плавно увеличивая частоту переменного тока, можно наблюдать увеличение накала нити лампы. Оно вызвано увеличением силы тока за счёт уменьшения ёмкостного сопротивления конденсатора. Зависимость ёмкостного сопротивления от частоты переменного тока приведена на рисунке 6.22.

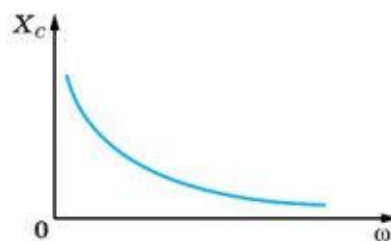


Рис. 6.22

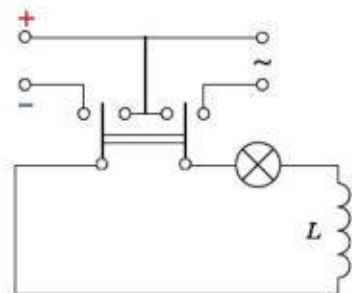


Рис. 6.23

КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. Соберём цепь из катушки большой индуктивности и лампы накаливания (рис. 6.23). С помощью переключателя можно присоединять эту цепь либо к источнику постоянного напряжения, либо к источнику переменного напряжения. При этом постоянное напряжение и действующее значение переменного напряжения должны быть одинаковы. Опыт показывает, что лампа светится ярче при постоянном напряжении. Следовательно, действующее значение силы тока в рассматриваемой цепи меньше силы постоянного тока. Объясняется это явлением самоиндукции.

При подключении катушки к источнику постоянного напряжения сила тока в цепи нарастает постепенно. Лишь по прошествии некоторого времени сила тока достигает наибольшего (установившегося) значения, соответствующего данному постоянному напряжению. Максимальное значение (амплитуда) силы переменного тока ограничивается индуктивностью L цепи и будет тем меньше, чем больше индуктивность и чем больше частота приложенного напряжения.

Определим силу тока в цепи, содержащей катушку индуктивности (рис. 6.24). Для этого найдём связь между напряжением на катушке и ЭДС самоиндукции в ней. Если активным сопротивлением катушки можно пренебречь, то напряжение на катушке, равное разности потенциалов между её выводами, уравнивается ЭДС самоиндукции.

При этом ЭДС самоиндукции в любой момент времени равна по модулю и противоположна по знаку напряжению,

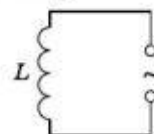


Рис. 6.24

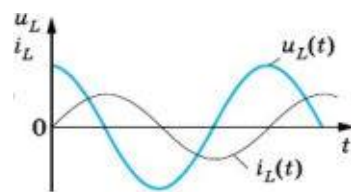


Рис. 6.25

созданному источником между выводами катушки:

$$e_i = -u.$$

При изменении силы тока по гармоническому закону $i = I_m \sin \omega t$ ЭДС самоиндукции равна

$$e_i = -Li' = -L\omega I_m \cos \omega t.$$

Так как $u = -e_i$, то напряжение на концах катушки оказывается равным

$$u = L\omega I_m \cos \omega t = L\omega I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

где $U_m = L\omega I_m$ — амплитуда колебаний напряжения.

Таким образом, колебания напряжения на катушке индуктивности опережают колебания силы тока на $\frac{\pi}{2}$, или, что то же самое, колебания силы тока отстают по фазе от колебаний напряжения на $\frac{\pi}{2}$. В момент, когда напряжение на катушке достигает максимума, сила тока равна нулю (рис. 6.25). В момент, когда напряжение становится равным нулю, сила тока максимальна по модулю.

Амплитуда колебаний силы тока в катушке равна $I_m = \frac{U_m}{L\omega}$.

Если ввести обозначение $\omega L = X_L$, то получим

$$I_m = \frac{U_m}{X_L}. \quad (3)$$

Физическую величину X_L , равную произведению циклической частоты на индуктивность, называют индуктивным сопротивлением.

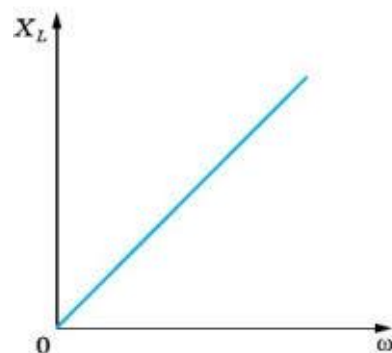


Рис. 6.26

Согласно формуле (3), амплитудное значение силы тока связано с амплитудным значением напряжения и индуктивным сопротивлением соотношением, подобным закону Ома для цепи постоянного тока.

Индуктивное сопротивление зависит от частоты. При $\omega = 0$ оно равно нулю ($X_L = 0$). Зависимость индуктивного сопротивления от частоты переменного тока приведена на рисунке 6.26.

Чем быстрее меняется напряжение, тем больше ЭДС самоиндукции и тем меньше амплитуда колебаний силы тока. Это не-

трудно обнаружить, если для питания цепи, изображённой на рисунке 6.23, взять генератор переменного тока регулируемой частоты.



1. Почему постоянный ток не может существовать в цепи, содержащей конденсатор? **2.** Как соотносятся фазы колебаний силы переменного тока в цепи и переменного напряжения между обкладками конденсатора? **3.** От каких физических величин зависит ёмкостное сопротивление? **4.** Влияет ли индуктивность на силу переменного тока в цепи? **5.** Как соотносятся фазы колебаний силы переменного тока в катушке индуктивности и переменного напряжения между её выводами? **6.** От каких физических величин зависит индуктивное сопротивление?



1. Катушка с сердечником из ферромагнетика поочерёдно включается на одно и то же напряжение в цепи постоянного и переменного тока. Одинаковая ли будет в ней сила тока?

2. Последовательно с лампочкой карманного фонаря к звуковому генератору подключена катушка индуктивности. Как изменится накал нити лампочки, если: а) не меняя частоту, поместить в катушку железный сердечник; б) уменьшить частоту?

3. Электрические цепи, изображённые на рисунке 6.27, подключили сначала к источнику постоянного тока, а затем к источнику переменного тока. При этом действующее значение переменного напряжения равно напряжению на полюсах источника постоянного тока. Как при этом изменились показания амперметра?

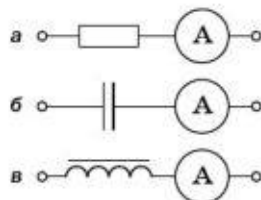


Рис. 6.27



УПРАЖНЕНИЯ

1. Найдите период переменного тока, для которого конденсатор ёмкостью 2 мкФ представляет сопротивление 20 Ом .
2. Конденсатор включён в цепь переменного тока стандартной частоты. Действующее значение напряжения в сети 220 В , сила тока в цепи конденсатора $2,5 \text{ А}$. Чему равна ёмкость конденсатора?
3. Ёмкость конденсатора измеряют с помощью вольтметра и амперметра, показания которых соответственно равны 12 В и 15 мА . Частота переменного тока равна 50 Гц . Определите ёмкость конденсатора.
4. Определите индуктивное сопротивление катушки индуктивностью $0,2 \text{ мГн}$ при частоте переменного тока: а) 25 Гц ; б) 50 Гц ; в) 400 Гц .
5. Во сколько раз изменится индуктивное сопротивление катушки, если её включить в цепь переменного тока с частотой не 10 кГц , а 50 Гц ?



ЗАКОН ОМА ДЛЯ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. Рассмотрим более общий случай электрической цепи, в которую последовательно включены проводник с активным сопротивлением R и малой индуктивностью, катушка с большой индуктивностью L и малым активным сопротивлением и конденсатор ёмкостью C . Если напряжение на концах такой цепи меняется по закону $u = U_m \sin \omega t$, то сила тока в цепи меняется по закону

$$i = I_m \sin (\omega t - \varphi_c),$$

где φ_c — разность фаз между колебаниями силы тока и колебаниями напряжения в цепи.

В результате математических преобразований можно получить соотношение между амплитудами колебаний силы тока и напряжения в RLC -контуре:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (1)$$

Сдвиг фаз φ_c будет определяться выражением

$$\operatorname{tg} \varphi_c = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (2)$$

Выражение (1) имеет вид закона Ома $I_m = \frac{U_m}{Z}$, где

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Величина Z — это *полное сопротивление цепи*. Закон Ома для цепи переменного тока (1) записан для амплитудных значений силы тока и напряжения.

РЕЗОНАНС В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА*. Аналогия между законами механических и электромагнитных колебаний позволяет сделать заключение о существовании резонанса в колебательном контуре, обладающем определённой собственной частотой колебаний.

Амплитуда силы тока при вынужденных электромагнитных колебаниях в контуре, совершающихся под действием внешнего гармонически

* Существуют два основных вида резонанса в цепи переменного тока: *резонанс напряжений*, который возникает при последовательном соединении элементов цепи, и *резонанс токов*, происходящий при их параллельном соединении. В этом параграфе будет рассмотрен резонанс напряжений.

изменяющегося напряжения, определяется формулой (1). При фиксированном напряжении U_m и заданных значениях R , L и C амплитуда колебаний силы тока достигает максимума при частоте ω , удовлетворяющей соотношению

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}. \tag{3}$$

Знаменатель в формуле (1) становится при этом минимальным, и амплитуда колебаний силы тока достигает максимального значения:

$$I_m = \frac{U_m}{R}.$$

Амплитуда силы тока особенно велика при малом R . Из уравнения (3) можно определить циклическую частоту переменного тока, при которой сила тока максимальна:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0.$$

Эта частота совпадает с частотой свободных колебаний в контуре с малым активным сопротивлением (см. § 31).

Резкое возрастание амплитуды установившихся вынужденных колебаний силы тока в колебательном контуре с малым активным сопротивлением происходит при совпадении частоты внешнего переменного напряжения с собственной частотой колебательного контура. В этом состоит явление *резонанса в колебательном контуре*.

Резонанс выражен тем отчётливее, чем меньше энергетические потери в цепи, т. е. чем меньше сопротивление R . При $R \rightarrow 0$ резонансное значение силы тока неограниченно возрастает: $I_{\text{рез}} \rightarrow \infty$.

С увеличением R максимальное значение силы тока уменьшается, и при больших R говорить о резонансе уже не имеет смысла. Зависимость амплитуды силы тока от частоты при различных сопротивлениях показана на рисунке 6.28 ($R_1 < R_2 < R_3$).

Одновременно с увеличением силы тока при резонансе резко возрастают напряжения на конденсаторе и катушке индуктивности. Они становятся одинаковыми и во много раз превосходят внешнее напряжение, которое связано с резонансной силой тока следующим образом:

$$U_m = I_{m, \text{рез}} R.$$

Если $R \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$, то $U_{mC, \text{рез}} = U_{mL, \text{рез}} \gg U_m$.

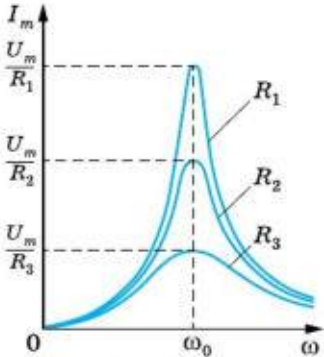


Рис. 6.28

При резонансе сдвиг фаз между силой тока и напряжением становится, согласно формуле (2), равным нулю. Наглядно это можно пояснить так. Колебания напряжения на катушке индуктивности и конденсаторе всегда происходят в противофазе. Резонансные амплитуды этих напряжений одинаковы. В результате напряжения на катушке и конденсаторе полностью компенсируют друг друга ($u_L = -u_C$), и падение напряжения происходит только на участке с активным сопротивлением.

Явление электрического резонанса учитывают в радиотехнике при расчётах электрических цепей, в схемах настройки радиоприёмников, радиопередатчиков, усилителей, генераторов высокочастотных колебаний.

В некоторых случаях резонанс в электрической цепи может принести большой вред. Если цепь не рассчитана на работу в условиях резонанса, то возникновение резонанса приведёт к аварии. Чрезмерно большие токи могут перегреть провода, а большие напряжения приведут к пробое изоляции.



1. Что представляет собой *RLC*-контур? **2.** Какое соотношение выражает закон Ома для цепи переменного тока? **3.** В чём заключается явление резонанса в электрическом колебательном контуре?



1. Как будет изменяться накал нити лампы при изменении частоты переменного тока от 0 до ∞ в цепях, изображённых на рисунке 6.29? Амплитуда колебаний напряжения источника переменного тока не изменяется.

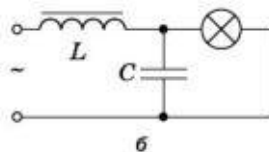
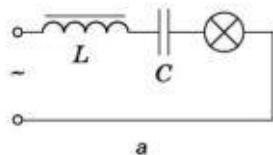


Рис. 6.29

2. Можно ли установить режим резонанса в цепи переменного тока, не изменяя индуктивности катушки и ёмкости конденсатора в цепи? Если да, то как это сделать?

3. Сравните явление резонанса в механических и электрических колебательных системах.



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Катушка с активным сопротивлением 10 Ом и индуктивностью 0,05 Гн соединена последовательно с конденсатором ёмкостью 2 мкФ. К цепи подведено напряжение с амплитудой 100 В при частоте переменного тока, равной 50 Гц (рис. 6.30). Определите амплитуду силы тока в цепи.

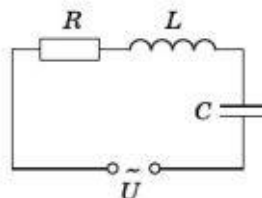


Рис. 6.30

УСТРОЙСТВО ТРАНСФОРМАТОРА. ЭДС мощных генераторов электростанций обычно составляет 16—20 кВ. Между тем большинство потребителей электроэнергии рассчитано на низкое напряжение (127—380 В). При передаче электроэнергии на большие расстояния, наоборот, требуется высокое напряжение в несколько десятков, сотен или тысяч киловольт. На практике повышение и понижение переменного напряжения осуществляются с помощью *трансформаторов* (рис. 6.31).

Трансформатор — устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Первые трансформаторы переменного тока были сконструированы и введены в практику русскими электротехниками Павлом Николаевичем Яблочковым (1847—1894) в 1876 г. и Иваном Филипповичем Усагиным (1855—1919) в 1882 г.

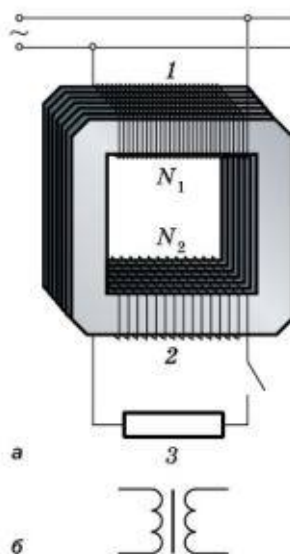


а



б

Рис. 6.31



а

б

Рис. 6.32



Трансформатор состоит из замкнутого стального сердечника-магнитопровода*, на котором располагаются две или несколько обмоток, не имеющих между собой электрического контакта (рис. 6.32, а). Обмотка 1, к которой подводится электрическая энергия, называется *первичной*; обмотка 2, к которой присоединяются потребители электроэнергии 3 («нагрузка»), — *вторичной*.

Условное обозначение трансформатора в электрических схемах показано на рисунке 6.32, б.

ХОЛОСТОЙ ХОД ТРАНСФОРМАТОРА. Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. Рассмотрим вначале процессы в трансформаторе с незамкнутой вторичной обмоткой — *режим холостого хода*. Пусть к первичной обмотке трансформатора приложено гармонически изменяющееся напряжение

$$u_1 = U_{m1} \cos \omega t. \tag{1}$$

Под действием этого напряжения в первичной обмотке возникает переменный ток i_1 . Можно считать, что колебания силы тока i_1 отстают по фазе от колебаний напряжения u_1 на четверть периода, т. е. на $\frac{\pi}{2}$:

$$i_1 = I_{m1} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = I_{m1} \sin \omega t.$$

Переменный магнитный поток, возбуждаемый током в первичной обмотке, совпадает по фазе с силой тока и пронизывает витки обеих обмоток трансформатора:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t, \tag{2}$$

где Φ_m — амплитуда магнитного потока.

Переменный магнитный поток наводит в первичной и вторичной обмотках ЭДС индукции. Мгновенное значение ЭДС индукции e в любом витке первичной или вторичной обмотки трансформатора одинаково и, согласно закону электромагнитной индукции, равно

$$e = -\Phi',$$

где Φ' — производная потока магнитной индукции по времени.

Из выражения (2) следует, что

$$\Phi' = \Phi_m \omega \cos \omega t,$$

поэтому $e = -\omega \Phi_m \cos \omega t$, или

$$e = -\mathcal{E}_m \cos \omega t. \tag{3}$$

Здесь $\mathcal{E}_m = \omega \Phi_m$ — амплитуда ЭДС в одном витке.

* Для уменьшения потерь от вихревых токов магнитопровод собирается из листов электротехнической (трансформаторной) стали толщиной 0,35 или 0,5 мм. Листы изолируются друг от друга тонкой бумагой или лаком.

В первичной обмотке, имеющей N_1 витков, полная ЭДС индукции $e_1 = N_1 e$, а во вторичной обмотке с числом витков N_2 полная ЭДС индукции $e_2 = N_2 e$. Отсюда следует, что

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (4)$$

Напряжение u_1 и ЭДС e_1 , как следует из выражений (1) и (3), колеблются в противофазе:

$$u_1 \approx -e_1. \quad (5)$$

При разомкнутой вторичной обмотке трансформатора тока в ней нет, поэтому имеет место соотношение

$$u_2 = -e_2. \quad (6)$$

Мгновенные значения ЭДС e_1 и e_2 изменяются синфазно, т. е. в любой момент времени их фазы одинаковы. Поэтому отношение мгновенных ЭДС индукций в формуле (4) можно заменить отношением амплитуд или действующих значений $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$ этих ЭДС, а с учётом равенств (5) и (6) — отношением действующих значений напряжений:

$$\frac{U_2}{U_1} \approx \frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \frac{N_2}{N_1} = K.$$

Величину K называют *коэффициентом трансформации*. При $K > 1$ трансформатор является *повышающим*, а при $K < 1$ — *понижающим*.

РАБОЧИЙ ХОД ТРАНСФОРМАТОРА. Если к концам вторичной обмотки присоединить цепь, потребляющую электроэнергию, или, как говорят, нагрузить трансформатор, то под действием ЭДС индукции $\mathcal{E}_2$ во вторичной обмотке появится ток i_2 . Он создаёт в сердечнике трансформатора свой переменный магнитный поток, который по правилу Ленца должен уменьшать изменения магнитного потока в сердечнике. Несмотря на появление нового магнитного потока, порождённого током i_2 во вторичной обмотке, магнитный поток, пронизывающий сердечник трансформатора, сохраняет ту же амплитуду Φ_m , что и при холостом ходе. Это объясняется тем, что при любых нагрузках падение напряжения в первичной обмотке незначительно из-за того, что её активное сопротивление мало. Поэтому равенство (5) остаётся справедливым и для нагруженного трансформатора. Для действующих значений оно запишется следующим образом:

$$U_1 \approx \mathcal{E}_1.$$

Следовательно, при неизменном первичном напряжении U_1 остаются практически неизменными ЭДС $\mathcal{E}_1$ и связанная с ней амплитуда магнитного потока Φ_m . Это может быть лишь в том случае, если магнитный по-

ток, порождаемый током первичной обмотки, увеличится по сравнению с потоком при холостом ходе настолько, что сможет компенсировать размагничивающее действие магнитного потока вторичной обмотки трансформатора. Таким образом, *когда трансформатор нагружен, то появление тока во вторичной обмотке приводит к возрастанию силы тока в первичной обмотке*. Иными словами, отдача энергии нагрузке через вторичную обмотку трансформатора сопровождается увеличением потребления энергии от сети первичной обмоткой.

*** КПД ТРАНСФОРМАТОРА.** Как и любая электрическая машина, трансформатор характеризуется КПД, показывающим, насколько эффективно используется подводимая к устройству энергия. За счёт энергии, потребляемой первичной обмоткой трансформатора, создаётся мощность, отдаваемая потребителям. Поэтому КПД η трансформатора можно определить как величину, равную отношению мощности P_2 , потребляемой нагрузкой, к мощности P_1 , потребляемой первичной обмоткой трансформатора из сети:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

КПД современных трансформаторов может достигать значений 98—99,5%. Это означает, что суммарные потери в трансформаторе составляют всего несколько процентов. Снижение КПД трансформатора обусловлено потерями энергии на нагревание проводов его обмоток и стального сердечника. Если пренебречь потерями энергии, то мощность, потребляемая первичной обмоткой трансформатора из сети, равна мощности, передаваемой нагрузке:

$$P_1 \approx P_2, \text{ или } I_1 U_1 \approx I_2 U_2.$$

Отсюда следует, что

$$\frac{I_2}{I_1} \approx \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{1}{K}.$$

Таким образом, *силы токов в обмотках трансформатора приближённо обратно пропорциональны числу витков в обмотках. Повышая с помощью трансформатора напряжение в несколько раз, мы во столько же раз уменьшаем силу тока*.



1. Какую величину называют коэффициентом трансформации?
2. В каком случае трансформатор является: а) повышающим; б) понижающим?
3. Почему на холостом ходу трансформатор с малым активным сопротивлением первичной обмотки почти не потребляет энергии из сети?
4. Как изменяется сила тока в первичной обмотке трансформатора при его рабочем ходе?
5. Чем определяется КПД трансформатора?



1. Изменится ли соотношение между напряжениями на зажимах первичной и вторичной обмоток трансформатора, если железный сердечник заменить: а) медным; б) алюминиевым сердечником?
2. Почему трансформатор выходит из строя, если в нём замыкаются накоротко хотя бы два соседних витка?
3. Как определить число витков обмотки трансформатора, не разматывая катушки?



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Трансформатор повышает напряжение с $U_1 = 100$ В до $U_2 = 6000$ В. На одну из его обмоток надели виток провода, концы которого подсоединены к вольтметру. Вольтметр показал напряжение $U_0 = 0,4$ В. Определите число витков каждой из обмоток трансформатора. Потерями энергии пренебречь.

Дано:

$$U_1 = 100 \text{ В}$$

$$U_2 = 6000 \text{ В}$$

$$U_0 = 0,4 \text{ В}$$

$$N_1 - ?$$

$$N_2 - ?$$

Решение:

Действующее значение ЭДС индукции в любом витке первичной и вторичной обмоток одинаково и по модулю равно

$$\mathcal{E}_0 = U_0.$$

Напряжение на зажимах первичной и вторичной обмоток:

$$U_1 = N_1 \mathcal{E}_0 = N_1 U_0, \quad U_2 = N_2 \mathcal{E}_0 = N_2 U_0.$$

Отсюда

$$N_1 = \frac{U_1}{U_0}, \quad N_2 = \frac{U_2}{U_0}.$$

Подставляя числовые данные, получим:

$$N_1 = \frac{100}{0,4} = 250 \text{ витков};$$

$$N_2 = \frac{6000}{0,4} = 15\,000 \text{ витков}.$$

Ответ: $N_1 = 250$ витков; $N_2 = 15\,000$ витков.



УПРАЖНЕНИЯ

1. Напряжение на зажимах вторичной обмотки понижающего трансформатора 60 В, сила тока во вторичной цепи 40 А. Первичная обмотка включена в цепь с напряжением 240 В. Найдите силу тока в первичной обмотке трансформатора. Потерями энергии в обмотках пренебречь.
2. Трансформатор имеет коэффициент трансформации, равный 20. Первичная обмотка имеет 200 витков. Напряжение на зажимах первичной обмотки 120 В. Определите напряжение на зажимах вторичной обмотки и число витков в ней. Потерями энергии в обмотках пренебречь.



3. На первичную обмотку понижающего трансформатора с коэффициентом трансформации 0,1 подаётся напряжение 220 В. При этом сила тока во вторичной обмотке, сопротивление которой 2 Ом, равна 4 А. Пренебрегая потерями энергии в первичной обмотке, определите напряжение на выходе трансформатора.
4. Понижающий трансформатор с коэффициентом трансформации 0,1 включён в сеть с напряжением 220 В. Чему равно напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора, если сопротивление вторичной обмотки равно 0,2 Ом, а сопротивление нагрузки — 2 Ом? Потери энергии в обмотках пренебречь.
5. Первичная обмотка понижающего трансформатора с коэффициентом трансформации 0,125 включена в сеть с напряжением 200 В. Сопротивление вторичной обмотки равно 2 Ом, сила тока во вторичной обмотке трансформатора равна 3 А. Определите напряжение на зажимах вторичной обмотки. Потери энергии в первичной обмотке пренебречь.

Это любопытно...

Из истории развития физики и техники

В 1848 г. немецкий изобретатель Генрих Румкорф (1803—1877) создал индукционную катушку (рис. 6.33), ставшую прообразом первого трансформатора. С помощью этого устройства он получил колебания тока высокого напряжения. Для того чтобы превратить постоянный ток батареи в переменный, Румкорф последовательно с первичной катушкой включил прерыватель, который периодически замыкал и размыкал ток первичной цепи.

Датой рождения трансформатора принято считать 30 ноября 1876 г. В этот день русскому учёному Яблочкову (изобретатель дуговой лампы — «свечи Яблочкова») был выдан патент на трансформатор с разомкнутым сердечником катушки. В качестве сердечника использовался стержень, на который были намотаны обмотки. При этом в цепь последовательно включались первичные обмотки катушек, а во вторичную обмотку, в зависимости от её пара-

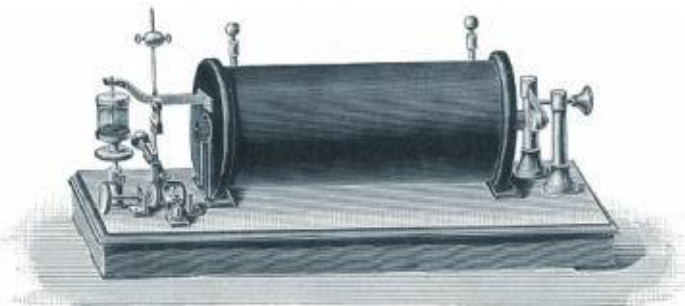


Рис. 6.33



Рис. 6.34

метров, могли включаться одна, две, три или более свечей. Индукционные катушки работали в режиме трансформатора, давая на выходе необходимое напряжение. Отметим, что независимо от Яблочкова Усагин изобрёл трансформатор промышленного типа.

С развитием техники переменных токов трансформаторы приобрели огромное значение. В 1882 г. был создан трансформатор, содержащий разное число витков

в первичной и вторичной обмотках. С помощью него можно было получать на вторичной обмотке более высокое напряжение переменного тока. Сопротивление в первичной цепи (а следовательно, и силу тока) можно было регулировать, перемещая внутри катушек сердечники. Вскоре было замечено, что если вторичную и первичную катушки насадить на единый сердечник, то трансформатор будет работать гораздо лучше — потери энергии сократятся, а КПД повысится. Первый такой трансформатор с замкнутой магнитной системой был создан в 1884 г. английскими изобретателями Джоном Гопкинсоном (1849—1898) и Эдуардом Гопкинсоном (1859—1922).

В 1885 г. венгерский электротехник Миклош Дери (1854—1934) разработал совместно с коллегами несколько модификаций однофазных трансформаторов с замкнутыми магнитопроводами, конструкция которых наиболее близка к современным. Поскольку мощные трансформаторы испытывали при своей работе значительный перегрев, была разработана система их масляного охлаждения.

В 1889 г. русским учёным Михаилом Осиповичем Доливо-Добровольским (1861—1919) была предложена система трёхфазного переменного тока. Им также были изобретены первый трёхфазный трансформатор, трёхфазный генератор, трёхфазный асинхронный двигатель и трёхфазная линия электропередачи.

В настоящее время существует множество типов трансформаторов. Основной из них — силовой трансформатор (рис. 6.34). Его используют в ЛЭП. Кроме силовых, существуют трансформаторы, предназначенные для измерения больших напряжений и токов (измерительные трансформаторы), трансформаторы напряжения, трансформаторы тока, импульсные трансформаторы и др.

§ 38

ПРОИЗВОДСТВО, ПЕРЕДАЧА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ. В зависимости от вида энергии, которая преобразуется в электрическую, различают три основных типа электростанций: *тепловые, атомные и гидроэлектростанции.*

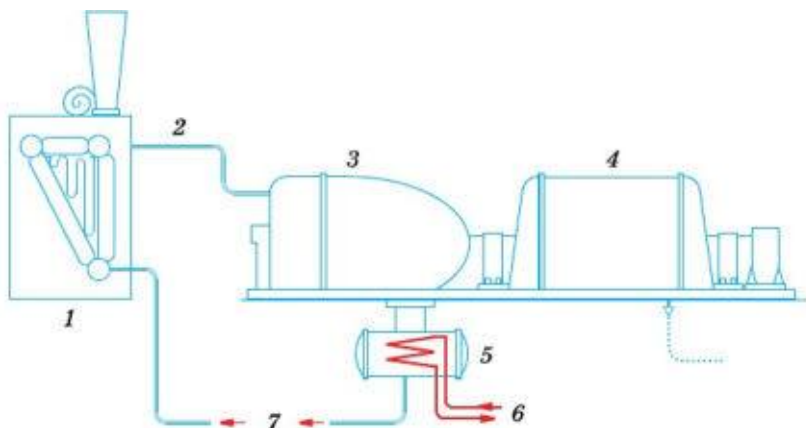


Рис. 6.35

На тепловых электростанциях источником энергии является топливо: уголь, газ, нефть, мазут, горючие сланцы. Ротаторы электрических генераторов приводятся во вращение паровыми и газовыми турбинами или двигателями внутреннего сгорания. Наиболее экономичными являются крупные тепловые паротурбинные электростанции (ТЭС) (рис. 6.35). В паровых котлах 1 таких станций химическая энергия топлива превращается в энергию пара 2. В турбинах 3 энергия пара преобразуется в механическую, а затем в генераторе 4, имеющем общий вал с турбиной, превращается в электрическую энергию. От генератора энергия направляется на шины распределительного устройства станции. Отработанный пар из турбины поступает в конденсатор 5, который охлаждается проточной водой 6, и конденсат 7 в виде горячей дистиллированной воды возвращается в котёл. Такие станции принято называть *тепловыми конденсационными станциями*.

Коэффициент полезного действия ТЭС достигает 40%. Причём большая часть энергии теряется вместе с горячим отработавшим паром. Специальные тепловые электростанции, так называемые *теплоэлектроцентрали* (ТЭЦ) (рис. 6.36), позволяют значительную часть энергии отработавшего пара использовать для отопления и технологических процессов в промышленных предприятиях, а также для бытовых нужд (отопление, горячее водоснабжение). В результате КПД ТЭЦ достигает 60—70%.

На *гидроэлектростанциях* (ГЭС) энергия движущейся воды в гидротурбине превращается в механическую, а затем



Рис. 6.36



Рис. 6.37

в генераторе преобразуется в электрическую энергию (рис. 6.37). На рисунке 6.38 приведена упрощённая схема гидроэлектростанции: 1 — генератор; 2 — трансформатор; 3 — турбина; 4 — лопатки направляющего аппарата.

Мощность станции зависит от создаваемой плотиной разности уровней воды (напора) и от массы воды, проходящей через турбины в секунду (расхода воды).

Гидроэлектростанции дают около 20% всей вырабатываемой в нашей стране электроэнергии.

На атомных электростанциях (АЭС) технология производства электрической энергии почти такая же, как и на ТЭС. Разница состоит в том, что на АЭС энергию для преобразования воды в пар даёт ядерный реактор. Более подробно работа АЭС, устройство и принцип действия ядерного реактора будут рассмотрены в главе «Физика атомного ядра. Элементарные частицы».

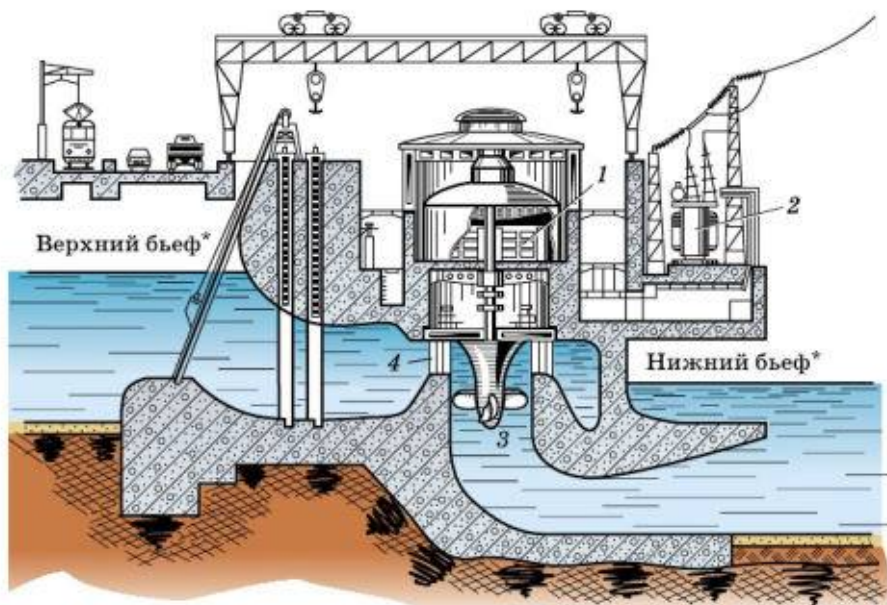


Рис. 6.38

* Бьеф — часть реки, канала, водохранилища или другого водного объекта, примыкающая к гидротехническому сооружению.

ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ. Передача электроэнергии связана с заметными потерями, так как электрический ток нагревает провода ЛЭП.

Передаваемая мощность P и дальность передачи энергии l определяются условиями электропередачи. Эти величины изменить невозможно. Удельное сопротивление ρ зависит от материала, из которого изготовлены провода. На практике используют материалы с наименьшим значением ρ (медь, алюминий). Увеличение площади поперечного сечения проводов малоэффективно, значительное их утолщение невозможно из-за большой массы и стоимости линии. Одним из эффективных способов уменьшения потерь электрической энергии является увеличение напряжения в линии электропередачи.

Чем длиннее линия электропередачи, тем выгоднее использовать более высокое напряжение. Так, например, в городах электроэнергию при напряжении 220 В передают на расстояние не более 200 м, а при напряжении 6 кВ — на расстояние до 5 км. В высоковольтной ЛЭП «Волжская ГЭС — Москва» используют напряжение, равное 500 кВ.

Рассмотрим схему передачи электроэнергии на большие расстояния (рис. 6.39). Генераторы, устанавливаемые на электростанциях, рассчитаны на напряжение, обычно не превышающее 25 кВ. При передаче энергии от мощных электростанций электрический ток по шинам поступает на повышающие трансформаторные подстанции. Они состоят из силовых трансформаторов, расположенных обычно на открытом воздухе недалеко от генераторов, распределительного устройства и щита управления. После повышения напряжения на подстанции до 35, 110, 220, 500, 750 кВ энергия направляется в район потребителя на понижающие трансформаторные подстанции, где напряжение уменьшается до 6—10 кВ.

Высоковольтные ЛЭП (рис. 6.40) — это в основном «воздушные» линии. Их изготавливают из голых алюминиевых, сталеалюминиевых или



Рис. 6.39



Рис. 6.40

медных проводов, укрепленных на гирляндах изоляторов, которые подвешиваются на металлических и железобетонных опорах. Расстояние между проводами выбирается с таким расчетом, чтобы была исключена возможность пробоя воздушного промежутка между проводами при раскачивании их ветром. По вершинам опор прокладываются заземленные стальные оцинкованные тросы. Они предназначены для предохранения линии от атмосферного

электричества. Трос, расположенный над проводами, принимает на себя атмосферные электрические разряды и отводит электрические заряды в землю. С понижающих трансформаторных подстанций по сети с напряжением 6—10 кВ энергия частично направляется к высоковольтным потребителям, а частично на понижающие трансформаторные подстанции, где напряжение понижается до 220—380 В. Далее по сети с напряжением 220 и 380 В она подводится к потребителям.

СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ. В настоящее время для производства и передачи электроэнергии целесообразно использовать как постоянный, так и переменный ток. Переменный ток достаточно легко преобразовать с помощью трансформатора. Современные генераторы переменного тока просты по конструкции, дешевы в производстве, их КПД достигает 99%. К недостаткам переменного тока относится низкая пропускная способность линий электропередачи и особенно кабельных линий из-за наличия ёмкости между проводами, проводами и землёй. Устойчивая электропередача переменным током практически возможна на расстояниях до 450—500 км при напряжении, равном 400—500 кВ.

Наиболее перспективным способом передачи электроэнергии на большие расстояния является использование постоянного тока. Линии электропередачи постоянного тока позволяют передавать по тем же проводам большую энергию, так как постоянное напряжение между проводами можно сделать равным допустимому амплитудному напряжению линии переменного тока. При передаче электроэнергии постоянным током исчезают затруднения, связанные с учётом индуктивного сопротивления и ёмкости линии. Это особенно важно при передаче электроэнергии на большие расстояния.

Трудности, связанные с преобразованием постоянного тока в переменный и обратно, успешно преодолеваются.

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ. В понятие «возобновляемые источники энергии» (ВИЭ) включают следующие формы энергии: солнечная, геотермальная, ветровая, энергия морских волн, течений, приливов и океана, энергия биомассы, гидроэнергия и др. Основной принцип ис-

пользования возобновляемой энергии заключается в её извлечении из постоянно происходящих в окружающей среде процессов и предоставлении для технического применения.

В отличие от топливной энергетики (или с использованием ископаемого топлива), при использовании ВИЭ практически не происходит выброса парниковых газов, оксидов серы и азота. Поэтому ВИЭ относят к экологически чистой энергетике. Отметим также неисчерпаемость ВИЭ в сравнении с нефтью, газом, углём, сырьём для ядерной энергетики.

Кратко рассмотрим некоторые виды экологически чистой энергетики. *Солнечная энергетика (гелиоэнергетика)* основывается на преобразовании электромагнитного солнечного излучения в электрическую или тепловую энергию. В настоящее время используется лишь малая часть солнечной энергии из-за того, что существующие солнечные батареи (рис. 6.41) имеют сравнительно низкий КПД и очень дороги в производстве.

Геотермальные электростанции (геоТЭС) представляют собой теплоэлектростанции, использующие в качестве теплоносителя воду из горячих геотермальных источников. Отсутствие необходимости нагрева воды позволяет считать геоТЭС более экологически чистыми, чем традиционные ТЭС. Геотермальные станции строят в вулканических районах, где на относительно небольших глубинах вода нагревается выше температуры кипения и просачивается к поверхности, иногда выбрасываясь в виде гейзеров.

Ветровая энергетика основана на преобразовании кинетической энергии воздушных масс в атмосфере в электрическую, механическую, тепловую или в любую другую форму энергии, удобную для использования в народном хозяйстве.

Такое преобразование может осуществляться в ветрогенераторе (для получения электрической энергии, рис. 6.42), ветряной мельнице (для преобразования в механическую энергию), парусе (для использования на транспорте) и др.

Ветровая энергия сильно рассеяна в пространстве, поэтому необходимо строить ветряные энергоустановки, способные постоянно работать с высоким КПД. В настоящее время разработаны и действуют так называемые циклонные электростанции, в которых тёплый воздух, поднимаясь в специальной 15-метровой башне и смешива-



Рис. 6.41



Рис. 6.42

ясь с циркулирующим воздушным потоком, создаёт искусственный «циклон», который вращает турбину. Такие установки намного эффективнее и солнечных батарей, и обычных ветрогенераторов.



1. Как устроена тепловая паротурбинная электростанция? **2.** Какие преобразования энергии происходят на гидроэлектростанциях? **3.** Назовите основные способы уменьшения потерь в ЛЭП. **4.** Опишите схему передачи электроэнергии на большие расстояния, используя рисунок 6.40. **5.** Какими преимуществами и недостатками обладают ЛЭП переменного тока? **6.** Приведите примеры экологически чистых видов энергетики.



1. Для уменьшения потерь на выделение количества теплоты в ЛЭП повышают напряжение, уменьшая силу тока. Не противоречит ли это формуле $Q = \frac{U^2}{R}t$?

2. Почему потери электроэнергии, вызванные коронным разрядом, больше при её передаче переменным током, чем при передаче постоянным?

§ 39

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

ВОЗНИКНОВЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ.

Переменное магнитное поле порождает электрическое поле с замкнутыми силовыми линиями. При изменении со временем магнитной индукции $\vec{B}$ возникает электрическое поле, линии напряжённости которого охватывают линии магнитной индукции (рис. 6.43). Чем быстрее меняется магнитная индукция, тем больше напряжённость электрического поля. При возрастании магнитной индукции $\left(\frac{\Delta B}{\Delta t} > 0\right)$ направление напряжённости образует *левый винт* с направлением вектора $\vec{B}$.

Максвелл допустил, что *во всех случаях, когда электрическое поле изменяется со временем, оно порождает магнитное поле*. Линии магнитной индукции этого поля охватывают линии напряжённости электрического поля (рис. 6.44) подобно тому, как линии напряжённости электрического поля охватывают линии индукции переменного магнитного поля. Но только при возрастании напряжённости электрического поля $\left(\frac{\Delta E}{\Delta t} > 0\right)$ направление вектора индукции $\vec{B}$ возникающего магнитного поля образует *правый винт* с направлением вектора $\vec{E}$.

* Если, напротив, магнитное поле убывает, то линии напряжённости $\vec{E}$ образуют *правый винт* с линиями магнитной индукции $\vec{B}$, а при ослаблении электрического поля линии магнитной индукции $\vec{B}$ образуют *левый винт* с линиями напряжённости $\vec{E}$.

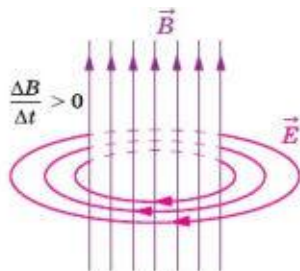


Рис. 6.43

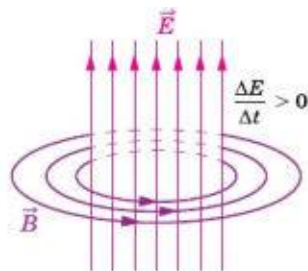


Рис. 6.44

Утверждение Максвелла некоторое время оставалось не чем иным, как гипотезой. Впоследствии её справедливость была доказана экспериментальным обнаружением электромагнитных волн.

Таким образом, *электромагнитные волны существуют только потому, что переменное магнитное поле порождает переменное электрическое поле, которое, в свою очередь, порождает магнитное поле и т. д.*

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ. Электрические и магнитные поля — проявление *единого электромагнитного поля*. В зависимости от того, в какой системе отсчёта рассматриваются электромагнитные процессы, проявляются те или иные стороны этого поля.

Согласно теории дальнего действия, кулоновская сила, действующая на электрический заряд, мгновенно изменится, если соседний заряд сдвинуть с места. По Максвеллу же дело обстоит совершенно иначе. Перемещение заряда меняет электрическое поле вблизи него. Это переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле в соседних областях пространства. Переменное магнитное поле, в свою очередь, порождает переменное электрическое поле и т. д. Причём возникающее вихревое магнитное или вихревое электрическое поле гасит поле в тех областях пространства, где оно уже имелось, но захватывает новые области пространства (рис. 6.45).

Перемещение заряда вызывает, таким образом, «всплеск» электромагнитного поля, который, распространяясь, охватывает всё большие области окружающего пространства, перестраивая то поле, которое существовало до смещения заряда. Наконец, этот «всплеск» достигает второго заряда, что и приводит к изменению действующей на него силы. Процесс распространения электромагнитного возмущения, механизм которого был раскрыт Максвеллом, протекает с конечной, хотя и очень большой скоростью. Он чисто математически показал, что скорость распространения этого процесса равна скорости света в пустоте — 300 000 км/с.

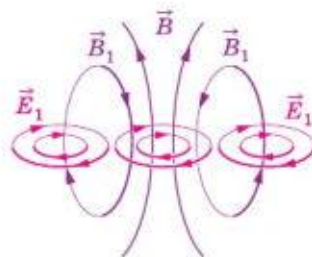


Рис. 6.45

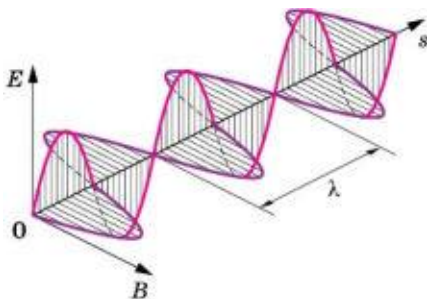


Рис. 6.46

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА. Пусть электрический заряд не просто сместился из одной точки пространства в другую, а приведён в быстрые колебания вдоль некоторой прямой. Тогда электрическое поле в непосредственной близости от заряда начнёт периодически изменяться. Период этих изменений равен периоду колебаний заряда.

Переменное электрическое поле будет порождать периодически меняющееся магнитное поле, а последнее, в свою оче-

редь, вызовет появление переменного электрического поля уже на большем расстоянии от заряда и т. д. В окружающем заряд пространстве, захватывая всё большие области, возникает система периодически изменяющихся электрических и магнитных полей. На рисунке 6.46 изображён «моментальный снимок» такой системы полей. Образуется так называемая *электромагнитная волна*, бегущая по всем направлениям от колеблющегося заряда.

Электромагнитные волны излучаются колеблющимися зарядами. При этом существенно, что скорость движения таких зарядов меняется со временем, т. е. что они движутся с *ускорением*. Наличие ускорения — главное условие излучения электромагнитных волн.

Обратим внимание, что векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ в электромагнитной волне перпендикулярны друг другу и перпендикулярны направлению распространения волны. Другими словами, электромагнитная волна является *поперечной*.

Расстояние между двумя ближайшими максимумами или минимумами возмущения электромагнитного поля называют *длиной волны* λ .

Период T и частота ν электромагнитных колебаний связаны соотношением $T = \frac{1}{\nu}$, следовательно, $\lambda = \frac{v}{\nu}$ или $v = \lambda \nu$.

Скорость распространения электромагнитной волны равна произведению длины электромагнитной волны на частоту электромагнитных колебаний. Модуль скорости распространения электромагнитных волн в вакууме приближённо равен модулю скорости света в вакууме — $3 \cdot 10^8$ м/с.

Важно подчеркнуть, что, в отличие от механических волн, электромагнитные волны могут распространяться в тех областях пространства, где отсутствует вещество, т. е. в вакууме.

ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН. Электромагнитные волны были экспериментально получены Герцем. В своих опытах для получения электромагнитных волн он использовал устройство, называемое сейчас *вибратором Герца*. Оно представляет собой открытый колебательный кон-

ний вибратора, Герц смог определить скорость электромагнитной волны по формуле $v = \lambda \nu$. Она оказалась равной скорости света $c = 300\,000$ км/с.

Таким образом, опыты Герца блестяще подтвердили теоретические предсказания Максвелла.

ИНТЕНСИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ. Электромагнитные волны переносят энергию из одних участков пространства в другие. Перенос энергии осуществляется вдоль *лучей* — воображаемых линий, указывающих направление распространения волны.

Интенсивностью электромагнитной волны I называют отношение электромагнитной энергии ΔW , проходящей за время Δt через перпендикулярную лучам площадку площадью S , к произведению площади S на время Δt .

$$I = \frac{\Delta W}{S \Delta t}.$$

Другими словами, интенсивность — это энергия, переносимая волной через единичную площадку (перпендикулярную лучам) в единицу времени, или, что то же самое, это мощность излучения, проходящего через единичную площадку

Единицей интенсивности в СИ является *ватт на квадратный метр* (Вт/м²). Интенсивность характеризует, в частности, степень воздействия электромагнитного излучения на его приёмники.

СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН. По длине волны (или частоте) спектр электромагнитных волн условно делят на несколько диапазонов (рис. 6.49). Кратко охарактеризуем некоторые диапазоны электромагнитных излучений.

Радиоволны занимают диапазон частот от $3 \cdot 10^4$ до $3 \cdot 10^{11}$ Гц. Их получают при помощи генераторов высокой и сверхвысокой частоты. Радиоволны больших частот излучаются в окружающее пространство, что позволяет использовать их для передачи информации на значительные расстояния (радиосвязь, телевидение). Обнаружение и точное определение местонахождения объектов с помощью радиоволн называют радиолокацией. Для определения расстояния до цели используют импульсный режим излучения радиолокатора. Его передатчик излучает волны кратковременными импульсами. Во время пауз принимаются отражённые волны. В общем случае расстояние L до предмета, отразившего радиоволны, определяют по формуле:

$$L = \frac{c\tau}{2},$$

где τ — промежуток времени между посланным и принимаемым сигналами.



Рис. 6.49

Инфракрасному излучению соответствует диапазон частот от 10^{11} до $3,85 \cdot 10^{14}$ Гц ($\lambda = 780$ нм — 1 мм). Оно возникает в результате колебательных и вращательных движений атомов и молекул вещества. Его испускает любое нагретое тело. Мощным источником инфракрасного излучения является Солнце. Около 50% его излучения лежит в инфракрасной области. В настоящее время созданы приборы ночного видения, например бинокли, оптические прицелы, преобразующие невидимое глазом инфракрасное изображение объекта в видимое.

Видимое излучение (свет) — единственный диапазон электромагнитных волн, воспринимаемый человеческим глазом. Световые волны занимают достаточно малый диапазон длин волн: от 380 нм до 780 нм ($\nu = 3,85 \cdot 10^{14}$ — $7,89 \cdot 10^{14}$ Гц). Источником видимого излучения являются валентные электроны в атомах и молекулах, изменяющие своё положение в пространстве, а также свободные заряды, движущиеся с ускорением. Эта часть спектра электромагнитных волн даёт человеку максимальную информацию об окружающем мире. Изучению световых волн будет посвящён отдельный раздел учебника.

Ультрафиолетовое излучение занимает диапазон частот от $8 \cdot 10^{14}$ до $3 \cdot 10^{16}$ Гц ($\lambda = 10$ —380 нм). Мощными источниками этого излучения являются Солнце, звёзды и другие космические объекты. Ультрафиолетовое излучение может оказывать как полезное, так и вредное воздействие на человеческий организм. Так, оно убивает болезнетворные бактерии, благодаря чему используется в медицине. Вместе с тем в больших дозах оно может вызвать повреждение сетчатки глаза и ожог кожи. Для защиты от ультрафиолетового излучения используют очки, контактные линзы.

Рентгеновское излучение занимает на шкале электромагнитных волн диапазон частот от $3 \cdot 10^{16}$ до $3 \cdot 10^{20}$ Гц ($\lambda = 10^{-12}$ — 10^{-18} м). Большая проникающая способность рентгеновского излучения используется в медицине (рентгеновские снимки, флюорография), науке и технике (рентгеноструктурный анализ кристаллов, обнаружение дефектов в образцах).

Создание приёмников рентгеновского излучения и размещение их на космических станциях позволили обнаружить рентгеновское излучение звёзд и целых галактик. Но рентгеновское излучение является ионизирующим: оно воздействует на ткани живых организмов и может быть причиной лучевой болезни, ожогов и злокачественных опухолей.

Гамма-излучение — самое коротковолновое электромагнитное излучение, занимающее диапазон частот от $3 \cdot 10^{20}$ Гц ($\lambda < 10^{-12}$ м). Оно возникает, например, при распаде радиоактивных ядер, при распаде элементарных частиц, при прохождении быстрых электронов через вещество. Гамма-излучение обладает ещё большей проникающей способностью, чем рентгеновское излучение. Оно проникает сквозь метровый слой бетона, слой свинца толщиной несколько сантиметров.



1. Что порождает изменяющееся с течением времени: а) магнитное поле; б) электрическое поле? **2.** В чём заключалась гипотеза Максвелла? **3.** Проявлением какого поля являются электрические и магнитные поля? **4.** Что представляет собой электромагнитная волна? **5.** Какими свойствами обладают электромагнитные волны? **6.** На какие диапазоны условно делят спектр электромагнитных волн по длине волны (или частоте)?



1. В системе отсчёта, движущейся со скоростью упорядоченного перемещения электронов в проводнике, электроны покоятся. Почему же и в этой системе на проводник будет действовать со стороны магнитного поля сила Ампера?

2. Передающий и приёмный вибраторы расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях. Возникнут ли электромагнитные колебания в приёмном вибраторе? Почему?



§ 40

ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ



А. С. ПОПОВ

ИЗОБРЕТЕНИЕ РАДИО. Опыты Герца, описание которых появилось в 1888 г., заинтересовали физиков всего мира. Мысль о практическом использовании электромагнитных волн возникла сразу же у многих учёных. Однако из-за невысокой чувствительности приёмника Герца и неудобного способа наблюдения принимаемых сигналов осуществление приёма было возможно только на расстояниях 8—10 м от передатчика.

В России одним из первых занялся изучением передачи электромагнитных волн преподаватель офицерских минных курсов в Кронштадте Александр Степанович Попов (1859—1906). Для того чтобы обеспечить

автоматический приём электромагнитных волн, он использовал звонокное устройство для встряхивания когерера* после приёма сигнала. Цепь электрического звонка замыкалась с помощью специального электромагнитного реле. Это реле было включено в цепь когерера и срабатывало в момент прихода электромагнитной волны. С окончанием приёма сигнала работа звонка сразу же прекращалась, так как молоточек звонка ударял не только по звонковой чашке, но и по когереру. С последним встряхиванием когерера электромагнитное реле отключало звонок, и аппарат был готов к приёму следующей волны. Схема приёмника Попова приведена на рисунке 6.50.

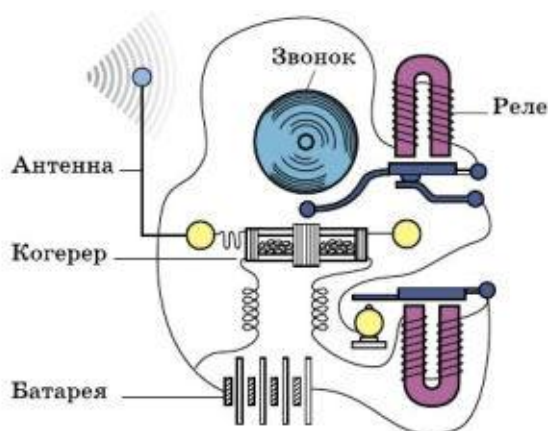


Рис. 6.50

Для того чтобы увеличить чувствительность аппарата, Попов один из выводов когерера заземлил, а другой присоединил к высоко поднятому куску проволоки, создав тем самым приёмную антенну. Заземление превращает проводящую поверхность земли в часть открытого колебательного контура, что увеличивает дальность приёма.

7 мая 1895 г. на заседании Русского физико-химического общества Попов выступил с докладом «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям» и продемонстрировал созданный им первый в мире радиоприёмник (рис. 6.51). Этот день вошёл в историю мировой науки и техники как день рождения радио. 24 марта 1896 г. Попов с помощью сконструированных им передатчика и приёмника радиосигналов смог передать первую в мире радиограмму на расстояние в 250 м. Летом следующего года дальность беспроводной связи была увеличена до 5 км.



Рис. 6.51

* Когерер представляет собой стеклянную трубку с двумя электродами, в которой находятся мелкие металлические опилки. В обычных условиях когерер обладает большим сопротивлением, так как опилки имеют плохой контакт друг с другом. Пришедшая электромагнитная волна создаёт в когерере переменный ток высокой частоты. Между опилками проскакивают мельчайшие искорки, которые «спекают» их. В результате сопротивление когерера резко падает.



Г. МАРКОНИ

Наряду с Поповым весьма схожее приёмное устройство в сочетании с искровым излучателем Герца применил итальянский изобретатель Гульельмо Маркони (1874—1937) в системе передачи на расстояние сигналов Морзе посредством электромагнитных волн. В устройствах, разработанных Маркони, были использованы антенны в виде высоко поднятого вертикального провода и заземления. Особенно важным было включение длинной антенны в передатчик. 12 декабря 1901 г. Маркони осуществил одностороннюю радиосвязь через Атлантический океан, а в 1907 г. была открыта первая трансатлантическая служба беспроволочной связи.

радиосвязь через Атлантический океан, а в 1907 г. была открыта первая трансатлантическая служба беспроволочной связи.

ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ. Радиосвязь — это передача и приём информации посредством электромагнитных волн в широком диапазоне частот — от $3 \cdot 10^4$ до $3 \cdot 10^{11}$ Гц. Схема радиосвязи представлена на рисунке 6.52.

На передающей станции генератор высокочастотных колебаний возбуждает в антенне вынужденные колебания (рис. 6.52, а). Излучаемые передающей антенной электромагнитные волны распространяются во все стороны и достигают антенны приёмной станции (рис. 6.52, б). Под действием переменного электромагнитного поля волны электроны в приёмной антенне приходят в движение. В антенне возникает переменный ток высокой частоты. Приёмный контур выделяет из всех частот, возбуждённых в антенне, только колебания, частота которых равна собственной частоте контура.

При радиотелефонной связи колебания давления воздуха в звуковой волне преобразуются с помощью микрофона в электрические колебания той же формы. Казалось бы, достаточно усилить эти колебания, подать в антенну, и передача на расстояние речи и музыки с помощью электромагнитных волн будет осуществлена. Однако в действительности такой простой способ передачи неосуществим.

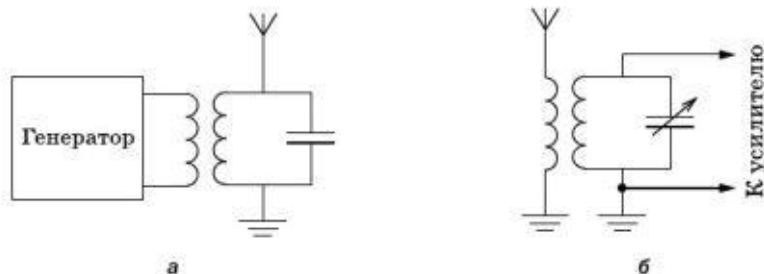


Рис. 6.52

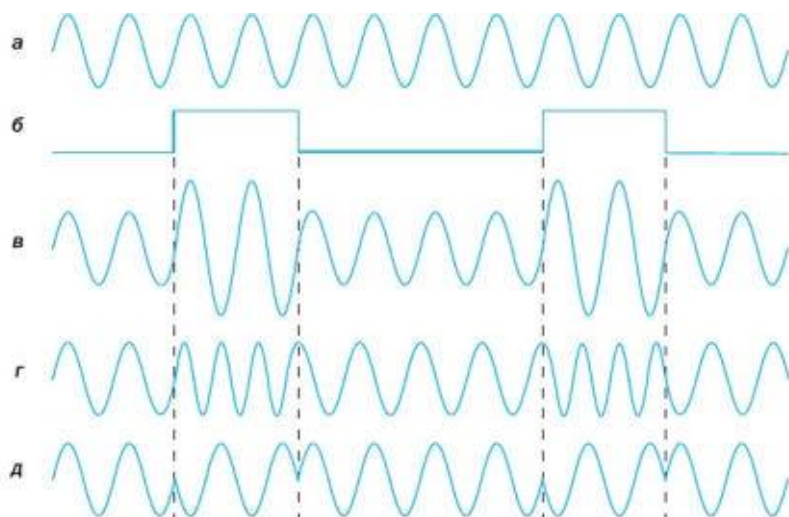


Рис. 6.53

Частота звуковых колебаний мала, а электромагнитные волны низкой (звуковой) частоты имеют малую интенсивность. Поэтому для передачи используются высокочастотные колебания*, вырабатываемые генератором (рис. 6.53, а). Колебания же низкой (звуковой) частоты (рис. 6.53, б) применяют лишь для изменения высокочастотных колебаний, или, как говорят, для их *модуляции*.

Модуляцией электромагнитной волны называют изменение её характеристик (амплитуды, частоты или фазы) при помощи колебаний с частотами, значительно меньшими частоты самой электромагнитной волны.

Соответственно различают амплитудную (рис. 6.53, в), частотную (рис. 6.53, г) и фазовую (рис. 6.53, д) модуляции колебаний. Частота исходной (немодулированной) волны называется *несущей частотой*, а частота изменения характеристик волны при модуляции — *частотой модуляции*. В радиоприёмнике из модулированных колебаний высокой частоты после их усиления получают низкочастотные колебания. Такой

* Можно показать, что интенсивность излучения электромагнитной волны прямо пропорциональна четвёртой степени её частоты. При увеличении частоты колебаний всего лишь в 2 раза излучаемая энергия возрастает в 16 раз. Поэтому при колебаниях низкой частоты излучения практически не происходит.

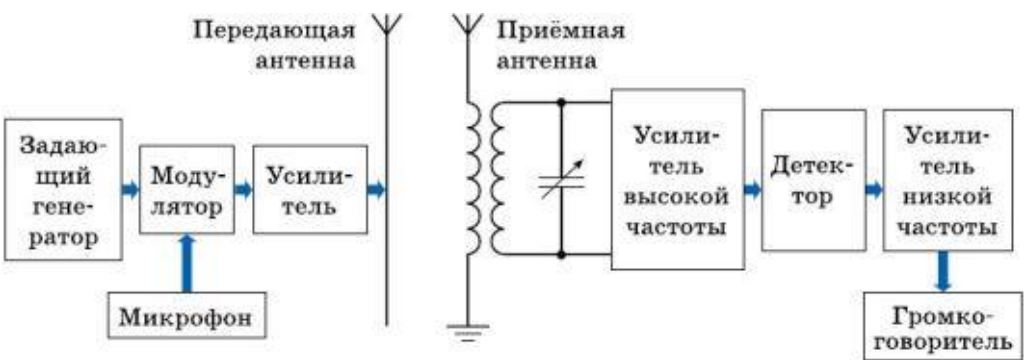


Рис. 6.54

процесс преобразования называется *детектированием* или *демодуляцией*. Полученный в результате детектирования низкочастотный сигнал соответствует тому звуковому сигналу, который действовал на микрофон передатчика. После усиления электрические колебания низкой частоты могут быть преобразованы в звуковые колебания или использованы для других целей. Блок-схема радиовещательного тракта приведена на рисунке 6.54.

ПОНЯТИЕ О ТЕЛЕВИДЕНИИ. С помощью радиоволн можно осуществлять передачу не только звуковых сигналов, но и изображений.

Общая схема телевизионного вещания подобна схеме обычного радиовещания (см. рис. 6.54). Однако в телевизионном передатчике наряду с сигналом звукового сопровождения создаётся ещё видеосигнал (сигнал изображения) со своей несущей частотой. Колебания с этой несущей частотой модулируются сигналом изображения, поступающим от особых передающих электронно-лучевых трубок (иконоскопов, видиконов или суперотиконов). В модулированный видеосигнал входят также сигналы для синхронизации развёртки электронного луча в приёмной электронно-лучевой трубке (кинескопе), на экране которой возникает изображение.

- Телевизионная схема включает в себя следующие устройства:
- 1) Телевизионная передающая камера (предназначена для преобразования изображения, получаемого при помощи объектива на мишени передающей трубки или полупроводниковой матрицы, в телевизионный видеосигнал).
 - 2) Телекинопроектор (преобразует изображение и звук на киноплёнке в телевизионный сигнал и позволяет демонстрировать кинофильмы по телевидению).
 - 3) Видеомagniтофон (записывает и в нужный момент воспроизводит видеосигнал, сформированный передающей камерой или телекинопроектором).

4) Видеомикшер (позволяет переключаться между несколькими источниками изображения: камерами, видеомагнитофонами и др.).

5) Передатчик (несущий сигнал высокой частоты модулируется телевизионным сигналом и передаётся по радио или проводам).

6) Приёмник — телевизор (с помощью синхроимпульсов, содержащихся в видеосигнале, телевизионное изображение воспроизводится на экран приёмника — кинескоп, ЖК-дисплей, плазменную панель).

В цветном телевидении применяют три видеосигнала, соответствующие трём основным цветам — красному, зелёному и синему. Для передачи изменяющихся изображений используют покадровый способ. Кадры представляют собой изображения, сменяющие друг друга с частотой $1/25$ с. Физиологическая особенность нашего зрения состоит в том, что такая смена кадров воспринимается человеческим глазом как непрерывное движение.

Существуют различные системы передачи телевидения.

Наземное телевидение — система передачи телевизионного сигнала к потребителю при помощи телевизионных вышек и передатчиков, работающих в диапазоне частот 47—862 МГц. Для приёма сигнала используется внутрикомнатная или наружная антенна.

Спутниковое телевидение — система передачи телевизионного сигнала от передающего центра к потребителю, использующая в качестве ретранслятора искусственные спутники Земли, расположенные в космосе на геостационарной околоземной орбите над экватором и оснащённые приёмопередающим оборудованием. Спутниковое телевидение обеспечивает покрытие качественным телевизионным сигналом больших территорий, труднодоступных для ретрансляции обычным способом.

Аналоговое телевидение — телевизионная система, использующая для получения, вывода и передачи изображения и звука аналоговый электрический сигнал.

Цифровое телевидение — технология передачи телевизионного изображения и звука при помощи цифрового кодирования видеосигнала и звукового сигнала.



1. Опишите схему приёмника Попова, представленную на рисунке 6.50. 2. Какой вклад в развитие радиосвязи внесли Попов и Маркони? 3. Какие устройства входят в систему радиосвязи? 4. В чём заключается процесс: а) модуляции; б) детектирования электромагнитных волн? 5. Как осуществляется передача изображений с помощью радиоволн?



1. Опишите схему радиовещательного тракта, показанную на рисунке 6.54. 2. Почему, когда автомобиль проезжает под эстакадой или мостом, радиоприёмник в нём плохо работает?



УПРАЖНЕНИЯ

1. Радиолокатор работает на волне длиной 15 см и испускает 4000 импульсов в 1 с. Длительность каждого импульса составляет 2 мкс. Сколько электромагнитных колебаний содержится в каждом импульсе? Определите глубину разведки локатора.
2. Радиолокатор посылает 5000 импульсов в секунду. Определите дальность действия, на которую рассчитан данный радиолокатор. Сколько электромагнитных колебаний содержится в каждом импульсе, если радиолокатор работает на длине волны 12 см, а продолжительность каждого импульса равна $2 \cdot 10^{-5}$ с?
3. Колебательный контур радиоприёмника настроен на частоту 12 МГц. Во сколько раз нужно изменить ёмкость конденсатора контура, чтобы настроиться на частоту, соответствующую длине волны 50 м?



ЗАДАНИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ И ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

1. Соберите простейший детекторный приёмник. Проведите испытания, установите, какие частоты радиоволн способно уловить это устройство.
2. Соберите супергетеродинный радиоприёмник. Проведите испытания, установите, какие частоты радиоволн способно уловить это устройство.
3. Используя школьный генератор и приёмник электромагнитных волн, произведите съёмку учебного фильма на тему «Основные свойства электромагнитных волн».

Примерные темы рефератов и проектов

1. Трансформаторы: устройство, принцип действия, применение.
2. Производство и передача электроэнергии: достижения и проблемы.
3. Спектр электромагнитных волн: диапазоны частот (длин волн), источники излучений, примеры применения.
4. Современные средства связи.
5. Физические основы передачи изображений с помощью радиоволн.





ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Оптика — раздел физики, в котором изучаются природа света, процессы его распространения и явления, наблюдаемые при взаимодействии света и вещества. Традиционно оптику разделяют на геометрическую (лучевую) и физическую (волновую).

Геометрическая оптика не рассматривает вопрос о природе света и причинах световых явлений, а опирается на эмпирические законы его распространения. В ней используется представление о световых лучах, отражающихся и преломляющихся на границах сред с разными оптическими свойствами и распространяющихся прямолинейно в оптически однородной среде.

Физическая оптика исследует вопросы, связанные с природой света и световых явлений. К явлениям, в которых проявляется волновая природа света, относятся интерференция, дифракция, поляризация.

В этой главе будут рассмотрены законы геометрической оптики и их применение при построении изображений в плоских зеркалах и линзах.

§ 41

ЗАКОН ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА. ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ. В геометрической оптике законы распространения света рассматриваются на основе представления о световых лучах и модели точечного источника света.

Направление распространения любых волн, в том числе и световых, определяется с помощью *лучей*.

Луч — прямая линия, перпендикулярная волновой поверхности и указывающая направление распространения энергии волны.

Понятие светового луча можно применять в том случае, когда *длина световой волны много меньше размеров тел, составляющих оптическую систему*. Направление пучка световых лучей можно найти экспериментально. Для этого нужно поставить на пути света непрозрачный экран с небольшим отверстием. Тогда в задымлённой комнате мы увидим путь света в виде узкого прямолинейного канала — светового пучка.

Все тела, которые испускают свет, называют *источниками света*. Тепловыми источниками света являются, например, Солнце, звёзды, пламя свечи, нить накала электрической лампочки. Многие тела, от которых исходит свет, сами его не излучают. Так, Луна светит отражённым светом, падающим на неё от Солнца.

Источник света, размеры которого много меньше расстояний до освещаемых тел, называют точечным.

При изучении распространения света мы будем считать, что свойства среды, в которой находится источник света, во всех точках и по всем направлениям одинаковы. Такую среду называют *однородной и изотропной*.

ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА. Прямолинейность распространения света — эмпирический закон, установленный в глубокой древности. Ещё в Древней Месопотамии за 5000 лет до н. э. люди знали о прямолинейном распространении света. В Древнем Египте это свойство света использовалось при строительстве пирамид. Закон прямолинейного распространения света был изложен в сочинениях Евклида (300 лет до н. э.).

В середине XVII в. французский учёный Пьер Ферма (1601—1665) выдвинул *принцип наименьшего действия*, из которого вытекали все законы геометрической оптики.

Принцип Ферма заключается в следующем: *свет, идущий из одной точки пространства в другую, всегда распространяется по пути, требующему минимального времени*.

Расстояние вдоль прямой — это кратчайшее расстояние между двумя точками. Скорость света в однородной среде во всех точках одна и та же. Следовательно, меньше всего времени для перехода света из одной точки среды в другую нужно именно при прямолинейном распространении.

Сформулируем *закон прямолинейного распространения света*.

В прозрачных однородных средах свет распространяется по прямым линиям.

Прямолинейностью распространения света в однородной среде объясняется явление образования тени. Если бы свет распространялся не прямолинейно, он мог бы обогнуть препятствие и тень бы не возникала.

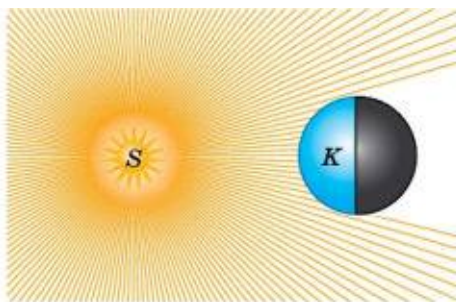


Рис. 7.1

Пусть S представляет собой точечный источник света, а K — тело, преграждающее путь свету, который падает на него от источника S (рис. 7.1). Свет распространяется прямолинейно, поэтому он задерживается телом K , в результате чего за этим телом образуется конус тени. При этом свет от источника S не достигает точек этого конуса.

Если размеры источника света велики по сравнению с расстоянием от него до препятствий, то свет от каждой точки тела формирует отдельный конус позади препятствия. В данном случае образуются области тени и полутени. В область полутени свет попадает не от всего источника, а только от некоторых его частей.

На рисунке 7.2 показано сечение конусов тени, образованных за телом B светом, распространяющимся от двух точек источника света. Предполагается, что световые лучи распространяются независимо друг от друга. Встречаясь или пересекаясь, они не оказывают никакого взаимного влияния. Это свойство света часто называют *законом независимости световых пучков* (рис. 7.3).

Образованием тени и полутени объясняются такие явления, как лунные и солнечные затмения. Кроме того, на явлении прямолинейного распространения света основано получение изображений предметов с помощью малых отверстий в непрозрачных экранах (например, в камере-обскуре).

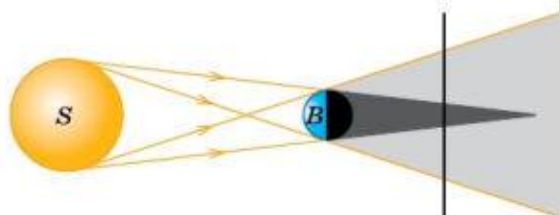


Рис. 7.2



Рис. 7.3



Рис. 7.4

ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА. Отражение света — это явление, при котором световая волна изменяет направление, но продолжает распространяться в той же среде. Если поверхность зеркальная, то падающий на неё пучок параллельных лучей отражается в одном направлении. В этом случае говорят о *зеркальном отражении*. Оно возникает на очень гладких поверхностях, например на ровном стекле, на поверхности озера в безветренную погоду (рис. 7.4). В случае шероховатой поверхности падающий на неё пучок параллельных лучей отражается по всевозможным направлениям. Такой вид отражения света называют *диффузным* (или *рассеянным*). Обычный лист бумаги отражает свет диффузно. Именно благодаря рассеянному отражению света мы можем видеть предметы, которые сами не излучают свет.



Для того чтобы получить закон отражения света, воспользуемся установкой (оптическим диском), представленной на рисунке 7.5. Установим плоское зеркало в центре кругового диска,

разделённого на градусы, так, чтобы лучи падали к основанию перпендикуляра CN к плоскости зеркала. Пусть SC — падающий луч, CS_1 — отражённый луч, точка C — точка падения луча. Угол SCN между падающим лучом и перпендикуляром, проведённым к плоскости зеркала в точке падения луча, называют *углом падения*. Угол S_1CN между отражённым лучом и перпендикуляром к плоскости зеркала в точке падения луча называют *углом отражения*.

Из опыта видно, что луч падающий и луч отражённый лежат в одной плоскости с перпендикуляром к плоскости зеркала, проведённым из точки падения.

Измерив по шкале диска углы падения и отражения, можно убедиться в том, что они равны. Можно изменять угол падения, перемещая источник света.

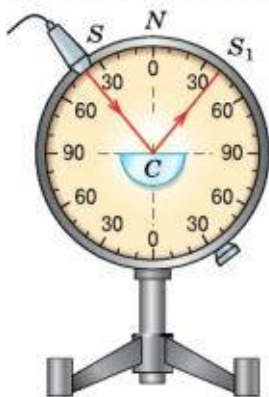


Рис. 7.5



При этом будет изменяться и угол отражения, но так, что эти два угла по-прежнему будут равны.

Сформулируем закон отражения света.

Падающий и отражённый лучи и перпендикуляр к поверхности, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Угол падения равен углу отражения.

ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ПЛОСКИХ ЗЕРКАЛАХ. Рассмотрим, как использовать закон отражения света при построении изображений в плоских зеркалах.

Плоским зеркалом называют плоскую поверхность, зеркально отражающую свет.

Пусть светящаяся точка S находится перед плоским зеркалом. Где мы увидим изображение этой точки, если посмотрим в зеркало? Для ответа на этот вопрос построим ход нескольких лучей, выходящих из точки S . После отражения от зеркала такие лучи, как видно из рисунка 7.6, попадают в глаз наблюдателя. Человеку кажется, что лучи выходят из точки S_1 , которую можно найти, продолжив лучи в противоположную сторону до пересечения. Точка S_1 будет являться изображением точки S в плоском зеркале. Это изображение называют *мнимым*, так как в точке S_1 пересекаются не сами отражённые лучи, а их продолжения (световая энергия в эту точку не поступает).

Для того чтобы найти положение точки S_1 , достаточно рассмотреть любые два луча расходящегося пучка. Обычно используют крайние лучи пучка, попадающего в глаз. В рассматриваемом случае это лучи AB и CD (см. рис. 7.6). В треугольниках SAC и S_1AC сторона AC общая. Используя закон отражения света, можно доказать, что углы в треугольниках, при-

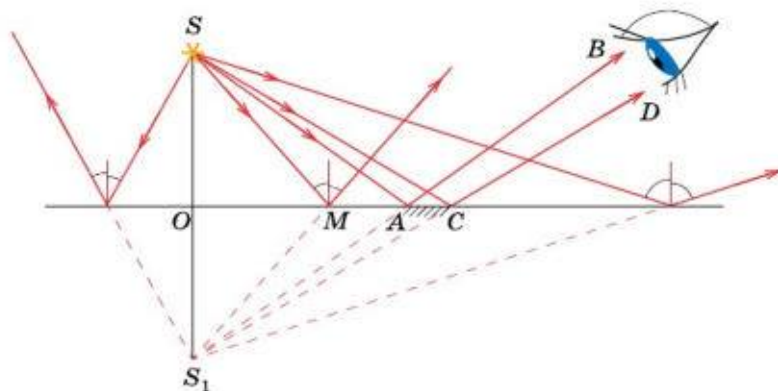


Рис. 7.6

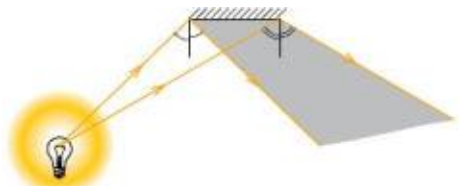


Рис. 7.7

легающие к этой общей стороне, соответственно равны. Следовательно, треугольники SAC и S_1AC равны и совместятся друг с другом, если перегнуть рисунок по линии зеркала. Это означает, что точка S_1 расположена *симметрично* точке S относительно плоскости зеркала. Поэтому для нахождения изображения точки достаточно опустить из неё на зеркало перпендикуляр и продолжить его на такое же расстояние за зеркало.

Для наблюдения изображения существенна лишь та часть AC зеркала, от которой лучи отражаются непосредственно в глаз. Вся остальная часть зеркала может быть закрыта или даже отрезана. Однако с уменьшением размеров зеркала уменьшается и та область пространства, откуда можно видеть изображение S_1 (так называемая *область видения*). Изменяя положение лампочки или зеркала, можно менять область видения изображения (область серого цвета на рис. 7.7).

Таким образом, *изображение предмета в плоском зеркале является прямым, мнимым, симметричным относительно плоскости зеркала, равным по размеру самому предмету.*

Таким образом, *изображение предмета в плоском зеркале является прямым, мнимым, симметричным относительно плоскости зеркала, равным по размеру самому предмету.*

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛОСКИХ ЗЕРКАЛ. Плоские зеркала находят широкое применение в быту. Их устанавливают в салонах автомобилей для лучшего обзора водителем проезжей части вокруг автомобиля. Плоские зеркала используют в шкалах измерительных (в частности, электроизмерительных) приборов высокого класса точности и др.

На практике применяется устройство, состоящее из трёх взаимно перпендикулярных зеркал, расположенных подобно плоскостям декартовой системы координат. Это устройство

называют *угловым отражателем* (рис. 7.8). Оно обладает замечательным свойством: при любом угле падения луч падающий и луч, последовательно отразившийся от трёх зеркал, оказываются *параллельными*. Специальные угловые отражатели были доставлены на Луну и использованы для точного измерения расстояния до неё с помощью лазерных лучей. Погрешность измерения составила всего лишь 0,1 м.



Рис. 7.8



1. Какие вопросы рассматриваются в геометрической оптике?
2. Что называют: а) лучом света; б) точечным источником света; в) однородной и изотропной средой?
3. Как образуются тень и полутень?
4. Сфор-



УПРАЖНЕНИЯ

1. Угловая высота Солнца над горизонтом равна 60° . Какой длины будет тень на земле от вертикально поставленного столба высотой 2 м?
2. В солнечный день длина тени от отвесно поставленной метровой линейки равна 50 см, а от дерева — 6 м. Чему равна высота дерева?
3. Телеграфный столб, освещённый Солнцем, отбрасывает тень длиной 6,9 м, а вертикально стоящий шест высотой 1 м — длиной 1,1 м. Чему равна высота телеграфного столба?
4. Постройте изображение предмета в плоском зеркале и определите графически область видения (рис. 7.11).
5. Матовая электрическая лампочка сферической формы радиусом 3 см освещает глобус радиусом 13 см. Определите диаметр полной тени и полутени глобуса на стене. Расстояние от лампочки до глобуса 1 м, а от глобуса до стены 2 м.

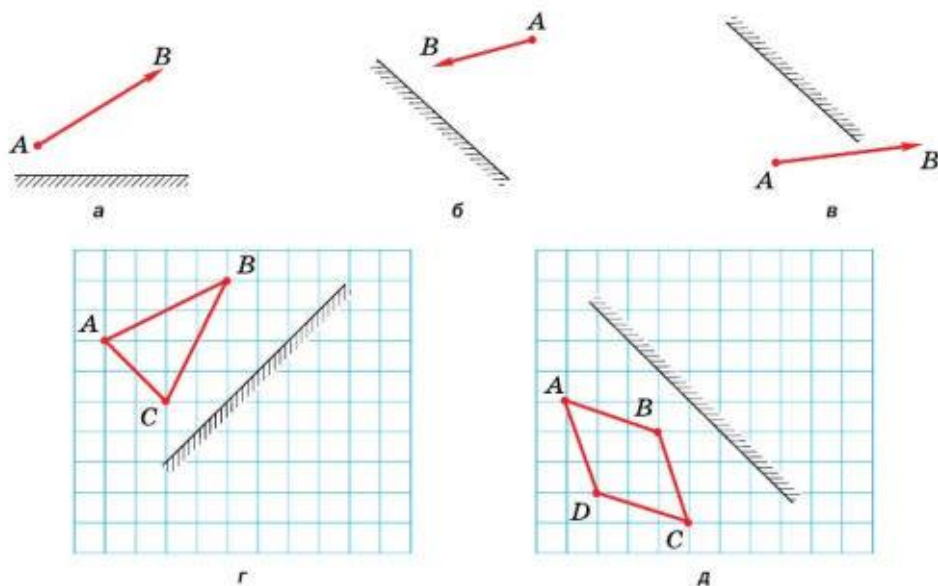


Рис. 7.11

Это любопытно...

Из истории развития физики и техники

О прямолинейном распространении света свидетельствует также получение изображения в *камере-обскуре* (в переводе с латыни — тёмная комната). Это устройство представляет собой светонепроницаемый ящик с отверсти-



Рис. 7.12

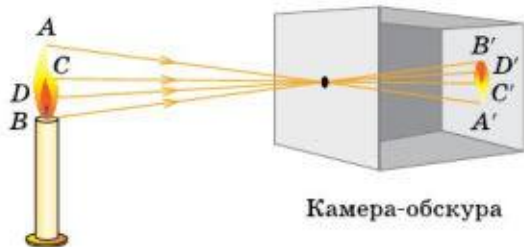


Рис. 7.13

ем в одной из стенок и экраном (матовым стеклом или тонкой белой бумагой) на противоположной стенке (рис. 7.12). Лучи света, проходя сквозь отверстие диаметром приблизительно 0,5—5 мм, создают перевёрнутое изображение на экране (рис. 7.13).

В X в. арабский учёный Ибн аль-Хайсам (Альхазен) (965—1039) использовал специальные палатки для наблюдений за затмениями Солнца. Он сделал маленькое отверстие в пологе палатки и рассматривал изображения Солнца на противоположной стенке. Альхазен был первым, кто объяснил принцип действия камеры-обскуры, основываясь на прямолинейности распространения света.

В 1544 г. нидерландский учёный Рейнер Гемма Фризиус (1508—1555) наблюдал солнечное затмение при помощи камеры-обскуры. Благодаря Фризиусу появилось первое изображение камеры-обскуры в научных трудах. Судя по всему, первым использовал камеру-обскуру для зарисовок с натуры Леонардо да Винчи. Отметим, что многие художники (например, Ян Вермеер Делфтский, 1632—1675) использовали камеру-обскуру для написания пейзажей, портретов, бытовых зарисовок. Итальянский учёный Джамбатиста делла Порта (1535—1615) усовершенствовал камеру-обскуру, добавив к ней собирающую линзу (стеклянную чечевицу). В 1600 г. выдающийся астроном и физик Иоганн Кеплер (1571—1630) изготовил для наблюдения солнечного затмения большую камеру-обскуру, а в 1607 г. он наблюдал с её помощью прохождение Меркурием солнечного диска.

§ 42 ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА

ЯВЛЕНИЕ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА. При распространении волн происходит не только их отражение, но и их преломление. Это относится и к свету. На границе раздела двух изотропных прозрачных однородных сред свет частично отражается, а частично проникает в другую среду, изменяя при этом направление своего распространения, т. е. *преломляется*.



Преломление света можно наблюдать экспериментально. Для этого стеклянный полуцилиндр с матовой задней поверхностью закрепляют на диске так, чтобы середина плоской поверхности



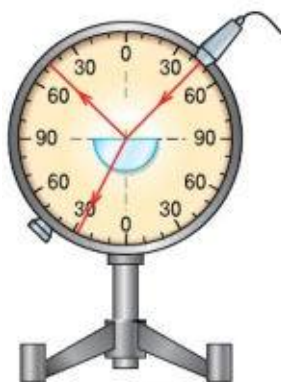


Рис. 7.14

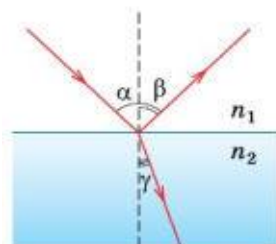


Рис. 7.15

совпадала с центром диска (рис. 7.14). Угол между преломлённым лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред в точке падения луча называют *углом преломления*.

Световой пучок идёт от осветителя вдоль радиуса диска и на границе раздела «воздух — стекло» частично отражается, а частично проходит в стекло и, изменив направление, преломляется. Ход луча в стекле и воздухе виден на матовой стенке диска. Пучок выходит из стекла в воздух перпендикулярно цилиндрической поверхности и поэтому не преломляется. Перемещая осветитель, можно изменять угол падения. При этом изменяются и угол отражения, и угол преломления. Эти углы измеряют по шкале на диске. Появление преломлённого луча свидетельствует о том, что он лежит в той же плоскости, что луч падающий и перпендикуляр к границе раздела сред в точке падения луча. Измерение углов падения и преломления показывает, что отношение их синусов при различных углах падения остаётся постоянным. Тем самым с помощью оптического диска можно убедиться в справедливости закона преломления света.

ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА. Закон преломления света был установлен в 1620 г. голландским учёным Виллебрордом Снеллиусом (1580—1626) и независимо от него французским математиком и физиком Рене Декартом (1596—1650)*. Направим узкий пучок света на границу раздела двух сред (рис. 7.15). В данном случае угол α — угол падения, а угол γ — угол преломления.

Запишем *закон преломления света* для двух изотропных прозрачных однородных сред с показателями преломления n_1 и n_2 .

Луч падающий, луч преломлённый и перпендикуляр, восстановленный к поверхности в точке падения луча, лежат в одной плоскости.

Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для данной пары сред не зависит от угла падения и равно

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}, \quad (1)$$

* Закон преломления света пытался количественно установить ещё греческий учёный Клавдий Птолемей (II в. н. э.). Его измерения относились к сравнительно небольшим углам, поэтому он пришёл к неправильному заключению о пропорциональности углов (а не синусов) падения и преломления.

где n_{21} — относительный показатель преломления второй среды по отношению к первой; v_1 и v_2 — скорости света в первой и второй средах.

Показатель преломления данной среды относительно вакуума называют *абсолютным показателем преломления n этой среды**:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (2)$$

где c — скорость света в вакууме; v — скорость света в данной среде.

Используя формулу (1), можно выразить относительный показатель преломления n_{21} через абсолютные показатели преломления n_1 и n_2 первой и второй сред:

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \text{ и } n_2 = \frac{c}{v_2}, \quad n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (3)$$

С учётом этого можно прийти к следующему выводу:

Произведение абсолютного показателя преломления среды, из которой падает свет, на синус угла падения равно произведению абсолютного показателя преломления второй среды на синус угла преломления.

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma.$$

Из двух прозрачных сред *оптически более плотной* считается та, в которой скорость света меньше. Соответственно, та среда, в которой скорость света больше, является *оптически менее плотной*. При переходе света из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную угол преломления меньше угла падения. Действительно, из выражений (1) и (3) следует, что если $n_2 > n_1$, то $\sin \alpha > \sin \gamma$. Тогда $\gamma < \alpha$. Это означает, что световой луч, попадая в среду оптически более плотную, отклоняется в сторону перпендикуляра к границе двух сред. Если происходит переход луча из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную, угол преломления оказывается больше угла падения.

ХОД ЛУЧА ЧЕРЕЗ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНУЮ ПЛАСТИНКУ. На рисунке 7.16 изображена прозрачная пластинка, грани которой MN и M_1N_1 параллельны. Можно показать, что луч AO_1 пучка света, падающего на грань MN пластинки, после двух преломлений выйдет наружу из пластинки по на-

* Абсолютный показатель преломления среды связан со скоростью распространения света в данной среде. Он зависит от свойств света и среды. Например, в воде или стекле для красного света абсолютный показатель преломления меньше, чем для зелёного света, а для зелёного меньше, чем для фиолетового.

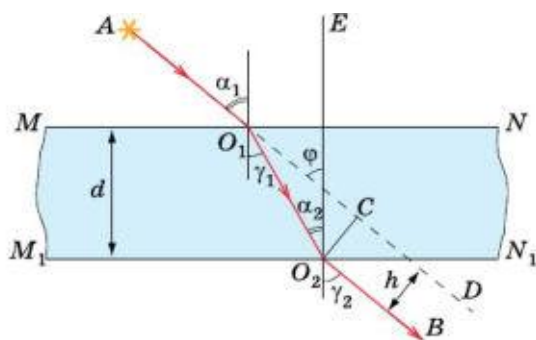


Рис. 7.16

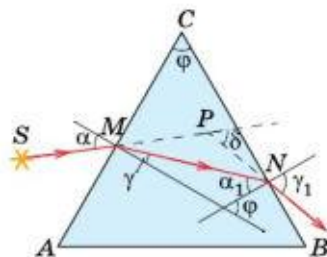


Рис. 7.17

правлению O_2B , параллельному AO_1 . Из рисунка 7.16 видно, что при прохождении луча через плоскопараллельную пластинку луч не изменяет своего направления, он только смещается. Расстояние O_2C между продолжением падающего луча и вышедшим лучом представляет собой смещение h луча.

Чем толще пластинка, чем больше угол падения луча и показатель преломления материала пластинки, тем больше смещение h . Глядя в окно на улицу, мы почти не замечаем смещения (угол падения и толщина стекла малы), зато хорошо замечаем дефекты стекла — изменение толщины и искривление поверхности стекла.

ХОД ЛУЧА ЧЕРЕЗ ТРЕУГОЛЬНУЮ ПРИЗМУ. В оптических приборах часто используется треугольная призма, изготовленная из стекла или других материалов. На рисунке 7.17 изображено сечение стеклянной треугольной призмы плоскостью, перпендикулярной её боковым рёбрам.

Пусть из воздуха на грань AC призмы падает луч света SM . В точке M он преломляется на границе раздела двух сред «воздух — стекло». Угол преломления γ меньше угла падения α . На грани CB призмы в точке N луч снова преломляется, но теперь угол преломления γ_1 больше угла падения α_1 . Испытав дважды преломление, луч оба раза отклоняется к основанию призмы.

Угол отклонения луча δ — это угол между входящим и выходящим лучами. Грани призмы, на которых луч испытал преломление, называют *преломляющими гранями*, третью грань — *основанием призмы*, а двугранный угол ϕ между преломляющими гранями — *преломляющим углом*.

Угол отклонения луча δ зависит от преломляющего угла ϕ , показателя преломления n , материала призмы и угла падения луча α .

1. Что называют углом преломления? 2. Сформулируйте закон преломления света. 3. Что характеризует: а) абсолютный показатель преломления; б) относительный показатель преломления? 4. Какой





а



б

Рис. 7.18

физический смысл имеет абсолютный показатель преломления среды? 5. Какая среда называется: а) оптически более плотной; б) оптически менее плотной? 6. Как распространяется луч через: а) плоскопараллельную пластину; б) треугольную призму?

1. Почему, сидя у горящего костра, мы видим предметы, расположенные по другую сторону костра, колеблющимися?

2. Чем ближе к поверхности Земли, тем больше оптическая плотность воздуха. Как это скажется на ходе луча, падающего в атмосферу Земли из космоса?

3. В знойное время в пустыне наблюдается мираж: появляется двойное изображение предметов — прямое и перевёрнутое (рис. 7.18, а). Как объяснить это явление? Почему над морем мираж выглядит иначе (рис. 7.18, б)? Для ответа на вопрос используйте материал рубрики «Это любопытно» на с. 246—249.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В дно пруда вертикально вбита свая высотой 2,5 м так, что она целиком находится под водой. Определите длину тени, отбрасываемой сваей на дно водоёма, если угол падения лучей на поверхность воды равен 60° . Показатель преломления воды равен 1,33, показатель преломления воздуха — 1.

Дано:

$$H = 2,5 \text{ м}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$n_{\text{в}} = 1,33$$

$$n = 1$$

$$l = ?$$

Решение:

Выполним необходимое построение (рис. 7.19).

Запишем закон преломления света:

$$n \sin \alpha = n_{\text{в}} \sin \gamma \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sin \gamma = \frac{n \sin \alpha}{n_{\text{в}}}.$$

Из прямоугольного треугольника ABC найдём:

$$\frac{l}{H} = \operatorname{tg} \gamma \Rightarrow l = H \operatorname{tg} \gamma.$$

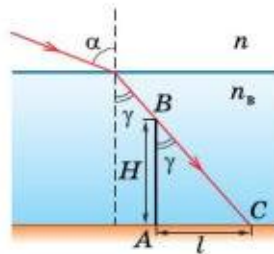


Рис. 7.19

Поскольку $\operatorname{tg} \gamma = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\sin^2 \gamma} - 1}}$, то

$$l = \frac{H}{\sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1 \sin \alpha}\right)^2 - 1}}; l = \frac{2,5}{\sqrt{\left(\frac{1,33}{1 \cdot \sin 60^\circ}\right)^2 - 1}} \text{ м} \approx 2,1 \text{ м.}$$

Ответ: $l \approx 2,1 \text{ м.}$



УПРАЖНЕНИЯ

1. Водолазу, находящемуся под водой, солнечные лучи кажутся падающими под углом 60° к поверхности воды. Чему равна действительная угловая высота Солнца над горизонтом?
2. Под каким углом должен упасть луч на стекло, чтобы преломлённый луч оказался перпендикулярным к отражённому лучу?
3. Луч света падает на границу раздела двух сред под углом 30° . Показатель преломления первой среды равен 2,4. Определите показатель преломления второй среды, если известно, что отражённый и преломлённый лучи перпендикулярны друг другу.
4. В дно реки вбит столб, часть которого высотой 1 м возвышается над поверхностью воды. Найдите длину тени столба на поверхности воды и на дне реки, если высота Солнца над горизонтом равна 30° , а глубина реки — 2 м.
5. Точечный источник света расположен в воздухе над поверхностью воды. Для наблюдателя, находящегося в воде под источником света, расстояние от поверхности воды до источника равно 2,5 м. Определите действительное расстояние от источника до поверхности воды.



Это любопытно...

Интересные факты

Рефракция света в атмосфере — это искривление световых лучей при прохождении в атмосфере, вызванное оптической неоднородностью воздуха. Речь прежде всего идёт об изменении плотности воздуха с высотой и об изменении его плотности при нагревании или охлаждении. Представим, что атмосфера состоит из оптически однородных горизонтальных слоёв; показатель преломления скачкообразно меняется от слоя к слою, постепенно возрастая при переходе от верхних слоёв к нижним. Такая ситуация схематически показана на рисунке 7.20, а, где атмосфера условно представлена в виде трёх слоёв с показателями преломления n_1 , n_2 , n_3 , причём $n_1 < n_2 < n_3$. За верхней границей показатель преломления равен 1.

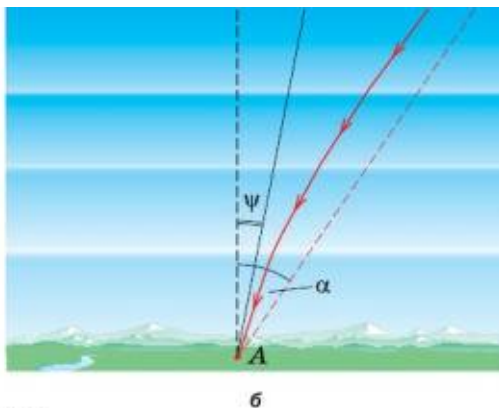
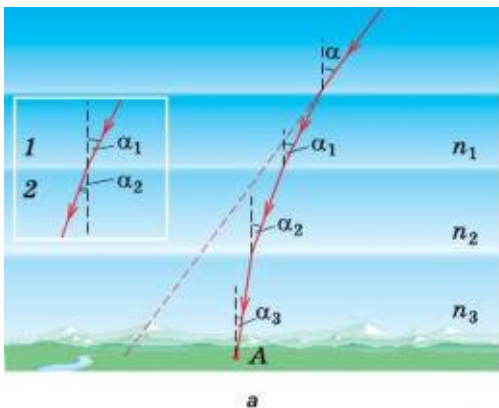


Рис. 7.20

Применяя закон преломления света к неоднородной атмосфере, можно показать, что траектория светового луча, приходящего к земному наблюдателю от некоторого заатмосферного объекта, должна иметь вид ломаной линии (см. рис. 7.20, а). В действительности показатель преломления меняется с высотой не скачкообразно, а непрерывно, поэтому световой луч будет представлять собой не ломаную, а кривую линию (рис. 7.20, б). Если бы не было рефракции в атмосфере, то объект на рисунке был бы виден наблюдателю под углом α , из-за рефракции наблюдатель видит объект не под углом α , а под углом ψ . Так как $\psi < \alpha$, то объект представляется наблюдателю выше линии горизонта; рефракция как бы приподнимает объект над горизонтом.

Из-за рефракции света все небесные тела — звёзды, планеты, Луна и Солнце — кажутся нам расположенными несколько выше над горизонтом, чем в действительности (рис. 7.21). Скорость света меньше у поверхности Земли, чем на высоте, из-за изменения плотности воздуха с высотой. В результате световая волна медленнее движется у поверхности Земли, и волновой фронт постепенно поворачивается к её поверхности. Чем ближе луч света к горизонту, тем больше он смещается вверх. При заходе Солнца его нижний край испытывает кажущееся смещение на $36'$ (угловых минут), а верхний край только на $29'$. Поэтому Солнце у горизонта кажется нам сплюснутым (рис. 7.22).

Мираж — оптическое явление в атмосфере, которое состоит в преломлении света на границе раздела между резко различными по плот-



Рис. 7.21

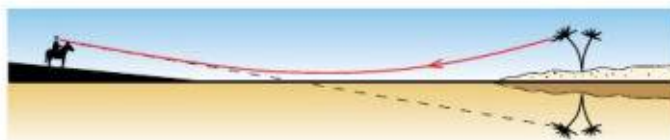


Рис. 7.22

ности и температуре слоями воздуха. Для наблюдателя такое явление заключается в том, что вместе с реально видимым отдалённым объектом также видно и его отражение в атмосфере.

Нижние «озёрные» миражи возникают над сильно нагретой поверхностью, например песком в пустыне. Воздух над песком на некоторое время становится менее плотным, чем в верхних слоях. Поэтому световые лучи, падая очень полого на поверхность нагретого слоя воздуха, искривляются и направляются вверх (рис. 7.23, а, б). Наблюдателю кажется, что они отражаются от земли. Обычно отражение происходит от поверхности воды. Поэтому и кажется, что между наблюдателем и горизонтом находится озеро.

Верхние миражи возникают, наоборот, над сильно охлаждённой поверхностью, например над холодной водой (рис. 7.24). В этом случае лучи света искривляются, поднимаясь в верхние, более тёплые слои атмосферы.



а



б

Рис. 7.23

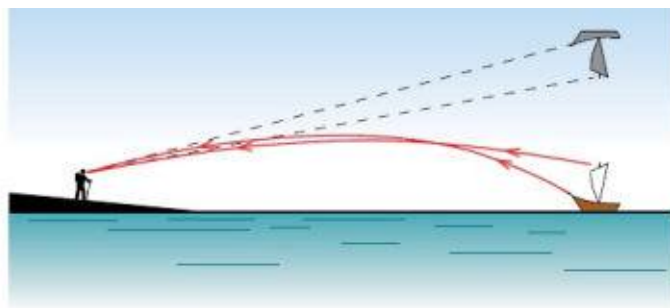


Рис. 7.24

§ 43

ЯВЛЕНИЕ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА. Закон преломления света позволяет объяснить такое явление, как *полное внутреннее отражение света*.



Будем наблюдать переход пучка света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную. Для этого поместим осветитель в нижней части оптического диска (рис. 7.25). Падающий луч направим на полуцилиндр вдоль радиуса диска. На цилиндрической поверхности луч не преломится, так как он падает на неё под прямым углом. Внутри стекла пучок света достигнет центра диска. Здесь на границе раздела двух сред «стекло — воздух» часть пучка отразится в соответствии с законом отражения, а часть пройдёт в воздух, изменив направление. При этом угол преломления будет больше угла падения. Поворачивая осветитель по часовой стрелке (см. рис. 7.25), будем постепенно увеличивать угол падения. При этом интенсивность, а значит, и энергия отражённого пучка возрастают, в то время как интенсивность преломлённого пучка уменьшается. Особенно быстро убывает интенсивность преломлённого пучка, когда угол преломления приближается к 90° . Наконец, когда угол падения становится таким, что преломлённый пучок идёт почти вдоль границы сред «стекло — воздух» (рис. 7.26), доля отражённой энергии близка к 100%. Наибольшему возможному углу преломления $\gamma = 90^\circ$ соответствует угол падения α_0 . Повернём осветитель, сделав угол падения α больше α_0 .

Будем наблюдать переход пучка света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную. Для этого поместим осветитель в нижней части оптического диска (рис. 7.25). Падающий луч направим на полуцилиндр вдоль радиуса диска. На цилиндрической поверхности луч не преломится, так как он падает на неё под прямым углом. Внутри стекла пучок света достигнет центра диска. Здесь на границе раздела двух сред «стекло — воздух» часть пучка отразится в соответствии с законом отражения, а часть пройдёт в воздух, изменив направление. При этом угол преломления будет больше угла падения. Поворачивая осветитель по часовой стрелке (см. рис. 7.25), будем постепенно увеличивать угол падения. При этом интенсивность, а значит, и энергия отражённого пучка возрастают, в то время как интенсивность преломлённого пучка уменьшается. Особенно быстро убывает интенсивность преломлённого пучка, когда угол преломления приближается к 90° . Наконец, когда угол падения становится таким, что преломлённый пучок идёт почти вдоль границы сред «стекло — воздух» (рис. 7.26), доля отражённой энергии близка к 100%. Наибольшему возможному углу преломления $\gamma = 90^\circ$ соответствует угол падения α_0 . Повернём осветитель, сделав угол падения α больше α_0 .

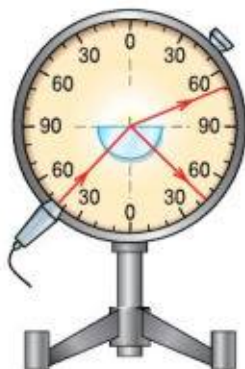


Рис. 7.25

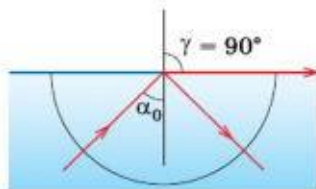


Рис. 7.26

Мы увидим, что преломлённый пучок исчез и весь свет отражается от границы раздела обратно в первую среду (стекло). Наблюдается явление полного внутреннего отражения света.

Наименьший угол падения α_0 , при котором наступает полное внутреннее отражение, называют предельным углом полного отражения.

Полное отражение наблюдается при переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, если световой пучок падает на границу раздела сред под углом, бóльшим предельного.

Если n_1 — показатель преломления среды, из которой выходит пучок света, а n_2 — показатель преломления среды, в которую пучок света входит, причём $n_1 > n_2$, то, согласно закону преломления,

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1},$$
$$\alpha_0 = \arcsin \frac{n_2}{n_1}.$$

Если пучок света переходит из какой-либо среды с показателем преломления n в воздух, показатель преломления которого приближённо можно принять за единицу, то

$$\alpha_0 = \arcsin \frac{1}{n}.$$

Из этого равенства можно найти значение предельного угла полного отражения α_0 . Для воды ($n = 1,33$) $\alpha_0 = 48^\circ 35'$, для стекла ($n = 1,5$) $\alpha_0 = 41^\circ 50'$, для алмаза ($n = 2,4$) $\alpha_0 = 24^\circ 40'$. Во всех случаях второй средой является воздух.

Полным отражением объясняется блеск капель росы на солнечном свете, светящиеся фонтаны, блеск («игра») бриллиантов, хрусталя и т. д.

ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА. Полное отражение используют в так называемой *волоконной оптике* для передачи света и изображения по пучкам прозрачных гибких волокон — *световодам*. Световод представляет собой тонкое волокно цилиндрической формы из кварцевого стекла с добавлением германия или бора. Толщина волокон варьируется от 100 мкм до 1 мкм и меньше.

За счёт многократного полного отражения свет может быть направлен по любому прямому или изогнутому пути (рис. 7.27). Волокна набираются

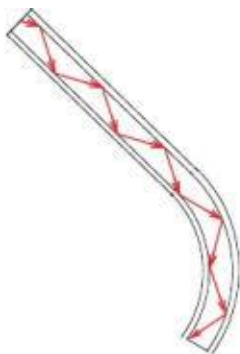


Рис. 7.27

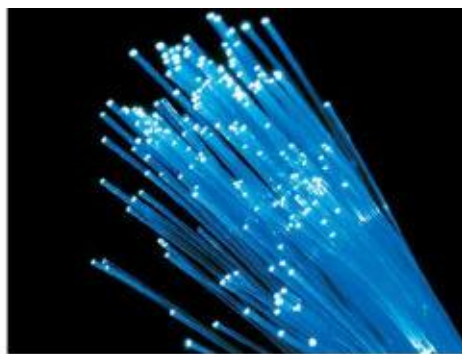


Рис. 7.28

в жгуты (рис. 7.28) с числом волокон до миллиона. Оптические волокна используют для передачи информации на волоконно-оптических телекоммуникационных сетях различных уровней (от межконтинентальных магистралей до домашних компьютерных сетей). Применение оптических волокон для линий связи обусловлено тем, что оптическое волокно обеспечивает высокую защищённость от несанкционированного доступа, низкое затухание сигнала при передаче информации на большие расстояния и возможность оперировать с чрезвычайно высокими скоростями передачи.

Поскольку оптические волокна могут быть очень тонкими, их возможно использовать для исследований кровеносных сосудов, лёгких и других частей тела. Оптические волокна позволяют медикам проводить визуальный анализ и лечение различных заболеваний через крошечные надрезы при помощи инструмента под названием «эндоскоп».

ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ ПРИЗМЫ. На явлении полного внутреннего отражения света основано действие различных *отражательных призм*. Световой луч, войдя в такую призму, испытывает одно или несколько полных внутренних отражений и затем выходит из неё. Призма, показанная на рисунке 7.29, поворачивает пучок света на 90° , что необходимо, например,

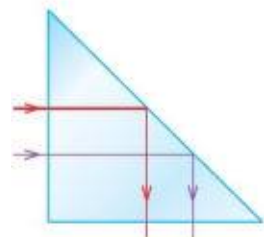


Рис. 7.29

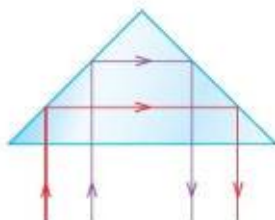


Рис. 7.30



Рис. 7.31

в перископе. Другой случай хода лучей, изображённый на рисунке 7.30, используется в призматических биноклях: направление пучка света изменяется на 180° . Призма, представленная на рисунке 7.31, не изменяет направление пучка, но переворачивает изображение (*оборотная призма*). Верхние лучи становятся нижними, и наоборот. Отражательные призмы применяют в различных оптических приборах.



1. Какое явление называют полным внутренним отражением света?
2. При каких условиях возникает данное явление?
3. Какой угол называют предельным углом полного отражения? Как его можно рассчитать?
4. Опишите устройство и принцип действия световода.
5. Назовите области применения световодов.
6. На каком явлении основано действие поворотных и оборотных призм?



1. Почему блестят: а) капельки росы; б) пузырьки воздуха в воде?
2. Можно ли наблюдать полное внутреннее отражение при переходе света из воздуха в воду?
3. Почему небольшие пузырьки воздуха в воде кажутся серебристыми?



УПРАЖНЕНИЯ

1. Вычислите предельный угол полного отражения для границы раздела двух сред «стекло — воздух», если $n_{\text{ст}} = 1,6$.
2. Луч света выходит из скипидара в воздух. Предельный угол полного отражения для этого луча равен 42° . Чему равна скорость распространения света в скипидаре?
3. При переходе светового луча из алмаза в воздух предельный угол полного отражения равен 25° . Вычислите показатель преломления алмаза.



§ 44

ЛИНЗЫ. ФОРМУЛА ТОНКОЙ ЛИНЗЫ

ВИДЫ ЛИНЗ. Прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями, называют *линзой*. В частном случае одна из поверхностей линзы может быть плоской. Линзы изготавливают из стекла, пластмасс, кварца, каменной соли и других прозрачных материалов. Линза может быть ограничена двумя выпуклыми сферическими поверхностями (двояковыпуклая линза, рис. 7.32, а), выпуклой сферической поверхностью и плоскостью (плоско-выпуклая линза, рис. 7.32, б), выпуклой и вогнутой

сферическими поверхностями (вогнуто-выпуклая линза, рис. 7.32, в). Эти линзы посередине толще, чем у краёв, и все они называются *собирающими* или *выпуклыми*. Такие линзы преобразуют падающий на них параллельный пучок света в сходящийся.

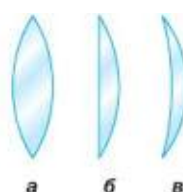


Рис. 7.32

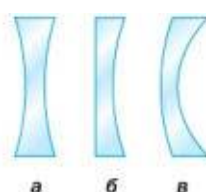


Рис. 7.33

Линзы, которые посередине тоньше, чем у краёв, называют *вогнутыми*. На рисунке 7.33 изображены три вида вогнутых линз: двояковогнутая (рис. 7.33, а), плоско-вогнутая (рис. 7.33, б) и выпукло-вогнутая (рис. 7.33, в). Вогнутые линзы при тех же условиях преобразуют параллельный пучок световых лучей в расходящийся. Поэтому такие вогнутые линзы являются *рассеивающими*.

ТОНКАЯ ЛИНЗА. Если толщина линзы $l = AB$ (рис. 7.34) пренебрежимо мала по сравнению с радиусами R_1 и R_2 кривизны поверхностей линзы и расстоянием предмета от линзы, то такую линзу называют *тонкой*. В дальнейшем мы будем рассматривать только тонкие линзы.

Точки A и B — вершины сферических сегментов — в тонкой линзе расположены столь близко друг к другу, что их можно принять за одну точку, которую называют *оптическим центром линзы* и обозначают обычно буквой O (см. рис. 7.34). Луч света, который проходит через оптический центр линзы, практически не преломляется.

Прямую O_1O_2 , проходящую через центры сферических поверхностей, которые ограничивают линзу, называют её *главной оптической осью*. Ясно, что главная оптическая ось тонкой линзы проходит через её оптический центр (см. рис. 7.34). Любая другая прямая, проходящая через оптический центр, является *побочной оптической осью* (рис. 7.35).

Главным фокусом линзы называют точку, в которой пересекаются после преломления линзой лучи, падающие на неё параллельно главной оптической оси (рис. 7.36, а). Лучи, параллельные главной оптической оси,

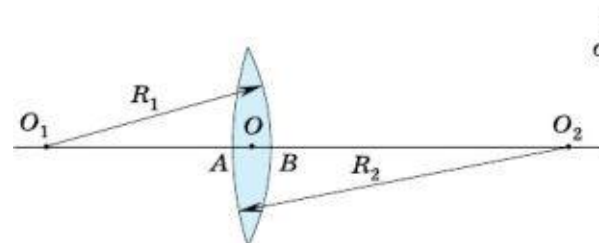


Рис. 7.34

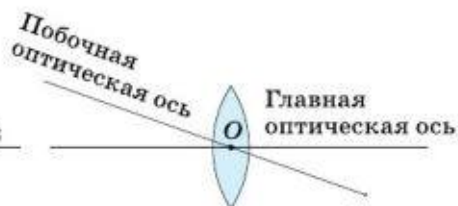


Рис. 7.35

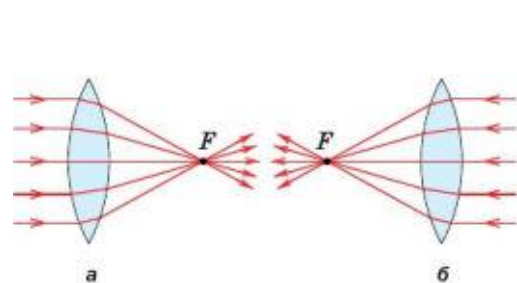


Рис. 7.36

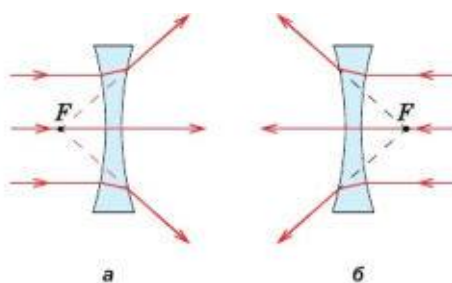


Рис. 7.37

можно направить на линзу и с противоположной стороны. Точка, в которой они сойдутся, пройдя линзу, является другим главным фокусом (рис. 7.36, б). Следовательно, у линзы два главных фокуса. В однородной среде они располагаются по обе стороны линзы на одинаковом расстоянии от неё. Это расстояние называют *фокусным расстоянием линзы* и обозначают буквой F .

Отрицательное значение F (в случае рассеивающей линзы) означает, что фокус линзы мнимый, т. е. лучи, падающие на неё параллельно главной оптической оси, после преломления пойдут расходящимся пучком. Другими словами, в главном мнимом фокусе линзы сойдутся не сами преломлённые лучи, а их продолжения (рис. 7.37, а). У рассеивающей линзы тоже два фокуса. Её второй мнимый главный фокус находится по другую сторону линзы на таком же расстоянии от неё, если среда по обе стороны линзы одна и та же (рис. 7.37, б).

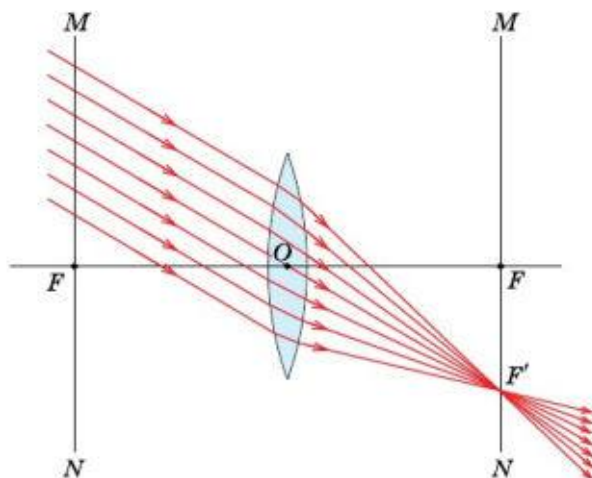


Рис. 7.38

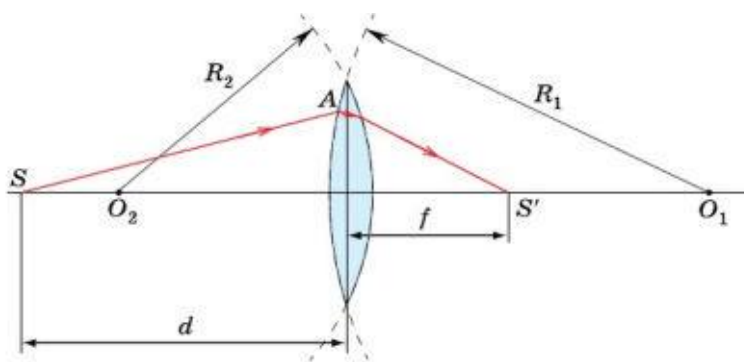


Рис. 7.41

стоянием f от изображения этой точки до линзы, показателем преломления n материала линзы относительно окружающей линзу среды и радиусами кривизны R_1 и R_2 поверхностей, ограничивающих линзу (рис. 7.41).

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (1)$$

Выражение (1) называют *формулой тонкой линзы*. В случае вогнутой поверхности соответствующий член $\frac{1}{R}$ входит в формулу (1) со знаком «минус». Плоская поверхность соответствует бесконечному радиусу кривизны, так что для неё $\frac{1}{R} = 0$.

Знак правой части формулы (1) определяет оптические свойства линзы. При положительной правой части линза является собирающей, при отрицательной — рассеивающей. У двояковыпуклой стеклянной линзы, находящейся в воздухе, $(n - 1) > 0$ и $\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) > 0$. Поэтому она является собирающей. У двояковогнутой стеклянной линзы, находящейся в воздухе, $(n - 1) > 0$, а $\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) < 0$. Следовательно, эта линза рассеивающая.

Из формулы (1) следует, что при удалении источника от линзы изображение приближается к линзе. Когда источник удалится настолько, что

падающий пучок можно будет считать параллельным ($d \rightarrow \infty$), изображение окажется в фокусе линзы на расстоянии от линзы

$$F = \frac{1}{(n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}.$$

ОПТИЧЕСКАЯ СИЛА ЛИНЗЫ. Величину, обратную главному фокусному расстоянию, называют *оптической силой линзы*. Её обозначают буквой D .

$$D = \frac{1}{F}. \quad (2)$$

Чем ближе к линзе лежат её главные фокусы, тем сильнее линза преломляет лучи, собирая или рассеивая их, и тем больше и абсолютное значение оптической силы линзы.

В СИ единицей оптической силы линзы является *диоптрия* (дптр). 1 дптр — *оптическая сила собирающей линзы, фокусное расстояние которой равно 1 м*. Поскольку фокусное расстояние рассеивающей линзы считают отрицательным, то её оптическая сила отрицательна.

Оптическая сила системы близко расположенных тонких линз равна алгебраической сумме оптических сил линз, входящих в систему:

$$D = D_1 + D_2 + \dots + D_n.$$

Используя понятие фокусного расстояния или понятие оптической силы, формулу тонкой линзы можно записать в виде

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F},$$

или

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D.$$

Таким образом, зная расстояние от источника до линзы и фокусное расстояние (положения фокусов), можно определить расстояние до изображения, не прибегая к рассмотрению хода лучей внутри линзы.

ПРАВИЛО ЗНАКОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФОРМУЛЫ ТОНКОЙ ЛИНЗЫ. Если линза собирающая, то её фокус действительный и перед членом $\frac{1}{F}$ ставится знак «плюс». В случае рассеивающей линзы перед ним ставится знак «минус». Перед членом $\frac{1}{f}$ ставится знак «плюс», если изображение является действительным, и знак «минус», если изображение мнимое. В том случае, когда F или f неизвестны, перед членами $\frac{1}{F}$ или $\frac{1}{f}$ ставится знак «плюс». Если в результате вычислений фокусного расстояния или рас-

стояния до изображения получается отрицательная величина, то это означает, что фокус или изображение является мнимым. Сказанное относится и к величине d . Для мнимого источника* $d < 0$.



1. Какую линзу называют тонкой? **2.** Чем отличается главная оптическая ось линзы от побочной оптической оси? **3.** Как называют точку, в которой пересекаются после преломления линзой лучи, падающие на неё параллельно главной оптической оси? **4.** Между какими физическими величинами устанавливает связь формула тонкой линзы? **5.** Какую физическую величину называют оптической силой линзы? **6.** Каким образом учитывается в формуле тонкой линзы правило знаков?



1. Всегда ли двояковыпуклая линза является собирающей, а двояковогнутая — рассеивающей?

2. Собирающую стеклянную линзу погрузили в воду. Как при этом изменилась оптическая сила линзы?



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Стеклянная линза имеет в воздухе ($n_2 = 1$) оптическую силу $D = 5$ дптр. Найдите оптическую силу той же линзы, полностью погружённой в воду. Показатель преломления стекла $n_1 = 1,5$, показатель преломления воды $n_3 = 1,33$.

Дано:

$$n_2 = 1$$

$$D_1 = 5 \text{ дптр}$$

$$n_1 = 1,5$$

$$n_3 = 1,33$$

$$D_2 = ?$$

Решение:

Запишем формулу тонкой линзы для случаев, когда линза расположена в воздухе:

$$D_1 = \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

и в воде:

$$D_2 = \left(\frac{n_1}{n_3} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (2)$$

Разделив почленно выражение (2) на выражение (1), получим

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{\frac{n_1}{n_3} - 1}{\frac{n_1}{n_2} - 1} \Rightarrow D_2 = D_1 \frac{\frac{n_1}{n_3} - 1}{\frac{n_1}{n_2} - 1}.$$

С учётом числовых данных запишем:

$$D_2 = 5 \cdot \frac{\frac{1,5}{1,33} - 1}{\frac{1,5}{1} - 1} \text{ дптр} \approx 1,28 \text{ дптр}.$$

Ответ: $D_2 \approx 1,28$ дптр.

* Мнимым источником называют точку, в которой сходятся продолжения лучей, падающих на линзу сходящимся пучком. Такая ситуация встречается в системе линз, когда до данной линзы лучи проходят через другую линзу.



1. Найдите главное фокусное расстояние и оптическую силу двояковыпуклой линзы с радиусами кривизны, равными 30 см каждый, изготовленной из стекла с показателем преломления 1,5.
2. Найдите фокусное расстояние стеклянной линзы, погружённой в воду, если её фокусное расстояние в воздухе равно 20 см. Показатель преломления стекла 1,6.
3. Из стекла с показателем преломления 1,54 требуется изготовить двояковыпуклую линзу с фокусным расстоянием 10 см. Какими должны быть радиусы кривизны поверхностей линзы, если известно, что один из них в 1,5 раза больше другого?
4. На каком расстоянии от собирающей линзы с фокусным расстоянием 15 см получится изображение предмета, если расстояние от предмета до линзы равно 20 см?
5. Из двух стёкол с показателями преломления 1,5 и 1,7 сделаны две одинаковые двояковыпуклые линзы. Найдите отношение их фокусных расстояний. Какое действие каждая из этих линз произведёт на луч, падающий на них параллельно главной оптической оси, если погрузить линзы в прозрачную жидкость с показателем преломления 1,6?
6. Найдите фокусное расстояние линзы, изготовленной из стекла (флинта) (рис. 7.42), если $AB = 10$ см, $CD = 1$ см. Линзу считать тонкой. Каким будет фокусное расстояние этой линзы, если её погрузить в воду ($n = 1,33$)?

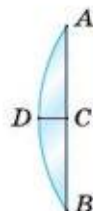


Рис. 7.42

§ 45

ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ТОНКИХ ЛИНЗАХ

ИЗОБРАЖЕНИЯ, СОЗДАВАЕМЫЕ ТОНКИМИ СОБИРАЮЩИМИ ЛИНЗАМИ. Для построения изображений предмета (светящейся стрелки), получаемых с помощью тонкой собирающей линзы, фокусы и оптический центр которой заданы, мы будем использовать три вида «удобных» лучей. Лучи, параллельные главной оптической оси, преломившись в линзе, проходят через её фокус. Из обратимости хода лучей следует, что лучи, идущие к линзе через её фокус, после преломления пойдут параллельно главной оптической оси. Наконец, лучи, проходящие через оптический центр линзы, не изменяют своего направления. Они лишь испытывают параллельное смещение, которое в случае тонкой линзы невелико и им можно пренебречь.

Для построения изображения точки можно использовать любые два из трёх «удобных» лучей, ход которых через линзу известен.

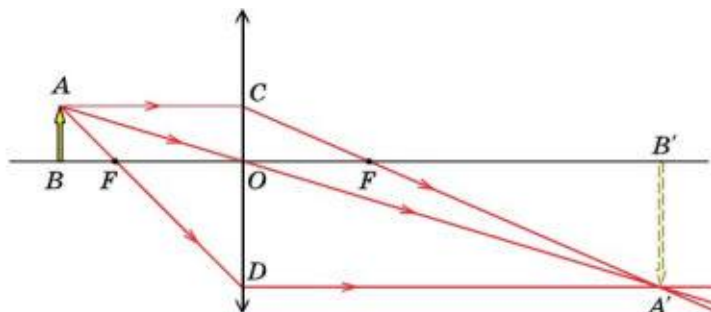


Рис. 7.43

- 1) Луч, проходящий через оптический центр линзы.
- 2) Луч, падающий на линзу параллельно главной оптической оси.
- 3) Луч, проходящий через главный фокус линзы.

Построим изображение предмета AB , который находится между фокусом и двойным фокусом тонкой собирающей линзы (рис. 7.43). Для того чтобы получить изображение точки A , направим луч AC параллельно главной оптической оси. После преломления он пройдет через фокус линзы F . Другой луч — AD можно направить через фокус линзы. После преломления он пойдет параллельно главной оптической оси. В точке пересечения этих двух преломленных лучей будет находиться изображение A' точки A . Таким же образом можно построить и все остальные точки изображения предмета. Но не следует думать, что изображение создается двумя или тремя лучами; оно формируется всем бесчисленным множеством лучей, вышедших из точки A и собравшихся в точке A' . В частности, в точку A' попадает луч AOA' , прошедший через оптический центр O линзы.

Получившееся изображение $A'B'$ является *действительным, увеличенным и перевернутым*.

Теперь построим изображение предмета AB , находящегося от линзы на расстоянии, меньшем её фокусного расстояния (рис. 7.44).

Луч BO проходит через оптический центр линзы, не преломляясь. Проведём луч BC параллельно главной оптической оси линзы. После преломления этот луч должен пройти через главный фокус линзы справа. Поскольку лучи после линзы расходятся, то изображение предмета будет мнимым; оно получается на продолжении луча CF . Пересечение двух лучей и даёт нам искомое изображение $A'B'$. Оно является *мнимым, прямым и увеличенным*.

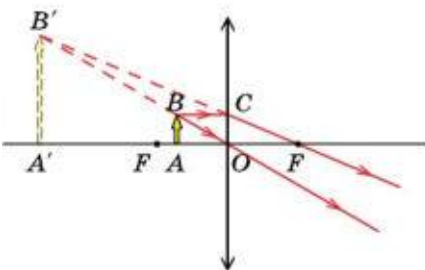


Рис. 7.44



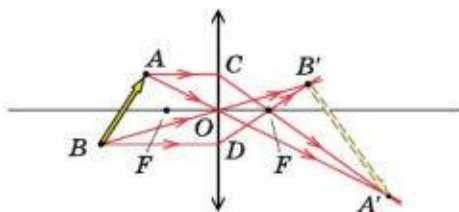


Рис. 7.45

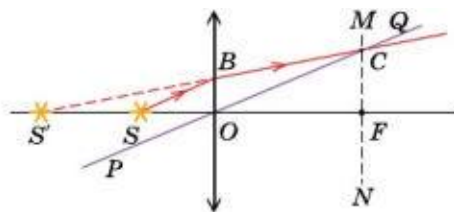


Рис. 7.46

Допустим, необходимо построить изображение отрезка AB , даваемое тонкой собирающей линзой, причём отрезок не перпендикулярен главной оптической оси.

Для построения будем использовать два «удобных» луча (рис. 7.45): лучи, проходящие через оптический центр линзы, и лучи, параллельные главной оптической оси. Охарактеризуем полученное изображение $A'B'$. Оно получилось *перевернутым* и *увеличенным*.

Рассмотрим случай, когда требуется построить изображение точки, расположенной на главной оптической оси. Трудность задачи заключается в том, что все три «удобных» луча сливаются в один, совпадающий с главной оптической осью. Поэтому следует определить ход произвольного луча SB (рис. 7.46), прошедшего через линзу в точке B . Для построения преломлённого луча проведём побочную оптическую ось PQ , параллельную лучу SB . Затем построим фокальную плоскость MN и найдём точку C пересечения фокальной плоскости с побочной оптической осью. Через эту точку и пройдёт преломлённый луч BC . Таким образом, мы построили ход двух лучей, выходящих из точки S . После преломления в линзе эти лучи расходятся. Изображение S' точки является *мнимым*, так как в ней сходятся продолжения преломлённых лучей.

ИЗОБРАЖЕНИЯ, СОЗДАВАЕМЫЕ ТОНКИМИ РАССЕИВАЮЩИМИ ЛИНЗАМИ. Рассмотрим построение изображений предметов в тонких рассеивающих линзах. Пусть предмет AB расположен на главной оптической оси рассеивающей линзы перед главным фокусом F (рис. 7.47).

Воспользуемся двумя «удобными» лучами. Пусть луч BO идёт через оптический центр линзы. Он пройдёт через него, не преломляясь. Луч BC направим параллельно главной оптической оси линзы, его продолжение FC после преломления в плоскости линзы должно

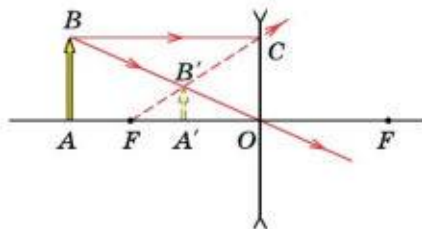


Рис. 7.47

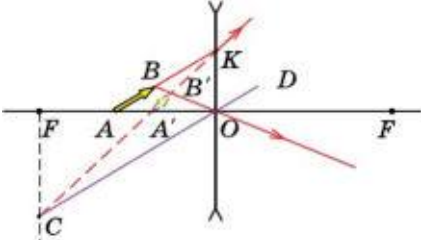


Рис. 7.48

полученное изображение $A'B'$: оно является *мнимым, уменьшенным и прямым*.

Рассмотрим, каким получится изображение в тонкой рассеивающей линзе, если предмет находится между ней и фокусом. Кроме того, расположим предмет наклонно к главной оптической оси (рис. 7.48).

Направим к плоскости линзы луч AK в направлении предмета. Поскольку луч AK не принадлежит к «удобным» лучам, то для построения его хода проведём побочную оптическую ось CD , параллельную лучу AK . Найдём точку пересечения левой фокальной плоскости с побочной оптической осью. Это будет точка C — точка побочного фокуса. Соединим точку C с точкой K — это будет продолжение преломлённого луча, который в рассеивающей линзе должен расходиться после плоскости линзы. Это означает, что изображение точки B будет мнимым и его можно получить, если провести луч BO , проходящий через оптический центр линзы (точку O). Этот луч пересечёт луч CK в точке B' , которая и будет изображением точки B . Точка A' получена на пересечении луча CK и главной оптической оси линзы. Охарактеризуем полученное изображение $A'B'$: оно является мнимым и уменьшенным. Теперь мы можем сделать обобщающий вывод: *в случае тонкой рассеивающей линзы изображение предмета всегда мнимое и уменьшенное*.

Наконец, рассмотрим случай, когда необходимо построить изображение точки S , находящейся на главной оптической оси рассеивающей

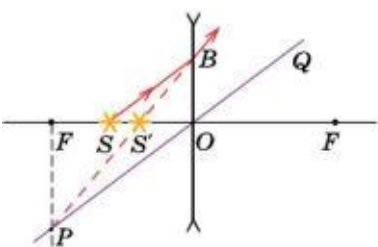


Рис. 7.49

линзы (рис. 7.49). Направим из точки S произвольный луч на плоскость линзы. Построим побочную оптическую ось PQ , проходящую параллельно лучу, проходящему через оптический центр линзы. Эта побочная оптическая ось пересечёт левую фокальную плоскость в точке P — побочном фокусе. Изображение точки S' будет лежать на продолжении луча PB в месте его пересечения с главной оптической осью.

УВЕЛИЧЕНИЕ ЛИНЗЫ. Изображение, даваемое тонкой линзой, обычно отличается своими размерами от размеров предмета. Различие размеров предмета и изображения характеризуют такой физической величиной, как *линейное увеличение*.

Линейным увеличением линзы называют отношение линейного размера изображения к линейному размеру предмета.

Для определения линейного увеличения линзы обратимся к рисунку 7.43. Если высота предмета AB равна h , а высота изображения $A'B'$ — H , то

$$\Gamma = \frac{H}{h}$$

будет линейным увеличением.

Из подобия треугольников OAB и $OA'B'$ следует, что $\frac{A'B'}{AB} = \frac{OB'}{OB}$, т. е.

$$\frac{H}{h} = \frac{f}{d}.$$

Следовательно, линейное увеличение линзы равно

$$\Gamma = \frac{f}{d}.$$

Используя подобие треугольников OCF и $FA'B'$, можно получить другую формулу для увеличения линзы:

$$\Gamma = \frac{f - F}{F}.$$

? 1. Какие «удобные» лучи используют для построения изображения предмета в линзе? 2. Приведите примеры построений изображений предмета, создаваемых тонкими собирающими линзами. Охарактеризуйте полученные изображения. 3. Приведите примеры построений изображений предмета, создаваемых тонкими рассеивающими линзами. Охарактеризуйте полученные изображения. 4. Какую физическую величину называют линейным увеличением линзы?

? 1. Как, используя в качестве источника света Солнце, оценить фокусное расстояние тонкой собирающей линзы? 2. Почему в тонкостенном стакане с водой ложечка кажется увеличенной? 3. С помощью линзы на экране получено изображение пламени свечи. Изменится ли размер изображения на экране, если линзу заменить тонкой непрозрачной пластинкой с малым отверстием? Сделайте необходимый чертёж.



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

С помощью тонкой собирающей линзы с фокусным расстоянием 6 см рассматривают монету, диаметр которой равен 1,25 см, и получают её мнимое изображение, диаметр которого равен 5 см. На каком расстоянии от линзы находится монета?

Дано:

$$F = 6 \text{ см}$$

$$h = 1,25 \text{ см}$$

$$H = 5 \text{ см}$$

$$d = ?$$

Решение:

Выполним необходимое построение (рис. 7.50).

В данном случае изображение является мнимым, поэтому предмет находится между линзой и её фокусом.

Запишем формулу тонкой линзы с учётом правила знаков:

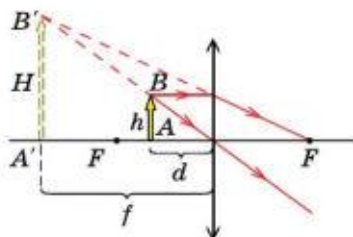


Рис. 7.50

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}; \quad (1)$$

и формулу увеличения:

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}. \quad (2)$$

Выразим f из формулы (2)

$$f = \frac{Hd}{h}$$

и подставим в выражение (1):

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{h}{Hd}; \quad \frac{1}{F} = \frac{1}{d} \left(1 - \frac{h}{H} \right);$$

$$d = F \left(1 - \frac{h}{H} \right).$$

Подставляя числовые данные, найдём:

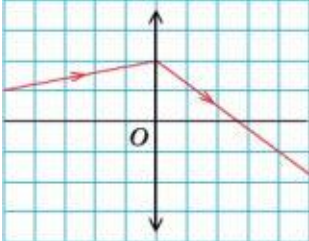
$$d = 6 \cdot \left(1 - \frac{1,25}{5} \right) \text{ см} = 4,5 \text{ см}.$$

Ответ: $d = 4,5 \text{ см}.$

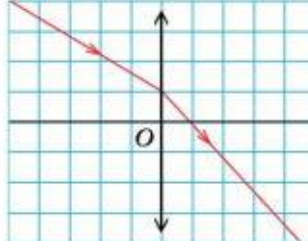


УПРАЖНЕНИЯ

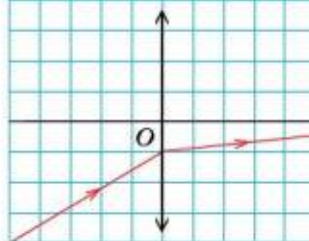
1. На рисунке 7.51 показан ход луча через линзу. Определите графически положение её фокусов.
2. На рисунке 7.52 показаны: AB — предмет, $A'B'$ — изображение, даваемое линзой. Определите графически положение оптического центра линзы и её фокусов.



а



б

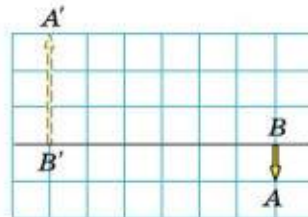


в

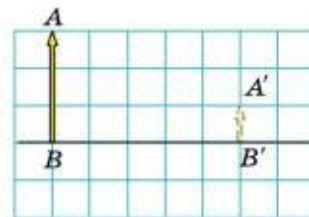
Рис. 7.51



а



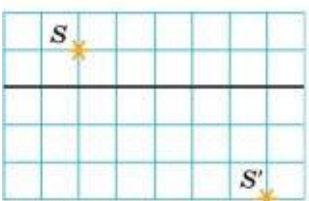
б



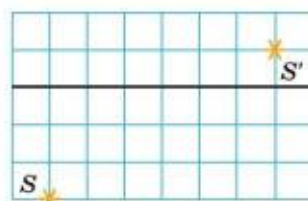
в

Рис. 7.52

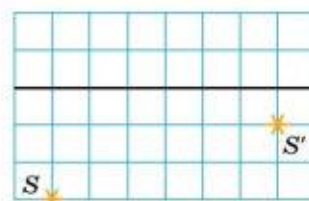
3. На рисунке 7.53 показаны положение главной оптической оси линзы, источник света S и его изображение S' в линзе. Найдите с помощью построения положение оптического центра линзы и её фокусов. Определите тип линзы.



а



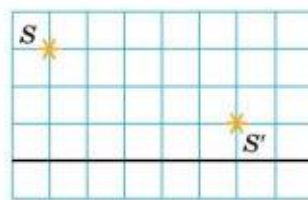
б



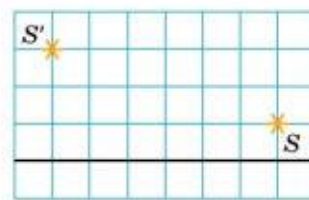
в



г



д



е

Рис. 7.53



4. Изображение миллиметрового деления шкалы, расположенной перед линзой на расстоянии $d = 12,5$ см, имеет на экране длину $L = 8$ см. На каком расстоянии от линзы находится экран? Чему равна оптическая сила линзы?
5. В 15 см от двояковыпуклой линзы с оптической силой 10 дптр поставлен перпендикулярно оптической оси предмет высотой 2 см. Найдите положение и высоту изображения.

§ 46

ГЛАЗ КАК ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

СТРОЕНИЕ ГЛАЗА. Глаз человека имеет почти шарообразную форму (рис. 7.54). Его диаметр составляет около 2,5 см. Снаружи глаз покрыт защитной оболочкой 1 белого цвета — *склерой*. Передняя прозрачная часть 2 склеры называется *роговой оболочкой* или *роговицей*.

С внутренней стороны к склере прилегает сосудистая оболочка 3, состоящая из сложного сплетения кровеносных сосудов, питающих глаз. Эта вторая оболочка в передней части глаза переходит в радужную оболочку 4, окрашенную у разных людей в различные цвета. В радужной оболочке имеется отверстие 5 — *зрачок*. В зависимости от интенсивности падающего света диаметр зрачка рефлекторно изменяется приблизительно от 2 до 8 мм. За зрачком помещается *хрусталик* 6 — прозрачное слоистое тело, похожее на линзу. Особая мышца 7 может в некоторых пределах менять форму хрусталика, делая его более выпуклым при рассмотрении близких предметов. Между роговицей и радужной оболочкой находится водянистая жидкость 8. Остальную часть глаза до задней стенки (глазного дна) занимает прозрачное полужидкое стекловидное тело 9. Глазное дно покрыто очень сложной сетчатой оболочкой 10 (*сетчаткой*), представляющей собой разветвления *зрительного нерва* 11 с нервными окончаниями в виде *палочек* и *колбочек*. Палочки и колбочки являются светочувствительными элементами.

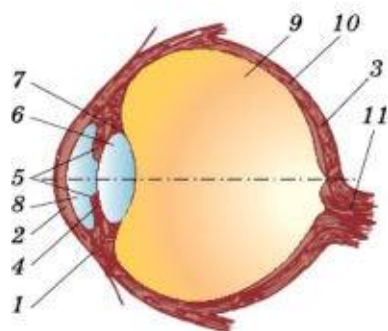


Рис. 7.54

ЗРЕНИЕ. В целом оптическую систему глаза можно рассматривать как собирающую линзу с переменным фокусным расстоянием и неизменной «глубиной» (расстояние от линзы до экрана). «Экраном», на котором образуется действительное обратное изображение рассматриваемого предмета, является сетчатка. Раздражение нервных окончаний (палочек и колбочек), вызванное падающим светом, формирует у нас зрительное ощущение. Палочки и колбочки воспринимают отдельные части изобра-

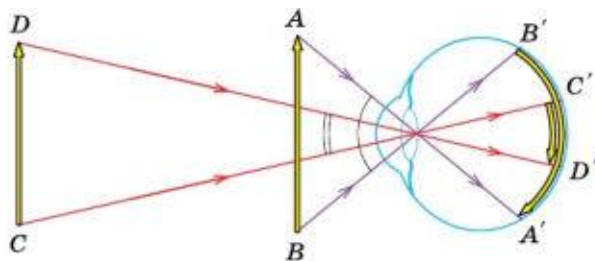


Рис. 7.55

жения предмета. Чем большее их число участвует в этом восприятии, тем больше подробностей мы различаем в предмете. Эти светочувствительные элементы крайне малы, и в сетчатке их очень много (около 130 млн). Чем крупнее изображение предмета на сетчатке, тем больше его деталей можно различить.

Размер изображения на сетчатке тем больше, чем больше угол, под которым глаз видит предмет (рис. 7.55). Удалённый предмет DC даёт на сетчатке изображение $D'C'$, которое меньше, чем изображение $A'B'$ такого же, как DC , но ближе расположенного предмета AB .

Угол, образованный прямыми, проведёнными от краёв предмета в оптический центр глаза, называют углом зрения.

Размер угла зрения зависит от размера рассматриваемого глазом предмета и расстояния от предмета до глаза. При угле зрения, меньшем одной минуты, детали предмета глазом не различаются — предмет воспринимается как одна точка.

АККОМОДАЦИЯ. Опыт показывает, что глаз не может одновременно чётко видеть предметы, находящиеся от него на разных расстояниях. Если держать, например, карандаш на расстоянии 25—30 см от глаза и смотреть так, чтобы его чётко видеть, то все удалённые предметы расплываются. Наоборот, если резко видны удалённые предметы, то становится нечётким изображение карандаша. Когда изменяется расстояние d от предмета до линзы, то изменяется и расстояние f от линзы до изображения. Но расстояние от оптического центра глаза до сетчатки в глазу человека меняться не может. Хрусталик весьма эластичен; под действием специальных мышц хрусталик изменяет свою кривизну, а следовательно, и фокусное расстояние так, чтобы резкое изображение рассматриваемого предмета всегда оказывалось на сетчатке. Приспособление глаза путём изменения кривизны хрусталика к резкому видению на различных расстояниях называют *аккомодацией*.

Удалённую точку, наблюдение которой не требует напряжения глаза, называют *дальней точкой аккомодации*. Для нормального глаза аккомодация не требуется при рассматривании очень удалённых предметов. Когда предмет приближается к глазу, кривизна хрусталика возрастает. Однако увеличение кривизны хрусталика имеет предел. Нормальный глаз может длительно без особого напряжения рассматривать предметы, расположенные от него не ближе 25 см. Если предмет располагается ближе, то для его резкого видения нужно чрезмерно увеличивать кривизну хрусталика, глаз утомляется, и появляются болезненные ощущения.

Расстояние от глаза до предмета, равное 25 см, называют расстоянием наилучшего зрения.

Точку, отстоящую от глаза на расстоянии наилучшего зрения, называют *ближней точкой аккомодации*.

ДЕФЕКТЫ ЗРЕНИЯ. У многих людей глаза создают в ненапряжённом состоянии изображение удалённого предмета не на сетчатке, а перед ней (рис. 7.56, *а*). Такие люди не могут чётко видеть удалённые предметы. Этот дефект зрения называют *близорукостью*. Близорукий человек чётко видит предмет, лишь начиная с некоторого расстояния. Дальняя точка аккомодации глаза не бесконечно удалена, соответственно меньше и расстояние наилучшего зрения. Близорукость исправляют ношением очков с рассеивающими линзами. На рисунке 7.56, *б* видно, что фокусное расстояние очков, прописываемых близорукому человеку, равно расстоянию от глаза до дальней точки аккомодации (точка *А*).

Дефект зрения, при котором изображения удалённых предметов получаются за сетчаткой (рис. 7.57, *а*), называют *дальнозоркостью*. Дальнозоркий человек должен напрягаться уже при наблюдении далёких предметов, а при наблюдении близких — предел аккомодации будет исчерпан при расстоянии до предмета, большем 25 см. Дальнозоркость исправляют ношением очков с собирающими линзами (рис. 7.57, *б*).

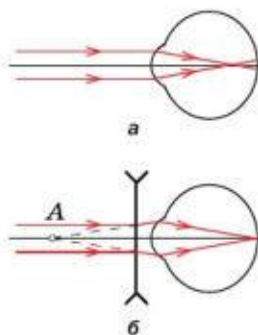


Рис. 7.56

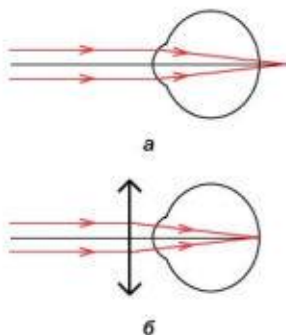


Рис. 7.57

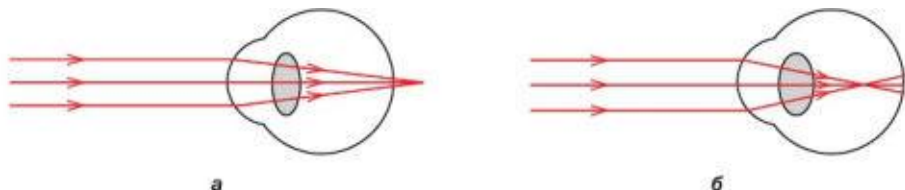


Рис. 7.58

1. Как получается изображение предмета с помощью оптической системы глаза? **2.** Какое изображение создаёт оптическая система глаза на сетчатке? **3.** При каком угле зрения детали предмета глазом не различаются? **4.** В чём заключается процесс аккомодации? **5.** Чему равно расстояние наилучшего зрения? **6.** Какой дефект зрения называют: а) близорукостью; б) дальнозоркостью? Как эти дефекты исправляют?

1. В темноте при быстром движении раскалённого уголька видна красная светящаяся полоса. Как это объяснить? **2.** Почему дождь представляется нам в виде струй, хотя состоит из отдельных капель? **3.** На рисунке 7.58 показан ход лучей в глазе человека при дальнозоркости и близорукости. Какая схема характеризует: а) близорукость; б) дальнозоркость? Очки какой оптической силы (положительной или отрицательной) нужно выбрать для исправления дальнозоркости и близорукости?

УПРАЖНЕНИЯ

- Очки имеют оптическую силу $+1,5$. Какие линзы используются в этих очках? Какой дефект зрения исправляют эти очки?
- Какой дефект зрения имеет человек, у которого расстояние наилучшего зрения равно $12,5$ см? Как можно исправить этот дефект?
- Какие очки следует прописать близорукому человеку, который может читать текст, расположенный не далее 25 см, чтобы он мог любоваться звёздами?

Это любопытно...

Из истории развития физики и техники

История изобретения очков содержит много неясных и противоречивых свидетельств. Известно о применении очков в Китае для защиты глаз от воспалительных процессов, от пыли и Солнца. Об этих очках писал итальянский купец и путешественник Марко Поло (1254—1324), совершивший в XIV в. путешествие в Китай.



Рис. 7.59



Рис. 7.60

Первые очки появились в XIII в. в Италии. Обрабатывая сферические, изогнутые и выпуклые поверхности и поднося их к глазам, итальянские мастера заметили оптические возможности стекла. Само слово «очки» происходит от латинского слова *ocularium*, означающего «прорезь для глаз в рыцарском шлеме».

Часто очки составляли одно целое с головными уборами. Так, в собрании Тауэра в Лондоне хранится рыцарский шлем с очками (рис. 7.59). Первое время очки были предметом роскоши, поскольку изготовление прозрачных стёкол было дорогим удовольствием. Очками пользовались только образованные и наиболее состоятельные люди. Первое художественное изображение очков относится к 1352 г., когда в церкви Тревизо в Италии была создана фреска, на которой один из персонажей изображён в оправе со стёклами на переносице (рис. 7.60). Наконец, в 1784 г. Б. Франклин изобрёл бифокальные очки, которые представляют собой два различных вида линз в одной и той же оправе.

§ 47

ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

ФОТОАППАРАТ. На законах геометрической оптики основано устройство и действие различных оптических приборов. Рассмотрим некоторые из них.

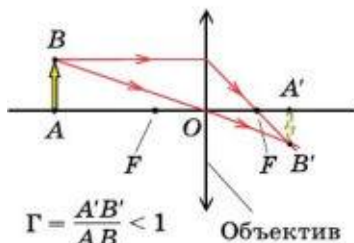


Рис. 7.61

Основными частями фотоаппарата являются непрозрачная камера и система линз, называемая *объективом*. Простейший объектив представляет собой одну собирающую линзу. Объектив создаёт вблизи задней стенки камеры действительное перевёрнутое изображение фотографируемого предмета (рис. 7.61).

В большинстве случаев предмет находится на расстоянии, большем двойного фокусного

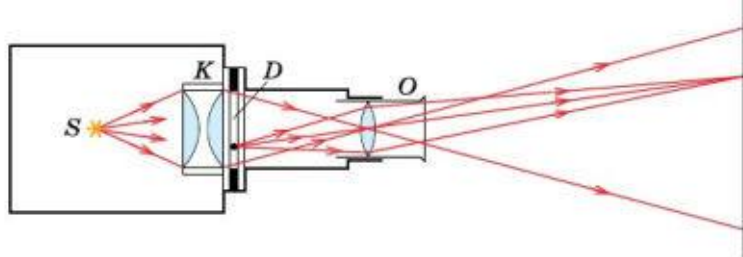


Рис. 7.62

расстояния, поэтому изображение будет уменьшенным. В том месте, где получается изображение, раньше помещали фотопластинку или фотоплёнку, покрытую слоем светочувствительного вещества (фотоэмульсией). В современных (цифровых) фотоаппаратах плёнка заменена матрицей светочувствительных элементов (фотодиодов), которые размещены на интегральной микросхеме. В фотодиодах падающий свет преобразуется в электрический сигнал.

Фотографируемый предмет может находиться на разных расстояниях от аппарата. В связи с этим расстояние между объективом и плёнкой также нужно изменять. Обычно это осуществляется перемещением объектива.

Изображение предмета в фотоаппарате — действительное, перевернутое и уменьшенное.

ПРОЕКЦИОННЫЙ АППАРАТ. Схема устройства проекционного аппарата приведена на рисунке 7.62. Изображение диапозитива* D создаётся на экране с помощью объектива O . Система линз K , называемая конденсором, используется для того, чтобы весь световой поток после диапозитива прошёл через объектив. Объектив проецирует освещённый диапозитив на экран.

Увеличение проекционного аппарата можно менять, приближая объектив к диапозитиву или удаляя от него с одновременным изменением расстояния от аппарата до экрана. Обратите внимание, что предмет в проекционном аппарате необходимо размещать на расстояниях от F до $2F$ (рис. 7.63). Увеличение проекционного аппарата тем больше, чем меньше фокусное расстояние объектива.

Изображение предмета в проекционном аппарате — действительное, увеличенное и перевернутое.

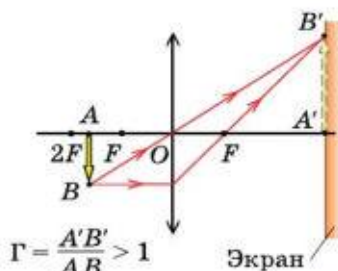


Рис. 7.63

* *Диапозитив* — рисунок или фотоснимок, выполненный на прозрачной основе.

По своему назначению оптические приборы, вооружающие глаз, можно разделить на две группы:

- 1) приборы для рассматривания мелких объектов (лупы, микроскопы);
- 2) приборы для рассматривания далёких объектов (зрительные трубы, телескопы и т. п.).

В отличие от фотоаппарата и проекционного аппарата, в таких приборах изображения рассматриваемых предметов являются мнимыми.

Отношение угла зрения при наблюдении предмета через оптический прибор к углу зрения при наблюдении невооружённым глазом принимают за характеристику оптического прибора — его угловое увеличение.

ЛУПА. Угол зрения, под которым виден предмет невооружённым глазом (рис. 7.64), равен*

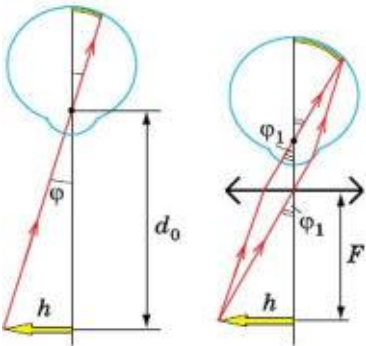
$$\varphi = \frac{h}{d_0}, \tag{1}$$

где $d_0 = 25$ см — расстояние наилучшего зрения; h — линейный размер предмета.

Простейший способ увеличения угла зрения при рассмотрении мелких предметов состоит в применении *лупы*. Лупой называют собирающую линзу или систему линз с малым фокусным расстоянием F (как правило, не более 10 см). Лупу помещают обычно близко к глазу, а предмет располагается в её фокальной плоскости. В этом случае лучи из любой точки объекта после выхода из лупы образуют параллельные пучки (рис. 7.65).

Следовательно, чёткое изображение точек на сетчатке получается без напряжения глаза. В лупу предмет виден под углом

$$\varphi_1 = \frac{h}{F}. \tag{2}$$



Разделив почленно равенство (2) на равенство (1), найдём угловое увеличение лупы $\Gamma_{\text{л}}$:

$$\Gamma_{\text{л}} = \frac{\varphi_1}{\varphi} = \frac{d_0}{F}.$$

Увеличение, даваемое лупой, ограничено её размерами. Действительно, линза с большой оптической силой должна быть сильно выпуклой. Вследствие этого размеры лупы приходится уменьшать до нескольких миллиметров, что ограничивает поле зрения и затрудняет использование лупы. Поэтому

Рис. 7.64

Рис. 7.65

* Для малых углов $\varphi \approx \text{tg } \varphi = \frac{h}{d_0}$.

лупы с увеличением более 40 не применяются. Лупы используют часовых дел мастера, геологи, ботаники, криминалисты, коллекционеры марок и те, кто занимается мелкой и точной работой, измерениями.

МИКРОСКОП. Микроскоп представляет собой комбинацию двух линз или систем линз (рис. 7.66). Линзу L_1 , обращённую к предмету, называют объективом. Действительное увеличенное изображение предмета, даваемое объективом, рассматривается через лупу L_2 — окуляр. В результате общее увеличение получается весьма большим.

Рассмотрим принцип действия микроскопа. Для получения действительного увеличенного изображения предмет AB располагают между фокусом объектива и точкой, находящейся на двойном фокусном расстоянии. Наблюдение в окуляр удобно вести без напряжения глаза. Для этого окуляр размещают так, чтобы изображение A_1B_1 , даваемое объективом, было совмещено с фокальной плоскостью окуляра (см. рис. 7.66).

Увеличением микроскопа Γ_m называют отношение угла зрения φ_1 , под которым виден предмет при наблюдении через микроскоп, к углу зрения φ при наблюдении невооружённым глазом с расстояния наилучшего зрения $d_0 = 25$ см:

$$\Gamma_m = \frac{\varphi_1}{\varphi}. \quad (3)$$

Согласно формуле (1),

$$\varphi = \frac{h}{d_0}, \quad (4)$$

где h — линейный размер предмета.

Окуляр микроскопа действует подобно лупе, и

$$\varphi_1 = \frac{H}{F_2}, \quad (5)$$

где H — линейный размер изображения, даваемого объективом; F_2 — фокусное расстояние окуляра.

Линейный размер изображения в объективе связан с линейным размером предмета соотношением

$$\frac{H}{h} = \frac{f - F_1}{F_1}, \quad (6)$$

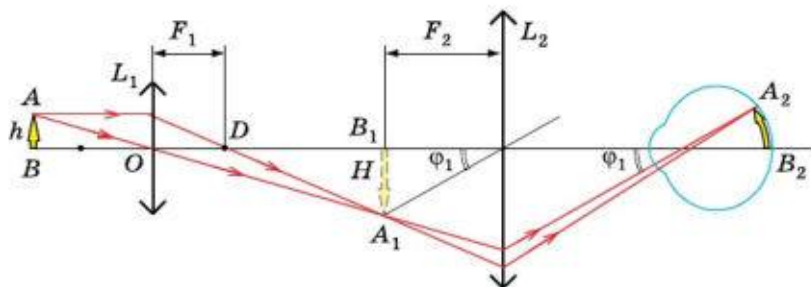


Рис. 7.66

Здесь F_1 — фокусное расстояние объектива. Расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра

$$\delta = f - F_1 \tag{7}$$

называют *оптической длиной тубуса* микроскопа.

Подставляя в выражение (3) значения углов (4) и (5) и учитывая соотношения (6) и (7), получим формулу для увеличения микроскопа:

$$\Gamma = \frac{\delta d_0}{F_1 F_2}.$$

Увеличение микроскопа варьируется от нескольких десятков до 1500. Микроскоп позволяет различать мелкие детали предмета, которые при наблюдении невооружённым глазом или с помощью лупы сливаются.

ТЕЛЕСКОПЫ. *Телескоп* — оптический прибор (большая зрительная труба), предназначенный для наблюдения небесных тел и звёзд. По своей оптической схеме телескопы подразделяются на линзовые (*рефракторы*) и зеркальные (*рефлекторы*). Телескоп, линзовая система которого даёт угловое увеличение удалённых объектов в видимом диапазоне, называют оптическим телескопом-рефрактором. Для получения максимального углового увеличения изображение A_1B_1 удалённого предмета должно находиться в фокусе окуляра F_2 телескопа. При этом фокусы объектива и окуляра телескопа совпадают (рис. 7.67).

Угловое увеличение телескопа-рефрактора Γ_τ определяется отношением угла зрения φ_1 , под которым виден удалённый предмет при наблюдении его в телескоп, к углу зрения φ , под которым он мог бы наблюдаться невооружённым глазом.

$$\Gamma_\tau = \frac{\varphi_1}{\varphi}.$$

Используя рисунок 7.67, можно показать, что $\Gamma_\tau = \frac{F_1}{F_2}$.

В телескопе-рефлекторе объективом является параболическое зеркало большого диаметра. Одним из крупнейших подобных телескопов яв-

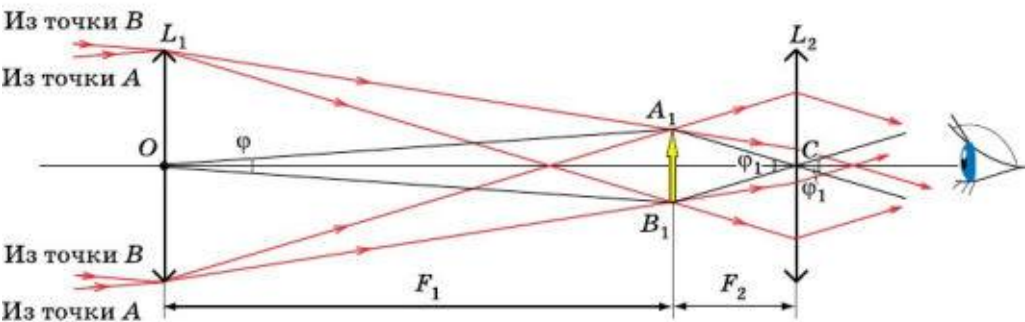


Рис. 7.67

ляется расположенный в предгорьях Кавказа отечественный телескоп БТА («Большой Телескоп Азимутальный») с диаметром зеркала, равным 6 м. Сейчас созданы телескопы с зеркалами ещё больших размеров. Так, например, в обсерватории Кека находятся два зеркальных телескопа, диаметр первичных зеркал (всего их три в каждом из телескопов) которых составляет 10 м.

Ход лучей в зеркальном телескопе показан на рисунке 7.68.

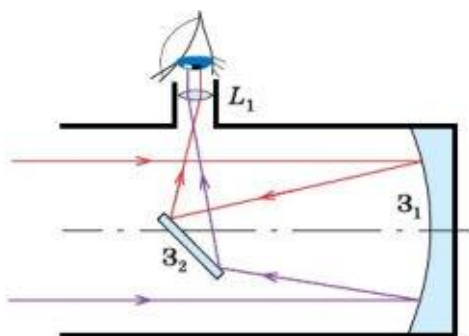


Рис. 7.68

Свет от небесного тела идёт практически параллельным пучком и после отражения от зеркала 3_1 сходится в его фокальной плоскости. При помощи плоского зеркала 3_2 световые лучи направляются в окуляр L_1 . Через окуляр рассматривают изображение тела. Увеличение больших телескопов превышает 500 за счёт большого фокусного расстояния объектива. С помощью телескопа можно различать на Луне предметы размером менее 1 м, а на Марсе — около 100 м.

- 1.** Охарактеризуйте изображение предмета, получаемого с помощью: а) фотоаппарата; б) проекционного аппарата. **2.** На какие группы можно разделить оптические приборы, вооружающие глаз? **3.** Что называют угловым увеличением оптического прибора? **4.** Чему равно угловое увеличение: а) лупы; б) микроскопа? **5.** На какие два класса можно подразделить телескопы по их оптической схеме?

Можно ли в телескоп увидеть муху, севшую на объектив этого телескопа?

УПРАЖНЕНИЯ

- Определите угловое увеличение лупы, фокусное расстояние которой равно: а) 5 см; б) 8 см; в) 0,2 м.
- Определите оптическую силу лупы, дающей: а) 4-кратное угловое увеличение; б) 2-кратное угловое увеличение.
- Найдите угловое увеличение, даваемое лупой, фокусное расстояние которой 2 см: а) для нормального глаза; б) для близорукого глаза с расстоянием наилучшего зрения 15 см.
- Чему равно угловое увеличение телескопа, если фокусное расстояние объектива равно 15 м, а окуляра — 2,5 см?

ЗАДАНИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ И ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

1. Соберите в домашних условиях камеру-обскуру. Продумайте, как с её помощью выполнить фотографические снимки. Определите размер деталей, которые можно различать с помощью такого устройства.
2. Предложите опыт, с помощью которого можно отличить очки для близоруких глаз от очков для дальновзорких глаз.
3. Проведите экспериментальное исследование на тему «Отражение света от различных поверхностей».

Примерные темы рефератов и проектов

1. Явление полного внутреннего отражения света: физическая сущность, экспериментальное исследование, примеры применения.
2. Явления отражения и преломления света в природе.
3. Зелёный луч как оптическое явление.
4. Оптические приборы: устройство, принцип действия, угловые увеличения, применение.
5. Аберрации линз и их влияние на оптические изображения.

Глава 8

ВОЛНОВАЯ ОПТИКА



Максвелл показал, что скорость распространения электромагнитных волн в вакууме должна быть равна скорости света. На основании этого он предположил, что *свет представляет собой электромагнитную волну*. Кроме того, из теории Максвелла следовало, что электромагнитные волны являются поперечными.

После того как Герц экспериментально получил и исследовал электромагнитные волны, а также измерил их скорость, электромагнитная теория света нашла экспериментальное подтверждение. При этом оказалось, что электромагнитные волны при распространении обнаруживают те же свойства, что и световые: отражение, преломление, интерференцию, дифракцию, поляризацию и др. В этой главе будут рассмотрены физические явления, связанные с волновой природой света.

§ 48

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА. Сейчас нам известно, что скорость распространения света в вакууме приближённо равна $3 \cdot 10^8$ м/с. Для определения её значения использовались различные методы. Рассмотрим лишь некоторые из них.

Скорость света впервые удалось измерить датскому астроному Олафу Рёмеру (1644—1710) в 1676 г. Он наблюдал затмения спутников Юпитера — самой большой планеты Солнечной системы. Юпитер, в отличие от Земли, имеет не менее 60 спутников. Ближайший его спутник — Ио — стал предметом наблюдений Рёмера. Рёмер видел, как спутник проходил перед планетой, а затем заходил в её тень и пропадал из поля зрения. Затем Ио опять появлялся, как мгновенно вспыхнувшая лампа. Промежуток времени между двумя вспышками оказался равным 42 ч 28 мин. Вначале измерения проводились в то время, когда Земля при своём дви-



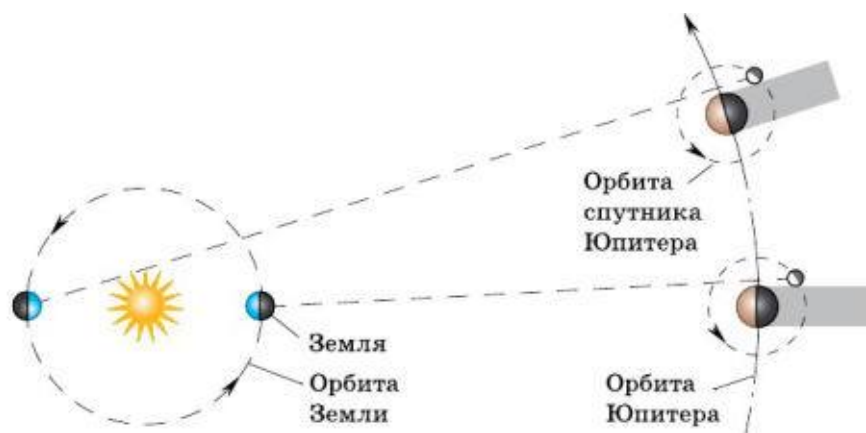


Рис. 8.1

жении вокруг Солнца ближе всего подошла к Юпитеру (рис. 8.1). Такие же измерения, проведённые шесть месяцев спустя, когда Земля удалилась от Юпитера на диаметр своей орбиты, неожиданно показали, что спутник не успел появиться из тени на целых 22 мин по сравнению с моментом времени, который можно было рассчитать на основании знания периода обращения Ио.

Зная запаздывание появления Ио и расстояние, которым оно вызвано, можно определить скорость, разделив это расстояние (диаметр орбиты Земли) на время запаздывания. Скорость оказалась чрезвычайно большой, примерно 215 000 км/с. По этой причине крайне трудно измерить время распространения света между двумя удалёнными точками на Земле. Ведь за 1 с свет проходит расстояние, большее длины земного экватора в 7,5 раза.

Впервые скорость света лабораторным методом измерил французский физик Арман Ипполит Физо (1819—1896) в 1849 г. В опыте Физо свет от источника, пройдя через линзу, падал на полупрозрачную пластинку 1 (рис. 8.2). После отражения от пластинки сфокусированный узкий пучок направлялся на периферию быстро вращающегося зубчатого колеса. Пройдя между зубцами, свет достигал зеркала 2, находившегося на расстоянии нескольких километров от колеса. Отразившись от зеркала, свет, прежде чем попасть в глаз наблюдателя, должен был опять пройти между зубцами. Когда колесо вращалось медленно, свет, отражённый от зеркала, был виден. При увеличении скорости вращения он постепенно исчезал.

В чём же здесь дело? Пока свет, прошедший между двумя зубцами, распространялся до зеркала и обратно, колесо успевало повернуться так, что на место прорези вставал зубец, и свет переставал быть видимым. При дальнейшем увеличении скорости вращения свет опять становился видимым. Очевидно, что за время распространения света до зеркала и



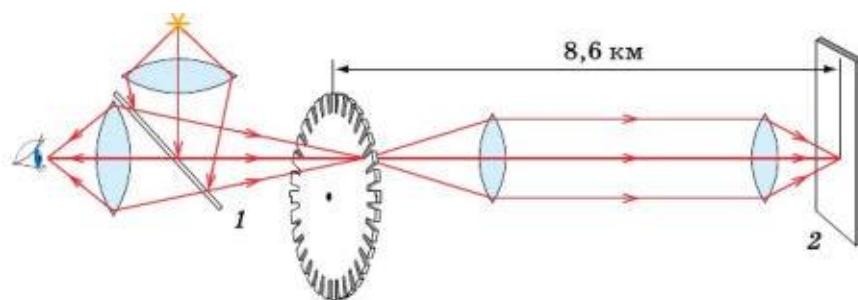


Рис. 8.2

обратно колесо успело повернуться настолько, что на место прежней прорези встала уже новая прорезь. Зная это время и расстояние между колесом и зеркалом, можно определить скорость света. В опыте Физо данное расстояние составляло 8,6 км, и для скорости света было получено значение 313 000 км/с.

Впоследствии было разработано ещё много других, более точных лабораторных методов измерения скорости света.

Например, американский физик Альберт Майкельсон (1852—1931) определил скорость света с помощью вращающейся восьмигранной зеркальной призмы. Полученное значение оказалось равным 299 774 км/с. По современным данным скорость света в вакууме составляет 299 792 458 м/с*. Ошибка в её измерении не превышает 0,3 м/с. Отметим, что наиболее точные измерения скорости основаны не на определении времени прохождения светом определённого расстояния, а на высокоточном измерении частоты и длины электромагнитной волны.

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА. ОПЫТЫ НЬЮТОНА. Занимаясь усовершенствованием телескопов, Ньютон обратил внимание на то, что изображение, даваемое объективом, по краям окрашено. Он заинтересовался этим явлением и первым «исследовал разнообразие световых лучей и проистекающие отсюда особенности цветов, каких до того никто даже не подозревал» (слова из надписи на надгробном памятнике Ньютону). Конечно, радужную окраску изображения, даваемого линзой, наблюдали и до Ньютона. Было также замечено, что радужные края имеют предметы, рассматриваемые через призму. Пучок световых лучей, прошедших через призму, окрашивается по краям.

* В 1983 г. на заседании Генеральной конференции мер и весов было принято новое определение метра: «Метр есть длина пути, пройденного светом в вакууме в течение временного интервала, равного $1/299\,792\,458$ с». Из этого определения следует, что скорость света принимается равной 299 792 458 м/с. Это сделано для того, чтобы каждый раз не менять определение метра по мере увеличения точности измерения расстояний.

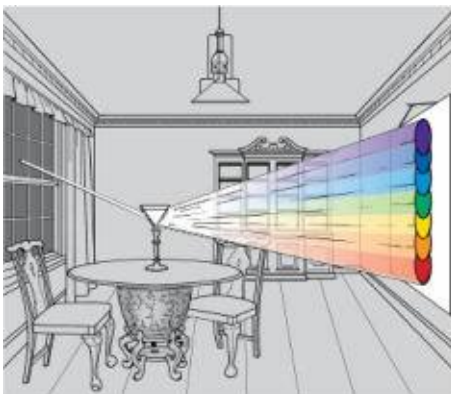


Рис. 8.3

Рассмотрим опыты Ньютона по наблюдению и изучению прохождения белого (солнечного) света через стеклянные призмы. В одном из них он направил на призму световой пучок малого поперечного сечения. Пучок солнечного света проходил в затемнённую комнату через маленькое отверстие в ставне.

Падая на стеклянную призму, он преломлялся и давал на противоположной стене удлинённое изображение с радужным чередованием цветов (оно было названо *спектром*). Стилизованное изображение опыта Ньютона



на показано на рисунке 8.3. В спектре белого света наблюдалось семь основных цветов: красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий и фиолетовый.

Ньютон провёл серию опытов со скрещёнными призмами. Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что не призма окрашивает белый свет, как предполагалось раньше. Призма не изменяет свет, а лишь разлагает его на составные части. Белый свет имеет сложную структуру. Из него можно выделить пучки различных цветов, и лишь совместное их действие вызывает у нас впечатление белого цвета. Если с помощью второй призмы, повернутой на 180° относительно первой, собрать все пучки спектра, то опять получится белый свет. Выделив же какую-либо часть спектра, например зелёную, и заставив свет пройти ещё через одну призму, мы уже не получим дальнейшего изменения окраски. «Вид цвета, — писал Ньютон, — свойственный каждому отдельному сорту лучей, не изменяется ни преломлением, ни отражением от естественных тел, ни какой-либо другой причиной, которую я мог бы наблюдать».

Другой важный вывод, к которому пришёл Ньютон, был сформулирован им в трактате «Оптика» (1704). «Световые пучки, отличающиеся по цвету, отличаются по степени преломляемости» (для них стекло имеет различные показатели преломления). При этом наиболее сильно преломляются лучи фиолетового цвета, а лучи красного цвета испытывают наименьшее отклонение. Благодаря тому что угол преломления в призме различен для световых лучей разного цвета, из неё они выходят разделёнными. Это означает, что показатель преломления вещества зависит от цвета падающего на него светового луча.

Зависимость показателя преломления вещества от цвета светового луча называют дисперсией.

В дальнейшем Ньютон усовершенствовал свои наблюдения спектра, чтобы получить более чистые цвета. Вместо круглого отверстия использовалась узкая щель, освещённая ярким источником. За щелью располагалась линза, дающая на экране изображение в виде узкой белой полоски. Если на пути лучей поместить призму (рис. 8.4), то изображение щели будет растянуто в спектр.

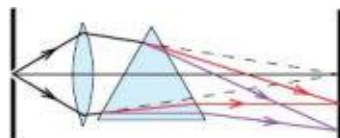


Рис. 8.4

Вам известно, что абсолютный показатель преломления $n = \frac{c}{v}$. Луч красного цвета преломляется меньше из-за того, что он имеет в веществе наибольшую скорость, а луч фиолетового цвета — наименьшую скорость. Именно поэтому призма и разлагает свет. В вакууме скорости лучей разного цвета одинаковы.

Цвет света определяется длиной электромагнитной волны (или частотой колебаний), так как $v = \frac{c}{\lambda}$. С учётом этого можно дать другое определение дисперсии света.

Дисперсией называют зависимость показателя преломления вещества от частоты света (или длины световой волны).



1. В чём состоит астрономический метод измерения скорости света?
2. В чём заключался опыт Физо? 3. Чему равна скорость света по современным данным? 4. Опишите опыты Ньютона по наблюдению дисперсии света. 5. Лучи какого цвета преломляются в стеклянной треугольной призме наиболее сильно? 6. Чем обусловлено явление дисперсии света?



1. Как объяснить, что при освещении солнечным светом мы видим траву зелёной, а розы — красными?
2. Какого цвета будет казаться нам зелёная трава и листья деревьев, если их рассматривать через красное стекло?
3. Почему с Земли небо видно голубым, а с Луны — чёрным?

§ 49

ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА

ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА. Ранее вы познакомились с такими понятиями, как волновая поверхность, луч и волновой фронт (см. § 30). Однако мы не ответили на вопрос о том, как, зная положение волновой поверхности

в данный момент времени, определить её положение в следующий момент времени. Для этого рассмотрим принцип Гюйгенса.

Каждая точка среды, до которой дошло возмущение, сама становится источником вторичных волн.

Зная положение волновой поверхности в момент времени t , можно найти её положение в следующий момент времени $t + \Delta t$. При этом каждую точку волновой поверхности следует рассматривать как источник вторичных волн. Поверхность, касательная ко всем вторичным волнам, представляет собой волновую поверхность в следующий момент времени (рис. 8.5). Принцип Гюйгенса используют для описания распространения любых волн: звуковых, световых и т. д.

С его помощью можно изучать распространение волн, а также вывести законы их отражения и преломления.

ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ ВОЛН. На рисунке 8.6 показана плоская волна, падающая на поверхность MN . Прямые A_1A и B_1B — лучи этой волны. Они параллельны. Плоскость AC является волновой поверхностью падающей волны.

Волновую поверхность отражённой волны можно получить, если провести огибающую вторичных волн, центры которых лежат на границе раздела сред. Различные участки волновой поверхности AC достигнут отражающей границы неодновременно. Возбуждение колебаний в точке A начнётся раньше, чем в точке B , на время

$$\tau = \frac{CB}{v},$$

где v — скорость распространения волн.

В момент, когда волна достигнет точки B и в этой точке начнётся возбуждение колебаний, вторичная волна с центром в точке A уже будет представлять собой полусферу радиусом $R = AD = \tau v = CB$. Радиусы вторичных волн от источников, расположенных между точками A и B , меняются так, как показано на рисунке 8.6. Огибающей вторичных волн явля-

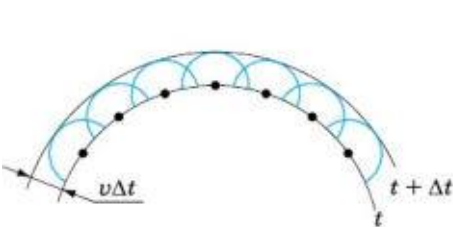


Рис. 8.5

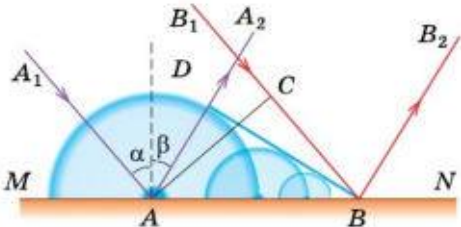


Рис. 8.6

ется плоскость DB , касательная к сферическим поверхностям. Она представляет собой волновую поверхность отражённой волны. Отражённые лучи AA_2 и BB_2 перпендикулярны волновой поверхности DB .

Так как $AD = CB$ и треугольники ADB и ACB прямоугольные, то $\angle DBA = \angle CAB$. Но $\alpha = \angle CAB$ и $\beta = \angle DBA$, как углы с перпендикулярными сторонами. Следовательно, угол отражения равен углу падения:

$$\alpha = \beta.$$

Кроме того, из построения следует, что падающий луч, луч отражённый и перпендикуляр, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Эти два утверждения и представляют собой *закон отражения волн*.

ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОЛН. Рассмотрим теперь преломление волн на плоской границе раздела двух однородных сред с помощью принципа Гюйгенса. Обозначим скорость волны в первой среде через v_1 , а во второй — через v_2 . Пусть на границу раздела сред MN падает плоская волна (рис. 8.7).

Волновая поверхность AC перпендикулярна лучам A_1A и B_1B . Границу раздела сред MN сначала достигнет луч A_1A . Луч B_1B достигнет её спустя время

$$\Delta t = \frac{CB}{v_1}.$$

В момент, когда вторичная волна достигнет точки B и в этой точке начнётся возбуждение колебаний, первичная волна от точки A уже будет иметь вид полусферы радиусом

$$AD = v_2 \Delta t.$$

Волновую поверхность преломлённой волны можно получить, проведя поверхность, касательную ко всем вторичным волнам во второй среде, центры которых лежат на границе раздела сред. В данном случае это плоскость BD . Она является огибающей вторичных волн. Угол падения α лу-

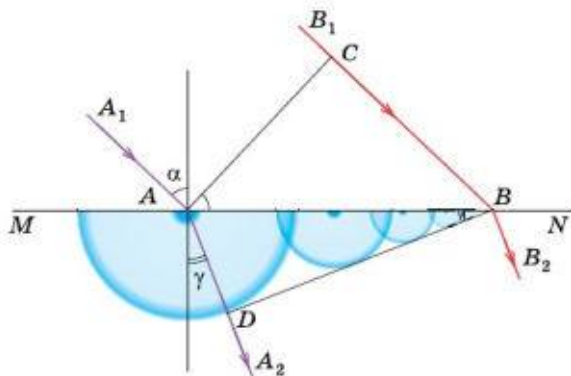


Рис. 8.7

ча равен $\angle CAB$ в треугольнике ABC (стороны одного из этих углов перпендикулярны сторонам другого). Следовательно,

$$CB = v_1 \Delta t = AB \sin \alpha. \quad (1)$$

Угол преломления γ равен $\angle ABD$ треугольника ABD . Поэтому

$$AD = v_2 \Delta t = AB \sin \gamma. \quad (2)$$

Разделив почленно выражение (1) на выражение (2), получим

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n, \quad (3)$$

где n — постоянная величина, не зависящая от угла падения. Её называют *показателем преломления*.

Из построения (см. рис. 8.7) видно, что падающий луч, луч преломлённый и перпендикуляр, восстановленный к границе раздела двух сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Данное утверждение совместимо с выражением (3), согласно которому отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух сред, представляет собой *закон преломления волн*.



- 1.** В чём состоит принцип Гюйгенса? **2.** Какую форму имеет волновой фронт вторичной волны в однородной и изотропной среде? **3.** Как с помощью принципа Гюйгенса можно вывести: а) закон отражения волн; б) закон преломления волн? **4.** Сформулируйте: а) закон отражения волн; б) закон преломления волн.

§ 50

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН

СЛОЖЕНИЕ ВОЛН. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ. До сих пор мы в основном рассматривали одну волну, распространяющуюся от точечного источника. Однако часто в среде одновременно распространяется несколько различных волн. При этом в каждой точке среды колебания, вызванные двумя волнами, складываются. Результирующее смещение любой частицы среды представляет собой сумму смещений, которые происходили бы при распространении одной из волн в отсутствие другой. К одному из подтверждений волновой природы того или иного процесса относится *явление интерференции**.

Сложение в пространстве двух (или нескольких) волн, при котором образуется постоянное во времени распределение амплитуды результирующих колебаний в различных точках пространства, называют *интерференцией*.

* От лат. *inter* — взаимно и *ferio* — ударяю.



Рис. 8.8

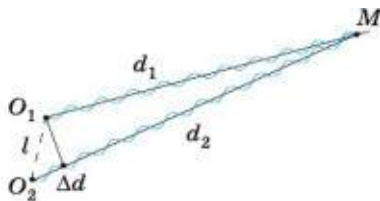


Рис. 8.9

УСЛОВИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ МАКСИМУМОВ И МИНИМУМОВ. Выясним, при каких условиях происходит интерференция волн. Для этого рассмотрим наложение волн на поверхности воды. Одновременно возбуждим две круговые волны в волновой ванне с помощью двух шариков (точечных вибраторов), укрепленных на стержне, который совершает гармонические колебания (рис. 8.8). В любой точке M на поверхности воды (рис. 8.9) будут складываться колебания, вызванные двумя волнами (от точечных источников O_1 и O_2). Амплитуды колебаний, вызванных в точке M обеими волнами, будут различаться, так как волны проходят различные пути d_1 и d_2 . Но если расстояние l между источниками много меньше этих путей ($l \ll d_1$ и $l \ll d_2$), то обе амплитуды можно считать практически одинаковыми.

Результат сложения волн, приходящих в точку M , будет зависеть от разности фаз между ними. Пройдя различные расстояния d_1 и d_2 , волны имеют разность хода $\Delta d = d_2 - d_1$. Если разность хода равна длине волны λ , то вторая волна будет запаздывать по сравнению с первой на один период (как раз за период волна проходит путь, равный длине волны). Следовательно, в этом случае гребни (как и впадины) обеих волн будут совпадать.

На рисунке 8.10 приведён график зависимости от времени смещений s_1 и s_2 , вызванных двумя волнами, при $\Delta d = \lambda$. Разность фаз колебаний равна нулю (или, что то же самое, 2π , так как период синуса равен 2π). В результате сложения этих колебаний возникает результирующее колебание с удвоенной амплитудой. То же самое будет происходить, если на отрезке Δd укладывается не одна, а любое целое число длин волн.

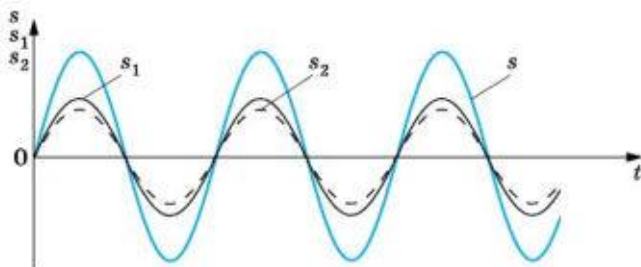


Рис. 8.10

Полученный результат позволяет сформулировать *условие интерференционных максимумов*.

Амплитуда колебаний среды в данной точке будет максимальной, если разность хода двух волн, возбуждающих колебания в этой точке, равна целому числу длин волн*.

$$\Delta d = k\lambda,$$

где $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$; λ — длина волны от каждого из источников.

Что произойдёт, если на отрезке Δd укладывается половина длины волны? Очевидно, что вторая волна будет отставать от первой на половину периода. Разность фаз окажется равной π , т. е. колебания будут происходить в противофазе. В результате сложения этих колебаний амплитуда результирующего колебания равна нулю и в рассматриваемой точке колебаний нет — волны гасят друг друга (рис. 8.11).

То же самое будет наблюдаться, если на отрезке укладывается любое нечётное число полуволн. Данный вывод позволяет сформулировать *условие интерференционных минимумов*.

Амплитуда колебаний среды в данной точке минимальна, если разность хода двух волн, возбуждающих колебания в этой точке, равна нечётному числу полуволн.

$$\Delta d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

где $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$.

Важно то, что амплитуда колебаний в любой точке не меняется с течением времени. В результате на поверхности воды возникает определённый

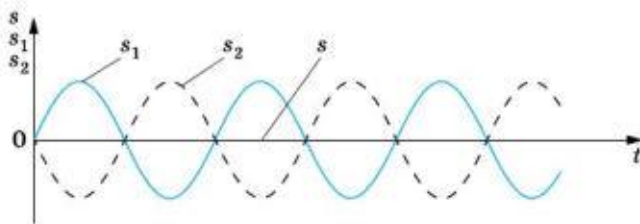


Рис. 8.11

* Это положение справедливо при условии, что фазы колебаний обоих источников совпадают.

ное распределение амплитуд колебаний, которое называют *интерференционной картиной* (рис. 8.12).

Для получения устойчивой интерференционной картины необходимо, чтобы источники волн имели одинаковую частоту и фазы их колебаний совпадали или различались на некоторую постоянную (не зависящую от времени) величину. Иначе говоря, разность фаз колебаний обоих источников должна оставаться неизменной. Источники, удовлетворяющие этим условиям, называются *когерентными*. Когерентными называют и созданные ими волны.

Если же разность фаз колебаний источников не остаётся постоянной, то в любой точке среды будет меняться разность фаз колебаний, возбуждаемых двумя волнами. Поэтому амплитуда результирующих колебаний будет изменяться с течением времени. В результате интерференционные максимумы и минимумы перемещаются в пространстве и интерференционная картина размывается.

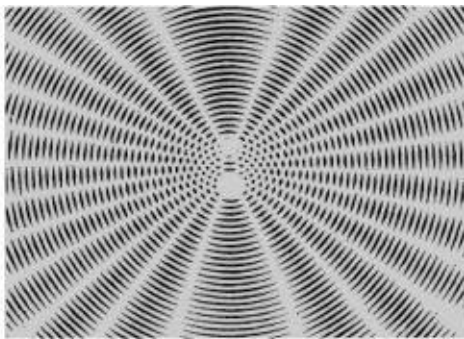


Рис. 8.12

1. Какое явление называют интерференцией? **2.** Как можно наблюдать интерференцию волн? **3.** При каких условиях происходит интерференция волн? **4.** В чём состоит условие интерференционных: а) максимумов; б) минимумов? **5.** Каким условиям должны удовлетворять источники волн для получения устойчивой интерференционной картины?

1. Как вам известно, волны переносят энергию. Но что происходит с этой энергией при гашении волн?
2. Если две волны интерферируют друг с другом, то влияет ли одна волна на распространение другой?
3. Лучи света падают под углом $\alpha = 45^\circ$ на тонкую прозрачную пластинку, которая при наблюдении в отражённых лучах кажется окрашенной в зелёный цвет. Покажите, что при уменьшении угла α цвет пластинки должен измениться в сторону красного конца спектра, а при увеличении угла α — в сторону фиолетового.

УПРАЖНЕНИЯ

1. Разность фаз двух когерентных волн равна $\pi/2$. Чему равна минимальная разность хода этих волн?
2. Разность хода двух когерентных волн равна $\lambda/4$. Определите разность фаз колебаний, возбуждаемых этими волнами.

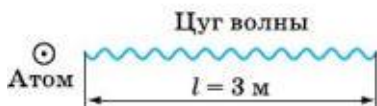


Рис. 8.13

ПРОБЛЕМА КОГЕРЕНТНОСТИ. Получить интерференционную картину (чередование минимумов и максимумов освещённости) от двух обычных независимых источников света, например, от двух электрических ламп, невозможно.

В предыдущем параграфе было установлено, что только когерентные волны, налагаясь друг на друга, дают устойчивую интерференционную картину с неизменным расположением в пространстве максимумов и минимумов колебаний. Световые волны от двух независимых источников, таких, как раскалённые твёрдые и жидкие тела, возбуждённые разрядом газы, не являются когерентными. В чём же здесь дело?

Длительность излучения атома, не взаимодействующего с соседями, характеризуется временем когерентности $\tau = 10^{-8}$ с. Поэтому излучаемую атомом волну можно представить в виде «обрывка» (цуга) синусоиды конечной длины. Длительность τ цуга составляет порядка 10^{-8} с. Длина такого цуга (длина когерентности) $l = c\tau \approx 3 \text{ м}^*$ (рис. 8.13).

В реальности свет излучается огромным количеством атомов, и излучают они независимо друг от друга. Через время порядка τ вся совокупность излучающих атомов обновляется, поэтому суммарное излучение будет иметь другую фазу. Если на экран попадают излучения от двух независимых источников, положение интерференционных полос на экране меняется с частотой 10^8 Гц. При этом глаз не в состоянии следить за этими быстрыми изменениями и фиксирует равномерную освещённость экрана.

ОПЫТ ЮНГА. Наблюдать интерференцию можно, если свет от одного источника разделить на два пучка и, заставив их пройти разные пути, свести вместе. При этом разность хода от места деления до точки наблюдения не должна превышать длины отдельного цуга. На опыте данная идея была реализована в 1802 г. английским учёным Томасом Юнгом (1773—1829).

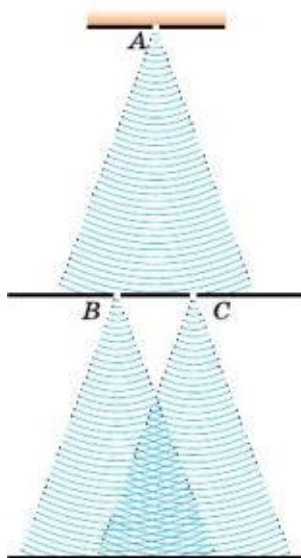


Рис. 8.14

* Подчеркнём, что вследствие движения атома и его взаимодействия с окружением регулярность колебаний в излучаемой волне нарушается, поэтому длина когерентности оказывается меньше.

В непрозрачной ширме он проколол булавкой два маленьких отверстия B и C на небольшом расстоянии друг от друга (рис. 8.14). Эти отверстия освещались узким световым пучком, прошедшим, в свою очередь, через малое отверстие A в другой ширме. На основании принципа Гюйгенса это отверстие можно считать новым точечным источником полусферических волн. Эти волны падают на отверстия B и C , которые сами становятся новыми точечными источниками.

Таким образом, в опыте Юнга достигается разделение исходной волны на две. Эти волны налагаются друг на друга в области за отверстиями, в результате чего на экране образуется устойчивая интерференционная картина в виде чередующихся светлых и тёмных полос. Закрывая одно из отверстий, Юнг обнаружил, что интерференционные полосы исчезали. Именно с помощью этого опыта впервые были измерены длины волн, соответствующие световым лучам разного цвета, причём весьма точно. Так, длина волны для красного света оказалась равной $0,7$ мкм, а для фиолетового света — $0,42$ мкм.



Т. ЮНГ



О. ФРЕНЕЛЬ

ОПЫТ ФРЕНЕЛЯ. Для получения когерентных источников света французский физик Огюстен Френель (1788—1827) предложил использовать бипризму — две призмы с малыми преломляющими углами, сложенные вместе (рис. 8.15). Свет от точечного источника S падает на левые (по рисунку) грани бипризмы, и после преломления возникают два световых пучка. Продолжения лучей, преломлённых верхней и нижней призмами, пересекаются в двух точках S_1 и S_2 , представляющих собой мнимые изображения источника S . При малых значениях преломляющих углов θ призмы источник и оба изображения лежат практически в одной плоскости. Волны в обоих пучках когерентны, так как фактически они испущены одним источником.

Оба пучка, накладываясь друг на друга, интерферируют. При этом возникает интерференционная картина, описанная в опыте Юнга (см. рис. 8.14). Для наглядного доказательства того, что мы имеем дело именно с интерференцией, можно видоизменить опыт. Если одну половину бипризмы прикрыть непрозрачным экраном, то интерференционная картина исчезает, так как наложения волн в этом случае не происходит.

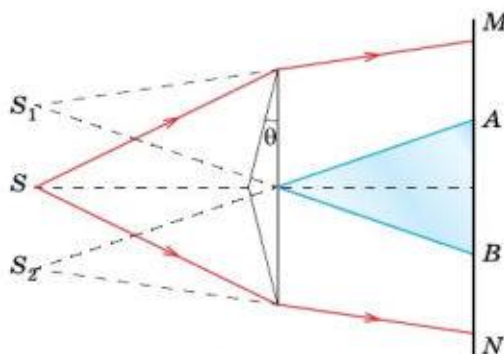


Рис. 8.15

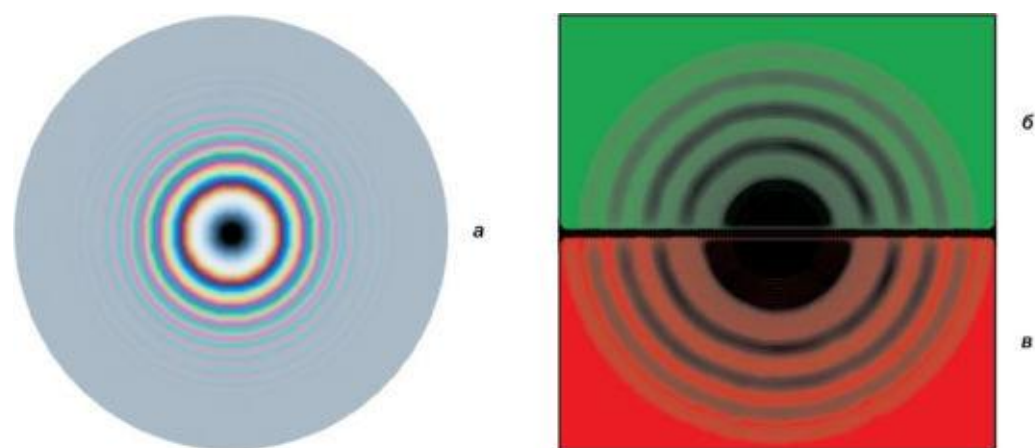


Рис. 8.16

КОЛЬЦА НЬЮТОНА. Интерференционная картина возникает в тонкой прослойке воздуха между стеклянной пластиной и положенной на неё плоско-выпуклой линзой большого радиуса кривизны. Эта интерференционная картина (линии равной толщины) имеет вид концентрических колец, называемых *кольцами Ньютона*. Расстояния между соседними кольцами быстро убывают по мере увеличения их радиуса.

Впервые кольца Ньютона обнаружил Р. Гук, а Ньютон исследовал их не только в белом свете (рис. 8.16, а), но и при освещении линзы одноцветным (монохроматическим*) зелёным (рис. 8.16, б) и красным (рис. 8.16, в) светом.

Впервые объяснить возникновение колец Ньютона удалось Юнгу на основе идеи интерференции. Разделение пучка монохроматического света на два когерентных (рис. 8.17) происходит при отражении от сферической поверхности плоско-выпуклой линзы (луч 1) и от верхней грани плоскопараллельной стеклянной пластины (луч 2). При сложении этих двух волн необходимо учитывать геометрическую разность хода, которая в случае этого опыта почти равна двум величинам зазора между сферической поверхностью и верхней поверхностью подложки.

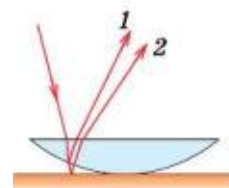


Рис. 8.17

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ В ТОНКИХ ПЛЁНКАХ. Любому человеку множество раз видел интерференционную картину, когда в детстве развлекался пусканием мыльных пузырей

* *Монохроматическое* (от греч. *monos* — один и *chroma* — цвет) *излучение* — электромагнитное излучение одной определённой и строго постоянной частоты. Под термином «монохроматический свет» понимают монохроматическое излучение в диапазоне частот, непосредственно воспринимаемых человеческим глазом.



или наблюдал за радужным переливом цветов тонкой масляной или бензиновой плёнки на поверхности воды (рис. 8.18). Интерференция в тонких плёнках наблюдается при освещении их поверхности весьма протяжёнными источниками света, даже при освещении рассеянным светом пасмурного неба.



Рис. 8.18

В 1802 г. Юнг пришёл к мысли о возможности объяснения цветов тонких плёнок наложением волн, одна из которых отражается от наружной поверхности плёнки, а вторая — от внутренней (рис. 8.19). Это так называемый *метод деления амплитуды волн*. Волны когерентны, так как они испущены одним атомом протяжённого источника света S . Волны 1 и 2 усиливают или ослабляют друг друга в зависимости от разности хода. Эта разность хода возникает из-за того, что волна 2 проходит внутри плёнки дополнительный путь $AB + BC$, а волна 1 при этом проходит лишь дополнительное расстояние AD .

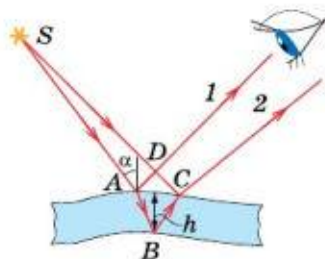


Рис. 8.19

Усиление световых волн происходит, если разность хода равна целому числу длин волн, а ослабление — если разность хода равна нечётному числу длин полуволн. Волны разного цвета имеют разную длину волн. Для взаимного гашения длинных волн нужна большая толщина плёнки, чем для гашения коротких волн. Следовательно, если плёнка имеет неодинаковую толщину в различных местах, то должны появиться различные цвета при освещении плёнки белым светом.

***ПРОСВЕТЛЁННАЯ ОПТИКА.** Число отражающих поверхностей в современных фотообъективах превышает 10. При падении света перпендикулярно поверхности от каждой из них отражается 5—9% всей энергии. Поэтому сквозь оптический прибор часто проходит всего 10—20% поступающего в него света. В результате ухудшается качество изображения. Для устранения этого недостатка следует уменьшить долю отражённой энергии света. Даваемое прибором изображение делается при этом ярче, «просветляется». Отсюда и происходит термин *просветление оптики*.

Просветление оптики основано на интерференции света при отражении от тонких плёнок. На поверхность оптического стекла, например

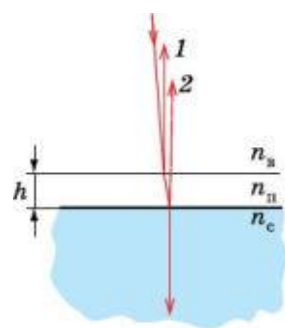


Рис. 8.20

линзы, наносят тонкую плёнку с показателем преломления n_n , меньшим показателя преломления стекла n_c . Рассмотрим случай нормального падения света на плёнку (рис. 8.20). Запишем условие того, что волны, отражённые от верхней и нижней поверхностей плёнки минимальной толщины волны, гасят друг друга:

$$2h = \frac{\lambda}{2n_n}, \quad (1)$$

где $\frac{\lambda}{n_n}$ — длина волны в плёнке; $2h$ — разность хода.

Если амплитуды обеих отражённых волн одинаковы или очень близки, то гашение света будет полным. Для того чтобы этого добиться, необходимо соответствующим образом подобрать показатель преломления плёнки. Это связано с тем, что интенсивность отражённого света определяется отношением коэффициентов преломления двух граничащих сред.

На линзу при обычных условиях падает белый свет. Выражение (1) показывает, что толщина плёнки зависит от длины волны. Поэтому осуществить гашение отражённых волн всех частот невозможно. Толщину плёнки подбирают так, чтобы полное гашение света при нормальном падении имело место для длин волн средней части спектра (зелёный цвет, $\lambda_z = 5,5 \cdot 10^{-5}$ см); она должна быть равна четверти длины волны в плёнке:

$$h = \frac{\lambda_z}{4n_n}.$$

Отражение света крайних участков спектра — красного и фиолетового — ослабляется незначительно. Поэтому объектив с просветлённой оптикой в отражённом свете имеет сиреневый оттенок.



1. Можно ли наблюдать интерференционную картину от двух независимых источников света? Почему?
2. В чём заключался опыт Юнга?
3. Какой способ использовал Френель для получения когерентных источников света?
4. Как возникает интерференционная картина в опыте с бипризмой Френеля?
5. Почему возникают кольца Ньютона?
6. Как образуется интерференционная картина в тонких плёнках?



1. Чем объясняется расцветка крыльев стрекоз, жуков и прочих насекомых? Почему меняется окраска крыльев насекомого, если его осматривать под разными углами?
2. Почему мыльный пузырь на Солнце играет всеми цветами радуги?



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

На рисунке 8.21 приведена схема опыта Юнга. Расстояние между щелями равно 1,5 мм, а экран расположен на расстоянии 2 м от щелей. Определите расстояние между интерференционными полосами на экране, если длина волны монохроматического света равна 650 нм.

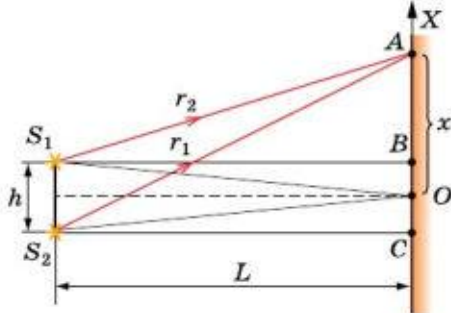


Рис. 8.21

Дано:

$$h = 1,5 \text{ мм}$$

$$L = 2 \text{ м}$$

$$\lambda = 650 \text{ нм}$$

$$\Delta x = ?$$

СИ:

$$1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$650 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

Решение:

Определим разность хода для двух световых лучей. Применим теорему Пифагора к треугольникам S_1AB и S_2AC :

$$r_2^2 = L^2 + \left(x - \frac{h}{2}\right)^2, \quad (1)$$

$$r_1^2 = L^2 + \left(x + \frac{h}{2}\right)^2. \quad (2)$$

По мере удаления точки наблюдения от точки O вдоль оси X разность хода увеличивается. Вычтем из выражения (2) выражение (1):

$$r_1^2 - r_2^2 = 2hx; \quad (r_1 - r_2)(r_1 + r_2) = 2hx.$$

Из условия $L \gg h$ получим приближённое равенство $r_1 + r_2 \approx 2L$.

С учётом этого

$$r_1 - r_2 = \frac{2hx}{2L} = \frac{hx}{L}.$$

Запишем условие интерференционного максимума:

$$r_1 - r_2 = \Delta d = m\lambda, \text{ где } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Таким образом, максимумы интерференции будут наблюдаться в точках экрана с координатами x_m , для которых справедливо равенство

$$\frac{hx_m}{L} = m\lambda.$$

Отсюда

$$x_m = \frac{m\lambda L}{h}.$$

Расстояние между соседними максимумами

$$\Delta x = x_{m+1} - x_m = \frac{\lambda L}{h}; \quad \Delta x = \frac{650 \cdot 10^{-9} \cdot 2}{1,5 \cdot 10^{-3}} \text{ м} \approx 8,7 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,87 \text{ мм}.$$

Ответ: $\Delta x = 0,87 \text{ мм}$.



УПРАЖНЕНИЯ

1. Два когерентных источника S_1 и S_2 (рис. 8.22) испускают свет с длиной волны 600 нм. Определите, на каком расстоянии от точки O на



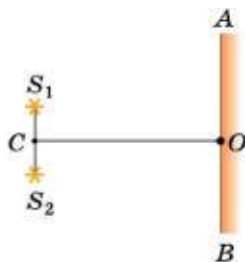


Рис. 8.22

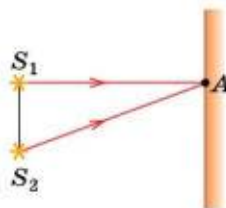


Рис. 8.23

экране будет наблюдаться первый интерференционный максимум, если $OC = 4$ м и $S_1S_2 = 1$ мм.

2. Два когерентных источника S_1 и S_2 испускают свет с длиной волны $0,5$ мкм. Источники находятся на расстоянии 2 мм друг от друга (рис. 8.23). Экран расположен на расстоянии 2 м от источника S_1 . Что будет наблюдаться в точке A экрана: усиление или ослабление света?
3. Как изменится интерференционная картина на экране AB (см. рис. 8.22), если: а) не изменяя расстояния между источниками света, удалить их от экрана; б) не изменяя расстояния до экрана, сближать источники света; в) источники света будут испускать свет с меньшей длиной волны?
4. Экран освещается жёлтым светом с длиной волны 590 нм, идущим от двух когерентных источников, расстояние между которыми равно 200 мкм. На расстоянии 15 мм от центра экрана O (см. рис. 8.22) наблюдается центр второй тёмной интерференционной полосы, считая от точки O . Определите расстояние OC от источников света до экрана.
5. Две когерентные световые волны достигают некоторой точки с разностью хода 2 мкм. Что произойдёт в этой точке: усиление или ослабление света? Рассмотрите случаи, когда свет: а) красного цвета ($\lambda_1 = 760$ нм); б) жёлтого цвета ($\lambda_2 = 600$ нм); в) фиолетового цвета ($\lambda_3 = 400$ нм).

§ 52

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА



Рис. 8.24

ДИФРАКЦИЯ. ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА—ФРЕНЕЛЯ. Волны способны огибать препятствия. Так, морские волны свободно огибают выступающие из воды камни, молы, волноломы (рис. 8.24), если их *размеры меньше длины волны или сравнимы с ней*. За этими препятствиями волны распространяются так, как если

бы их не было совсем. Способностью огибать препятствия обладают и звуковые волны. Вы можете слышать сигнал машины за углом дома, когда самой машины не видно.

Отклонение от прямолинейного распространения волн, огибание волнами препятствий называют дифракцией*.



Наблюдать дифракцию света непросто, так как длина световой волны очень мала. Для этого необходимо использовать небольшие по размеру препятствия. Если световая волна проходит сквозь круглое отверстие или на её пути находится небольшой диск, то возникают дифракционные картины, показанные на рисунке 8.25, а, б. При освещении проволоочки светом вместо её тени на экране видны чередующиеся светлые и тёмные полосы (рис. 8.25, в).

Дифракцию света можно наблюдать и в том случае, когда расстояние до экрана достигает порядка метра. Тогда размеры препятствий не должны превышать сотых долей миллиметра. Если же расстояние до экрана достигает сотен метров или нескольких километров, то дифракцию света можно наблюдать на препятствиях размером в несколько сантиметров и даже метров. Таким образом, по мере уменьшения ширины щели световые волны всё больше отклоняются от прямолинейного распространения**.

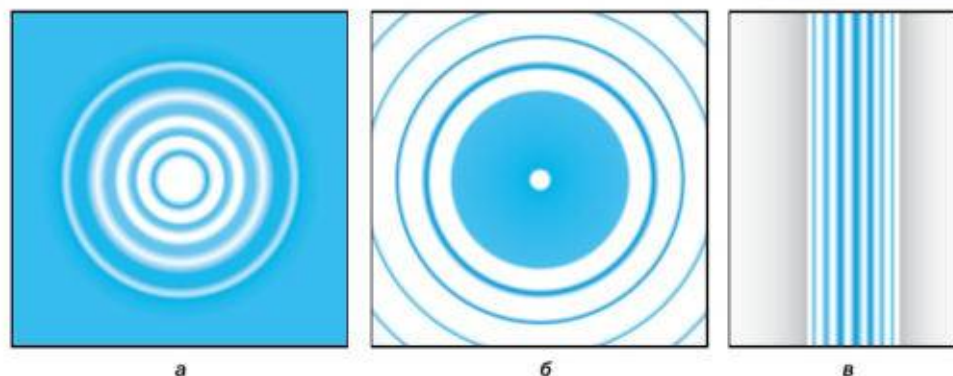


Рис. 8.25

* От лат. *diffRACTus* — разломанный.

** Закон прямолинейного распространения света и другие законы геометрической оптики выполняются достаточно точно лишь в том случае, если размеры препятствий на пути распространения света много больше длины световой волны. При этом волновые свойства света можно не учитывать. Отсюда следует важный вывод: геометрическая оптика является предельным случаем волновой оптики, когда длина световой волны много меньше размеров препятствий.

Исследование дифракции света получило развитие в работах Френеля. Он не только детально исследовал различные случаи дифракции на опыте, но и построил количественную теорию этого явления. Френелем также впервые было объяснено прямолинейное распространение света в однородной среде на основе волновой теории. Этих успехов Френель добился, объединив принцип Гюйгенса с идеей интерференции вторичных волн. Так появился *принцип Гюйгенса—Френеля*.

Световая волна, возбуждаемая каким-либо источником, может быть представлена как результат интерференции когерентных вторичных волн, излучаемых каждой точкой волновой поверхности.

Френелем также впервые было объяснено прямолинейное распространение света в однородной среде на основе волновой теории. Пусть, например, волна распространяется в однородной среде по определённому направлению. Любая точка, до которой дойдёт волна, становится источником вторичных волн, которые разбегаются во все стороны. На первый взгляд, первоначальное направление распространения изменится, и световая волна рассеется в стороны. Однако если учесть взаимную интерференцию этих вторичных волн, то окажется, что в боковых направлениях вторичные волны взаимно уничтожают друг друга и лишь в первоначальном направлении они взаимно усиливаются. Поэтому свет распространяется в первоначальном направлении.

ПЯТНО ПУАССОНА. Пусть на круглый непрозрачный диск падает плоская волна, параллельная оси диска. Согласно принципу Гюйгенса—Френеля, точки на краю диска можно рассматривать как источники вторичных когерентных волн. Эти волны пройдут одинаковое расстояние от края диска до любой точки на его оси. В результате они придут в эту точку в одинаковой фазе и усилятся. Поэтому в центре тени за диском должно быть светлое пятно. Вокруг центрального пятна располагаются светлые и тёмные кольца (рис. 8.26).

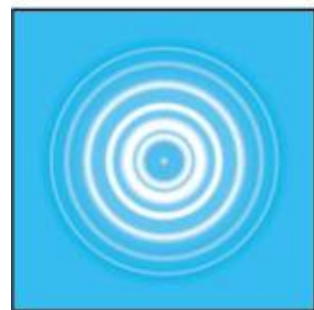


Рис. 8.26

Любопытный случай произошёл на заседании Французской академии наук в 1818 г. Присутствовавший на заседании известный физик Симеон Дени Пуассон (1781—1840) обратил внимание на то, что из теории Френеля вытекает факт, явно противоречащий здравому смыслу. За маленьким непрозрачным диском должно находиться светлое пятно в центре тени. Каково же было удивление учёных, когда тут же поставленные французским учёным Домиником Араго (1786—1853) эксперименты подтвердили существование такого пятна! Обнаруженное явление

стало одним из веских аргументов в пользу волновой теории света.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА ДЛИННОЙ УЗКОЙ ЩЕЛИ.

В том случае, если наблюдение дифракционной картины проводится на очень большом расстоянии от препятствия, говорят о *дифракции в параллельных лучах*. Часто такую дифракцию называют дифракцией Фраунгофера по имени исследовавшего её немецкого учёного Йозефа Фраунгофера (1787—1826). Этот вид дифракции рассматривается особо по двум причинам. Во-первых, это более простой частный случай дифракции, а во-вторых, такого рода дифракция часто встречается в разнообразных оптических приборах.

Пусть на длинную узкую щель падает плоская монохроматическая волна (рис. 8.27). Щель можно считать длинной, если её ширина b много меньше длины щели l . Если $l \approx 100b$, то щель можно рассматривать как бесконечно длинную. Дифракционную картину будем наблюдать по методу Фраунгофера, т. е. в параллельных лучах, а практически — на экране, расположенном в фокальной плоскости собирающей линзы.

Разобьём поверхность щели на узкие параллельные полосы света. Определим результат интерференции вторичных волн, создаваемых этими источниками. Линза сводит все падающие на неё под углом φ параллельные лучи вместе на экране. Разность хода от вторичных источников, расположенных в щели, определяется углом φ между нормалью к плоскости щели и направлением распространения лучей (см. рис. 8.27). При $\varphi = 0$ наблюдается центральный максимум, так как все вторичные волны в этом случае имеют одинаковую разность хода.

Допустим, лучи идут под углом φ так, что луч от правого края щели проходит ровно на одну длину волны больше луча от левого края ($\sin \varphi = \frac{\lambda}{b}$, см. рис. 8.27). Тогда луч из центра щели пройдёт путь на половину длины волны больше, чем от левого края. Соответствующие этим лучам волны, интерферируя, ослабят друг друга. В данном случае все вторичные источники можно разбить на пары с расстоянием между источниками $\frac{b}{2}$ — каждая волна от источника в левой половине щели ослабит соответствующую волну из правой половины.

Таким образом, для угла φ , удовлетворяющего условию $\sin \varphi = \frac{\lambda}{b}$, наблюдается *дифракционный минимум*. Рассуждая аналогично, можно по-

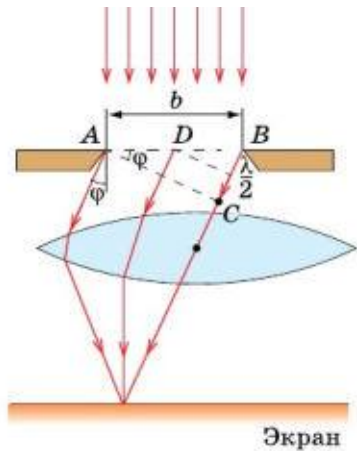


Рис. 8.27



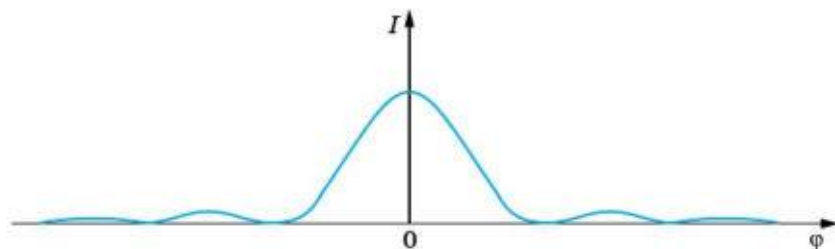


Рис. 8.28

казать, что дифракционные минимумы будут наблюдаться для каждого угла φ , удовлетворяющего условию

$$b \sin \varphi = k\lambda, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

Между дифракционными минимумами располагаются в виде светлых параллельных полос дифракционные максимумы. При $\varphi = 0$ наблюдается центральный (нулевой), самый интенсивный максимум. В этом случае все вторичные волны имеют одинаковую разность хода.

Примерная зависимость интенсивности света на экране от угла φ приведена на рисунке 8.28. При ширине щели $b \leq \lambda$ интенсивность света плавно спадает от центра дифракционной картины к её краям.

? 1. Какое явление называют дифракцией? При каких условиях оно наблюдается? 2. Сформулируйте принцип Гюйгенса—Френеля. 3. Как можно объяснить прямолинейное распространение света на основе волновой теории? 4. При каком условии наблюдаются дифракционные минимумы при дифракции света на длинной узкой щели?

?? 1. Почему радиоволны огибают здания, а световые волны, также являющиеся электромагнитными, нет? 2. На каких волнах (более длинных или более коротких) легче наблюдать явление дифракции? 3. Почему для наблюдения дифракции используют тела малых размеров (игла, тонкая проволока, волос и т. д.)?

Это любопытно...

Из истории развития физики и техники

Впервые дифракцию света наблюдал итальянский учёный Франческо Гримальди (1618—1663) в середине XVII в. В узкий пучок света он помещал различные предметы, в частности тонкие нити. При этом тень на экране оказывалась шире, чем это должно быть согласно законам геометрической оптики.

Кроме того, по обе стороны тени обнаруживались цветные полосы. Пропущенная тонкий пучок света через маленькое отверстие, Гримальди также наблюдал отступление от закона прямолинейного распространения света. Светлое пятно против отверстия оказывалось большего размера, чем это следовало ожидать при прямолинейном распространении света.

Опыты по дифракции проводились также Ньютоном. Но если Гримальди правильно истолковал свои опыты как следствие волновой природы света (он, кстати, первым и ввёл термин «дифракция»), то Ньютон объяснял их притяжением световых частиц краями препятствий, расположенных на пути распространения света.

§ 53 ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЁТКА

УСТРОЙСТВО ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ. На явлении дифракции света основано действие *дифракционной решётки** (рис. 8.29, а, б).

Дифракционная решётка представляет собой совокупность большого числа очень узких щелей, разделённых непрозрачными промежутками.

Дифракционная решётка изготавливается с помощью специальной делятельной машины, наносящей на стеклянной пластине параллельные штрихи. Число штрихов доходит до нескольких тысяч на 1 мм; общее чи-



а



б

Рис. 8.29

* В 1785—1786 гг. американский учёный Дэвид Риттенхаус (1732—1796) изобрёл первую дифракционную решётку, используя для этого 50 волосков, натянутых между двумя винтами с мелкой резьбой (примерно 100 линий на дюйм). Большой заслугой Фраунгофера является широкое использование им дифракционных решёток для исследования спектров.

сло штрихов превышает 100 000. Наилучшими качествами обладают так называемые отражательные решётки. Они представляют собой чередование участков, отражающих и рассеивающих свет. Рассеивающие свет штрихи наносятся резцом на отшлифованной металлической пластине.

Если ширина прозрачных щелей (или отражающих свет полос) равна a , а ширина непрозрачных промежутков (или рассеивающих свет полос) равна b , то величину $d = a + b$ называют *периодом решётки* (или *постоянной решётки*).

ДИФРАКЦИОННАЯ КАРТИНА НА РЕШЁТКЕ. Пусть на прозрачную дифракционную решётку с периодом d нормально падает плоская монохроматическая волна с длиной волны λ . Дифракционную картину будем наблюдать на экране, расположенном в фокальной плоскости собирающей линзы (рис. 8.30).

Положения максимумов и минимумов, характерных для одной щели, не зависят от положения щели относительно линзы (нужно только, чтобы свет от щели попадал на линзу). Поэтому может показаться, что при наличии N щелей мы получим на экране дифракционную картину как от одной щели (см. рис. 8.27), но усиленную в N раз. Однако это не так. Дело в том, что волны от всех щелей интерферируют друг с другом, поскольку они когерентны.

Найдём условие, при котором идущие от щелей волны усиливают друг друга. Рассмотрим вторичные волны, распространяющиеся в направлении, определяемом углом φ . Разность хода между волнами от краёв соседних щелей равна длине катета AC прямоугольного треугольника ABC (см. рис. 8.30). При этом $AC = d \sin \varphi$. Для того чтобы в точке P наблюдался интерференционный максимум, разность хода должна быть равна целому числу длин волн:

$d \sin \varphi = \pm k \lambda,$

(1)

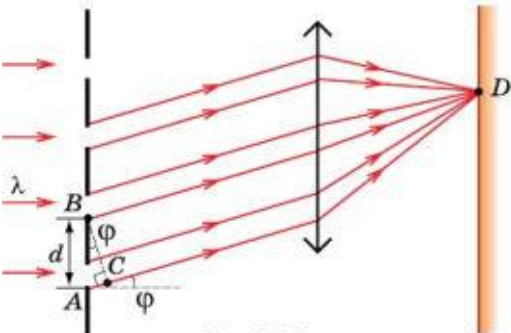


Рис. 8.30

где $k = 0, 1, 2, \dots$ определяет порядок спектра.

Каждой точке в первой щели соответствует точка во второй щели, находящаяся на расстоянии d от этой точки. Это означает, что при выполнении условия (1) усиливают друг друга не только волны, идущие от нижних краёв щелей, но и волны, идущие от всех других точек щелей.

Углы φ , для которых выполнено условие (1), определяют положение *главных максимумов дифракционной картины*. Целое число k называют *порядком главного максимума*. Максимум нулевого порядка (центральный максимум) только один, а максимумов первого, второго и т. д. порядков бывает по два. Отметим, что дифракционная картина на экране симметрична относительно центрального максимума. Именно главные максимумы представляют особый практический интерес. Они получаются тем более узкими и резкими, чем больше штрихов N содержит дифракционная решётка.

А какой вид имеет дифракционная картина между главными максимумами? Первичные минимумы, характерные для одной щели, остаются на своих местах. Однако появляются и *дополнительные минимумы*, соответствующие таким углам φ , для которых колебания от отдельных щелей взаимно гасятся. Углы, определяющие направления на дополнительные минимумы, можно найти из условия

$$d \sin \varphi = \frac{\lambda}{N}, 2 \frac{\lambda}{N}, 3 \frac{\lambda}{N}, \dots, \frac{N-1}{N} \lambda.$$

Теперь между двумя главными максимумами располагается $N - 1$ дополнительных минимумов. Это приводит к тому, что главные максимумы очень резко очерчены и интенсивность света в них велика. На рисунке 8.31 приведена примерная зависимость интенсивности света от угла дифракции. Пунктирная кривая показывает распределение интенсивности для одной щели. Вторичные максимумы между дополнительными минимумами слабы. Увеличение числа щелей не меняет положение главных максимумов, но делает их более интенсивными. Наиболее интенсивным остаётся центральный максимум ($\varphi = 0$).

С помощью дифракционной решётки можно производить очень точные измерения длины волны. Если период решётки известен, то определение длины волны сводится к измерению угла φ , соответствующего направлению на максимум. Так как положение максимумов (кроме центрального, соответствующего $\varphi = 0$) зависит от длины волны, то

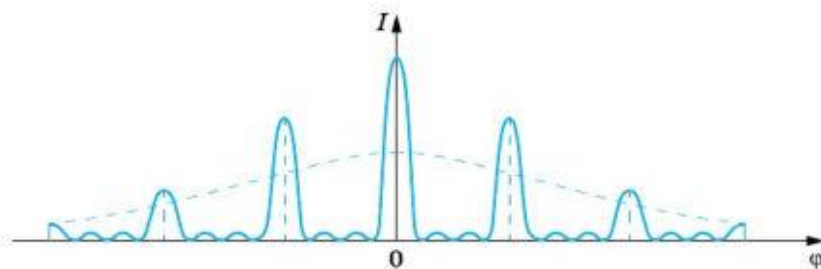


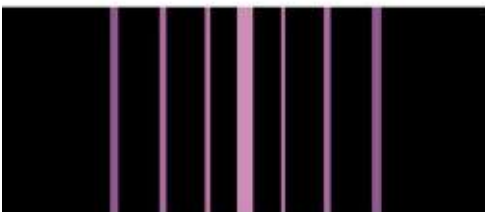
Рис. 8.31



а



б



в

Рис. 8.32



Рис. 8.33

решётка разлагает белый свет в спектр (рис. 8.32, а). Чем больше λ , тем дальше располагается тот или иной максимум, соответствующий данной длине волны, от центрального максимума (рис. 8.32, б, в). Каждому значению k соответствует свой спектр. Это свойство дифракционной решётки используется при исследованиях спектрального состава света.

Наши ресницы с промежутками между ними представляют собой грубую дифракционную решётку. Поэтому, если посмотреть, прищурившись, на яркий источник света,

то можно обнаружить радужные цвета. Белый свет разлагается в спектр при дифракции на ресницах.

Лазерный CD-диск с его бороздками, проходящими близко друг к другу, подобен отражательной дифракционной решётке. Если вы посмотрите на отражённый им свет от электрической лампочки, то обнаружите разложение света в спектр (рис. 8.33). При этом можно наблюдать несколько спектров, соответствующих разным значениям k . Картина будет очень чёткой, если свет от лампочки падает на диск под большим углом.



1. Что представляет собой дифракционная решётка?
2. Что называют периодом (постоянной) дифракционной решётки?
3. Каким условием определяются положения главных максимумов при дифракции света на решётке?
4. Охарактеризуйте зависимость интенсивности света от угла дифракции, используя рисунок 8.31.



При дифракции происходит отклонение световых лучей от прямолинейного распространения в однородной среде. Не опровергает ли явления дифракции закон прямолинейного распространения света в однородной среде?



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

При помощи дифракционной решётки с периодом 0,02 мм на экране, находящемся на расстоянии 1,8 м от неё, получена дифракционная картина. Её первый максимум находится на расстоянии 3,6 см от центрального. Найдите длину световой волны.

Дано:

$$d = 0,02 \text{ мм}$$

$$L = 1,8 \text{ м}$$

$$x = 3,6 \text{ см}$$

$$\lambda = ?$$

СИ:

$$2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

$$3,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

Решение:

Запишем условие главных максимумов при дифракции света на дифракционной решётке:

$$d \sin \varphi = k\lambda,$$

где $k = 1$ (для максимума первого порядка).

Из треугольника SOA (рис. 8.34) найдём:

$$\frac{x}{L} = \operatorname{tg} \varphi.$$

Можно считать, что $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi$, так как в условиях данной задачи угол φ мал.

Подставив это выражение в условие главных максимумов, найдём длину волны:

$$\lambda = d \frac{x}{L}.$$

С учётом числовых данных получим

$$\lambda = \frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 3,6 \cdot 10^{-2}}{1,8} \text{ м} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 40 \text{ нм}.$$

Ответ: $\lambda = 40 \text{ нм}$.

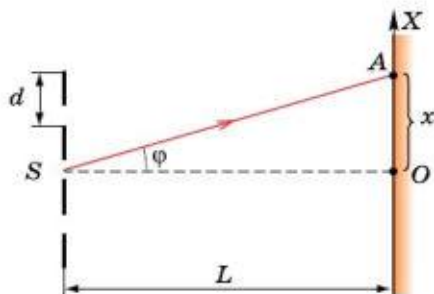


Рис. 8.34



УПРАЖНЕНИЯ

1. Допустим, у вас есть дифракционные решётки, имеющие 100 и 600 штрихов на 1 мм. Какая из них даст на экране более широкий спектр при прочих равных условиях?

2. Дифракционная решётка имеет 120 штрихов на 1 мм. Найдите длину волны света, падающего на решётку, если угол между двумя спектрами первого порядка равен 8° .
3. На дифракционную решётку, имеющую 500 штрихов на 1 мм, по нормали к ней падает плоская монохроматическая волна. Определите наибольший порядок спектра k , который можно наблюдать при помощи такой решётки, если длина волны равна 500 нм.
4. Расстояние между штрихами дифракционной решётки составляет 5 мкм. На решётку по нормали к ней падает плоская монохроматическая волна с длиной волны 560 нм. Максимум какого наибольшего порядка даёт эта решётка?
5. На дифракционную решётку нормально к её поверхности падает монохроматический свет. Период дифракционной решётки в $n = 3,5$ раза больше длины световой волны. Найдите общее число дифракционных максимумов, которые теоретически возможно наблюдать в данном случае.



§ 54

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТОВЫХ ВОЛН

ПОПЕРЕЧНОСТЬ СВЕТОВЫХ ВОЛН. ПОЛЯРИЗАЦИЯ. Явления интерференции и дифракции не оставляют сомнений в том, что распространяющийся свет обладает свойствами волн. Но каких волн — продольных или поперечных?



Поперечность световых волн была доказана в ходе многочисленных экспериментов. Рассмотрим лишь один из них. Это опыт с кристаллами турмалина — прозрачными кристаллами зелёной окраски. Кристалл турмалина имеет ось симметрии и принадлежит к числу так называемых одноосных кристаллов. Возьмём прямоугольную пластину турмалина, вырезанную таким образом, чтобы одна из её граней была параллельна оси кристалла. Если направить перпендикулярно на такую пластину пучок света от электрической лампы или Солнца, то вращение пластины вокруг пучка не приведёт к изменению интенсивности света, прошедшего через неё.

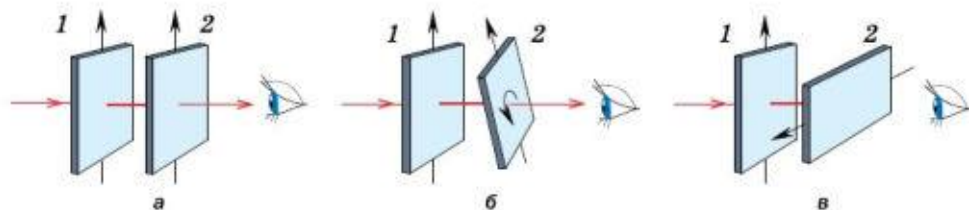


Рис. 8.35

Теперь заставим пучок света пройти через второй (2) точно такой же кристалл турмалина, параллельный первому (1) (рис. 8.35, а). При одинаково направленных осях кристаллов опять ничего интересного не происходит: просто световой пучок ещё более ослабляется за счёт поглощения во втором кристалле. Но если второй кристалл вращать, оставляя первый неподвижным (рис. 8.35, б), то обнаружится удивительное явление — гашение света. По мере увеличения угла между осями интенсивность света уменьшается. В том случае, когда оси перпендикулярны друг другу, свет не проходит совсем (рис. 8.35, в). Он полностью поглощается вторым кристаллом. Как это можно объяснить?

Из этих опытов следует два факта. Во-первых, световая волна, идущая от источника света, полностью симметрична относительно направления распространения (при вращении кристалла вокруг луча в первом опыте интенсивность не менялась). Во-вторых, волна, вышедшая из первого кристалла, не обладает осевой симметрией (в зависимости от поворота второго кристалла относительно луча получается та или иная интенсивность прошедшего света).

Полное объяснение опыта можно получить, сделав два предположения. Первое из них относится к самому свету. *Свет — поперечная волна*. Но в падающем от обычного источника пучке волн присутствуют колебания всевозможных направлений, перпендикулярных направлению распространения волны (рис. 8.36).

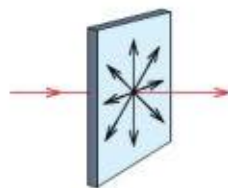


Рис. 8.36

Световую волну с колебаниями по всем направлениям, перпендикулярным направлению распространения, называют естественной.

В обычных условиях источники света создают именно такую волну. Данное предположение объясняет результат первого опыта. Вращение кристалла турмалина не меняет интенсивность прошедшего света, так как падающая волна обладает осевой симметрией (несмотря на то что она является поперечной).

Второе предположение, которое необходимо сделать, относится к кристаллу. Кристалл турмалина обладает способностью пропускать световые волны с колебаниями, лежащими в одной определённой плоскости (плоскость P на рис. 8.37). Такой свет называют *поляризованным* или, точнее, *плоскополяризованным*, в отличие от естественного света, который может быть назван также неполяризованным. Это предположение полностью объясняет результаты второго опыта. Из первого кристалла выходит плоскополяризованная волна.

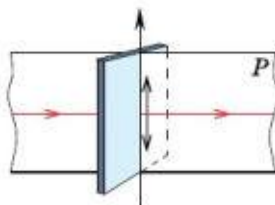


Рис. 8.37

При скрещённых кристаллах (угол между осями 90°) она не проходит сквозь второй кристалл. Если оси составляют между собой некоторый угол, отличный от 90° , то проходят колебания, амплитуда которых равна проекции амплитуды волны, прошедшей через первый кристалл, на направление оси второго кристалла.

Итак, кристалл турмалина *поляризует свет*, т. е. преобразует естественный свет в плоскополяризованный. Это означает, что в поляризованном свете вектор напряжённости $\vec{E}$ электрического поля совершает колебания только в одной плоскости, называемой *плоскостью поляризации*.

Устройство, преобразующее естественный свет в поляризованный, называют *поляризатором*. Устройство, позволяющее определять плоскость поляризации световой волны, называют *анализатором*. В опыте, показанном на рисунке 8.35, поляризатором является пластинка 1, анализатором — пластинка 2.

ПОЛЯРОИДЫ. Не только кристаллы турмалина способны поляризовать свет. Таким же свойством обладают, например, так называемые *поляроиды*. Поляроид представляет собой тонкую (0,1 мм) плёнку кристаллов герапатита, нанесённую на целлулоид или стеклянную пластинку. С поляроидом можно проделать те же опыты, что и с кристаллом турмалина.

Преимущество поляроидов состоит в том, что можно создавать большие поверхности, поляризующие свет. К недостаткам поляроидов относится фиолетовый оттенок, который они придают белому свету.

Поляроидные плёнки применяют для регулировки интенсивности света, например, в солнечных очках, фарах автомобиля, в фотографии для получения моментальных снимков (рис. 8.38) и др.



Рис. 8.38

Отметим, что свет поляризуется не только при прохождении сквозь кристаллы. Частичная поляризация света наблюдается при отражении света от поверхности диэлектрика и при преломлении света. Частично поляризованный свет можно рассматривать как смесь естественного света и плоскополяризованного. Поляризацию света легко обнаружить, наблюдая сквозь полосу поляроида отражённый от поверхности воды или стекла пучок лучей.



1. Как можно экспериментально установить поперечность световых волн? **2.** Как можно объяснить результаты опытов, показанных на рисунке 8.35? **3.** Чем отличается естественная световая волна от плоскополяризованной? **4.** Что называют: а) плоскостью поляризации; б) поляризатором; в) анализатором? **5.** Что представляют собой поляроиды? Приведите примеры использования поляроидных плёнок.

Это любопытно...

Из истории развития физики и техники

В 1808 г. французский физик и инженер Этьен Луи Малюс (1775—1812) открыл явление поляризации света. Он рассматривал сквозь пластинку исландского шпата отблеск Солнца в окнах Люксембургского дворца в Париже. При этом он обнаружил, что при некоторых положениях кристалла вместо двух преломлённых лучей наблюдается только один! Сначала Малюс решил, что замеченное им явление объясняется изменениями яркости солнечного света, обычно незаметными для глаза.

Но в ту же ночь он собрал на столе экспериментальную установку, состоявшую из восковой свечи, чаши с водой, угломера и кристалла исландского шпата. Постепенно поднимая чашу, Малюс изменял угол падения света от восковой свечи на поверхность воды. Лучи света, отражённые от гладкой поверхности воды, Малюс рассматривал через кристалл. Когда угол падения лучей достиг 36° , в кристалле один из преломлённых лучей исчез. После этого Малюс заменил чашу с водой на стеклянное зеркало — и снова повторилась та же картина, но на этот раз лучи падали под углом 35° , когда исчезал один из преломлённых лучей.

Явление поляризации Малюс объяснял тем, что частицы света имеют полюсы, как магниты. В обычном свете полюсы разных частиц направлены беспорядочно. Но при поляризации отсортировываются лишь частицы света с определёнными направлениями полюсов. Возмож-



Э. МАЛЮС

но, используя слово «полюс», Малюс и предложил назвать новое явление поляризацией. Кроме того, он вывел закон, позволяющий определить интенсивность света, прошедшего через поляризатор.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ И ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

1. Выполните проектную работу на тему «Эффект Тиндаля». Изучите, как спектральный состав белого света меняется при прохождении через раствор молока в воде при изменении процентного состава молока.
2. Изучите принцип действия оптического интерферометра. Оптические интерферометры позволяют проводить точные измерения различных величин (оптических длин волн, показателей преломления прозрачных сред и др.). Убедиться в этом можно, если в опыте Юнга по интерференции света, прошедшего через две щели, в один из пучков ввести тонкую прозрачную пластину. Оцените толщину пластины из слюды.
3. Проведите опыты на темы «Дифракция света на отверстиях от булавок» и «Дифракция света на штангенциркуле». Зарисуйте и охарактеризуйте полученные дифракционные картины.
4. Проведите исследование солнцезащитных поляроидных очков. Предложите критерии сравнения, запланируйте и поставьте эксперимент и докажете, какие очки являются качественными поляроидами, а какие нет.

Примерные темы рефератов и проектов

1. Причина возникновения радуги.
2. Рассеяние света. Почему небо голубое?
3. Интерференция в мыльных пузырях.
4. Интерферометры: виды, устройство, принцип действия, применение.
5. Калейдоскоп — детская игрушка или оптический прибор?



Глава 9

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ



Развитие электродинамики и оптики привело к пересмотру представлений о пространстве и времени. Согласно классическим представлениям, считавшимся на протяжении веков незыблемыми, движение не оказывает никакого влияния на течение времени (время абсолютно), а линейные размеры любого тела не зависят от того, покоится тело или движется (длина абсолютна). В 1905 г. в статье Альберта Эйнштейна (1879—1955) были сформулированы основы новой теории пространства и времени — *теории относительности*.

В рамках этой теории рассматриваются пространственно-временные закономерности, справедливые для любых физических процессов. При этом принято выделять общую (или теорию тяготения) и частную (или специальную, СТО) теории относительности. Физические явления, описываемые в рамках теории относительности, называют релятивистскими (от лат. *relativus* — относительный). Они проявляются при скоростях движений материальных объектов, близких к скорости света в вакууме.

В рамках СТО рассматривается взаимосвязь физических явлений только в инерциальных системах отсчёта. В настоящее время формулы и выводы СТО широко используют для расчёта энергетического выхода ядерных реакций, при проектировании и создании ускорителей элементарных частиц, в астрофизике, в системах спутниковой навигации и других областях современной науки и техники.

§ 55

ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ И ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ. После того как Максвеллом была разработана теория электромагнитного поля, возник вопрос, распространяется ли принцип относительности, справедливый для механических явлений, и на электромагнитные явления. Другими

словами, протекают ли электромагнитные процессы (взаимодействие зарядов и токов, распространение электромагнитных волн и т. д.) одинаково во всех инерциальных системах отсчёта (ИСО)? Для ответа на этот вопрос нужно было выяснить, меняются ли основные законы электродинамики при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой, или же, подобно законам Ньютона, они остаются неизменными (инвариантными).

Значения координат и времени в двух ИСО связаны друг с другом преобразованиями Галилея. Законы электродинамики сложны, и выяснить, инвариантны эти законы относительно преобразований Галилея или нет, — задача непростая. В электродинамике Максвелла скорость распространения электромагнитных волн в вакууме одинакова по всем направлениям и равна $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Но, в соответствии с законом сложения скоростей, вытекающим из преобразований Галилея, скорость может равняться c только в одной избранной системе отсчёта. В любой другой системе отсчёта, движущейся по отношению к этой избранной системе отсчёта со скоростью $\vec{v}$, скорость света должна равняться $\vec{c} - \vec{v}$. Это означает, что если справедлив обычный закон сложения скоростей, то при переходе от одной ИСО к другой законы электродинамики должны меняться так, чтобы в этой новой системе отсчёта скорость света равнялась не $\vec{c}$, а $\vec{c} - \vec{v}$.

Таким образом, обнаружились определённые противоречия между электродинамикой и механикой Ньютона, законы которой согласуются с принципом относительности. Возникшие трудности можно было попытаться преодолеть тремя различными способами.

Первая возможность состояла в том, чтобы объявить несостоятельным принцип относительности применительно к электромагнитным явлениям. Эту точку зрения разделял Лоренц. Электромагнитные явления ещё со времён Фарадея рассматривались как процессы в особой, всепроникающей среде, заполняющей всё пространство, — «мировом эфире». Инерциальная система отсчёта, покоящаяся относительно эфира, — это, согласно Лоренцу, особая преимущественная система. В ней законы электродинамики Максвелла справедливы и имеют наиболее простую форму. Лишь в этой системе отсчёта скорость света в вакууме одинакова по всем направлениям.

Вторая возможность заключалась в том, чтобы считать неправильными сами уравнения Максвелла и попытаться изменить их таким образом, чтобы они при переходе от одной ИСО к другой (в соответствии с классическими представлениями о пространстве и времени) не менялись. Такая попытка, в частности, была предпринята Герцем. Он полагал, что эфир полностью увлекается движущимися телами и поэтому электромагнитные явления, происходящие в эфире, протекают одинаково, независимо от того, покоится тело или движется. Принцип относительности справедлив.

Наконец, *третья возможность* разрешения указанных трудностей состояла в отказе от классических представлений о пространстве и времени, с тем чтобы сохранить как принцип относительности, так и уравнения Максвелла. Это наиболее революционный путь, так как он подразумевает пересмотр основных представлений в физике.

История показала, что единственно правильной оказалась именно третья возможность. Последовательно её развивая, Эйнштейн пришёл к новым представлениям о пространстве и времени. Несостоятельность первых двух возможностей была установлена в ходе экспериментов.



А. МАЙКЕЛЬСОН

ОПЫТ МАЙКЕЛЬСОНА. Если бы скорость света была равна $300\,000$ км/с только в системе отсчёта, связанной с эфиром, то, измеряя скорость света в произвольной инерциальной системе, можно было бы обнаружить движение этой системы отсчёта по отношению к эфиру и определить скорость этого движения. Подобно тому как в системе отсчёта, движущейся относительно воздуха, возникает ветер, при движении по отношению к эфиру (если, конечно, эфир существует) должен быть обнаружен «эфирный ветер». Опыт по обнаружению «эфирного ветра» был поставлен в 1881 г. американским учёным Альбертом Майкельсоном (1852—1931)*. Суть этого опыта можно понять с помощью следующего примера.

Из города A самолёт совершает рейсы в города B и C (рис. 9.1, a). Расстояния AB и AC одинаковы и равны $l = 300$ км, причём трасса AB перпендикулярна трассе AC . Скорость самолёта относительно воздуха $c = 200$ км/ч. Пусть в направлении AB дует ветер со скоростью $v = 10$ км/ч. Спрашивается: какой рейс займёт больше времени: от A к B и обратно или от A к C и обратно?



Рис. 9.1

* В 1887 г. А. Майкельсон совместно с американским учёным Эдвардом Морли (1838—1923) повторил данный опыт со значительно более высокой точностью.

В первом случае время полёта равно

$$t_1 = \frac{l}{c+v} + \frac{l}{c-v} \approx 3,00075 \text{ ч.}$$

Во втором случае самолёт должен держать курс не на сам город C , а на некоторую точку D , лежащую против ветра (рис. 9.1, б). Относительно воздуха самолёт пролетит расстояние AD . Воздушный поток сносит самолёт на расстояние DC . Отношение этих расстояний равно отношению скоростей:

$$\frac{DC}{AD} = \frac{v}{c}.$$

Относительно Земли самолёт пролетит расстояние AC . Так как $\frac{DC}{AD} = \sin \alpha$ (см. рис. 9.1, б), то $\sin \alpha = \frac{v}{c}$. Но

$$AD = \frac{AC}{\cos \alpha} = \frac{AC}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha}},$$

поэтому $AD = \frac{AC}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$

Следовательно, время t_2 , затраченное самолётом на прохождение этого пути туда и обратно со скоростью c , можно определить следующим образом:

$$t_2 = \frac{2AD}{c} = \frac{2AC}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{AC}{\sqrt{c^2 - v^2}} \approx 3,00375 \text{ ч.}$$

Зная разность времён, а также расстояние AC и скорость c , можно определить скорость ветра относительно Земли.

Упрощённая схема опыта Майкельсона приведена на рисунке 9.2. В нём использовался высокочувствительный прибор — интерферометр (в настоящее время он носит название *интерферометра Майкельсона*).

В опыте роль самолёта играла световая волна, скорость которой составляет 300 000 км/с относительно эфира. (Никаких сомнений в существовании эфира тогда не было.) Роль обычного ветра играл предполагаемый

«эфирный ветер», обдувающий Землю. Относительно неподвижного эфира Земля не может покоиться всё время, так как она движется вокруг Солнца со скоростью около 30 км/с, и эта скорость непрерывно меняет направление. Роль города A играла полупрозрачная пластина P , разделяющая поток света от источника S на два взаимно перпендикулярных пучка. Города B и C заменены зеркалами M_1 и M_2 , направляющими световые пучки обратно. Далее оба пучка света соединялись и попадали в объектив зрительной

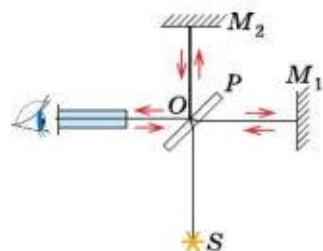


Рис. 9.2

трубы. При этом возникала интерференционная картина, состоящая из чередующихся светлых и тёмных полос. Расположение полос зависело от разности времён, затрачиваемых на одном и другом пути.

Направление «эфирного ветра» неизвестно. Но при вращении прибора ориентация световых путей OM_1 и OM_2 относительно «эфирного ветра» должна была изменяться. Следовательно, должна была изменяться разность времён прохождения светом путей OM_1 и OM_2 , а поэтому должны были смещаться и интерференционные полосы. По этому смещению исследователи надеялись определить значение и направление скорости «эфирного ветра».

Однако никакого смещения интерференционных полос при повороте прибора обнаружено не было! Эксперименты ставились в разное время суток и в различные времена года, но всегда с одним и тем же отрицательным результатом: движения Земли по отношению к эфиру зафиксировать не удалось. Точность экспериментов была такой, что они позволили бы обнаружить изменение скорости распространения света (при повороте интерферометра) даже на 2 м/с.

Всё это было похоже на то, как если бы вы, высунув голову из окна машины, при скорости 100 км/ч не заметили бы встречного ветра.

Таким образом, идея о существовании преимущественной системы отсчёта не выдержала опытной проверки. В свою очередь, это означало, что никакой особой среды — «светоносного эфира», с которой можно было бы связать такую преимущественную систему отсчёта, не существует.



1. Какие сложности возникают при распространении принципа относительности на электромагнитные явления? **2.** Какие способы были предложены для разрешения противоречий между электродинамикой Максвелла и механикой Ньютона? **3.** В чём состоял эксперимент Майкельсона—Морли? **4.** Какие результаты были получены в этом эксперименте?

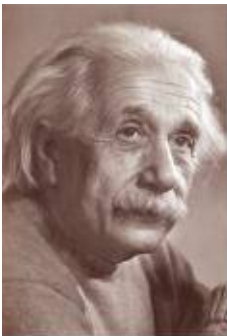


Как вы думаете, почему известный английский физик и социолог науки Джон Бернал (1901—1971) назвал результат опыта Майкельсона—Морли «величайшим из всех отрицательных результатов в истории науки»?

§ 56

ПОСТУЛАТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

ПОСТУЛАТЫ СТО. В 1905 г. Эйнштейн отправил в немецкий журнал *Annalen der Physik* («Анналы физики») статью «К электродинамике движущихся сред». Прочитав эту статью, немецкий физик Макс Планк (1858—1947) понял, что общепринятые научные представления о пространстве и вре-



А. ЭЙНШТЕЙН

мени пересмотрены. Согласно Эйнштейну, не следует изобретать различные гипотезы для объяснения отрицательных результатов всех попыток обнаружить различие между инерциальными системами. Необходимо признать полное равноправие всех ИСО в отношении не только механических, но и электромагнитных процессов. При этом нет никакого различия между состоянием покоя и равномерного прямолинейного движения. Именно это обнаружилось в опыте Майкельсона—Морли (движение Земли по орбите не оказывает влияния на оптические явления на Земле).

Представьте себе, что вы находитесь в поезде, который движется равномерно, не постукивает на стыках рельсов и не меняет своего направления. Если опустить шторы на окнах, то вы не сможете определить, движется ли поезд вообще. Купе вокруг вас выглядит абсолютно так же, как это же купе в том случае, когда поезд стоит на платформе.

Эйнштейн утверждал, что никакой путешественник не сможет провести в закрытом купе эксперимент, который позволил бы определить, движется поезд или находится в состоянии покоя.

Именно принцип относительности будет работать в рассматриваемом случае, так как любое свободное движение относительно, оно приобретает смысл только в сравнении с другими объектами или наблюдателями, которые также совершают свободное движение. Эйнштейн понял, что любые законы физики должны быть абсолютно одинаковы для всех наблюдателей, совершающих равномерное движение.

В основе СТО лежат два базовых постулата*. *Принцип относительности* — главный постулат теории Эйнштейна. Его можно сформулировать следующим образом.

Все законы природы одинаковы в любой инерциальной системе отсчёта.

Это означает, что во всех ИСО физические законы имеют одинаковую форму. Таким образом, принцип относительности классической механики обобщается на все процессы в природе, в том числе и на электромагнитные.

Второй постулат теории относительности — *постулат абсолютной скорости*.

* *Постулат* — утверждение, принимаемое в рамках какой-либо научной теории за истинное в силу очевидности и поэтому играющее в данной теории роль аксиомы.

Скорость света в вакууме одинакова для всех инерциальных систем отсчёта.

Она не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приёмника светового сигнала. Этот факт был экспериментально подтверждён. Например, нидерландский астроном Виллем де Ситтер (1872—1934) проводил наблюдения движения двойных звёзд. Он предположил, что данные космические объекты могут быть использованы для измерения влияния движения источника на скорость света. Если бы скорость света зависела от скорости движения звезды, то из-за значительной удалённости двойной звезды от Земли различие скорости света от каждой звезды вызвало бы искажение оптического изображения этих звёзд в телескоп. Однако Ситтер этого не обнаружил.

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ОДНОВРЕМЕННОСТИ СОБЫТИЙ. Одним из основных понятий в СТО является понятие *события*.

Событием называют физическое явление, происходящее в определённой точке пространства в некоторый момент времени в выбранной системе отсчёта.

Рассмотрим, как происходят два события относительно разных ИСО. Допустим, что космонавт хочет узнать, одинаково ли идут часы A и B , установленные на противоположных концах космического корабля (рис. 9.3).

Для этого с помощью источника, неподвижного относительно корабля и расположенного в его середине, космонавт производит вспышку света. Свет одновременно достигает обоих часов. Если показания часов в этот момент одинаковы, то часы идут *синхронно*.

Но так будет лишь относительно системы отсчёта K' , связанной с кораблём. В системе же отсчёта K , относительно которой корабль движется, положение иное. Часы на носу корабля удаляются от того места, где произошла вспышка света источника, и, чтобы достигнуть часов A , свет должен

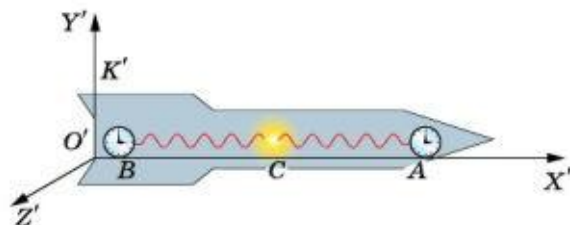


Рис. 9.3

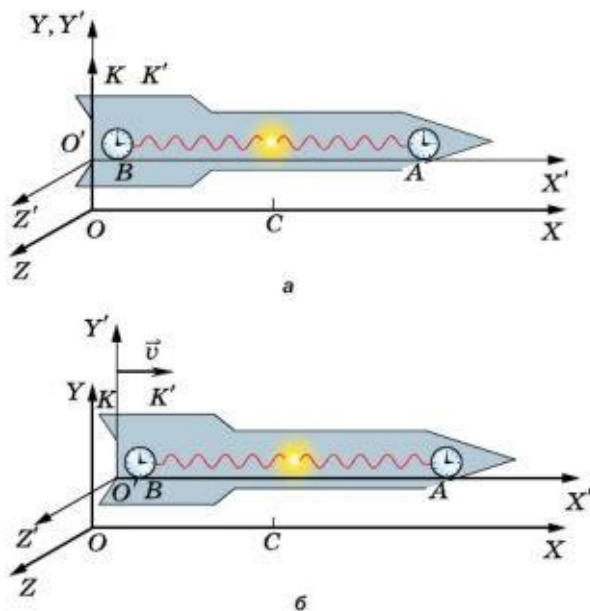


Рис. 9.4

преодолеть расстояние, большее половины длины корабля (рис. 9.4, а, б). Напротив, часы B на корме приближаются к месту вспышки, и путь сигнала меньше половины длины корабля. Поэтому наблюдатель в системе K придёт к выводу, что сигналы достигают обоих часов не одновременно.

Соответственно часы A и B идут неодинаково. Поэтому мы вынуждены прийти к следующему заключению.

Одновременность пространственно разделённых событий относительна.

Причиной относительности одновременности событий является конечность скорости распространения сигналов.

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ПРОМЕЖУТКОВ ВРЕМЕНИ. Пусть промежуток времени между двумя событиями, происходящими в одной и той же точке системы отсчёта K , равен τ_0 (его называют *собственным временем*). Согласно СТО, промежуток времени τ между этими же событиями относительно системы отсчёта K' , движущейся относительно системы отсчёта K со скоростью $\vec{v}$, будет равен

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (1)$$

Очевидно, что $\tau > \tau_0$, т. е. движущиеся часы идут медленнее, чем покоящиеся. В этом проявляется *релятивистский эффект замедления времени* в движущихся системах отсчёта.

Явление замедления времени обнаруживается экспериментально при наблюдении распада нестабильных элементарных частиц, таких, как мюон, π -мезоны и др. Среднее время жизни, например, мюона, т. е. время жизни между двумя событиями: рождением мюона и его распадом, в системе, относительно которой события происходят в одной точке, в среднем равно $\tau_0 = 2,2 \cdot 10^{-6}$ с. Чем быстрее движется мюон относительно лабораторной системы отсчёта, тем больше его время жизни. Скорости движения элементарных частиц могут быть очень близкими к скорости света. Поэтому увеличение времени жизни, определяемое формулой (1), обнаруживается на опыте.

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ РАССТОЯНИЙ. Пусть твёрдый стержень AB покоится в системе отсчёта K' (рис. 9.5). Его длина в этой системе отсчёта, если стержень расположен вдоль оси X' , равна

$$l_0 = x'_2 - x'_1.$$

Длину l_0 покоящегося стержня называют *собственной длиной*.

Спрашивается: чему равна длина стержня l с точки зрения системы отсчёта K , относительно которой стержень движется со скоростью $\vec{v}$?

Расчёты* показывают, что

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (2)$$

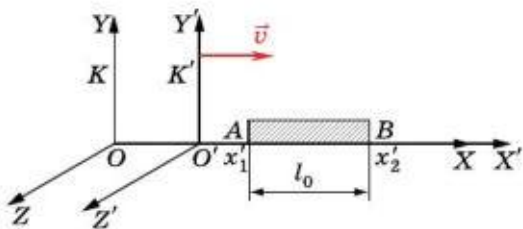


Рис. 9.5

* Строгий вывод формул (1) и (2) основан на так называемых *преобразованиях Лоренца*. Согласно принципу относительности, не только уравнения Максвелла для электромагнитного поля, но и любые другие законы природы не должны менять свою форму при преобразованиях Лоренца. Законы Ньютона, инвариантные относительно преобразований Галилея, не инвариантны относительно преобразований Лоренца. Поэтому законы классической механики не могут описывать движения тел со скоростями, близкими к скорости света.

Таким образом, длина l движущегося стержня меньше собственной длины l_0 . Длина не является абсолютной величиной, как считалось раньше, а зависит от скорости движения объекта. Абсолютным является лишь утверждение о том, что покоящийся стержень всегда длиннее движущегося.

В заключение отметим, что с тех пор, как Эйнштейн опубликовал свою статью, прошло более 100 лет, однако большинство из нас до сих пор воспринимает пространство и время как абсолютные понятия. Причина этого весьма проста: эффекты, обусловленные СТО, зависят от скорости движения. Скорости, с которыми движутся все транспортные средства на сегодняшний момент, не позволяют уловить эффекты, связанные с различием в восприятии пространства и времени между неподвижными наблюдателями и наблюдателями, находящимися в этих видах транспорта.



1. Сформулируйте: а) первый постулат СТО; б) второй постулат СТО. В чём заключается их физический смысл? **2.** Зависит ли скорость света от скорости источника или от скорости приёмника светового сигнала? **3.** С чем связана относительность одновременности событий в СТО? **4.** В чём проявляется релятивистский эффект замедления времени? Как его можно экспериментально обнаружить? **5.** Сравните длину стержня в системе отсчёта, относительно которой он движется, с его собственной длиной.



С космического корабля на Землю посылается световой сигнал. Будет ли промежуток времени (по земным часам), за который сигнал дойдёт до Земли, одинаков в следующих трёх случаях: а) корабль с большой скоростью удаляется от Земли; б) корабль с большой скоростью приближается к Земле; в) корабль неподвижен относительно Земли?



УПРАЖНЕНИЯ

- 1.** Чему равна длина метровой линейки, движущейся относительно наблюдателя со скоростью $0,6c$, направленной вдоль линейки? Во сколько раз изменятся продольные размеры линейки?
- 2.** С какой скоростью должен двигаться предмет, чтобы его длина была втрое меньше собственной длины?
- 3.** С какой скоростью должен лететь звездолёт, чтобы пройденный путь, измеренный астронавтом, оказался вдвое короче пути, измеренного с Земли?
- 4.** С какой скоростью должен двигаться космический корабль относительно Земли, чтобы часы на нём шли в 2 раза медленнее, чем на Земле?
- 5.** Какое время пройдёт на Земле, если в ракете, движущейся относительно Земли со скоростью $0,99c$, пройдёт 10 лет?

Интересные факты

После создания Эйнштейном СТО французский физик Поль Ланжевен (1872—1946) сформулировал «парадокс близнецов» (или, иначе, «парадокс часов»). Это мысленный эксперимент с двумя братьями-близнецами, движущимися относительно друг друга.

Если один из братьев-близнецов отправится в длительное космическое путешествие на сверхскоростном космическом корабле, а потом вернётся на Землю, то кто из братьев-близнецов окажется младше к моменту их встречи? Согласно релятивистскому эффекту замедления времени, брат-близнец, улетавший в космос, окажется более молодым, чем его брат-близнец, оставшийся на Земле (рис. 9.6). Но каждый из братьев-близнецов считает (и это подтверждается их наблюдениями), что часы другого брата-близнеца идут медленнее, чем его часы. В действительности выход из парадокса достаточно прост. Дело в том, что принцип относительности Эйнштейна утверждает равноправие не любых, а только инерциальных систем отсчёта. Ясно, что систему отсчёта, связанную с Землёй, можно приближённо считать инерциальной, а систему отсчёта, связанную с движущимся космическим кораблём (совершающим торможение и разгон), — нельзя.



Рис. 9.6

§ 57

МАССА, ИМПУЛЬС И ЭНЕРГИЯ В СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ИМПУЛЬС. Согласно второму закону Ньютона, постоянная сила, действуя на тело продолжительное время, может сообщить ему сколь угодно большую скорость. Но в действительности скорость света в вакууме является предельной, и ни при каких условиях тело не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме.

Таким образом, СТО требует пересмотра и уточнения законов механики. При этом должны выполняться закон сохранения импульса и закон

сохранения механической энергии в замкнутых системах. Для того чтобы закон сохранения импульса выполнялся во всех ИСО, необходимо изменить определение импульса тела. В рамках СТО релятивистский импульс $\vec{p}$ тела массой m , движущегося со скоростью $\vec{v}$, имеет вид

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (1)$$

При скоростях движения, много меньших скорости света ($v \ll c$), релятивистский импульс переходит в классический. Обратим внимание, что масса m , входящая в выражение (1), является фундаментальной характеристикой тела, не зависящей от выбора системы отсчёта.

ОСНОВНОЙ ЗАКОН РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ДИНАМИКИ. В курсе физики 10 класса мы использовали запись второго закона динамики Ньютона в форме

$$\Delta \vec{p} = \vec{F} \Delta t, \text{ или } \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}.$$

Основной закон релятивистской динамики записывается так же, однако под $\vec{p}$ следует понимать релятивистский импульс:

$$\frac{\Delta \left(\frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right)}{\Delta t} = \vec{F}.$$

СВЯЗЬ МЕЖДУ ЭНЕРГИЕЙ И МАССОЙ. Как уже было сказано, в релятивистской механике выполняется закон сохранения механической энергии. Для того чтобы разогнать частицу массой m из состояний покоя до некоторой скорости v , сила F должна совершить работу A , которая будет равна кинетической энергии E_k частицы. Основной закон релятивистской динамики позволяет получить для работы следующее выражение:

$$A = E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2. \quad (2)$$

Эйнштейн интерпретировал первый член в правой части формулы (2) как полную энергию E движущейся частицы:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (3)$$

а второй член — как энергию покоя E_0 :

$$E_0 = mc^2. \quad (4)$$

При малых скоростях ($v \ll c$) формула (2) переходит в классическое выражение для кинетической энергии $E_k = \frac{mv^2}{2}$.

Формула Эйнштейна (4) выражает фундаментальный закон природы, который называют *законом взаимосвязи массы и энергии*. Во всей физике найдётся совсем немного столь же простых и универсальных формул, связывающих фундаментальные физические величины.

Согласно формуле Эйнштейна, любое тело обладает энергией уже только благодаря факту своего существования. Так, в 1 кг вещества содержится энергия $E_0 = 1 \cdot (3 \cdot 10^8)^2$ Дж = $9 \cdot 10^{16}$ Дж. Для того чтобы выделилась такая энергия, потребовалось бы сжечь 9 млн т древесины!

Почему же в задачах классической механики и термодинамики, применяя закон сохранения энергии, мы не учитывали энергию покоя? При малых скоростях движения тела формулу (3) можно записать в виде

$$E \approx mc^2 + \frac{mv^2}{2}, \text{ т. е. энергия покоя входит в качестве слагаемого в полную}$$

энергию. Однако изменения энергии, возникающие в этих задачах, настолько малы по сравнению с энергиями покоя взаимодействующих тел, что изменениями масс тел можно пренебречь. Но так бывает не всегда. Далее мы увидим, что в ядерных реакциях относительное изменение массы достигает величин, с которыми необходимо считаться. Например, при делении ядра урана-235 масса продуктов распада примерно на 0,1% меньше массы исходного ядра. При этом выделяется огромная энергия.

РЕЛЯТИВИСТСКОЕ СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ЭНЕРГИЕЙ И ИМПУЛЬСОМ. С помощью формул (1) и (3) можно получить соотношение, связывающее энергию и импульс релятивистской частицы. Возводя обе части этих формул в квадрат и преобразовывая разность $E^2 - p^2c^2$, получим

$$E^2 - p^2c^2 = \frac{m^2c^4}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{m^2v^2c^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{m^2c^2(c^2 - v^2)}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = m^2c^4.$$

Таким образом,

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2.$$

Данное соотношение показывает, что частица может иметь энергию и импульс, но при этом не иметь массы. Для безмассовой частицы (например, фотона) связь между энергией и импульсом имеет вид

$$E = pc.$$

Безмассовая частица не может существовать в состоянии покоя. В любой ИСО она движется со скоростью света.

* Это можно показать, воспользовавшись приближёнными равенствами $\sqrt{1-x} \approx 1 - x/2$, $1/(1-x) \approx 1 + x$, справедливыми при $|x| \ll 1$.

*** ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ.** Закон всемирного тяготения фактически утверждает, что если изменить распределение вещества в одном месте пространства, то изменения гравитационного поля мгновенно проявятся во всей Вселенной. Это не только означает возможность передавать сигналы со сверхсветовой скоростью (что невозможно в рамках СТО), но и требует существования абсолютного времени (что также противоречит основным положениям СТО). В связи с этим Эйнштейном в 1915—1916 гг. была создана новая теория пространства-времени, которая получила название *общей теории относительности* (ОТО). Она является обобщением СТО для гравитационных полей. Согласно ОТО, свойства пространства обусловлены находящейся в нем материей. При этом чем больше массы тел, тем более искривлено пространство вокруг них. Следовательно, вблизи тяготеющей массы (например, Солнца) должно наблюдаться искривление луча света.

В обычных условиях наблюдать этот эффект очень трудно, поскольку свет Солнца затмевает звёзды, расположенные вблизи него. Однако такие наблюдения можно выполнить во время солнечных затмений. В 1919 г. британская экспедиция, наблюдавшая солнечное затмение в Западной Африке, обнаружила, что световые лучи действительно отклоняются Солнцем. Отметим, что гравитационное отклонение света, наряду с другими эффектами ОТО, является экспериментальным подтверждением справедливости данной теории.



1. Как можно определить релятивистский импульс тела? 2. Как записывается формула Эйнштейна? 3. Что называют энергией покоя (собственной энергией)? 4. Как связаны между собой энергия и импульс в СТО?



УПРАЖНЕНИЯ

1. Вычислите энергию покоя электрона.
2. На сколько увеличивается масса воды в озере объёмом 10^6 м^3 при её нагревании на 22°C ?
3. Общая мощность излучения Солнца составляет около $3,8 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$. На сколько уменьшается масса Солнца за 1 с?
4. На сколько увеличится масса пружины жёсткостью 10 кН/м при её растяжении на 3 см?
5. При какой скорости кинетическая энергия частицы равна её энергии покоя?

Примерные темы рефератов и проектов

1. Значение опытов Майкельсона—Морли в истории физики.
2. Альберт Эйнштейн — создатель СТО.
3. Релятивистский закон сложения скоростей.
4. «Парадокс близнецов» и его объяснение.



КВАНТОВАЯ ФИЗИКА. АСТРОФИЗИКА

Мы узнали, что при распространении принципа относительности Галилея на электромагнитные явления пришлось отказаться от гипотезы эфира и пересмотреть устоявшиеся представления о пространстве и времени. В конечном счёте это привело к созданию СТО. Но оказалось, что в рамках классической физики невозможно правильно объяснить строение и устойчивость атома, происхождение линейчатых спектров, закономерности взаимодействия света с веществом, фотоэффект и др. Только создание принципиально новой физической теории (*квантовой механики*) позволило решить эти проблемы.

Данная теория описывает движение и взаимодействие микрочастиц (элементарных частиц, атомов, молекул, атомных ядер) и их систем (например, кристаллов). Её законы и методы позволили выяснить строение атомов, установить природу химической связи, объяснить Периодическую систему химических элементов Д. И. Менделеева, исследовать строение атомных ядер, свойства элементарных частиц. Поскольку свойства макроскопических тел определяются движением и взаимодействием частиц, из которых они состоят, законы квантовой механики лежат в основе понимания макроскопических явлений (например, сверхпроводимости). Ряд выдающихся технических достижений XX в. (создание ядерной энергетики, микроэлектроники, лазерной техники) напрямую связаны с развитием квантовой физики. Квантовые представления оказались востребованными и при изучении природы космических объектов (например, нейтронных звёзд), механизма протекания ядерных реакций в недрах звёзд.

В этом разделе будут рассмотрены элементы квантовой физики, атомной физики, физики атомного ядра и элементарных частиц, а также представления о строении и эволюции Вселенной.

Глава 10

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА. СТРОЕНИЕ АТОМА



14 декабря 1900 г. на заседании Немецкого физического общества Планк высказал гипотезу, согласно которой излучение и поглощение электромагнитных волн атомами и молекулами вещества происходят не непрерывно (как это предполагается классической теорией), а дискретно — порциями (или квантами). На основе этого предположения была создана теория равновесного теплового излучения, выводы которой полностью согласовывались с результатами экспериментов.

В 1905 г. Эйнштейн, исходя из квантовой природы света, объяснил законы фотоэффекта. В 1913 г., используя квантовые представления об излучении и поглощении света и планетарную модель атома, датский физик Нильс Бор (1885—1962) разработал новую модель атома. В её рамках удалось объяснить происхождение линейчатых спектров. Впоследствии на её основе была создана квантовая механика. Эта теория обобщает классическую механику Ньютона и переходит в неё лишь в предельных случаях.

§ 58

РАВНОВЕСНОЕ ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

РАВНОВЕСНОЕ ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. Известно, что любое тело, нагретое до высокой температуры, светится. Это означает, что оно излучает в окружающее пространство электромагнитные волны. Такое излучение вещества называют *тепловым*. Тепловое излучение вещества характеризуется сплошным спектром. Оно происходит за счёт внутренней энергии вещества при любой температуре, отличной от 0 К. При этом потери атомами энергии на излучение света компенсируются за счёт энергии теплового движения атомов (или молекул) излучающего тела. При столкновении быстрых атомов (или молекул) друг с другом часть их кинетической энергии превращается в энергию возбуждения атомов, которые затем излучают свет.

Тепловое излучение может быть *равновесным*, т. е. возможно равновесие между телом и созданным им излучением. Равновесное излучение можно получить внутри полости тела, имеющего постоянную температуру. При равновесии электромагнитная энергия, излучаемая телом в единицу времени внутрь полости, равна энергии, поглощаемой из полости за это же время. Температура тела при этом остаётся неизменной.

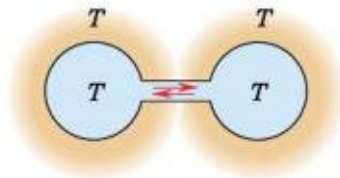


Рис. 10.1

Равновесному тепловому излучению приписывается определённая температура: если температура тела, например, равна 300 К, то говорят, что излучение, находящееся в полости, также имеет температуру, равную 300 К. Вследствие равновесного характера теплового излучения к нему можно применять законы термодинамики. Это позволяет установить ряд закономерностей. Так, плотность энергии излучения и распределение этой энергии по частотам не зависят от свойств вещества стенок полости.

Если бы это было не так, то, соединив трубкой две полости со стенками из разных веществ, мы обнаружили бы перетекание энергии из одной полости в другую, даже при одинаковых температурах (рис. 10.1). В результате одно тело начало бы остывать, а другое — нагреваться, т. е. состояние теплового равновесия нарушилось бы само собой. Но, согласно законам термодинамики, это невозможно.

Энергия теплового излучения не зависит от рода вещества, из которого сделаны стенки полости, следовательно, можно выбрать любую простую модель строения вещества и с её помощью попытаться найти зависимость плотности энергии теплового излучения от температуры и частоты. Важно, чтобы модель учитывала излучение и поглощение волн всех частот.

«УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ КАТАСТРОФА». В конце XIX в. уже было известно об излучении электромагнитных волн определённой частоты вибратором Герца. В этом устройстве электрические заряды совершают колебания, близкие к гармоническим. Поэтому вибратор Герца называют также электромагнитным осциллятором*.

При исследовании закономерностей равновесного теплового излучения Планк использовал модель *абсолютно чёрного тела***.

* От лат. *oscillo* — качаюсь.

** *Абсолютно чёрное тело* — тело, полностью поглощающее всю энергию падающего на него электромагнитного излучения любой частоты при произвольной температуре. В природе абсолютно чёрных тел не бывает. Хорошей экспериментальной моделью такого тела является непрозрачная замкнутая полость с небольшим отверстием, стенки которой имеют одинаковую температуру. Свет, падающий через отверстие внутрь полости, после многочисленных отражений будет практически полностью поглощён стенками, и снаружи отверстие будет казаться совершенно чёрным. С увеличением температуры внутри полости будет возрастать энергия выходящего из отверстия излучения и изменяться его спектральный состав.



М. ПЛАНК

собой бесконечную совокупность электромагнитных осцилляторов, каждый из которых излучает и поглощает электромагнитную энергию определённой частоты.

Из молекулярно-кинетической теории следует, что в состоянии теплового равновесия средняя энергия любого осциллятора не зависит от частоты и равна kT . Напомним, что средняя кинетическая энергия молекулы одноатомного газа равна почти такой же величине, а именно $\frac{3}{2}kT$. *Излучаемая осциллятором в единицу времени электромагнитная энергия пропорциональна средней энергии осциллятора kT .* Число

осцилляторов со всевозможными значениями частот колебаний должно быть бесконечно велико, поэтому излучаемая ими энергия должна быть бесконечно большой. Но этот вывод совершенно бессмыслен, так как он отрицает возможность теплового равновесия между веществом и излучением.

Тело при любой температуре должно излучать и терять энергию до тех пор, пока его температура не снизится до абсолютного нуля. Однако повседневный опыт показывает, что ничего подобного в действительности не происходит: вещество не расходует всю свою энергию на излучение электромагнитных волн.

Так как общая энергия излучения получается бесконечно большой из-за того, что излучаются все частоты вплоть до сколь угодно высоких («ультрафиолетовых»), то сложившаяся противоречивая ситуация получила название «*ультрафиолетовой катастрофы*».

ГИПОТЕЗА ПЛАНКА. Планк первым понял, что объяснить существование равновесного теплового излучения, основываясь на сложившихся законах электродинамики Максвелла и механики Ньютона, нельзя. Выход из трудностей возможен при одном достаточно простом, но противоречащем известным законам природы предположении. *Энергия простейшей микроскопической системы — гармонического осциллятора — не может принимать любые значения. При собственной частоте колебаний ν_0 она принимает лишь дискретные (прерывные) значения:*

$$E_n = h\nu_0 n,$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$ — целые числа; h — коэффициент пропорциональности, названный впоследствии *постоянной Планка*.

Из молекулярно-кинетической теории вытекает, что в состоянии теплового равновесия средняя энергия осцилляторов Планка равна не kT , а зависит от частоты, и при $\nu_0 \rightarrow \infty$ приближается к нулю. На основе своей гипотезы Планк получил формулу, характеризующую распределение энергии в спектре излучения чёрного тела. Эта формула прекрасно согласуется с экспериментальными данными. На рисунке 10.2 показана соответствующую

щая формуле Планка кривая спектрального распределения энергии излучения чёрного тела для некоторой температуры. Кривая имеет максимум и резко спадает в сторону высоких частот, так что энергия излучения (численно равна площади под кривой) оказывается не бесконечно большой, а конечной.

На рисунке 10.3 изображены возможные значения энергии осциллятора в соответствии с предположением Планка. Если энергия системы принимает лишь дискретные значения, то можно сделать вывод, что электромагнитная энергия излучается осциллятором не непрерывно, а отдельными порциями — *квантами* (от лат. *quantum* — количество). Энергия осциллятора может меняться только скачками на величину $h\nu_0$, поэтому энергия кванта электромагнитного излучения равна

$$E = h\nu_0.$$

По известному из опыта распределению энергии по частотам было определено значение постоянной Планка. Оно оказалось очень малым:

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

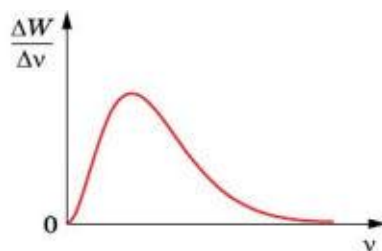


Рис. 10.2

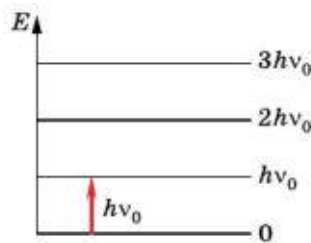


Рис. 10.3

? 1. Какое излучение называют тепловым? 2. Почему к тепловому излучению можно применять законы термодинамики? 3. Какими особенностями обладает тепловое излучение? 4. В чём заключается гипотеза Планка? 5. Чему равна энергия кванта электромагнитного излучения?

? 1. Какое свойство инфракрасных лучей используют при сушке древесины, сена, овощей? 2. Комнатный электрический нагреватель состоит из накаливаемой спирали и вогнутой, хорошо полированной металлической поверхности. Для чего используется эта поверхность? 3. Почему в парниках температура значительно выше, чем у окружающего воздуха, даже при отсутствии отопления?

§ 59

ЗАКОНЫ ФОТОЭФФЕКТА

НАБЛЮДЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА. В развитии представлений о природе света важный шаг был сделан Герцем. В 1887 г. он обнаружил, что при освещении отрицательного электрода искрового разрядника ультрафио-



летовым светом разряд происходит при меньшем напряжении между электродами, чем в отсутствие тако-го освещения. Однако Герцу не удалось правильно объяснить это явление, которое впоследствии получи-ло название *внешнего фотоэффекта*. Основополагаю-щий вклад в экспериментальное изучение фотоэффе-кта внёс А. Г. Столетов.

А. Г. СТОЛЕТОВ

Фотоэффект — явление вырывания электронов из вещества под действием света.



Для наблюдения фотоэффекта можно использовать электро-метр с присоединённой к нему цинковой пластиной (рис. 10.4). Если зарядить пластину положительно, то освещение пласти-ны, например электрической дугой, не влияет на быстроту разрядки электрометра.



Рис. 10.4

Но если пластину зарядить отрицательно, то световой пучок от дуги разряжает его очень бы-стро. Объяснить данный факт можно единст-венным образом. Свет вырывает электроны с поверхности пластины; если она заряжена отрицательно, электроны отталкиваются от неё и электрометр разряжается. При положитель-ном же заряде пластины вырванные светом электроны притягиваются к пластине и снова оседают на ней. Поэтому заряд электрометра не изменяется.

Однако если на пути светового потока поставить обыкновенное стекло, то отрицательно заряженная пластина уже не теряет электроны, какой бы ни была интенсивность излучения. Стекло поглощает ультрафиолетовые лучи, поэтому можно сделать вывод, что именно ультрафиолетовый уча-сток спектра вызывает фотоэффект. Этот факт нельзя объяснить на основе волновой теории света.

ЗАКОНЫ ФОТОЭФФЕКТА. Для того чтобы получить о фотоэффекте более пол-ное представление, нужно выяснить, от чего зависит число электронов (фотоэлектронов), вырванных светом с поверхности вещества, и чем определяется их скорость (или кинетическая энергия).



С этой целью были проведены экспериментальные исследова-ния. В стеклянный баллон, из которого выкачан воздух, поме-

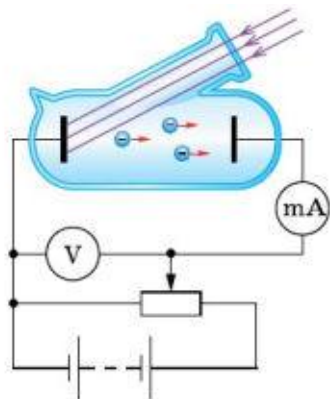


Рис. 10.5

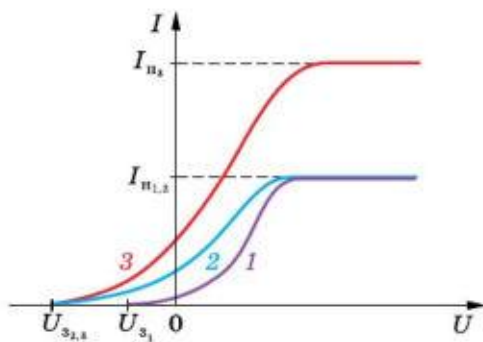


Рис. 10.6

щаются два электрода (рис. 10.5). Внутри баллона на один из электродов (*фотокатод*) падает свет через кварцевое «окошко», прозрачное не только для видимого света, но и для ультрафиолетового излучения. На электроды подаётся напряжение, которое можно изменять с помощью потенциометра и измерять вольтметром.

К фотокатоду присоединяют отрицательный полюс батареи. Под действием света фотокатод испускает электроны, которые при движении в электрическом поле образуют электрический ток — *фототок*. При малых напряжениях не все вырванные светом электроны достигают другого электрода. Если, не меняя интенсивности излучения, увеличивать разность потенциалов между электродами, то сила тока нарастает. При некотором напряжении она достигает максимального значения, после чего перестаёт увеличиваться (рис. 10.6). Максимальное значение силы тока I_n называется *током насыщения*. Он определяется числом электронов, испущенных за 1 с освещаемым электродом.

Анализ результатов проведённых экспериментов и вольт-амперные характеристики фотоэффекта (см. рис. 10.6) позволяют сформулировать *законы фотоэффекта*.

Число электронов, вырываемых светом с поверхности металла за 1 с, прямо пропорционально поглощаемой за это время энергии световой волны.

Данное утверждение называют *законом Столетова* или *первым законом фотоэффекта*. Можно привести и другую формулировку этого закона.

Сила фототока насыщения при неизменной частоте падающего света прямо пропорциональна интенсивности света.

В рамках волновой теории света не удалось адекватно объяснить некоторые закономерности фотоэффекта. При падении электромагнитной волны на поверхность фотокатода электроны в некотором слое вещества должны начать вынужденные колебания. Энергию, необходимую для преодоления сил притяжения со стороны положительно заряженных атомных ядер, электроны в этом случае смогут «приобрести» лишь спустя некоторое время от начала освещения. Но в эксперименте временной задержки в появлении фототока не наблюдалось. Разряд электрометра начинается одновременно с началом освещения, т. е. фотоэффект практически безынерционен. Если временная задержка существует, то она не превышает 10^{-9} с.

Из графика, приведённого на рисунке 10.6, видно, что сила фототока отлична от нуля и при нулевом напряжении. Это означает, что часть вырванных светом электронов достигает правого (см. рис. 10.5) электрода и при отсутствии напряжения. Если изменить полярность батареи, то сила тока уменьшится и при некотором напряжении U_3 (его называют *задерживающим* или *запирающим потенциалом*) обратной полярности она станет равной нулю. Электрическое поле тормозит вырванные электроны до полной остановки, а затем возвращает их на электрод.

Задерживающее напряжение U_3 зависит от максимальной кинетической энергии, которую имеют вырванные светом электроны. Измеряя задерживающее напряжение и применяя теорему о кинетической энергии, можно найти максимальное значение кинетической энергии фотоэлектронов:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_3.$$

При изменении интенсивности света задерживающее напряжение, как показали опыты, не меняется. Следовательно, не меняется и кинетическая энергия электронов. Но с точки зрения волновой теории света этот факт непонятен. Ведь чем больше интенсивность света, тем большие силы действуют на электроны со стороны электромагнитного поля световой волны и тем большая энергия, казалось бы, должна передаваться электронам. В результате опытов было обнаружено, что кинетическая энергия вырываемых светом электронов зависит только от частоты света. Это позволяет сформулировать *второй закон фотоэффекта*.

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от интенсивности света.

Приведём формулировку *третьего закона фотоэффекта*.

Для каждого вещества существует минимальная частота света $\nu_{\min}$, называемая красной границей фотоэффекта, ниже которой фотоэффект не наблюдается.

Значение этой частоты зависит от рода вещества фотокатода и состояния его поверхности.

ТЕОРИЯ ФОТОЭФФЕКТА. Законы фотоэффекта удалось объяснить лишь на основе квантовых представлений. Это было сделано в 1905 г. Эйнштейном, который применил гипотезу Планка к процессам излучения и поглощения света веществом. В экспериментально установленных законах фотоэффекта он нашёл убедительное доказательство того, что свет имеет прерывистую структуру, излучается и поглощается отдельными порциями — световыми квантами (фотонами). Энергия E каждой такой порции излучения в полном соответствии с гипотезой Планка пропорциональна частоте: $E = h\nu$.

Максимальную кинетическую энергию фотоэлектрона можно найти, применив закон сохранения энергии. Энергия порции света (фотона) $h\nu$ расходуется на совершение работы выхода $A_{\text{вых}}$, т. е. работы, которую нужно совершить для извлечения электрона из металла, и на сообщение электрону максимальной кинетической энергии. Следовательно,

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\max}^2}{2}.$$

Это уравнение называют *уравнением Эйнштейна для фотоэффекта*. С его помощью можно объяснить законы фотоэффекта. Интенсивность света, по Эйнштейну, пропорциональна числу квантов (порций) энергии в световом пучке и поэтому определяет число электронов, вырванных из металла (первый закон фотоэффекта). Согласно уравнению Эйнштейна, максимальная скорость (или максимальная кинетическая энергия) фотоэлектронов определяется только частотой света и работой выхода, зависящей от рода металла и состояния его поверхности. От интенсивности света она не зависит (второй закон фотоэффекта).

Для каждого вещества фотоэффект наблюдается лишь в том случае, если частота ν света больше минимального значения $\nu_{\min}$. Ведь чтобы вырвать электрон из металла даже без сообщения ему кинетической энергии, нужно совершить работу выхода $A_{\text{вых}}$. Следовательно, энергия кванта должна быть больше этой работы:

$$h\nu > A_{\text{вых}}.$$

Красную границу фотоэффекта можно определить следующим образом:

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}.$$

Эта граница названа красной в силу того, что при $\lambda > \lambda_{\max}$ (при более «красном» свете) фотоэффект не происходит.

При этом максимальная длина световой волны $\lambda_{\max} = \frac{hc}{A_{\text{вых}}}$. Если $\nu < \nu_{\min}$ или $\lambda > \lambda_{\max}$, то фотоэффект невозможен (третий закон фотоэффекта).

Безынерционность фотоэффекта объясняется тем, что передача энергии при столкновении фотона с электроном происходит практически мгновенно.

Используя уравнение Эйнштейна, можно найти постоянную Планка h . Для этого нужно экспериментально определить частоту света ν , работу выхода $A_{\text{вых}}$ и измерить кинетическую энергию фотоэлектронов. На основе подобных измерений и расчётов было получено значение $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Точно такое же значение было найдено Планком при теоретическом изучении совершенно другого явления — теплового излучения.



1. Что называют фотоэффектом?
2. Как можно наблюдать фотоэффект?
3. Сформулируйте законы внешнего фотоэффекта.
4. Как записывается уравнение Эйнштейна для фотоэффекта?
5. Как можно объяснить законы фотоэффекта с помощью уравнения Эйнштейна?
6. Что называют работой выхода электрона? От чего она зависит?



1. Как положительно зарядить цинковую пластину, закреплённую на стержне электрометра, имея электрическую дугу, стеклянную палочку и лист бумаги? Палочкой прикасаться к пластине нельзя.
2. На рисунке 10.7, а представлена схема установки для изучения закономерностей фотоэффекта, а на рисунке 10.7, б — вольт-амперные характеристики, полученные с помощью этой установки. Проанали-

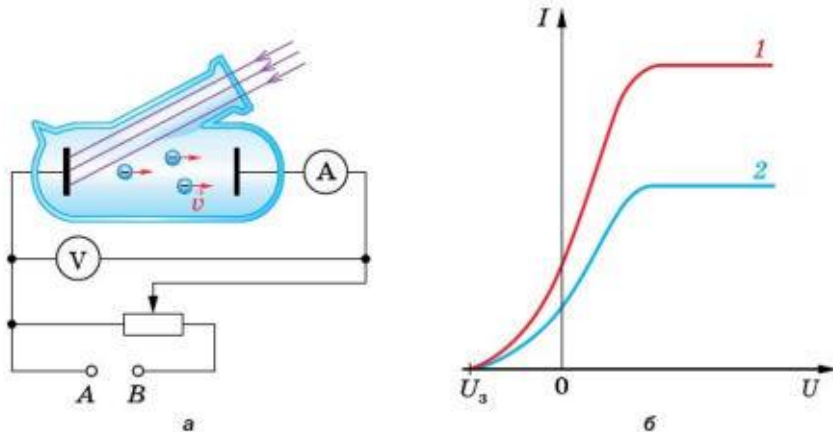


Рис. 10.7

зируйте данные графики. Чем отличаются друг от друга условия, при которых получены зависимости 1 и 2?

3. В опыте по обнаружению фотоэффекта цинковая пластина крепится на стержне электрометра, предварительно заряжается отрицательно и освещается светом дуговой лампы (см. рис. 10.4). Как изменится время разрядки электрометра, если: а) электрометр приблизить к источнику света; б) увеличить угол падения лучей на пластину; в) закрыть непрозрачным экраном часть пластины; г) поставить светофильтр, задерживающий инфракрасную часть спектра; д) поставить светофильтр, задерживающий ультрафиолетовую часть спектра?



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

На рисунке 10.8 показан график зависимости максимальной кинетической энергии E_k фотоэлектронов, вылетающих с поверхности металла, от частоты ν падающего света. Определите по графику постоянную Планка. Чему равны: а) красная граница фотоэффекта; б) работа выхода электронов из данного металла?

Решение:

Из графика следует, что красная граница фотоэффекта $\nu_{\min} = 600$ ТГц. При $\nu < \nu_{\min}$ фотоэффект не происходит.

Запишем уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2},$$

$$E_k = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = h\nu - A_{\text{вых}}.$$

Подставив в это уравнение координаты точек $(\nu_{\min}; 0)$ и $(\nu_1; E_{k1})$, получим

$$0 = h\nu_{\min} - A_{\text{вых}}, \quad E_{k1} = h\nu_1 - A_{\text{вых}}.$$

Отсюда

$$h = \frac{E_{k1}}{\nu_1 - \nu_{\min}}, \quad A_{\text{вых}} = \frac{E_{k1}\nu_{\min}}{\nu_1 - \nu_{\min}}.$$

Выбрав по графику значения $\nu_1 = 1200$ ТГц $= 1,2 \cdot 10^{15}$ Гц и $E_{k1} = 2,5$ эВ $= 4 \cdot 10^{-19}$ Дж, рассчитаем значения постоянной Планка и работы выхода:

$$h = \frac{4 \cdot 10^{-19}}{(1,2 - 0,6) \cdot 10^{15}} \text{ Дж} \cdot \text{с} \approx 6,7 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с};$$

$$A_{\text{вых}} = 2,5 \cdot \frac{600}{1200 - 600} \text{ эВ} = 2,5 \text{ эВ}.$$

Ответ: $h \approx 6,7 \cdot 10^{-34}$ Дж · с; а) $\nu_{\min} = 600$ ТГц; б) $A_{\text{вых}} = 2,5$ эВ.

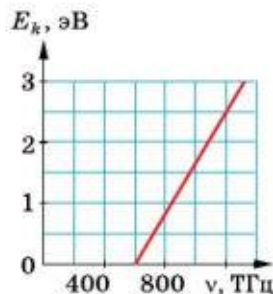


Рис. 10.8



1. Возникает ли фотоэффект в цинке под действием излучения, имеющего длину волны 450 нм?
2. Работа выхода электронов из ртути равна 4,53 эВ. Будет ли наблюдаться фотоэффект, если на поверхность ртути падает видимый свет?
3. Определите максимальную кинетическую энергию и максимальную скорость фотоэлектронов, если фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов: а) 2 В; б) 1 В; в) 4,5 В.
4. К вакуумному фотоэлементу, у которого катод выполнен из цезия, приложено запирающее напряжение 2 В. При какой длине волны падающего на катод света появится фототок?
5. До какого потенциала зарядится изолированная металлическая пластинка при длительном освещении светом с длиной волны 450 нм, если работа выхода электронов равна 2 эВ?
6. При увеличении частоты падающего на металл света в 2 раза задерживающее напряжение для фотоэлектронов увеличивается в 3 раза. Частота первоначально падающего света равна $1,2 \cdot 10^{15}$ Гц. Определите красную границу фотоэффекта для этого металла.



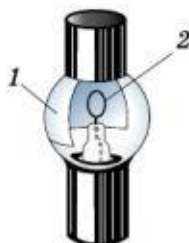
Это любопытно...

Интересные факты

Явление фотоэффекта лежит в основе действия различных устройств. Одним из них является вакуумный фотоэлемент, представляющий собой стеклянную колбу, часть внутренней поверхности которой покрыта тонким слоем металла с малой работой выхода (рис. 10.9, а, б). Это катод 1. Через прозрачное «окошко» свет проникает внутрь колбы. В её центре расположена прово-



а



б

Рис. 10.9

лочная петля или диск — анод 2, который предназначен для улавливания фотоэлектронов. Анод присоединяют к положительному полюсу батареи.

Фотоэлементы реагируют на видимый свет и даже на инфракрасные лучи. При попадании света на катод фотоэлемента в цепи возникает электрический ток, который включает или выключает то или иное реле. Комбинация фотоэлемента с реле позволяет конструировать множество различных «видящих» автоматов. Одним из них является автомат в метро. Он срабатывает (выдвигает перегородки турникета) при пересечении светового пучка, если предварительно не приложен проездной билет к устройству контроля.

Кроме рассмотренного нами внешнего фотоэффекта, разнообразные применения находит *внутренний фотоэффект* в полупроводниках. Это явление состоит в том, что электроны, вырванные из атомов, молекул или ионов, остаются внутри вещества. Но при этом изменяются энергии электронов. Внутренний фотоэффект используется в фоторезисторах — приборах, сопротивление которых зависит от освещённости. Кроме того, сконструированы полупроводниковые фотоэлементы, создающие ЭДС и непосредственно преобразующие световую энергию в энергию электрического тока. ЭДС, называемая в данном случае фотоЭДС, возникает в области p — n -перехода двух полупроводников при облучении этой области светом. При этом если замкнуть цепь через внешнюю нагрузку, то в цепи пойдёт ток, определяемый разностью токов неосновных и основных носителей через p — n -переход. Этот ток зависит от интенсивности падающего света и сопротивления резистора. Широкое применение полупроводниковые элементы получили при изготовлении солнечных батарей, устанавливаемых на космических кораблях.

§ 60

ДАВЛЕНИЕ СВЕТА. КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

ДАВЛЕНИЕ СВЕТА. Важнейшим следствием электромагнитной теории света стало предсказанное Максвеллом давление света. Рассмотрим воздействие электромагнитной волны на лист металла (рис. 10.10). Под действием электрического поля электромагнитной волны свободный электрон со скоростью $\vec{v}$ будет двигаться в направлении, противоположном направлению вектора напряжённости $\vec{E}$ электрического поля световой волны. При этом действующая на движущийся электрон со стороны магнитного поля магнитная составляющая силы Лоренца $\vec{F}$ направлена в сторону распространения волны. Суммарное действие таких сил на электроны передаётся кристаллической решётке. В результате возникает *сила светового давления*.

Для доказательства справедливости теории Максвелла было важно измерить давление света. Многие учёные пытались это сделать, но безуспешно,

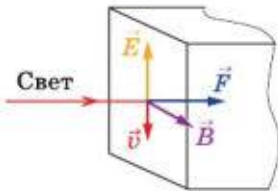


Рис. 10.10



П. Н. ЛЕБЕДЕВ

так как световое давление очень мало. В яркий солнечный день на поверхность площадью 1 м^2 действует сила, модуль которой равен всего лишь $4 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$.

Впервые давление света измерил в 1899 г. знаменитый русский физик Пётр Николаевич Лебедев (1866—1912). Сконструированный им прибор состоял из очень лёгкого стерженька, подвешенного на тонкой стеклянной нити. По краям стерженька были приклеены две пары лёгких крылышек (рис. 10.11). Два крылышка имели зеркальную поверхность, а два других были зачернены. Весь прибор помещался в сосуд, из которого был выкачан воздух. Свет падал на крылышки, расположенные по одну сторону от стерженька. О значении давления можно было судить по углу закручивания нити.

Трудности точного измерения давления света были связаны с невозможностью выкачать из сосуда весь воздух (движение молекул воздуха, вызванное неодинаковым нагревом крылышек и стенок сосуда, приводит к возникновению дополнительных вращающих моментов). На закручивание нити влияет неодинаковый нагрев сторон крылышек (сторона, обращённая к источнику света, нагревается больше, чем противоположная сторона). Молекулы, отражающиеся от более нагретой стороны, передают крылышку больший импульс, чем молекулы, отражающиеся от менее нагретой стороны.

Преодолев все эти трудности, Лебедев обнаружил световое давление на твёрдые тела. Важно, что измеренное значение совпало с предсказанным Максвеллом. Впоследствии Лебедеву удалось осуществить ещё более тонкий эксперимент: измерить давление света на газы (1907—1910).

Таким образом, опыты Лебедева сыграли важную роль в утверждении теории электромагнитного поля Максвелла.

Причину светового давления можно объяснить в рамках квантовой теории света. Фотоны, подобно частицам вещества, обладают импульсом. При поглощении их телом они передают ему свой импульс. Согласно закону сохранения импульса, импульс тела равен импульсу поглощённых фотонов. Поэтому покоящееся тело приходит в движение. Изменение импульса тела означает, согласно второму закону Ньютона, что на тело действует сила. Таким образом, опыты Лебедева можно рассматривать как экспериментальное доказательство того, что *фотоны обладают импульсом*. Если при падении по нормали к поверхности весь свет отражается, то импульс, передаваемый поверхности каждым фотоном, увеличивается в 2 раза. Следовательно, в 2 раза возрастает и давление света.

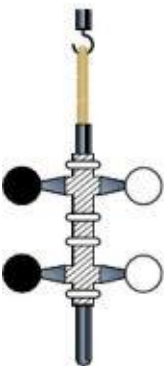


Рис. 10.11

ЭНЕРГИЯ И ИМПУЛЬС ФОТОНА. Фотон обладает определённой порцией энергии $h\nu$. Энергию фотона часто выражают через циклическую частоту $\omega = 2\pi\nu$. При этом в качестве коэффициента пропорциональности вместо величины h используют величину $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ (читается: «аш с чертой»), равную по современным данным

$$\hbar = 1,0545887(57) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Тогда энергию фотона можно выразить следующим образом:

$$E = h\nu = \hbar\omega.$$

Отметим, что фотон является безмассовой частицей. Как было показано в § 58, для таких частиц связь между энергией и импульсом выражается соотношением $E = pc$. Таким образом, импульс фотона

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (1)$$

Импульс фотона направлен по световому лучу. Чем больше частота, тем больше энергия и импульс фотона и тем отчётливее выражены корпускулярные свойства света.

Из-за того что постоянная Планка мала, энергия фотонов видимого света крайне незначительна. Так, фотоны, соответствующие зелёному свету, имеют энергию $4 \cdot 10^{-19}$ Дж. Тем не менее в опытах выдающегося русского учёного Сергея Ивановича Вавилова (1891—1951) было установлено, что человеческий глаз способен реагировать на различие освещённостей, определяемое единичными квантами света.

КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ. Итак, учёные были вынуждены ввести представление о свете как о потоке частиц. На первый взгляд это возврат к корпускулярной теории Ньютона. В то же время интерференция, дифракция и поляризация света наглядно свидетельствуют о наличии у света волновых свойств. Тем самым свет обладает своеобразным дуализмом свойств. При распространении света проявляются его волновые свойства, а при взаимодействии с веществом (излучении и поглощении) — корпускулярные.

Проявление светом как волновых, так и корпускулярных свойств называют *корпускулярно-волновым дуализмом*. Впоследствии двойственность свойств была открыта у электронов и других элементарных частиц. Электрон, в частности, наряду с корпускулярными свойствами обладает также и волновыми. Убедительным доказательством этого может служить дифракция электронов.

Отметим, что эти необычные свойства микрообъектов описываются с помощью *квантовой механики* — современной теории движения микрочастиц. Механика Ньютона оказывается в данном случае неприменимой.

ГИПОТЕЗА ДЕ БРОЙЛЯ. В 1924 г. французский физик Луи де Бройль (1892—1987) выдвинул следующую гипотезу.

Электрон и любые другие частицы должны иметь волновые свойства наряду с корпускулярными.

Гипотеза де Бройля означает, что корпускулярно-волновой дуализм свойств, характерный для электромагнитного поля, имеет универсальный характер. Другими словами, корпускулярно-волновой дуализм является общим свойством материи.

Предположив, что с движением частиц связано распространение каких-то волн, де Бройль сумел найти длину этих волн. Для этого он распространил на все частицы ту связь между длиной волны и импульсом, которая была установлена для фотонов (1). Тогда любой частице, обладающей импульсом, можно сопоставить волновой процесс с длиной волны (её называют *волной де Бройля* и обозначают через λ_B), определяемой по формуле

$$\lambda_B = \frac{2\pi\hbar}{p} = \frac{h}{p}.$$

Частота волны связана с энергией частицы формулой Планка:

$$\nu = \frac{E}{h} \quad \left(\text{или } \omega = \frac{E}{\hbar} \right).$$

*** СООТНОШЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЕЙ ГЕЙЗЕНБЕРГА.** Связывая импульс частицы однозначно с длиной волны, мы от частицы переходим к образу бесконечной синусоиды, простирающейся во всём пространстве. При этом выражение «длина волны в данной точке» не может иметь никакого смысла. Не может иметь смысла и понятие «импульс в точке». Также лишаются смысла такие понятия, как «мгновенная скорость» и «энергия частицы в данный момент времени». Ведь энергия связана с частотой формулой Планка: $E = \hbar\omega$, а понятие частоты относится к бесконечному во времени гармоническому колебательному процессу.

Утверждение о том, что электрон лишь приближённо может рассматриваться как материальная точка, означает, что его координаты, импульс и энергия могут быть заданы лишь приближённо.

Чем точнее фиксирован, например, импульс, тем бо́льшая неопределённость будет в значении координаты.

Если через Δp_x обозначить неопределённость проекции импульса на ось X , а через Δx — неопределённость, с которой фиксируется координата, то, как показал немецкий физик Вернер Гейзенберг (1901—1976), они удовлетворяют следующему неравенству:

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar.$$

Для двух других пар координат и проекций импульса справедливы аналогичные неравенства, которые называют *соотношениями неопределённостей Гейзенберга*.

Согласно соотношениям неопределённостей, теряет смысл одно из важнейших понятий классической механики — понятие траектории частицы, которое предполагает, что в любой момент времени частица находится в определённой точке пространства и имеет импульс, направленный по касательной к траектории. Теперь уже нельзя говорить, что частица движется вдоль какой-то линии. Описание движения в рамках классической механики в микромире становится невозможным.

Из-за того что постоянная Планка очень мала, соотношения неопределённостей имеют кардинальное значение лишь для очень лёгких частиц. Если бы масса частицы равнялась массе автомобиля, то неопределённость скорости была бы порядка 10^{-24} см/с при фиксации положения с точностью до размеров атома (10^{-8} см). Ясно, что эта неопределённость на много порядков меньше той, с которой мы можем измерять скорости. Но для электрона в атоме положение совсем иное. Находясь в атоме, электрон локализован в пространстве с точностью 10^{-8} см. Ввиду малой массы электрона неопределённость скорости при этом достигает значения 10^8 см/с, которое лишь в 100 раз меньше скорости света.



1. Как возникает сила светового давления? **2.** Как можно объяснить причину светового давления в рамках квантовой теории света? **3.** Как можно определить: а) энергию фотона; б) импульс фотона? **4.** В чём состоит корпускулярно-волновой дуализм свойств света? **5.** Какую гипотезу выдвинул де Бройль? **6.** В чём заключаются соотношения неопределённостей Гейзенберга?



1. Почему опыты Лебедева могут рассматриваться как экспериментальное доказательство того, что фотоны обладают импульсом?
2. Почему хвост кометы направлен всегда в сторону, противоположную Солнцу?
3. Почему давление света на чёрную поверхность меньше, чем на белую?



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Свет, распространяясь в среде с абсолютным показателем преломления 1,45, имеет длину волны 250 нм. Определите энергию фотона.

Дано:

$$n = 1,45$$

$$\lambda = 250 \text{ нм}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$E = ?$

СИ:

$$250 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

Решение:

Используя определение абсолютного показателя преломления, запишем:

$$n = \frac{c}{v},$$

где v — скорость света в среде;
 c — скорость света в вакууме.

Длина волны в среде определяется выражением

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu}.$$

Поскольку $v = \frac{c}{n}$, то $\lambda = \frac{c}{n\nu}$.

Отсюда частота света равна

$$\nu = \frac{c}{n\lambda}.$$

С учётом этой формулы найдём энергию фотона:

$$E = h\nu = \frac{hc}{n\lambda}.$$

Подставляя числовые данные, получим

$$E = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,45 \cdot 250 \cdot 10^{-9}} \text{ Дж} \approx 5,5 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Ответ: $E \approx 5,5 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.



УПРАЖНЕНИЯ

1. Определите энергию фотонов, соответствующих наиболее длинным (780 нм) и наиболее коротким (380 нм) волнам видимой части спектра.
2. Найдите энергию фотона рентгеновского излучения с длиной волны 10^{-3} нм. Сравните её с энергией фотона красного света (720 нм).
3. Найдите энергию фотона: а) красных лучей света (700 нм); б) рентгеновских лучей (25 пм); в) γ -лучей (1,24 пм).
4. Свет распространяется в среде с абсолютным показателем преломления 1,5, имея длину волны в среде 400 нм. Определите соответствующую такому свету энергию фотона.
5. Найдите длину волны де Бройля: а) для электрона, движущегося со скоростью 10^3 см/с; б) для атома водорода, движущегося со скоростью, равной среднеквадратичной скорости при температуре 300 К; в) для шарика массой 1 г, движущегося со скоростью 1 см/с.



Это любопытно...

Из истории развития физики и техники

Гипотеза де Бройля получила подтверждение в ряде экспериментов по взаимодействию пучков частиц (электронов, нейтронов, атомов и молекул) с веществом. В 1927 г. американские учёные Клинтон Дэвиссон (1881—1958) и Лестер Джермер (1896—1970) обнаружили, что пучок электронов,



Рис. 10.12

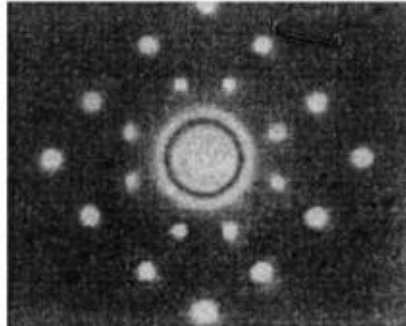


Рис. 10.13

рассеивающийся от естественной дифракционной картины (кристалла никеля), даёт отчётливую дифракционную картину. Впоследствии формула де Бройля была подтверждена опытами отечественного физика Петра Саввича Тартаковского (1895—1940) и английского учёного Джорджа Паджета Томсона (1892—1975). Они изучали дифракцию электронов при их прохождении через тонкую металлическую фольгу поликристаллической структуры. После прохождения пучка электронов сквозь золотую фольгу на фотопластинке были обнаружены дифракционные кольца. По радиусам колец можно определить длину волны, связанной с движением электронов. При этом опытные данные находились в полном согласии с вычисленной по формуле $\lambda_e = \frac{h}{p}$.

Волновые свойства были также обнаружены у протонов, нейтронов и даже у атомов и простых молекул. На рисунке 10.12 показана картина дифракции электронов на тонкой пластинке слюды, а на рисунке 10.13 — картина дифракции нейтронов на кристалле кварца. Дифракция электронов и дифракция нейтронов, в частности, находят широкое применение при анализе структуры кристаллов наряду с рентгеновскими лучами.

§ 61

ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА

МОДЕЛЬ АТОМА ТОМСОНА. Учёные не сразу пришли к правильным представлениям о строении атома после того, как поняли, что он имеет сложную структуру. Одну из первых моделей атома предложил в 1903 г. английский физик Джозеф Джон Томсон (1856—1940), открывший в 1897 г. электрон.

В модели Томсона положительный заряд атома занимает весь объём атома и распределён в этом объёме с постоянной плотностью. Простейший атом — атом водорода — представляет собой положительно заряженную сферу радиусом около 10^{-8} см, внутри которой находится элек-



Рис. 10.14

трон (рис. 10.14). В невозбуждённом атоме электрон покоится в центре сферы. У более сложных атомов в положительно заряженной сфере находится несколько электронов, так что атом подобен кексу, в котором роль изюминок играют электроны.

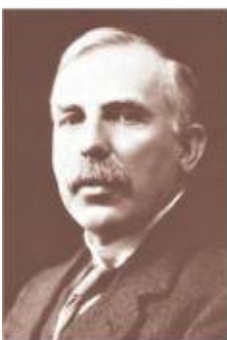
Модель Томсона способна объяснить излучение атомом электромагнитных волн определённой частоты колеблющимися электронами, выведенными из положения равновесия. Но эта модель не объясняет излучение

большого числа спектральных линий и не позволяет объяснить спектральные закономерности. Немаловажно и то, что модель Томсона не даёт возможности понять, что определяет размеры атомов. Кроме того, она оказалась в полном противоречии с опытами по исследованию распределения положительного заряда в атоме. Эти опыты, проведённые впервые английским физиком Эрнестом Резерфордом (1871—1937), сыграли ключевую роль в создании и развитии атомной физики. Рассмотрим их более подробно.

ОПЫТЫ РЕЗЕРФОРДА. Для экспериментального исследования распределения положительного заряда, а следовательно, и массы внутри атома Резерфорд предложил в 1906 г. применить зондирование атома с помощью α -частиц. Эти частицы возникают при распаде радия и некоторых других элементов. Масса α -частицы примерно в 8000 раз больше массы электрона, а её положительный заряд равен по модулю удвоенному заряду электрона. Они представляют собой полностью ионизированные атомы гелия. Скорость α -частиц очень велика: она составляет $1/15$ скорости света.

Резерфорд и его сотрудники бомбардировали α -частицами атомы тяжёлых элементов. Электроны вследствие своей малой массы не могут заметно изменить траекторию α -частицы. Рассеяние (изменение направления движения) α -частиц может вызвать только положительно заряженная часть атома. Тем самым по рассеянию α -частиц можно определить характер распределения положительного заряда и массы внутри атома.

Схема опытов Резерфорда показана на рисунке 10.15. Испускаемый радиоактивным препаратом 1 пучок α -частиц выделялся диафрагмой 2 и после этого падал на тонкую фольгу 3 из исследуемого материала (золото, медь и др.). После рассеяния α -частицы попадали на экран 4, покрытый сульфидом цинка. Столкновение каждой частицы с экраном сопровождалось вспышкой света (сцинтилляцией), которую можно было наблюдать в микроскоп 5. Модифицируя



3. РЕЗЕРФОРД

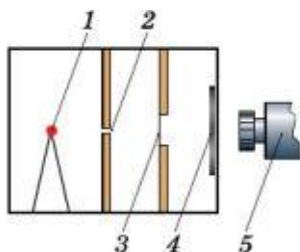


Рис. 10.15



Рис. 10.16

экспериментальную установку, Резерфорд попытался обнаружить отклонение α -частиц на большие углы. При этом оказалось, что небольшое число α -частиц (примерно одна из 2000) отклонилось на углы, большие 90° .

Предвидеть такой результат с помощью модели Томсона было нельзя. Положительный заряд, распределённый по объёму всего атома, не может создать достаточно интенсивное электрическое поле, способное отбросить α -частицу назад. Очевидно, что α -частица могла быть отброшена назад лишь в том случае, если положительный заряд атома и его масса сконцентрированы в очень малой области пространства.

Так Резерфорд пришёл к идее *атомного ядра* — тела малых размеров, в котором сконцентрированы почти вся масса и весь положительный заряд атома. На рисунке 10.16 показаны траектории α -частиц, пролетающих на различных расстояниях от ядра.

Подсчитывая число α -частиц, рассеянных на различные углы, Резерфорд смог оценить размеры ядра. Оказалось, что ядро имеет диаметр порядка 10^{-12} — 10^{-13} см (у разных ядер диаметры различны). Впоследствии удалось определить и заряд ядра. При условии что заряд электрона принят за единицу, заряд ядра в точности равен порядковому номеру данного химического элемента в таблице Д. И. Менделеева.

ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА. Результаты экспериментов позволили Резерфорду предложить новую модель атома. Согласно ей, в центре атома расположено положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома. В целом атом нейтрален. Поэтому число внутриатомных электронов, как и заряд ядра, равно порядковому номеру элемента в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева. Ясно, что покоиться электроны внутри атома не могут, так как они упали бы на ядро. Они движутся вокруг ядра, подобно тому, как планеты обращаются вокруг Солнца. Модель атома Резерфорда была названа *планетарной* или *ядерной*. Планеты притягиваются к Солнцу силами всемирного тяготения, а электроны взаимодействуют с атомным ядром силами кулоновского притяжения.

В атоме водорода вокруг ядра обращается всего лишь один электрон. Ядро атома водорода имеет положительный заряд, равный по модулю за-

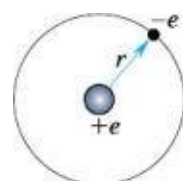


Рис. 10.17

ряду электрона, и массу, примерно в 1836,1 раза большую массы электрона. Это ядро было названо *протоном*^{*} и стало рассматриваться как элементарная частица. Размер атома — это радиус орбиты его электрона (рис. 10.17).

Планетарная модель атома имеет прямое экспериментальное обоснование. Однако на её основе нельзя объяснить факт существования атома, его устойчивость. Ведь движение электронов по орбитам происходит с ускорением. Ускоренно движущийся заряд, согласно классическим законам электродинамики, должен излучать электромагнитные волны с частотой, равной частоте его обращения. Излучение сопровождается потерей энергии. Теряя энергию, электроны должны приближаться к ядру.

Электрон в атоме водорода движется с ускорением, на 23 порядка превышающим ускорение свободного падения! Как показывают расчёты, основанные на механике Ньютона и электродинамике Максвелла, электрон за время порядка 10^{-8} с должен упасть на ядро. Атом должен прекратить своё существование. В действительности ничего подобного не происходит. Атомы устойчивы и в невозбуждённом состоянии могут существовать неограниченно долго, не излучая при этом электромагнитные волны. Данный вывод, не согласующийся с опытом, удалось объяснить только в рамках квантовой теории.

1. Что представляет собой модель атома Томсона? **2.** Опишите схему опытов Резерфорда, представленную на рисунке 10.15. **3.** Какие выводы можно сделать на основе результатов опытов Резерфорда? **4.** Почему модель атома Резерфорда называют планетарной? **5.** Какой приблизительно диаметр имеет атомное ядро? **6.** В чём заключаются противоречия планетарной модели атома и законов классической физики?

1. В одной из своих лекций Резерфорд оценил результаты опытов, проведённых его сотрудниками Гейгером и Марсденом по рассеянию α -частиц при их столкновении с атомами. Ниже приведён фрагмент из этой лекции. «Помню, что ко мне пришёл возбуждённый Гейгер и сказал: „Нам удалось наблюдать α -частицы, возвращающиеся назад...“ Это было почти столь же невероятно, как если бы вы выстрелили 15-дюймовым снарядом в листок папиросной бумаги, а он вернулся бы назад и угодил бы в вас. ...Это обратное рассеивание должно быть результатом однократного столкновения, а когда я произвёл расчёты, то увидел, что невозможно получить величину того же порядка, разве что вы рассматриваете систему, в которой большая часть массы атома сконцентрирована в малом ядре». а) Какую модель атома предложил Резерфорд на основе опытов по рассеянию

* Согласно современным данным, масса протона равна $1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг, что примерно в 1800 раз больше массы электрона.

α -частиц? б) Что, согласно этой модели, является в атоме источником сильного электрического поля? в) Каким зарядом обладает этот источник?

2. Может ли атом при переходе в возбуждённое состояние поглотить произвольную порцию энергии?

§ 62 ПОСТУЛАТЫ БОРА. МОДЕЛЬ АТОМА ВОДОРОДА ПО БОРУ

ПОСТУЛАТЫ БОРА. Выход из крайне затруднительного положения в теории атома был найден в 1913 г. Н. Бором на пути дальнейшего развития квантовых представлений о процессах в природе. Бор сформулировал основные положения новой теории атома, используя планетарную модель атома и квантовую гипотезу Планка. Причём и законы классической физики не отвергались им безоговорочно.

В основу своей теории атома Бор положил следующие постулаты*:

Первый постулат Бора.

Атомная система может находиться только в особых стационарных, или квантовых, состояниях, каждому из которых соответствует определённая энергия E_n . В стационарном состоянии атом не излучает и не поглощает энергию.

Этот постулат находится в явном противоречии с классической механикой, согласно которой энергия движущихся электронов может быть любой. Противоречит он и электродинамике Максвелла, так как допускает возможность ускоренного движения электронов без излучения ими электромагнитных волн.

Второй постулат Бора.

Излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией E_m в стационарное состояние с меньшей энергией E_n . Энергия излучённого фотона равна разности энергий стационарных состояний.

$$h\nu_{mn} = E_m - E_n.$$



Н. БОР

* Постулаты Бора были экспериментально подтверждены в опытах немецких физиков Джеймса Франка (1882—1964) и Густава Герца (1887—1975) в 1913 г.

Отсюда можно выразить частоту излучения:

$$\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h} = \frac{E_m}{h} - \frac{E_n}{h}.$$

При поглощении света атом переходит из стационарного состояния с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией.

Второй постулат Бора противоречит электродинамике Максвелла, так как частота излучённого света свидетельствует не об особенностях движения электрона, а лишь об изменении энергии атома.

МОДЕЛЬ АТОМА ВОДОРОДА ПО БОРУ. Свои постулаты Бор применил для разработки теории атома водорода. В атоме водорода один электрон движется вокруг ядра по круговой орбите. Ядро атома водорода представляет собой один протон с зарядом $Ze = e$ (так как $Z = 1$). Бор рассматривал простейшие круговые орбиты. Потенциальная энергия взаимодействия электрона с ядром определяется формулой

$$W_p = -k \frac{e^2}{r},$$

где k — коэффициент пропорциональности, равный $9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$; e — модуль заряда электрона; r — расстояние от электрона до ядра (радиус орбиты). Потенциальная энергия взаимодействия бесконечно удалённых зарядов здесь принята равной нулю. Потенциальная энергия отрицательна, так как взаимодействующие частицы имеют заряды противоположных знаков.

Полная энергия E атома, согласно механике Ньютона, равна сумме кинетической и потенциальной энергий:

$$E = \frac{m_e v^2}{2} - k \frac{e^2}{r}. \quad (1)$$

Между скоростью электрона и радиусом его орбиты существует связь, которую можно установить на основе второго закона Ньютона. Центробежное ускорение $\frac{v^2}{r}$ сообщает электрону на орбите кулоновская сила. Поэтому

$$\begin{aligned} \frac{m_e v^2}{r} &= \frac{ke^2}{r^2}, \text{ или} \\ m_e r v^2 &= ke^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Подставляя значение скорости, найденное из соотношения (2), в формулу (1), получим выражение для полной энергии атома:

$$E = -\frac{ke^2}{2r}. \quad (3)$$

Из первого постулата Бора следует, что энергия может принимать только определённые дискретные значения E_n . Поэтому, согласно выражению (3), и радиусы орбит в атоме водорода не могут быть произвольными.

При движении электрона по круговой орбите модуль его импульса $m_e v$ и радиус орбиты r остаются неизменными. Следовательно, постоянной будет и величина $m_e v r$. В механике её называют *моментом импульса*. Бор обратил внимание на то, что наименование постоянной Планка совпадает с наименованием единицы момента импульса:

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

Бор предположил, что произведение модуля импульса на радиус орбиты кратно постоянной Планка $\hbar$:

$$m_e v r = n \hbar,$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$

В этом и заключается *правило квантования орбит* (или *третий постулат Бора*). Оно устанавливает возможные радиусы орбит и соответственно возможные значения энергии в атоме.

Число n называют *главным квантовым числом*.

С помощью правила квантования можно, исключив скорость из формулы (2), получить выражение для радиусов круговых стационарных (боровских) орбит:

$$r_n = \frac{\hbar^2 n^2}{k m_e e^2}. \quad (4)$$

Радиусы боровских орбит меняются дискретно с изменением числа n (рис. 10.18). Постоянная Планка, масса и заряд электрона определяют возможные значения электронных орбит. Учитывая, что масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-28} \text{ г}$, найдём наименьший ($n = 1$) радиус орбиты (*первый боровский радиус*):

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{k m_e e^2} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ см}.$$

Подставляя выражение (4) для радиусов орбит в формулу (3), получим дискретные (прерывные) значения энергий стационарных состояний атома (энергетические уровни):

$$E_n = -\frac{k^2 m_e e^4}{2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}.$$

В низшем энергетическом состоянии ($n = 1$)

$$E_1 = -\frac{k^2 m_e e^4}{2 \hbar^2} = -2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} \approx -13,6 \text{ эВ}.$$

Для наглядного представления энергетических уровней атома используют *энергетическую диаграмму*. На ней каждый энергетический уровень изображают в виде горизонтальной линии, перпендикулярной оси, на которой указывают значение энергии данного уровня. На рисунке 10.19 в качестве примера приведена энергетическая диаграмма атома водорода.

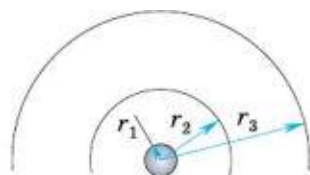


Рис. 10.18

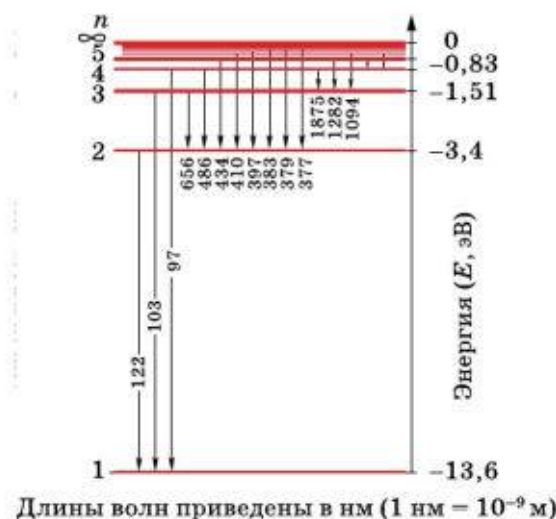


Рис. 10.19

Сверху на диаграмме проведена линия, соответствующая нулевому значению энергии атома водорода: $E = 0$. В произвольном масштабе от этой линии откладывают вниз значения энергии атома водорода в стационарных состояниях: $E_1 = -13,6$ эВ; $E_2 = \frac{E_1}{2^2} = -3,4$ эВ; $E_3 = \frac{E_1}{3^2} = -1,51$ эВ; $E_4 = \frac{E_1}{4^2} = -0,83$ эВ. Стационарное состояние атома с минимальным значением энергии ($n = 1$) называют *основным* или *нормальным состоянием*. Все остальные стационарные состояния являются *возбуждёнными*.

Из рисунка 10.19 видно, что с ростом r_n , т. е. с увеличением n или с переходом электрона на более дальние орбиты его энергия возрастает, атом переходит во всё более возбуждённое состояние. При $n \rightarrow \infty$ радиус орбиты $r_n \rightarrow \infty$ и $E \rightarrow 0$ (электрон удаляется от ядра на бесконечно большое расстояние). Наибольшее значение энергии при $n \rightarrow \infty$ соответствует *энергии ионизации атома*, т. е. отрыву от него электрона (для атома водорода энергия ионизации равна 13,6 эВ).

Если в основном состоянии атом может находиться бесконечно долго, то время жизни в возбуждённом состоянии составляет 10^{-7} — 10^{-9} с. С течением времени атом, находящийся в возбуждённом состоянии, самопроизвольно переходит в стационарное состояние с меньшей энергией.

ЛИНЕЙЧАТЫЕ СПЕКТРЫ. При изучении явления дисперсии мы узнали, что узкий пучок белого (солнечного) света, проходя через стеклянную треугольную призму, образует на экране *сплошной (непрерывный) спектр*

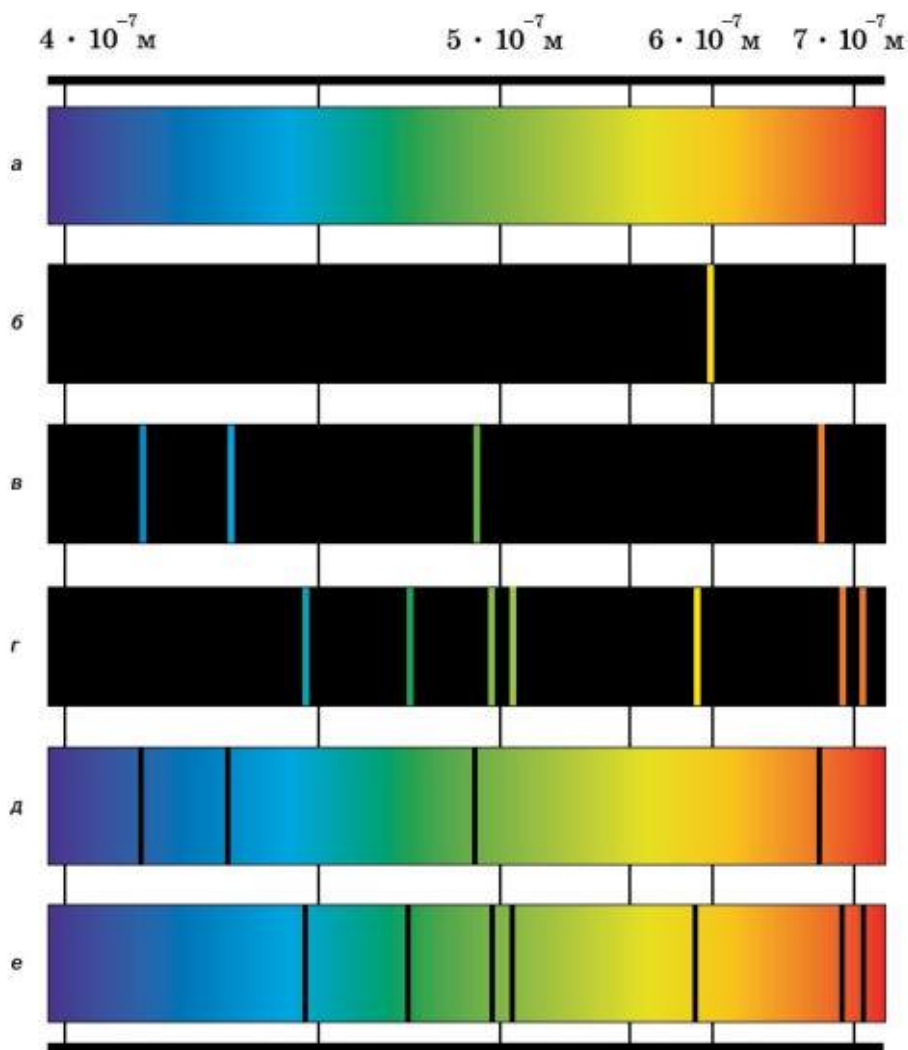


Рис. 10.20

(рис. 10.20, а). Однако спектры бывают не только сплошными. Внесём в бледное пламя газовой горелки кусочек асбеста, смоченного раствором обыкновенной поваренной соли. При наблюдении пламени в спектроскоп на фоне едва различимого непрерывного спектра пламени вспыхнет яркая жёлтая линия (рис. 10.20, б). Эту жёлтую линию дают пары натрия, которые образуются при расщеплении молекул поваренной соли в пламени. На рисунке 10.20, в, г приведены также спектры водорода и гелия. Каждый из них представляет собой цветные линии различной яркости,

разделённые широкими тёмными полосами. Такие спектры называют *линейчатыми*.

Наличие линейчатого спектра означает, что вещество излучает свет только вполне определённых длин волн (точнее, в определённых очень узких спектральных интервалах). Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном (но не молекулярном) состоянии. В этом случае свет излучают атомы, которые практически не взаимодействуют друг с другом. Все вещества, атомы которых находятся в возбуждённом состоянии, излучают световые волны, энергия которых определённым образом распределена по длинам волн.

Поглощение света веществом также зависит от длины волны. Если пропускать белый свет сквозь холодный, неизлучающий газ, то на фоне непрерывного спектра источника появляются тёмные линии (на рис. 10.20, *д* показаны спектры поглощения водорода, а на рис. 10.20, *е* — гелия). Газ поглощает наиболее интенсивно свет как раз тех длин волн, которые он испускает в сильно нагретом состоянии. Тёмные линии на фоне непрерывного спектра — это линии поглощения, образующие в совокупности спектр поглощения.

Согласно второму постулату Бора, возможные частоты излучения атома водорода определяются формулой

$$\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h} = \frac{k^2 m_e e^4}{4\pi\hbar^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (5)$$

где $R = \frac{k^2 m_e e^4}{4\pi\hbar^3} \approx 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ — так называемая *постоянная Ридберга*, определяемая через постоянную Планка, массу и заряд электрона.

Впервые формула, позволяющая вычислить длины волн или частоты света, испускаемого атомом водорода, была экспериментально найдена швейцарским учёным Иоганном Бальмером (1825—1898) в 1885 г. Все частоты видимой части спектра излучения водорода удовлетворяют формуле (5).

Все частоты излучений атома водорода образуют ряд *серий*, каждой из которых соответствуют определённое значение числа n и различные значения числа $m > n$. Излучение частот данной серии происходит при переходах с высших энергетических уровней на один из низших. Переходы в первое возбуждённое состояние (на второй энергетический уровень) с верхних уровней образуют *серию Бальмера*. Впоследствии были найдены аналогичные серии спектральных линий в области ультрафиолетового и инфракрасного излучений.

Теория Бора позволила рассчитать спектр атома водорода и водородоподобных ионов, т. е. ионизированных атомов с зарядом ядра Ze и одним электроном (например, He^+ , Li^{++} и т. д.). Однако с её помощью не удалось описать спектр атома гелия — атома, следующего за атомом водорода

в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева. Тем не менее модель атома Бора способствовала созданию современной квантовой теории.



1. Сформулируйте постулаты Бора. **2.** В чём заключается правило квантования? **3.** Что называют энергией ионизации? Чему она равна для атома водорода? **4.** Опишите энергетическую диаграмму атома водорода, представленную на рисунке 10.19. **5.** Какое стационарное состояние называют: а) основным; б) возбуждённым? **6.** Что представляют собой линейчатые спектры?



1. Почему теорию Бора иногда называют полуклассической теорией строения атома? **2.** Почему спектры излучения разных веществ отличаются друг от друга? **3.** Какой спектр, № 1 или № 2 (рис. 10.21), содержит: а) водород; б) гелий; в) аргон?

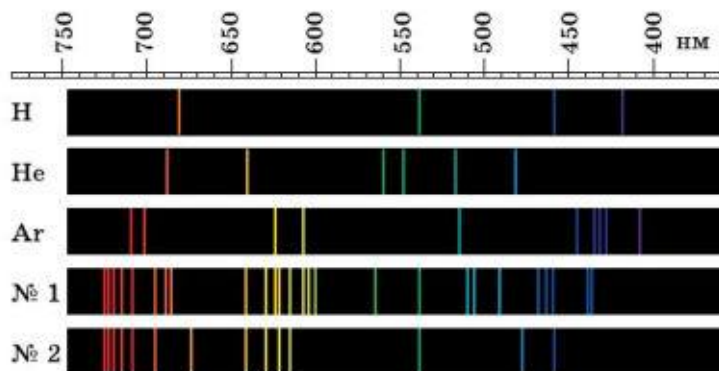


Рис. 10.21



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Каким должно быть значение минимальной энергии фотона, поглощённого атомом водорода, который находится в основном состоянии, чтобы в излучении атома при обратном переходе электрона на второй энергетический уровень наблюдалось шесть линий спектра?

Дано:

$$n = 2$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$$

$$h\nu_{\min} = ?$$

Решение:

При переходе электрона с m -й орбиты на n -ю излучается фотон с энергией $h\nu_{mn} = hR \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$. По условию задачи $n = 2$.

Тогда для наблюдения в излучении шести линий спектра число m должно принимать шесть значений — от $m = 3$ до $m = 8$. Для этого необходимо, чтобы электрон в атоме водорода

перешёл с первого (основного) энергетического уровня на восьмой. Этот переход соответствует минимальной энергии поглощённого фотона:

$$h\nu_{\min} = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3,29 \cdot 10^{15} \cdot \left(1 - \frac{1}{8^2}\right) \text{ Дж} \approx \\ \approx 2,15 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} \approx 13,4 \text{ эВ.}$$

Ответ: $h\nu_{\min} \approx 13,4 \text{ эВ}$.



УПРАЖНЕНИЯ

1. При переходе электрона в атоме водорода с одного энергетического уровня на другой был излучён свет с частотой $4,57 \cdot 10^{14}$ Гц. На сколько уменьшилась энергия атома?
2. При переходе атома водорода из четвёртого энергетического состояния во второе излучаются фотоны с энергией 2,55 эВ (зелёная линия спектра водорода). Определите длину волны этой линии спектра.
3. Под действием бомбардирующих электронов с кинетической энергией 1,892 эВ водород светится. Определите длину волны излучения. Какого цвета линия получена в спектре?
4. При облучении паров ртути электронами энергия атома ртути увеличивается на 4,9 эВ. Чему равна длина волны излучения, которое испускают атомы ртути при переходе в невозбуждённое состояние?

§ 63

ЛАЗЕРЫ

СПОНТАННОЕ И ИНДУЦИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЯ. Как мы уже выяснили, если атом находится в возбуждённом состоянии, то он с течением времени самопроизвольно переходит в стационарное состояние с меньшей энергией. При этом возникает *спонтанное*, или *самопроизвольное*, *излучение*, при котором каждый атом начинает и заканчивает процесс излучения независимо от других атомов. Другими словами, спонтанные излучения разных атомов не согласованы (некогерентны) друг с другом.

В 1917 г. Эйнштейн предсказал возможность так называемого *индуцированного (вынужденного) излучения* света атомами. Под таким излучением следует понимать излучение возбуждённых атомов под действием падающего на них света.

Вынужденное излучение принципиально отличается от спонтанного. Это обусловлено тем, что возникшая световая волна не отличается от волны, падающей на атом, ни частотой, ни фазой, ни поляризацией. Вынужденное излучение означает переход атома из высшего энергетического состояния в низшее с излучением фотона, но не самопроизвольно, а под влиянием внешнего воздействия.



Ещё в 1939 г. российский физик Валентин Александрович Фабрикант (1907—1991) указал на возможность использования явления вынужденного излучения для усиления электромагнитных волн. В 1954 г. российские учёные Александр Михайлович Прохоров (1916—2002) и Николай Геннадьевич Басов (1922—2001) и независимо от них американский физик Чарльз Таунс (1915—2015) использовали явление индуцированного излучения для создания микроволнового генератора радиоволн с длиной волны $\lambda = 1,27$ см. Данное устройство было названо *мазером*^{*}. За разработку нового принципа генерации и усиления радиоволн Басов, Прохоров и Таунс в 1964 г. были удостоены Нобелевской премии по физике. В 1960 г. американским инженером Теодором Мейманом (1927—2007) был создан первый *лазер*^{**} — квантовый генератор электромагнитных волн в видимом диапазоне спектра.



А. М. ПРОХОРОВ, Ч. ТАУНС
И Н. Г. БАСОВ

СВОЙСТВА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. Лазеры обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с другими источниками света.

1. Лазеры способны создавать пучки света с очень малым углом расхождения (около 10^{-5} рад). На Луне такой пучок, испущенный с Земли, даёт пятно диаметром ~ 3 км.

2. Свет лазера обладает исключительной монохроматичностью. В отличие от обычных источников света, атомы которых излучают свет независимо друг от друга, в лазерах атомы излучают свет согласованно. Поэтому фаза волны не испытывает нерегулярных изменений. Два лазера дают когерентные волны, которые могут интерферировать друг с другом.

3. Лазеры являются самыми мощными источниками света. В узком интервале спектра у некоторых типов лазеров кратковременно (в течение промежутка времени 10^{-9} с) достигается интенсивность излучения $10^{21} - 10^{22}$ Вт/см², в то время как интенсивность излучения Солнца равна только $7 \cdot 10^3$ Вт/см², причём суммарно по всему спектру. Кроме того, напряжённость электрического поля в электромагнитной волне, излучаемой лазером, может превышать напряжённость поля внутри атома.

* Аббревиатура *maser* расшифровывается как «Microwave amplification by stimulated emission of radiation» — «Микроволновое усиление с помощью индуцированного (стимулированного) излучения».

** Аббревиатура *laser* означает «Light amplification by stimulated emission of radiation» — «Световое усиление с помощью индуцированного (стимулированного) излучения».

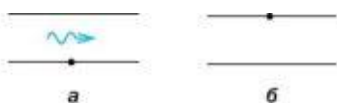


Рис. 10.22

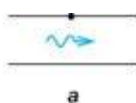
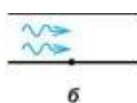


Рис. 10.23



ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРА. В обычных условиях большинство атомов находится в низшем энергетическом состоянии. Поэтому при низких температурах вещества не светятся. При прохождении электромагнитной волны сквозь вещество её энергия поглощается. За счёт этого часть атомов возбуждается, т. е. переходит в высшее энергетическое состояние. При этом от светового пучка отнимается энергия $h\nu = E_2 - E_1$, равная разности энергий между энергетическими уровнями 2 и 1.

На рисунке 10.22, а схематически представлены невозбуждённый атом и электромагнитная волна в виде отрезка синусоиды. Электрон находится на нижнем энергетическом уровне. Возбуждённый атом, поглотивший энергию (рис. 10.22, б), может отдать свою энергию соседним атомам при столкновении или испустить фотон в любом направлении.

Представим себе, что каким-либо способом мы возбудили большую часть атомов среды. Тогда при прохождении через вещество электромагнитной волны с частотой $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ эта волна будет не ослабляться, а, на-

против, усиливаться за счёт индуцированного излучения. Под её воздействием атомы согласованно переходят в низшие энергетические состояния, излучая волны, совпадающие по частоте и фазе с падающей волной. На рисунке 10.23, а изображены возбуждённый атом и волна, а на рисунке 10.23, б схематически показано, что атом перешёл в основное состояние, а волна усилилась.

В настоящее время существуют различные методы получения среды с возбуждёнными состояниями атомов*. В рубиновом лазере для этого используется специальная мощная лампа. Атомы возбуждаются за счёт поглощения света. Но двух уровней энергии для работы лазера недостаточно. Каким бы мощным ни был свет лампы, число возбуждённых атомов не будет больше числа невозбуждённых. Ведь свет одновременно и возбуждает атомы, и вызывает индуцированные переходы с верхнего уровня на нижний.

Выход был найден в использовании трёх энергетических уровней (конечно, общее число уровней всегда велико; но речь идёт о «работающих» уровнях). На рисунке 10.24 изображены три энергетических уровня.

* Состояние вещества, при котором меньше половины атомов находится в возбуждённом состоянии, называется *состоянием с нормальной населённостью энергетических уровней*. Состояние, в котором больше половины атомов вещества находится в возбуждённом состоянии, называется *состоянием с инверсной населённостью* (от лат. *inversio* — переворачивание) *уровней*.

Существенно, что в отсутствие внешнего воздействия время, в течение которого система находится в различных энергетических состояниях («время жизни»), неодинаково.

На уровне 3 система атомов находится в течение всего 10^{-8} с, после чего самопроизвольно переходит в состояние 2 без излучения фотона. (Энергия при этом передаётся кристаллической решётке.) «Время жизни» в состоянии 2 в 100 000 раз больше, т. е. составляет около 10^{-3} с. Переход из состояния 2 в состояние 1 под действием внешней электромагнитной волны сопровождается излучением. Это и используется в лазерах.

После вспышки мощной лампы система переходит в состояние 3 и спустя промежуток времени 10^{-8} с оказывается в состоянии 2 (на *метастабильном уровне*), в котором находится сравнительно долго ($\sim 10^{-3}$ с). Таким образом и создаётся «перенаселённость» возбуждённого уровня 2 по сравнению с невозбуждённым уровнем 1.

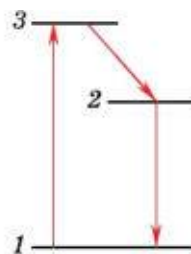


Рис. 10.24

УСТРОЙСТВО РУБИНОВОГО ЛАЗЕРА. Необходимые энергетические уровни имеются в кристаллах рубина. Рубин — это кристалл оксида алюминия Al_2O_3 с примесью атомов хрома (около 0,05%). Именно уровни ионов хрома в кристалле обладают требуемыми свойствами.

Из кристалла рубина изготавливают стержень цилиндрической формы с плоскопараллельными торцами. Газоразрядная лампа, имеющая форму спирали (рис. 10.25), испускает сине-зелёный свет. Кратковременный импульс тока от батареи конденсаторов ёмкостью в несколько тысяч микрофард вызывает яркую вспышку лампы. Спустя малое время энергетический уровень 2 становится «перенаселённым». В результате самопроизвольных переходов $2 \rightarrow 1$ (см. рис. 10.24) начинают излучаться волны всевозможных направлений. Те из них, которые идут под углом к оси кристалла, выходят из него и не играют в дальнейших процессах никакой роли. Но волна, идущая вдоль оси кристалла, многократно отражается от его торцов. Она вызывает индуцированное излучение возбуждённых ионов хрома и быстро усиливается.

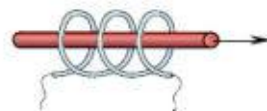


Рис. 10.25

На рисунке 10.26 показано развитие лавины фотонов вдоль оси рубинового стержня. Один из торцов рубинового стержня делают зеркальным, а другой — полупрозрачным. Через него выходит мощный кратковременный (длительностью около сотни микросекунд) импульс крас-

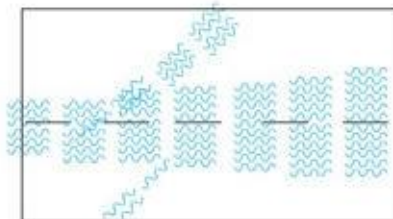


Рис. 10.26

ного света, обладающий теми уникальными свойствами, о которых было рассказано в начале параграфа. Волна является когерентной, так как все атомы излучают согласованно, и очень мощной, так как при индуцированном излучении вся запасённая энергия выделяется за очень малое время.

Отметим, что рубиновый лазер Меймана работал в импульсном режиме, излучая свет с длиной волны 694,3 нм.

ДРУГИЕ ТИПЫ ЛАЗЕРОВ. В 1961 г. сотрудники компании «Лаборатории Белла» (США) Али Джаван (1926—2016), Уильям Беннетт (1930—2008) и Дональд Харриот (1928—2007) сообщили о создании первого газового лазера, работающего в непрерывном режиме на смеси атомов гелия и неона. Основной его частью является газоразрядная трубка, в которой происходит тлеющий газовый разряд. Трубка заполнена смесью атомов неона и гелия. В результате взаимодействия с электронами плазмы часть атомов неона и гелия переходят в возбуждённое состояние. Атомы гелия, находясь на нестабильных уровнях, могут передавать энергию возбуждения атомам неона при их столкновениях. Вследствие этого возникает инверсная населённость возбуждённых уровней атомов неона, что, в свою очередь, вызывает вынужденное излучение с длиной волны 632,8 нм.

Впоследствии был получен лазерный эффект на парах цезия, и началось конструирование лазеров на сотнях различных материалов. В 1961—1964 гг. были разработаны другие твёрдотельные, а также жидкостные и газовые лазеры, в 1962 г. появились полупроводниковые лазеры, в 1970-е гг. начал работать первый лазер на свободных электронах, а в 1980-е — рентгеновский лазер с высокотемпературной плазмой в качестве активной среды. К настоящему времени лазеры созданы (или разрабатываются) практически во всех диапазонах электромагнитных волн.

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ. Лазерное излучение находит широкое применение в различных областях науки, техники и промышленности. Огромная мощность лазерного излучения используется для испарения материалов в вакууме, для обработки (резание, сварка, сверление) металлов и т. д. Лазерным лучом раскраивают ткани и режут стальные листы, сваривают кузова автомобилей и приваривают мельчайшие детали в радиоэлектронной аппаратуре, пробивают отверстия в хрупких и сверхтвёрдых материалах. В медицине лазеры используют в качестве бескровных скальпелей при лечении глазных, кожных и других заболеваний.

С помощью лазеров можно осуществить кабельную, телефонную, телевизионную и оптоволоконную связь. По одному оптическому волокну с помощью лазерного луча можно осуществить передачу более 100 телевизионных программ. Лазерный луч записывает и считывает информацию с компакт-дисков в компьютерах и лазерных проигрывателях.

Лазеры позволяют получать объёмные изображения предметов, используя когерентность лазерного луча (голография). Возбуждая лазерным излучением атомы или молекулы, можно вызвать между ними химические реакции, которые в обычных условиях не идут. Перспективно использование сверхмощных лазерных лучей для осуществления управляемого термоядерного синтеза (УТС). Об этом будет рассказано в главе 11.



1. Как возникает: а) спонтанное излучение; б) вынужденное излучение?
2. Какими свойствами обладает лазерное излучение?
3. Опишите принцип действия лазера.
4. В чём заключается трёхуровневая система получения среды с инверсной населённостью уровней?
5. Как возникает вынужденное излучение в рубиновом лазере?
6. Приведите примеры использования лазеров в науке, технике и быту.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ И ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

1. Выполните проект на тему «Модель абсолютно чёрного тела». Сконструируйте модель абсолютно чёрного тела. Используя современные средства измерения интенсивности падающего излучения (датчик света), докажите, что через отверстие в этом теле выходит ничтожная доля падающего на тело излучения.
2. В вашем распоряжении имеется вакуумный фотоэлемент, вольтметр и набор светофильтров. Как, используя перечисленное оборудование, можно определить постоянную Планка?
3. Известно, что лампа накаливания даёт сплошной спектр. А какой спектр даёт энергосберегающая люминесцентная лампа? Для ответа на этот вопрос поставьте опыт, используя спектроскоп.

Примерные темы рефератов и проектов

1. Опыты Лебедева по измерению давления света на твёрдые тела и газы.
2. Опыты Вавилова по наблюдению квантовых флуктуаций света.
3. Экспериментальное доказательство существования стационарных состояний атома.
4. Метод спектрального анализа и его применение.
5. Лазерное излучение и его использование в науке, технике и быту.



Глава 11

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ



С того момента, когда Резерфорд доказал существование ядра внутри атома, началось развитие *ядерной физики*. В этом разделе физики рассматриваются структура и свойства атомных ядер, процессы их взаимопревращения, которые происходят в результате радиоактивных распадов или различных ядерных реакций. К ядерной физике иногда относят *физику элементарных частиц*. Предметом её исследований является изучение природы, свойств и взаимных превращений элементарных частиц.

Данные разделы физики тесно взаимосвязаны. Если многие элементарные частицы (например, нейтрон, нейтрино) были открыты при исследовании ядерных процессов, то, в свою очередь, исследование взаимодействия и взаимных превращений элементарных частиц позволило выявить природу многих ядерных процессов, например таких, как β -излучение ядер. Для изучения ядерных процессов, свойств элементарных частиц используются технически сложные экспериментальные установки (например, ускорители заряженных частиц).

§ 64

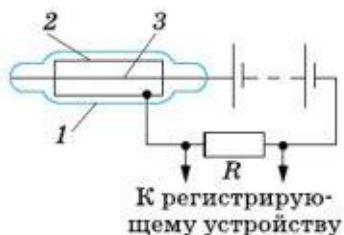
МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГИСТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ. В зависимости от целей эксперимента и условий, в которых он проводится, применяются те или иные регистрирующие устройства. Они различаются такими характеристиками, как эффективность (отношение количества зарегистрированных частиц к числу частиц, попавших в прибор), минимальное время регистрации (время, за которое прибор после регистрации частицы возвращается в исходное, рабочее состояние), точность измерений энергий, масс, зарядов частиц и т. д.

В настоящее время разработано множество счётчиков и детекторов элементарных частиц. Рассмотрим некоторые из них.



а



б

Рис. 11.1

ГАЗОРАЗРЯДНЫЙ СЧЁТЧИК ГЕЙГЕРА. Счётчик Гейгера* (рис. 11.1, а) — один из важнейших приборов для автоматического счёта частиц. Конструктивно он состоит из стеклянной трубки 1 (рис. 11.1, б), покрытой изнутри металлическим слоем (катод 2), и тонкой металлической нити, идущей вдоль оси трубки (анод 3).

Трубка заполняется при низком давлении неоном или аргоном. Заряженная частица (электрон, α -частица и т. д.), пролетая в газе, отрывает у атомов электроны и создаёт положительные ионы и свободные электроны. Электрическое поле между анодом и катодом (к ним подводится высокое напряжение) ускоряет электроны до энергий, при которых начинается ударная ионизация. При этом возникает лавина ионов, и ток через счётчик резко возрастает. На нагрузочном резисторе R образуется импульс напряжения, который подаётся в регистрирующее устройство (обычно это усилитель и механический счётчик). Для того чтобы счётчик мог регистрировать новую частицу, лавинный разряд необходимо погасить. Это происходит автоматически.

В момент появления импульса тока падение напряжения на нагрузочном резисторе R велико, поэтому напряжение между анодом и катодом резко уменьшается — настолько, что разряд прекращается и счётчик снова готов к работе. Счётчик Гейгера применяют в основном для регистрации электронов и γ -квантов (фотонов большой энергии).

КАМЕРА ВИЛЬСОНА. Счётчики позволяют лишь регистрировать факт прохождения через них частицы и фиксировать некоторые её характеристики. В камере же заряженная частица оставляет след (*трек*), который можно непосредственно наблюдать или фотографировать. Камера Вильсона была изобретена в 1912 г. шотландским физиком Чарльзом Вильсоном (1869—1959). Устройство представляет собой герметически закры-

* Его принцип действия был предложен в 1908 г. сотрудником Резерфорда немецким физиком Хансом Гейгером (1882—1945). В 1928 г. он совместно с Вальтером Мюллером (1905—1979) усовершенствовал счётчик, поэтому его часто называют счётчиком Гейгера—Мюллера.

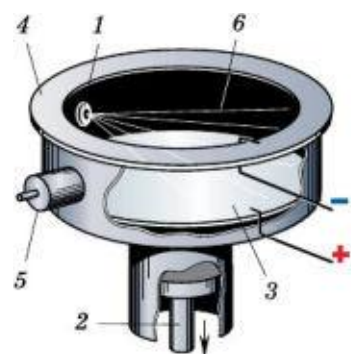


Рис. 11.2

тый сосуд, заполненный парами воды или спирта, близкими к насыщению. На рисунке 11.2 цифрами обозначены: 1 — источник заряженных частиц; 2 — поршень; 3 и 4 — электроды для создания электрического поля; 5 — лампа для бокового освещения; 6 — треки заряженных частиц.

При резком опускании поршня пар в камере адиабатно расширяется. Вследствие этого происходит охлаждение пара, и он становится пересыщенным. Это неустойчивое состояние пара. Если частица проникает в камеру непосредственно перед расширением или после него, то ионы, которые она образует, будут дей-

ствовать как центры конденсации. Возникающие на них капельки воды образуют след пролетевшей частицы — трек. Затем камера возвращается в исходное состояние, и ионы удаляются электрическим полем. Перед расширением это поле выключается. Информация, которую дают треки в камере Вильсона, значительно богаче той, которую могут дать счётчики. По длине трека можно определить энергию частицы, а по числу капелек на единицу его длины оценить её скорость.

Помещая камеру в однородное магнитное поле*, можно по направлению изгиба траектории и её кривизне определить знак заряда и отношение заряда к массе или импульс частицы (если её заряд известен).

Камера Вильсона позволила сделать ряд важнейших открытий в ядерной физике. По наблюдениям траекторий частиц в камере Вильсона в сильном магнитном поле американский физик Карл Андерсон (1905—1991) обнаружил в составе космических лучей новую частицу — *позитрон*. Эта частица имела такую же массу, как и электрон, но обладала, в отличие от него, не отрицательным, а положительным электрическим зарядом.

ПУЗЫРЬКОВАЯ КАМЕРА. В 1952 г. американским физиком Дональдом Глазером (1926—2013) была изобретена пузырьковая камера. Устройство заполняется жидкостью, чаще всего жидким водородом или пропаном. В подготовленном для работы состоянии жидкость в камере находится под высоким давлением, предохраняющим её от закипания, несмотря на то, что температура жидкости выше температуры кипения при атмосферном давлении. При резком понижении давления жидкость оказывается перегретой и в течение некоторого времени находится в этом неустойчивом состоянии. Для того чтобы она закипела, нужны центры парообразования. Пролетающая заряженная частица и создаёт такие центры в виде

* Данный метод был разработан советскими физиками Петром Леонидовичем Капцей (1894—1984) и Дмитрием Владимировичем Скобельцыным (1892—1990).

цепочки ионов. На этих ионах образуются пузырьки пара, образующие трек частицы (рис. 11.3).

Длительность рабочего цикла камеры невелика — около 0,1 с. В этом заключается преимущество пузырьковой камеры перед камерой Вильсона. Из-за большой плотности жидкости (по сравнению с плотностью газа) частица быстро теряет свою энергию. Пробеги частиц оказываются достаточно короткими, и частицы даже больших энергий задерживаются в камере. Это позволяет наблюдать как распад частицы (или серию последовательных распадов), так и вызываемые ею реакции.

Для регистрации заряженных частиц широко используется явление ионизации атомов, которое они вызывают в веществе детектора. На этом основана работа таких детекторов, как камера Вильсона, пузырьковая камера, искровая камера, фотоэмульсии, газовые сцинтилляционные и полупроводниковые детекторы. Незаряженные частицы (например, γ -кванты) детектируются по вторичным заряженным частицам, возникающим в результате их взаимодействия с веществом детектора. Быстрораспадающиеся частицы регистрируются по продуктам их распада.



Рис. 11.3

1. На чём основан принцип действия газоразрядного счётчика Гейгера?
2. Для регистрации каких частиц используется счётчик Гейгера?
3. Как устроена камера Вильсона? Почему пролетевшая заряженная частица в камере Вильсона образует трек?
4. Какими преимуществами обладает пузырьковая камера по сравнению с камерой Вильсона?

1. Почему пролетающий протон оставляет в камере Вильсона видимый след, а пролетающий нейтрон нет?
2. На рисунке 11.4 пунктиром показан трек электрона в камере Вильсона, помещённой в магнитное поле. В каком направлении двигался электрон, если линии магнитной индукции поля направлены к вам?
3. В камере Вильсона, перегородженной твёрдой пластинкой, замечен след частицы (рис. 11.5). В какую сторону двигалась частица? Какой по знаку заряд она имеет, если линии индукции магнитного поля направлены перпендикулярно плоскости чертежа, к вам?

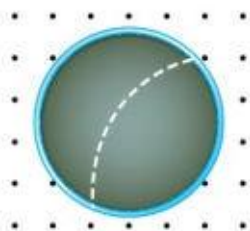


Рис. 11.4



Рис. 11.5

ОТКРЫТИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ. Явление естественной радиоактивности* было обнаружено французским учёным Анри Беккерелем (1852—1908). Долгое время он исследовал родственное явление — фосфоресценцию (люминесценцию) веществ, предварительно подвергшихся облучению солнечным светом. К таким веществам принадлежат, в частности, соли урана, с которыми экспериментировал Беккерель. У него возник вопрос: не появляются ли после облучения солей урана наряду с видимым светом и рентгеновские лучи?

Беккерель завернул фотопластинку в плотную чёрную бумагу, положил сверху крупинки урановой соли и выставил на яркий солнечный свет. После проявления пластинка почернела на тех участках, где лежала соль. Следовательно, уран создавал какое-то излучение, которое, подобно рентгеновскому, пронизывает непрозрачные тела и действует на фотопластинку. Беккерель думал, что это излучение возникает под влиянием солнечных лучей. Но однажды, в феврале 1896 г., провести очередной опыт ему не удалось из-за облачной погоды. Беккерель убрал пластинку в ящик стола, положив на неё сверху медный крест, покрытый солью урана. Проявив на всякий случай пластинку два дня спустя, он обнаружил на ней почернение в форме отчётливой тени креста.

Это означало, что соли урана самопроизвольно, без влияния внешних факторов создают какое-то излучение. Вскоре Беккерель обнаружил, что излучение урановых солей ионизирует воздух, подобно рентгеновским лучам, и разряжает электроскоп. Испробовав различные химические соединения урана, он установил важный факт: *интенсивность излучения определяется только количеством урана в препарате и совершенно не зависит от того, в какие соединения он входит*. Следовательно, это свойство присуще не соединениям, а химическому элементу урану, его атомам. Естественно было попытаться установить, не обладают ли способностью к самопроизвольному излучению другие химические элементы, кроме урана.

В 1898 г. Мария Склодовская-Кюри (1867—1934) во Франции и другие учёные обнаружили излучение тория. Систематическое исследование руд, содержащих уран и торий, позволило Склодовской-Кюри и Пьеру Кюри (1859—1906) выделить неизвестный ранее химический элемент — *полоний*, названный так в честь родины Марии Склодовской-Кюри — Польши. Позже был открыт ещё один элемент, дающий очень интенсивное излучение. Он был назван *радием*.

* Существует и *искусственная радиоактивность* — радиоактивность изотопов, полученных искусственно в ходе ядерных реакций.

Явление испускания некоторыми веществами излучения, проникающего сквозь тела, называли *радиоактивностью*, а вид излучения — *радиоактивным*.

Впоследствии было установлено, что все химические элементы с порядковым номером $Z > 83$ являются радиоактивными.

СОСТАВ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. После открытия радиоактивных элементов началось интенсивное изучение их свойств. Классический опыт, позволивший обнаружить *сложный состав радиоактивного излучения*, был проведён Резерфордом и его сотрудниками в 1899 г.



Радиоактивный препарат помещался на дно узкого канала в толстостенном куске свинца. Напротив канала находилась фотопластинка. На выходящее из канала излучение действовало сильное магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны лучу (рис. 11.6). Вся установка размещалась в вакууме. В отсутствие магнитного поля на фотопластинке после проявления обнаруживалось одно тёмное пятно точно против канала. В магнитном же поле пучок распадался на три пучка. При этом две составляющие первичного потока отклонялись в противоположные стороны. Это указывало на наличие у этих излучений зарядов противоположных знаков. При этом отрицательная компонента излучения отклонялась магнитным полем гораздо больше, чем положительная. Третья составляющая не отклонялась магнитным полем. Положительно заряженная компонента получила название *альфа-лучей*, отрицательно заряженная — *бета-лучей* и нейтральная — *гамма-лучей* (соответственно α -лучи, β -лучи, γ -лучи).

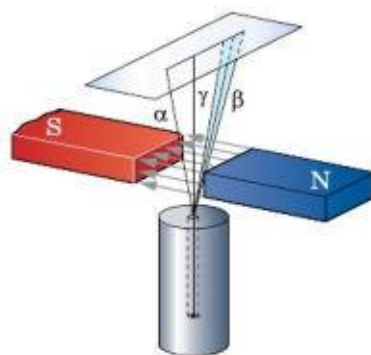


Рис. 11.6

Эти три вида излучения сильно отличаются друг от друга по своей *проникающей способности*, т. е. по тому, насколько интенсивно они поглощаются различными веществами. Наименьшей проникающей способностью обладают α -лучи. Слой бумаги толщиной около 0,1 мм для них уже непрозрачен. Если прикрыть отверстие в свинцовой пластинке листочком бумаги, то на фотопластинке не обнаружится пятна, соответствующего α -лучам. В значительно меньшей степени поглощаются при прохождении через вещество β -лучи. Алюминиевая пластинка полностью их задерживает только при толщине в несколько миллиметров. Наибольшей проникающей способностью обладают γ -лучи. Слой свинца

толщиной 1 см не является для них непреодолимой преградой. При прохождении через такую пластину интенсивность γ -лучей убывает лишь вдвое.

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА α -, β - и γ -ЛУЧЕЙ. По своим свойствам γ -лучи очень сильно напоминают рентгеновские, поэтому логично предположить, что γ -лучи представляют собой электромагнитные волны. Все сомнения в этом отпали после того, как была обнаружена дифракция γ -лучей на кристаллах и измерена длина волны. Она оказалась очень малой — от 10^{-8} до 10^{-11} см. На шкале электромагнитных волн γ -лучи непосредственно следуют за рентгеновскими.

Сначала α - и β -лучи рассматривались как потоки заряженных частиц. Проще всего было экспериментировать с β -лучами, так как они сильно отклоняются как в магнитном, так и в электрическом поле. При исследовании отклонения β -частиц в электрическом и магнитном полях было установлено, что они представляют собой электроны, движущиеся со скоростями, очень близкими к скорости света. Существенно, что скорости β -частиц, испущенных данным радиоактивным элементом, неодинаковы.

Труднее оказалось выяснить природу α -частиц, так как они слабо отклоняются магнитным и электрическим полями. Окончательно эту задачу удалось решить Резерфорду и Гейгеру. Они измерили отношение заряда q частицы к её массе m по отклонению в электрическом и магнитном полях. Оно оказалось примерно в 2 раза меньше, чем у протона — ядра атома водорода. Для определения массы α -частицы нужно было измерить ещё её заряд. Это было сделано лишь после изобретения счётчика Гейгера.

С его помощью подсчитывалось число частиц, попадающих в единицу времени внутрь металлического цилиндра, соединённого с электрометром (рис. 11.7). Сквозь очень тонкое окошко α -частицы могут проникать внутрь счётчика и регистрироваться им. Электрометр позволяет определить суммарный заряд α -частиц, испущенных за определённый интервал времени. Такого рода опыты показали, что заряд α -частицы равен удвоенному элементарному заряду. Следовательно, её масса в 4 раза превосходит массу атома водорода, т. е. равна массе атома гелия. Таким образом, α -частица оказалась ядром атома гелия*.

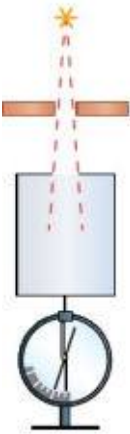


Рис. 11.7



1. Как была обнаружена естественная радиоактивность?
2. Какими особенностями обладает радиоактивное излучение солей урана?
3. Какие новые химические элементы были открыты супругами Кюри?

* В первое десятилетие XX в. атомное ядро ещё не было открыто. Поэтому Резерфорд говорил об ионе атома гелия.

ри? 4. Какое явление называют радиоактивностью? 5. Как был обнаружен сложный состав радиоактивного излучения? 6. Что представляют собой: а) α -лучи; б) β -лучи; в) γ -лучи?

Скорость α -частицы в среднем в 15 раз меньше скорости β -частицы. Почему α -частицы (жирный пунктирный трек на рис. 11.8) слабее отклоняются магнитным полем? Как направлен вектор индукции магнитного поля?



Рис. 11.8

§ 66

РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА. ИЗОТОПЫ

РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ. Выясним, что происходит с веществом при радиоактивном излучении. Во-первых, следует отметить удивительное постоянство, с которым радиоактивные элементы уран, торий и радий испускают излучения. На протяжении суток, месяцев и лет интенсивность излучения заметно не изменялась. На него не оказывали никакого влияния такие обычные воздействия, как нагревание или увеличение давления. Во-вторых, очень скоро после открытия естественной радиоактивности выяснилось, что она сопровождается выделением энергии. Этот факт был экспериментально установлен П. Кюри. Он поместил ампулу с хлоридом радия в калориметр. В нём поглощались α -, β - и γ -лучи, и за счёт их энергии нагревался калориметр. Кюри определил, что 1 г радия за 1 ч выделяет 582 Дж энергии. Она выделяется непрерывно на протяжении ряда лет. Откуда же берётся энергия, на выделение которой не оказывают никакого влияния все известные воздействия? По-видимому, при радиоактивности вещество испытывает какие-то глубокие изменения.

Экспериментально было установлено, что при радиоактивном распаде происходит цепочка последовательных превращений атомов. Общий вывод, к которому пришли учёные, был точно сформулирован Резерфордом: «Атомы радиоактивного вещества подвержены спонтанным видоизменениям. В каждый момент небольшая часть общего числа атомов становится неустойчивой и взрывообразно распадается. В подавляющем большинстве случаев выбрасывается с огромной скоростью осколок атома — α -частица. В некоторых других случаях взрыв сопровождается выбрасыванием быстрого электрона и появлением γ -лучей, обладающих, подобно рентгеновским лучам, большой проникающей способностью. Было обнаружено, что в результате атомного превращения образуется вещество совершенно нового вида, полностью отличное по своим физиче-

ским и химическим свойствам от первоначального вещества. Это новое вещество, однако, само также неустойчиво и испытывает превращение с испусканием характерного радиоактивного излучения. Таким образом, точно установлено, что атомы некоторых элементов подвержены спонтанному распаду, сопровождающемуся излучением энергии в количествах, огромных по сравнению с энергией, освобождающейся при обычных молекулярных видоизменениях».

После того как было открыто атомное ядро, стало ясно, что именно оно претерпевает изменения при радиоактивных превращениях. Ведь α -частиц в электронной оболочке нет, а уменьшение числа электронов оболочки на единицу превращает атом в ион, а не в новый химический элемент. При этом *заряд ядра определяет порядковый номер элемента в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева и все его химические свойства*.

ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА. При исследовании радиоактивного распада опытным путём был установлен характер зависимости активности* радиоактивных веществ от времени — *основной закон радиоактивного распада***.

Оказалось, что для каждого радиоактивного вещества существует определённый интервал времени, на протяжении которого активность убывает в 2 раза. Его называют *периодом полураспада*.

Период полураспада T — это промежуток времени, в течение которого распадается половина первоначального числа радиоактивных атомов.

На рисунке 11.9 приведён график зависимости активности A некоторого радиоактивного вещества от времени t . Период полураспада этого вещества равен 5 сут.

Найдём закон, по которому убывает число радиоактивных ядер данного изотопа. Пусть число радиоактивных атомов в начальный момент времени ($t = 0$) равно N_0 . Тогда по истечении периода полураспада это число будет равно $\frac{N_0}{2}$. Спустя ещё один такой же интервал времени это число станет равным

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2}.$$

* Активность A радиоактивного вещества — число распадов, происходящих с радиоактивными ядрами вещества в единицу времени.

** Данный закон был установлен Резерфордом и Фредериком Содди (1877—1956) и опубликован в 1903 г.

По прошествии времени $t = nT$, т. е. спустя n периодов полураспада T , радиоактивных атомов останется

$$N = N_0 \frac{1}{2^n},$$

или

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}.$$

Данная формула представляет собой математическую запись закона радиоактивного распада.

Период полураспада — основная физическая величина, характеризующая скорость радиоактивного распада. Для разных веществ его значения варьируются в широких пределах. Например, для урана $T \approx 4,5$ млрд лет, для радия $T = 1600$ лет, поэтому активность радия значительно больше, чем активность урана. Чем меньше период полураспада, тем интенсивнее протекает распад. Так, существуют радиоактивные элементы с периодом полураспада в миллионные доли секунды.

Закон радиоактивного распада является *статистическим законом*. Он справедлив в среднем для большого количества атомов. Для малого же числа атомов говорить об определённом законе радиоактивного распада не имеет смысла. Время существования отдельных атомов может колебаться от долей секунды до миллиардов лет. Атом урана, например, может спокойно пролежать в земле миллиарды лет и внезапно распасться, в то время как его соседи продолжают оставаться в прежнем состоянии.

ИЗОТОПЫ. В результате наблюдения огромного числа радиоактивных превращений выяснилось, что существуют вещества, имеющие различные радиоактивные свойства (т. е. распадающиеся разными способами), но тождественные по своим химическим свойствам. На этом основании Содди в 1911 г. высказал предположение о существовании элементов с одинаковыми химическими свойствами, но различающихся в других отношениях, в частности своей радиоактивностью. Эти элементы нужно помещать в одну и ту же клетку таблицы Д. И. Менделеева. Содди назвал их *изотопами* (от греч. *isos* — одинаковый, *topos* — место).

У изотопов заряды атомных ядер, которые определяют число электронов в оболочке и, следовательно, химические свойства атомов, одинаковы. Но массы ядер различны. В настоящее время установлено существование изотопов у всех химических элементов, но только не все элементы

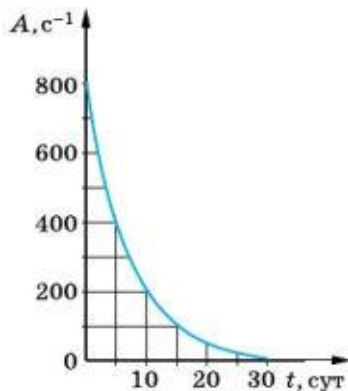


Рис. 11.9

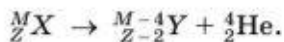
имеют стабильные изотопы. Изотопы имеются у самого тяжёлого из существующих в природе элементов — урана (относительные атомные массы 238, 235 и др.) и у самого лёгкого — водорода (относительные массы 1, 2, 3). Изотоп водорода с относительной атомной массой 2 называется *дейтерием*. Он стабилен и входит в качестве небольшой примеси (1 : 4500) в обычный водород. При соединении дейтерия с кислородом образуется так называемая тяжёлая вода. Её физические свойства заметно отличаются от свойств обычной воды. При нормальном атмосферном давлении она кипит при 101,2 °С и замерзает при 3,8 °С. Изотоп водорода с относительной атомной массой 3 называется *тритием*. Он β-радиоактивен с периодом полураспада, равным около 12 лет.

Существование изотопов доказывает, что заряд атомного ядра и, следовательно, строение электронной оболочки определяют химические свойства атомов и те физические свойства, которые зависят от периферии электронной оболочки, например размеры. Масса же атома и его радиоактивные свойства не определяются порядковым номером в таблице Д. И. Менделеева.

ПРАВИЛА СМЕЩЕНИЯ. Радиоактивные превращения элементов подчиняются так называемым *правилам смещения*, сформулированным впервые Содди.

При α-распаде ядро теряет положительный заряд $2e$ и масса его убывает приблизительно на четыре единицы относительной атомной массы. В результате элемент смещается на две клетки к началу таблицы Д. И. Менделеева.

Символически это можно записать следующим образом:



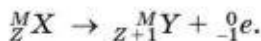
Напомним, что химический элемент обозначается общепринятыми символами: заряд ядра Z записывается в виде индекса слева внизу символа химического элемента, а атомная масса M — в виде индекса слева сверху символа химического элемента. Например, обычный изотоп водорода обозначается символом ${}^1_1\text{H}$, дейтерий — символом ${}^2_1\text{H}$. Для α-частицы, являющейся ядром атома гелия, применяется обозначение ${}^4_2\text{He}$.

При β-распаде* из ядра вылетает электрон.

При β-распаде заряд ядра увеличивается на единицу, а масса остаётся почти неизменной. В результате элемент смещается на одну клетку ближе к концу таблицы Д. И. Менделеева.

* В данном случае рассматривается *электронный бета-распад* (или β⁻-распад).

Символически правило смещения при электронном β -распаде можно записать в виде



Здесь символ ${}_{-1}^0e$ обозначает электрон: индекс «0» вверху означает, что масса его очень мала по сравнению с единицей относительной атомной массы.

γ -излучение не сопровождается изменением заряда; масса же ядра меняется ничтожно мало.

Правила смещения показывают, что *при радиоактивном распаде сохраняется электрический заряд и приблизительно сохраняется относительная атомная масса ядер.*



1. Какими свойствами обладают радиоактивные вещества?
2. Какую физическую величину называют периодом полураспада?
3. Запишите закон радиоактивного распада.
4. Почему закон радиоактивного распада имеет статистический характер?
5. Какие химические элементы называют изотопами? Приведите примеры изотопов водорода.
6. Что происходит с ядром радиоактивного элемента: а) при его α -распаде; б) при его β -распаде?



1. Какие из известных вам законов сохранения выполняются при радиоактивном распаде?
2. Изменяется ли химическая природа элемента при испускании γ -лучей его ядрами?



УПРАЖНЕНИЯ

1. Какой элемент образуется в результате α -распада изотопа: а) ${}_{92}^{235}\text{U}$; б) ${}_{90}^{232}\text{Th}$; в) ${}_{88}^{226}\text{Ra}$?
2. Какой элемент образуется в результате β -распада изотопа: а) ${}_{82}^{209}\text{Pb}$; б) ${}_{6}^{14}\text{C}$; в) ${}_{11}^{24}\text{Na}$?
3. Во что превращается изотоп таллия ${}_{81}^{210}\text{Tl}$ после трёх β -распадов и одного α -распада?
4. Ядро изотопа ${}_{83}^{211}\text{Bi}$ образовалось из другого ядра после одного α - и одного β -распадов. Определите, что это за ядро.
5. Период полураспада изотопа йода ${}_{53}^{131}\text{I}$ составляет 8 суток. Через какое время число атомов этого изотопа окажется в 100 раз меньше их начального числа?
6. В сосуде имеются $25 \cdot 10^6$ атомов радия. Со сколькими из них произойдёт радиоактивный распад за одни сутки, если период полураспада радия равен 1620 лет?
7. В сосуде объёмом 1 дм³ находится 1 г трития при температуре 27 °С. За 12 лет половина ядер трития превращается в ядра гелия. Найдите давление в сосуде в конце этого срока.



Интересные факты

Измерение абсолютного возраста радиоактивных минералов основано на точном определении соотношения количества радиоактивного элемента и продукта его распада. Для этого используются различные методы ядерной геохронологии (радиоизотопные методы). Одним из наиболее популярных методов является **уран-свинцовый метод**. В нём используются два изотопа урана $^{238}_{92}\text{U}$ и $^{235}_{92}\text{U}$, цепочки распада которых заканчиваются разными изотопами свинца $^{206}_{82}\text{Pb}$ и $^{207}_{82}\text{Pb}$, что позволяет обеспечить высокую надёжность и точность метода. Уран-свинцовый метод применяют для датировки объектов с возрастом порядка сотен миллионов лет.

Иногда в дополнение к этому методу используют распад изотопа тория $^{232}_{90}\text{Th}$ (**уран-торий-свинцовый метод**). Чаще всего для определения возраста уран-свинцовым методом применяют кристаллы циркона — минерала, обладающего большой прочностью и устойчивостью к химическим воздействиям. Поскольку свинец — конечный продукт радиоактивного распада урана, то чем больше содержание его атомов в кристалле по отношению к урану, тем старше циркон.

Возраст образца может быть определён и по соотношению концентраций изотопов одного только свинца (без учёта изотопов урана). Такой метод называют **свинцев-свинцовым**. С его помощью, например, в 1953 г. геохимик из Чикагского университета Клэр Кэмерон Паттерсон (1922—1955) сумел вычислить возраст Земли, оценив его в 4,55 млрд лет. Это стало одним из выдающихся научных достижений XX в.

§ 67

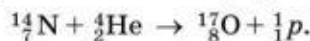
ИСКУССТВЕННОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ АТОМНЫХ ЯДЕР. ПРОТОННО-НЕЙТРОННАЯ МОДЕЛЬ АТОМНОГО ЯДРА

ИСКУССТВЕННОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ АТОМНЫХ ЯДЕР. Впервые искусственное превращение ядер было осуществлено Резерфордом в 1919 г. В силу того что ядро весьма устойчиво и ни высокие температуры, ни давления, ни электромагнитные поля не вызывают превращения элементов и не влияют на скорость радиоактивного распада, Резерфорд предположил, что для разрушения или преобразования ядра нужна очень большая энергия. Наиболее подходящим носителем большой энергии в то время были α -частицы, вылетающие из ядер при радиоактивном распаде.

Первым ядром, подвергшимся искусственному преобразованию, стало ядро азота $^{14}_7\text{N}$. Бомбардируя его α -частицами большой энергии, испускаемыми радием, Резерфорд обнаружил появление протонов — ядер атома водорода. Спустя несколько лет превращение ядра атома азота удалось наблюдать в камере Вильсона. Примерно одна α -частица из 50 000, испу-



ценных радиоактивным препаратом в камере, захватывается ядром атома азота, что приводит к испусканию протона (${}_1^1p$). При этом ядро атома азота превращается в ядро изотопа кислорода:



Данное превращение атомных ядер называют *ядерной реакцией*.

Ядерными реакциями называют превращения атомных ядер при их взаимодействии с элементарными частицами или друг с другом.

На рисунке 11.10 показана одна из фотографий рассмотренного процесса. Слева видна характерная «вилка» — разветвление трека. Жирный след принадлежит ядру атома кислорода, а тонкий — протону. Остальные α -частицы не претерпевают столкновений с ядрами, и их треки прямолинейны.

Другими исследователями были обнаружены превращения ядер атомов фтора, натрия, алюминия и др. под влиянием α -частиц.

Существенно, что кинетическая энергия α -частицы не равна сумме кинетических энергий протона и нового ядра, возникшего в результате превращения. Реакция идёт с поглощением кинетической энергии. Часть кинетической энергии (примерно $1,2 \cdot 10^6$ эВ) переходит во внутреннюю энергию вновь образовавшегося ядра. Но аналогичная реакция расщепления ядра атома алюминия приводит к выделению кинетической энергии: кинетическая энергия продуктов реакции больше кинетической энергии α -частицы, бомбардировавшей ядро алюминия, на 400 000 эВ. Уже эти наблюдения показали, что запасы энергии внутри атомных ядер исключительно велики, и нужно только научиться эту энергию извлекать и использовать.

Ядерные реакции происходят, когда частицы вплотную приближаются к ядру. Одноимённо заряженные частицы отталкиваются друг от друга. Поэтому сближение положительно заряженных частиц с ядрами (или ядер друг с другом) возможно, если этим частицам (или ядрам) сообщена большая кинетическая энергия. Эта энергия сообщается протонам, ядрам дейтерия (дейтронам), α -частицам и другим более тяжёлым ядрам с помощью ускорителей элементарных частиц и ионов.



Рис. 11.10

ОТКРЫТИЕ НЕЙТРОНА. В начале 1930-х гг. были экспериментально обнаружены неизвестные ранее лучи, которые назвали бериллиевым излучением.

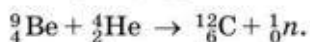
ем. Оно возникало при бомбардировке бериллия α -частицами.

Французские учёные Ирен Жолио-Кюри (1897—1956) и Фредерик Жолио-Кюри (1900—1958) обнаружили, что если на пути излучения бериллия поставить парафиновую пластину, то ионизирующая способность этого излучения резко увеличивается. Они справедливо предположили, что излучение бериллия выбивает из парафиновой пластины протоны, имеющиеся в большом количестве в этом водородсодержащем веществе.

С помощью камеры Вильсона (схема опыта приведена на рис. 11.11) Жолио-Кюри обнаружили эти протоны и по длине свободного пробега оценили их энергию. Если допустить, что протоны ускорялись в результате столкновения с γ -квантами, то энергия этих квантов должна быть огромной — около 55 МэВ.

В 1932 г. ученик Резерфорда — английский физик Джеймс Чедвик (1891—1974) наблюдал в камере Вильсона треки ядер азота, испытавших столкновение с бериллиевым излучением. По его оценке, энергия γ -квантов, способных сообщать ядрам скорость, соответствующую наблюдениям, должна была составлять 90 МэВ. Аналогичные наблюдения треков ядер аргона привели к цифре 150 МэВ. Стало очевидным, что предположение об излучении бериллием γ -квантов несостоятельно. Из бериллия под действием α -частиц вылетают какие-то достаточно тяжёлые частицы, так как только при столкновениях с тяжёлыми частицами протоны или ядра атомов азота и аргона могли получить ту большую энергию, которая наблюдалась. Поскольку эти частицы обладали большой проникающей способностью и непосредственно не ионизировали газ, то, следовательно, они были электрически нейтральными. Ведь заряженная частица сильно взаимодействует с веществом и поэтому быстро теряет свою энергию. Новая частица была названа *нейтроном*.

При столкновении α -частиц с ядрами атомов бериллия происходит следующая реакция:



Здесь ${}^1_0\text{n}$ — символ нейтрона; его заряд равен нулю, а относительная атомная масса равна приблизительно единице.

Согласно современным данным, нейтрон имеет массу, равную $1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг.

ПРОТОННО-НЕЙТРОННАЯ МОДЕЛЬ ЯДРА. После того как в опытах Чедвика был открыт нейтрон, российский фи-



Рис. 11.11



ДЖ. ЧЕДВИК

зик Дмитрий Дмитриевич Иваненко (1904—1994) и В. Гейзенберг предложили *протонно-нейтронную модель ядра*. Она была подтверждена последующими исследованиями ядерных превращений и в настоящее время является бесспорной. Согласно протонно-нейтронной модели, *ядра состоят из элементарных частиц двух сортов: протонов и нейтронов*. Число протонов в ядре равно числу электронов в атомной оболочке, так как в целом атом нейтрален.

Следовательно, число протонов в ядре равно атомному номеру Z элемента в таблице Д. И. Менделеева.

Сумму числа протонов Z и числа нейтронов N в ядре называют массовым числом A .

$$A = Z + N.$$

При ядерных реакциях выполняются закон сохранения электрического заряда, энергии и импульса.

При любой ядерной реакции выполняется закон *сохранения массового числа*.

Сумма массовых чисел частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме массовых чисел частиц, являющихся продуктами этой ядерной реакции.

Так как массы протона и нейтрона близки друг к другу, то массовое число равно округлённой до целого числа относительной атомной массе элемента. Ядра изотопов имеют одно и то же значение Z , но различные массовые числа A , т. е. различное число нейтронов N . Для протонов и нейтронов часто используют термин «*нуклоны*», т. е. ядерные частицы.

-  1. Как было осуществлено искусственное превращение атомных ядер? 2. Что называют ядерными реакциями? 3. Почему для протекания ядерных реакций необходимо сблизить взаимодействующие частицы на очень малые расстояния? 4. Как был открыт нейтрон? 5. Что называют массовым числом? 6. Сформулируйте закон сохранения массового числа.

-  1. Бомбардируя атомы бора ${}^{11}_5\text{B}$ быстрыми протонами, в камере Вильсона получили три почти одинаковых следа частиц, направленных в разные стороны. Какие это частицы?
2. Почему α -частицы, испускаемые радиоактивными препаратами, не могут вызвать ядерных реакций в тяжёлых химических элементах?
3. Если нуклоны способны притягиваться друг к другу, то почему же все ядра до сих пор не слились в одно гигантское ядро?



УПРАЖНЕНИЯ

1. Назовите химический элемент, в атомном ядре которого содержится:
а) $7p + 7n$; б) $51p + 71n$; в) $101p + 155n$ нуклонов.
2. Во сколько раз меньше нейтронов содержит ядро атома азота $^{14}_7\text{N}$, чем ядро цинка $^{65}_{30}\text{Zn}$?
3. Сколько протонов и нейтронов содержит ядро изотопа $^{27}_{13}\text{Al}$: а) в количестве 1 моль; б) массой 1 г?
4. При бомбардировке изотопа железа $^{56}_{26}\text{Fe}$ нейтронами образуется β -радиоактивный изотоп марганца с атомной массой 56. Запишите реакцию получения искусственно радиоактивного марганца и реакцию происходящего с ним β -распада.
5. Запишите недостающие обозначения в ядерных реакциях:
а) $^{239}_{94}\text{Pu} + ^4_2\text{He} \rightarrow ? + ^1_0n$; в) $^6_3\text{Li} + ^1_1p \rightarrow ? + ^4_2\text{He}$;
б) $? + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{10}_6\text{B} + ^1_0n$; г) $^{14}_7\text{N} + ? \rightarrow ^{15}_8\text{O} + \gamma$.



Это любопытно...

Интересные факты

Широкое применение для определения возраста древних предметов органического происхождения (древесины, древесного угля, тканей и т. д.) получил *радиоуглеродный метод* (радиоуглеродная датировка, метод радиоуглеродного анализа). Его автором является американский учёный Уиллард Либби (1908—1980), который за эту разработку был удостоен Нобелевской премии по химии 1960 г.

В растениях всегда имеется β -радиоактивный изотоп углерода $^{14}_6\text{C}$ с периодом полураспада $T = 5700$ лет. Он образуется в атмосфере Земли в небольшом количестве из азота под действием нейтронов: $^1_0n + ^{14}_7\text{N} \rightarrow ^{14}_6\text{C} + ^1_1p$.

Нейтроны возникают за счёт ядерных реакций, вызванных быстрыми частицами, которые проникают в атмосферу из космоса (космические лучи). Соединяясь с кислородом, этот углерод образует углекислый газ, поглощаемый растениями, а через них и животными. После гибели организма пополнение его радиоактивным углеродом прекращается. Имеющееся же количество этого изотопа убывает вследствие радиоактивности. Определяя процентное содержание радиоактивного углерода в органических остатках, можно определить их возраст, если он лежит в пределах от 1000 до 50 000 и даже до 100 000 лет.

Радиоуглеродный метод был успешно использован при датировке таких археологических находок, как древесные остатки, найденные на месте шумерских городов, образцы древесного угля из Стоунхенджа, берестяные грамоты Великого Новгорода, древнеегипетские мумии и др.

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЯДЕРНЫХ СИЛ. Атомные ядра весьма устойчивы, следовательно, протоны и нейтроны должны удерживаться внутри ядра силами, причём очень большими. Сразу же можно сказать, что это не гравитационные силы, которые слишком слабы. Устойчивость ядра не может быть объяснена и действием электромагнитных сил, так как между одноимённо заряженными протонами действуют электрические силы отталкивания, а нейтроны лишены электрического заряда. Это означает, что между нуклонами действуют особые силы, которые называют *ядерными*.

Какими основными свойствами обладают ядерные силы? Они примерно в 100 раз превосходят электромагнитные. Ядерные силы — самые мощные силы из всех, которыми располагает природа. Поэтому взаимодействие нуклонов часто называют *сильным взаимодействием*. Это особый тип взаимодействия, присущий многим элементарным частицам наряду с электромагнитными взаимодействиями.

Другая важная особенность ядерных сил — это их короткодействующий характер. Электромагнитные силы сравнительно медленно убывают с расстоянием. Ядерные силы заметно проявляются, как показали опыты Резерфорда по рассеянию α -частиц ядрами, лишь на расстояниях около 10^{-13} см. Это и есть размер ядра — именно на таком расстоянии друг от друга нуклоны удерживаются ядерными силами.

Кроме того, силы ядерного взаимодействия между нуклонами не зависят от электрического заряда частиц, входящих в состав атомного ядра, и одинаковы для любой пары нуклонов (протон — протон, протон — нейтрон, нейтрон — нейтрон). Это свойство ядерных сил называют зарядовой независимостью.

Отметим также, что каждый нуклон в ядре взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов того же ядра. В этом состоит свойство насыщения ядерных сил.

Ядерные силы имеют *обменный характер*. Взаимодействие нуклонов внутри ядра обусловлено тем, что они обмениваются какими-то частицами, являющимися переносчиками взаимодействия. Первым к такому заключению пришёл в 1935 г. японский физик Хидэки Юкава (1907—1981). Эти частицы (их назвали π -мезонами* или *пионами*) были открыты в 1947 г. группой исследователей под руководством английского учёного Сесила Пауэлла (1903—1969). Оказалось, что существуют π -мезоны трёх сортов: положительно заряженные, отрицательно заряженные и нейтральные. Масса нейтрального π^0 -мезона равна $264,1m_e$, а положительных и отрицательных π -мезонов — $273,1m_e$.

* От греч. *мезос* — средний.

Все π -мезоны активно участвуют в ядерных взаимодействиях. Но лишь π^0 -мезонами свободно обмениваются как протоны, так и нейтроны, π^+ -мезон виртуально может быть испущен только протоном, а поглощён — только нейтроном, π^- -мезоны, напротив, могут испускаться только нейтронами, а поглощаться — только протонами. При обмене заряженными π -мезонами протон и нейтрон превращаются друг в друга. Обмен пионами между нуклонами приводит к появлению ядерных сил притяжения между ними.

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР. Важнейшую роль в ядерной физике играет понятие *энергии связи ядра*, т. е. энергии, которая необходима для полного расщепления ядра на отдельные частицы. На основании закона сохранения энергии можно привести определение данной физической величины.

Энергия связи ядра равна энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц.

Измерения масс атомных ядер показывают, что масса ядра $M_{\text{я}}$ всегда меньше суммы масс m_p и m_n составляющих его протонов и нейтронов:

$$M_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n.$$

Разность масс частиц, образующих ядро, и массы ядра называют *дефектом массы* ΔM :

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}.$$

В частности, для гелия масса ядра на один процент меньше суммы масс двух протонов и двух нейтронов. Соответственно для одного моля гелия $\Delta M = 0,286$ г. Уменьшение массы при образовании ядра из частиц означает, что при этом уменьшается энергия этой системы частиц на значение энергии связи $E_{\text{св}}$:

$$E_{\text{св}} = \Delta M c^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}})c^2.$$

Но что при этом происходит с энергией связи $E_{\text{св}}$ и массой ΔM ? При образовании ядра частицы за счёт действия ядерных сил на малых расстояниях устремляются с огромным ускорением друг к другу. Излучаемые при этом γ -кванты обладают энергией $E_{\text{св}}$ и массой

$$\Delta M = \frac{E_{\text{св}}}{c^2}.$$

О том, насколько велика энергия связи, можно судить по такому примеру: образование 4 г гелия сопровождается выделением такой же энергии, что и сгорание 1,5—2 вагонов каменного угля.

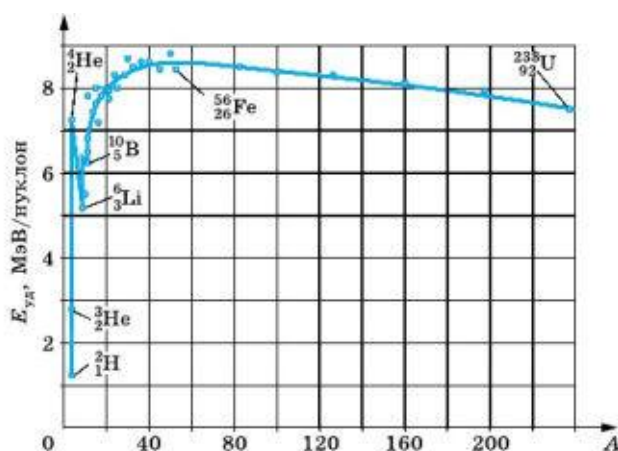


Рис. 11.12

УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНОГО ЯДРА. Важную информацию о свойствах ядер содержит экспериментально полученная зависимость *удельной энергии связи*^{*}, т. е. энергии связи, приходящейся на один нуклон в ядре, от массового числа A . Другими словами, удельная энергия связи равна той энергии, которую нужно сообщить каждому нуклону атомного ядра,

$$E_{уд} = \frac{E_{св}}{A}.$$

Из графика зависимости удельной энергии связи от массового числа (рис. 11.12) видно, что, не считая самых лёгких ядер, удельная энергия связи примерно постоянна и равна 8 МэВ/нуклон. Отметим, что энергия связи электрона с ядром в атоме водорода, равная энергии ионизации, почти в миллион раз меньше. Максимальную удельную энергию связи (8,6 МэВ/нуклон) имеют элементы с массовыми числами от 50 до 60 (см. рис. 11.12), т. е. железо и близкие к нему по порядковому номеру элементы. Ядра этих элементов наиболее устойчивы.

У тяжёлых ядер удельная энергия связи уменьшается за счет растущей с увеличением Z энергии кулоновского отталкивания протонов.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ВЫХОД ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ. В соответствии с законом сохранения энергии изменение кинетической энергии в процессе ядерной реакции равно изменению энергии покоя участвующих в реакции ядер и частиц.

^{*} Если измерить массу в атомных единицах массы ($1 \text{ а. е. м.} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$) и использовать формулу Эйнштейна, то можно определить энергетический эквивалент массы: 1 а. е. м. эквивалентна 931,5 МэВ.

Энергетическим выходом ядерной реакции называют разность энергий покоя ядер и частиц до реакции и после реакции.

Он равен также изменению кинетической энергии частиц — участников реакции. Если кинетическая энергия ядер и частиц после реакции больше, чем до реакции, то говорят о *выделении энергии*. В противном случае реакция идёт с *поглощением энергии*.



1. Укажите основные свойства ядерных сил.
2. Какие частицы являются переносчиками ядерного (сильного) взаимодействия?
3. Что понимают под энергией связи атомных ядер?
4. С чем связано возникновение дефекта массы?
5. Какие химические элементы обладают: а) наименьшей; б) наибольшей удельной энергией связи ядра (см. рис. 11.12)?
6. Как можно определить энергетический выход ядерных реакций?



1. На рисунке 11.13 представлены треки электрона и позитрона, полученные в камере Вильсона. Камера находилась в магнитном поле, направленном от вас перпендикулярно рисунку. Какой из треков принадлежит электрону, а какой — позитрону? Какая частица имеет большую кинетическую энергию?
2. Чем различаются ядра изотопов хлора: $^{35}_{17}\text{Cl}$ и $^{37}_{17}\text{Cl}$?
3. На рисунке 11.14 приведена схема треков частиц в камере Вильсона при захвате α -частицы ядром азота. а) Какие частицы образуют прямолинейные треки? б) Какой ядерной реакции соответствует образование «вилки» на конце трека α -частицы и какие частицы создадут тонкую (и длинную) и жирную (и короткую) ветви вилки?



Рис. 11.13



Рис. 11.14



УПРАЖНЕНИЯ

1. Определите дефект массы ядер изотопов: а) ^6_3Li ; б) ^3_1H ; в) $^{10}_5\text{B}$. Выразите ответ в атомных единицах массы и килограммах.
2. Дефект массы ядра изотопа лития ^7_3Li $\Delta M = 0,0699 \cdot 10^{-27}$ кг. Определите энергию связи и удельную энергию связи атомного ядра.
3. Найдите энергию связи и удельную энергию связи для ядер: а) ^4_2He ; б) $^{12}_6\text{C}$; в) $^{15}_7\text{N}$; г) $^{235}_{92}\text{U}$.



4. Какую энергию нужно затратить, чтобы удалить нуклон из ядра изотопа углерода $^{13}_6\text{C}$?
5. Для каждой из ядерных реакций определите, происходит поглощение или выделение энергии. Найдите энергетический выход ядерной реакции.
- а) $^9_4\text{Be} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^{10}_5\text{B} + ^1_0\text{n}$; б) $^{14}_7\text{N} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1\text{H}$.



§ 69

ЦЕПНЫЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ. ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР

ОТКРЫТИЕ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР УРАНА. Деление ядер урана было обнаружено в 1938 г. немецкими учёными Отто Ганом (1879—1968) и Фрицем Штрассманом (1902—1980). Они установили, что при бомбардировке урана нейтронами возникают химические элементы средней части таблицы Менделеева: барий, криптон и др. Правильное объяснение данного явления, а именно как деления ядра урана, захватившего нейтрон, было дано в начале 1939 г. австрийским учёным Лизой Мейтнер (1878—1968) и английским физиком Отто Фришем (1904—1979).

Возможность деления тяжёлых ядер можно объяснить с помощью графика зависимости удельной энергии связи от массового числа A (см. рис. 11.12). Удельная энергия связи ядер атомов, занимающих в таблице Д. И. Менделеева последние места ($A \approx 200$), примерно на 1 МэВ/нуклон меньше удельной энергии связи в ядрах элементов, находящихся в середине таблицы Д. И. Менделеева ($A \approx 100$). Поэтому процесс деления тяжёлых ядер на ядра элементов средней части этой таблицы является энергетически выгодным. Система после деления переходит в состояние с минимальной внутренней энергией.

При делении ядра энергия связи, приходящаяся на каждый нуклон, увеличивается на 1 МэВ, и общая выделяющаяся энергия составляет около 200 МэВ. Большая часть этой энергии (168 МэВ) приходится на кинетическую энергию осколков.

ЦЕПНАЯ ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ. Любой из нейтронов, вылетающих из ядра в процессе деления, может, в свою очередь, вызвать деление соседнего ядра, которое также испускает нейтроны, способные вызвать дальнейшее деление. В результате число делящихся ядер очень быстро увеличивается, возникает *цепная ядерная реакция*.

Цепной ядерной реакцией называют реакцию, в которой вызывающие её частицы (нейтроны) образуются как продукты этой же реакции.

Цепная ядерная реакция сопровождается выделением огромной энергии. Например, при делении каждого ядра урана выделяется около

200 МэВ. При полном же делении всех ядер, имеющихся в 1 г урана, выделяется энергия $2,3 \cdot 10^4$ кВт·ч. Это эквивалентно энергии, получаемой при сгорании 3 т угля или 2,5 т нефти! Но для осуществления цепной ядерной реакции нельзя использовать любые ядра, делящиеся под влиянием нейтронов. В силу ряда причин из ядер, встречающихся в природе, пригодны лишь ядра изотопа урана с массовым числом 235.

Естественный уран состоит в основном из двух изотопов: ${}_{92}^{235}\text{U}$ и ${}_{92}^{238}\text{U}$. Но изотоп ${}_{92}^{235}\text{U}$ составляет всего 1/140 долю от более распространённого изотопа ${}_{92}^{238}\text{U}$. Ядра ${}_{92}^{235}\text{U}$ делятся под влиянием как быстрых, так и медленных нейтронов. Ядра ${}_{92}^{238}\text{U}$ могут делиться лишь под влиянием нейтронов с энергией более 1 МэВ. Такую энергию имеют примерно 60% нейтронов, появляющихся при делении. Однако примерно лишь один нейтрон из пяти производит деление ${}_{92}^{238}\text{U}$. Остальные нейтроны захватываются этим изотопом, не производя деления. В результате цепная реакция с использованием чистого изотопа ${}_{92}^{238}\text{U}$ невозможна. Поэтому для получения достаточного количества изотопа ${}_{92}^{235}\text{U}$ в чистом виде природный уран обогащают. При этом процентное содержание данного изотопа увеличивается до необходимой величины.

Скорость цепной ядерной реакции деления ядер характеризуют *коэффициентом размножения нейтронов*.

Коэффициентом размножения нейтронов называют отношение числа нейтронов в каком-либо поколении к числу нейтронов предшествующего поколения.

Под сменой поколений понимают деление ядер, при котором поглощаются нейтроны старого поколения и рождаются новые нейтроны.

Если $k \geq 1$, то число нейтронов увеличивается с течением времени или остаётся постоянным, при этом происходит цепная ядерная реакция.

При $k < 1$ число нейтронов убывает и цепная ядерная реакция невозможна.

Коэффициент размножения определяется следующими факторами:

1. захватом медленных нейтронов ядрами ${}_{92}^{235}\text{U}$ с последующим делением и захватом быстрых нейтронов ядрами ${}_{92}^{235}\text{U}$ и ${}_{92}^{238}\text{U}$ также с последующим делением;
2. захватом нейтронов ядрами урана без деления;
3. захватом нейтронов продуктами деления, замедлителем и конструктивными элементами установки;
4. вылетом нейтронов из делящегося вещества наружу.

Лишь первый процесс сопровождается увеличением числа нейтронов (в основном за счёт деления ${}_{92}^{235}\text{U}$). Все остальные приводят к их убыли. Цепная реакция в чистом изотопе ${}_{92}^{238}\text{U}$ невозможна, так как в этом случае $k < 1$.

Для стационарного течения цепной реакции коэффициент размножения нейтронов $k = 1$. Это равенство необходимо поддерживать с большой точностью. Уже при $k = 1,01$ почти мгновенно произойдёт взрыв.

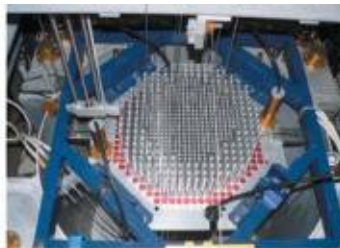


Рис. 11.15

ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР. Деление ядер урана для получения энергии используют в *ядерном реакторе* (рис. 11.15).

Ядерным (или атомным) реактором называют устройство, в котором осуществляется управляемая реакция деления ядер.

Ядра урана, особенно ядра изотопа $^{235}_{92}\text{U}$, наиболее эффективно захватывают медленные нейтроны (рис. 11.16). Вероятность захвата медленных нейтронов с последующим делением ядер в сотни раз больше, чем быстрых. Поэтому в ядерных реакторах, работающих на естественном уране, используются замедлители нейтронов для повышения коэффициента размножения нейтронов.

На рисунке 11.17 приведена схема энергетической установки с ядерным реактором. Основными элементами ядерного реактора являются: ядерное горючее ($^{235}_{92}\text{U}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$, $^{238}_{92}\text{U}$ и др.), замедлитель нейтронов (тяжёлая или обычная вода, графит и др.), теплоноситель для вывода энергии, образующейся при работе реактора (вода, жидкий натрий и др.), и устройство для регулирования скорости реакции (вводимые в рабочее пространство реактора регулирующие стержни, содержащие кадмий или бор — вещества, которые хорошо поглощают нейтроны). Снаружи реактор окружают защитной оболочкой, изготовленной из бетона с железным наполнителем, которая задерживает γ -излучение и нейтроны.

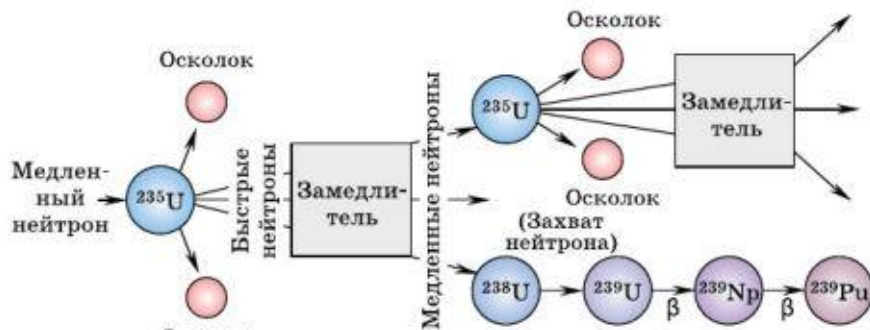


Рис. 11.16



Рис. 11.17

Лучшим замедлителем нейтронов является тяжёлая вода. Хорошим замедлителем считается также графит, ядра которого не поглощают нейтроны. Коэффициент размножения k может стать равным единице лишь при условии, что размеры реактора и соответственно масса урана превышают некоторые критические значения.

Критической массой называют наименьшую массу делящегося вещества, при которой может протекать цепная ядерная реакция.

Для чистого (без замедлителя) изотопа ${}_{92}^{235}\text{U}$, имеющего форму шара, критическая масса приблизительно равна 50 кг. При этом радиус шара равен примерно 9 см (уран — очень тяжёлое вещество). Применяя замедлители нейтронов и отражающую нейтроны оболочку из бериллия, удалось снизить критическую массу до 250 г.

Управление реактором осуществляется при помощи регулирующих стержней. При выдвинутых из активной зоны реактора стержнях $k > 1$, а при полностью вдвинутых стержнях $k < 1$. Вдвигая стержни внутрь активной зоны, можно в любой момент времени приостановить развитие цепной ядерной реакции.

Энергия, выделяющаяся в результате деления ядер, используется для образования пара в парогенераторе. Пар вращает паровую турбину, которая совмещена с осью электрогенератора. Генератор вырабатывает электрическую энергию. Отработанный пар из паровой турбины поступает в конденсатор, где охлаждается и конденсируется (превращается в воду). Затем вода снова поступает в парогенератор, и процесс повторяется. Такой реактор называют *реактором на медленных нейтронах*.

К настоящему времени построены реакторы на быстрых нейтронах, работающие без замедлителя. Так как вероятность деления, вызванного быстрыми нейтронами, мала, то такие реакторы не могут работать на естественном уране. Цепную ядерную реакцию можно поддерживать лишь в обогащённой смеси, содержащей не менее 15% изотопа $^{235}_{92}\text{U}$. Преимущество реакторов на быстрых нейтронах состоит в том, что при их работе образуется значительное количество плутония, который затем можно использовать в качестве ядерного топлива. Эти реакторы называют *реакторами-размножителями*, так как они воспроизводят делящийся материал.



1. Почему возможно деление тяжёлых ядер? 2. Каких значений может достигать энергия, выделяющаяся при делении ядра? 3. Какую ядерную реакцию называют цепной? 4. Что характеризует коэффициент размножения нейтронов? Что будет происходить, если: а) $k \geq 1$; б) $k < 1$? 5. Опишите основные элементы ядерного реактора, используя рисунок 11.17. 6. Что называют критической массой?



На рисунке 11.18 показана схема устройства ядерного реактора. Ответьте на следующие вопросы: а) К какому типу реакторов относится этот реактор? б) Что является замедлителем нейтронов? Может ли реактор работать без замедлителя нейтронов? в) Что является отражателем нейтронов? Может ли реактор работать без отражателя нейтронов? г) Может ли реактор работать без управляющих стержней? д) Для чего нужен теплоноситель? Какие вещества используют в качестве теплоносителя? Может ли реактор работать без теплоносителя?



Рис. 11.18



УПРАЖНЕНИЯ

1. Подводная лодка «Наутилус» (США) имеет мощность топливных установок 14,7 МВт и КПД, равный 25%. Топливом является обогащённый изотоп $^{235}_{92}\text{U}$ массой 1 кг. При делении его ядер выделяется энергия $6,9 \cdot 10^{13}$ Дж. Определите запас горючего, необходимого для плавания лодки в течение года.
2. При единичном акте деления ядра $^{235}_{92}\text{U}$ выделяется энергия, равная 200 МэВ. За какой промежуток времени первоначальная загрузка урана в реакторе, равная 10 кг, уменьшится на 2%? Мощность реактора постоянна и равна 1 МВт.

Из истории развития физики и техники

Впервые цепная ядерная реакция деления урана была осуществлена в Чикагском университете (США) коллективом учёных под руководством итальянского физика Энрико Ферми (1901—1954) в декабре 1942 г. Построенный ядерный реактор (он был назван «Чикагской поленницей» или CP-1) состоял из графитовых блоков, между которыми были расположены шары из природного урана и его диоксида. Быстрые нейтроны, появляющиеся в результате деления ядер $^{235}_{92}\text{U}$, замедлялись графитом, а затем вызывали новые деления ядер.

В нашей стране первый ядерный реактор (Ф-1) был запущен 25 декабря 1946 г. научно-исследовательской группой, которую возглавлял Игорь Васильевич Курчатов (1903—1960). Реактор Ф-1 был собран из графитовых блоков и имел форму шара диаметром примерно 7,5 м. В центральной его части по отверстиям в графитовых блоках были размещены урановые стержни. Реактор Ф-1, как и реактор CP-1, не имел системы охлаждения, поэтому обладал очень малой мощностью (его средняя мощность составляла всего 20 Вт). Результаты исследований на реакторе Ф-1 послужили основой для разработки более сложных по конструкции промышленных ядерных реакторов.

В 1954 г. в г. Обнинске (Калужская область) была введена в действие первая атомная электростанция (АЭС) мощностью 5 МВт. Энергия, выделяющаяся в ядерном реакторе, использовалась для превращения воды в пар, который вращал связанную с генератором турбину. Наиболее эффективное использование изотопов урана достигается в реакторах на быстрых нейтронах, в которых обеспечивается также воспроизводство нового ядерного горючего (плутония). В 1980 г. на Белоярской АЭС состоялся пуск первого в мире реактора на быстрых нейтронах мощностью 600 МВт.



Э. ФЕРМИ



И. В. КУРЧАТОВ

ДОЗА ИЗЛУЧЕНИЯ. Даже слабые излучения способны нанести живым клеткам существенные повреждения и вызвать опасные заболевания (например, лучевую болезнь). При большой интенсивности излучения живые организмы погибают. Опасность излучений усугубляется тем, что они не вызывают никаких болевых ощущений даже при смертельных дозах. Сильное влияние оказывает облучение на наследственность, поражая гены в хромосомах.

Воздействие ионизирующих излучений на живые организмы характеризуется *поглощённой дозой излучения*.

Поглощённой дозой излучения D называют отношение поглощённой энергии E ионизирующего излучения к массе m облучаемого вещества.

$$D = \frac{E}{m}.$$

В СИ поглощённую дозу излучения выражают в *греях** (Гр). 1 Гр равен поглощённой дозе излучения, при которой облучённому веществу массой 1 кг передаётся энергия ионизирующего излучения 1 Дж: 1 Гр = 1 Дж/кг.

На практике используется и внесистемная единица поглощённой дозы излучения — *рад*. В практической дозиметрии 1 рад $\approx$ 0,01 Гр.

Отношение поглощённой дозы излучения к времени облучения называют мощностью поглощённой дозы.

$$P = \frac{D}{t}.$$

В СИ единицей мощности поглощённой дозы является *грей в секунду* (Гр/с).

При одной и той же дозе поглощённого излучения биологическое действие разных видов ионизирующего излучения на живые организмы и растения неодинаково. Для характеристики различия биологического действия ионизирующего излучения используют *коэффициент относительной биологической активности*, или *коэффициент качества* k .

Коэффициент качества β -излучения, рентгеновского и γ -излучения принят равным 1. Коэффициент качества для протонов с кинетической

* Эта единица названа в честь английского учёного Льюиса Грея (1905—1965).

энергией 0,1—10 МэВ примерно равен 10, для α -частиц с энергией 10 МэВ — 20.

Для оценки действия ионизирующего излучения на живые организмы была введена физическая величина — *эквивалентная доза*.

Эквивалентная доза H — величина, равная произведению поглощённой дозы излучения D на коэффициент качества k .

$$H = Dk.$$

Единицей эквивалентной дозы в СИ является *зиверт** (1 Зв). 1 Зв равен эквивалентной дозе, при которой доза поглощённого γ -излучения равна 1 Гр.

Естественный фон радиации (космические лучи, радиоактивность окружающей среды, в частности, её источниками являются радон и продукты его распада, искусственные источники радиации и др.) составляет за год дозу излучения около $2 \cdot 10^{-3}$ Гр на человека. Международная комиссия по радиационной защите установила для лиц, работающих с излучением, предельно допустимую дозу за год, равную 0,05 Гр. Доза излучения в 3—10 Гр, полученная за короткое время, является смертельной.

ЗАЩИТА ОТ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ. При работе с любым источником радиации необходимо принимать меры по защите людей, которые могут попасть в опасную зону действия излучения.

Самый простой метод защиты — это удаление от источника радиоактивного излучения на достаточно большое расстояние. Даже без учёта поглощения в воздухе интенсивность радиации убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника.

Когда удаление от источника излучения на достаточно большое расстояние невозможно, для защиты от излучения устанавливают преграды из поглощающих материалов. Наиболее сложна защита от γ -лучей и нейтронов из-за их большой проникающей способности. Лучшим поглотителем γ -лучей является свинец. Медленные нейтроны хорошо поглощаются бором и кадмием. Быстрые нейтроны предварительно замедляются с помощью графита.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ. Ядерной энергетике, как и многим другим отраслям промышленности, присущи вредные или опасные факторы воздействия на окружающую среду. Наибольшую опасность представляет собой радиоактивное загрязнение.

Оно может возникнуть в результате аварии на ядерном реакторе. Приведём лишь несколько примеров.

* Эта единица названа в честь шведского учёного Рольфа Зиверта (1896—1966), изучавшего воздействие радиоактивных излучений на биологические организмы.

Взрыв четвёртого энергоблока на Чернобыльской АЭС (26 апреля 1986 г.) привёл к выбросу в атмосферу радиоактивных веществ. Вследствие аварии на АЭС Фукусима-1, произошедшей из-за сильнейшего в истории Японии землетрясения и последовавшего за ним цунами, в 2011 г. произошла колоссальная утечка воды, содержащей радиоактивные вещества. Таким образом, опасность разрушения активной зоны реактора из-за ошибок персонала, просчётов в конструкции реакторов и природных катастроф остаётся реальной. Поэтому принимаются строжайшие меры для снижения этого риска (в частности, разрабатываются автоматические противоаварийные системы).

Сложные проблемы возникают с захоронением радиоактивных отходов и демонтажем отслуживших свой срок АЭС. Срок их службы составляет около 20 лет, после чего восстановление станций из-за многолетнего воздействия радиации на материалы конструкций невозможно. Технология переработки и утилизации радиоактивных отходов осуществляется на специальных заводах и включает разнообразные средства и этапы работы в целях переработки и последующего захоронения отходов.

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ. Радиоактивные изотопы широко используют в науке, технике, медицине, сельском хозяйстве и промышленности. В науке и в производстве применяют *метод меченых атомов*, основанный на том, что химические свойства радиоактивных изотопов не отличаются от свойств нерадиоактивных изотопов тех же элементов. Радиоактивность является своеобразной меткой, с помощью которой можно проследить за поведением элемента при различных химических реакциях и физических превращениях веществ. Метод меченых атомов стал одним из наиболее действенных методов при решении многочисленных проблем биологии, физиологии, медицины и т. д.

В медицине радиоактивные изотопы применяют как в диагностических, так и для терапевтических целей. Радиоактивный натрий, вводимый в небольших количествах в кровь, используется для исследования кровообращения. Размножающиеся клетки в злокачественных (раковых) опухолях более чувствительны к облучению, чем нормальные. На этом основано подавление раковой опухоли γ -лучами радиоактивных препаратов.

Радиоактивные изотопы позволяют судить о диффузии металлов, процессах в доменных печах и т. д. Мощное γ -излучение радиоактивных препаратов используют для исследования внутренней структуры металлических отливок с целью обнаружения в них дефектов.



1. Какую физическую величину называют: а) поглощённой дозой излучения; б) мощностью поглощённой дозы? 2. Приведите примеры источников естественного радиационного фона. 3. Что характеризует коэффициент относительной биологической активности? 4. Как

можно определить эквивалентную дозу? 5. Какие меры предпринимаются для защиты от ионизирующего излучения? 6. Какие существуют экологические проблемы использования АЭС?

§ 71 ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ. ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ. Энергию за счёт ядерных реакций можно получить не только в реакциях деления тяжёлых ядер, но и при соединении лёгких атомных ядер. Масса ядра гелия ${}^4_2\text{He}$ значительно меньше суммы масс двух ядер тяжёлого водорода (${}^2_1\text{H}$ и ${}^3_1\text{H}$), на которые можно разделить ядро гелия. Это означает, что должна выделяться значительная энергия, равная разности энергии связи тяжёлого ядра ${}^4_2\text{He}$ и двух лёгких ядер ${}^2_1\text{H}$ и ${}^3_1\text{H}$. Подобного рода реакции слияния лёгких ядер могут протекать только при очень высоких температурах, поэтому их называют *термоядерными*.

Термоядерные реакции — это реакции слияния лёгких ядер при очень высокой температуре (порядка 10^7 — 10^9 К).

Для слияния ядер необходимо, чтобы они сблизилась на расстояние около 10^{-12} см, т. е. чтобы они попали в сферу действия ядерных сил. Этому сближению препятствует кулоновское отталкивание ядер, которое может быть преодолено лишь за счёт большой кинетической энергии теплового движения ядер. Энергия, которая выделяется при термоядерных реакциях в расчёте на один нуклон, превышает удельную энергию, выделяющуюся при цепных реакциях деления ядер. Так, при слиянии тяжёлого водорода — дейтерия ${}^2_1\text{H}$ — со сверхтяжёлым изотопом водорода — тритием ${}^3_1\text{H}$ — выделяется около 3,5 МэВ на один нуклон. При делении же урана выделяется примерно 1 МэВ энергии на один нуклон.

Энергия излучения Солнца и звёзд имеет термоядерное происхождение. По современным представлениям, на ранней стадии развития звезды она в основном состоит из водорода. Температура внутри звезды столь велика, что в ней протекают реакции слияния протонов с образованием гелия. При слиянии ядер гелия образуются более тяжёлые элементы. Поэтому термоядерные реакции играют важнейшую роль в эволюции химического состава вещества во Вселенной.

УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ (УТС). Термоядерный синтез в форме неуправляемой термоядерной реакции был впервые реализован при взрыве термоядерной бомбы. УТС носит регулируемый характер. Наиболее перспективной в этом отношении является реакция слияния дейтерия с тритием:



В данной реакции выделяется энергия, равная 17,6 МэВ.



УТС возможен при одновременном выполнении двух условий.

1. Температура термоядерного рабочего вещества (плазмы) $T > 10^8$ К.

2. Для того чтобы оценить, будет ли термоядерный синтез в заданном реакторе являться источником энергии (выделяющаяся термоядерная энергия должна быть больше энергии, уносимой из плазмы электромагнитным излучением и потоком уходящих частиц), вводится критерий Лоусона*.

Произведение концентрации n частиц плазмы и времени τ удержания горячей плазмы в рабочем объёме должно превышать определённую величину. Для реакции слияния дейтерия с тритием

$$n\tau > 10^{14} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}.$$

Даже в оптимальных условиях для реактора, работающего на смеси дейтерия и трития, необходимо достижение температур $\sim 2 \cdot 10^8$ К. Кроме того, для плазмы с плотностью $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ должны быть обеспечены секундные времена удержания.

В термоядерном реакторе предполагается наличие плазмы, нагретой до температур в сотни миллионов градусов, и её сохранение в течение времени, достаточного для осуществления термоядерных реакций. Необходимые температуры могут быть достигнуты путём создания в плазме мощных электрических разрядов. Основная трудность состоит в том, чтобы удержать плазму столь высокой температуры внутри установки на протяжении 0,1—1 с. Никакие стенки из вещества здесь не подойдут, так как при столь высокой температуре они превратятся в пар!

В 1951 г. российские учёные Игорь Евгеньевич Тамм (1895—1971) и Андрей Дмитриевич Сахаров (1921—1989) предложили метод удержания высокотемпературной плазмы в ограниченном объёме с помощью очень сильных магнитных полей. На практике он был реализован в таком техническом устройстве, как *токамак* (аббревиатура от ТОроидальная КАмера с МАгнитными Катушками). Он представляет собой вакуумную камеру, на которую намотаны катушки для создания магнитного поля специальной формы. Из камеры сначала откачивают воздух, а затем заполняют её смесью дейтерия и трития. После этого в камере создают вихревое электрическое поле, которое вызывает протекание тока и зажигание плазмы. При этом плазма в токамаке удерживается не стенками камеры, а специально создаваемым магнитным полем.

Отметим, что под руководством Льва Андреевича Арцимовича (1909—1973) в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова в Москве был выполнен цикл исследований, результатом которых стал пуск в 1975 г. крупнейшей в мире термоядерной установки «Токамак-10» (Т-10).

Токамак считается наиболее перспективным устройством для осуществления УТС. Но эта проблема настолько сложна, что самостоятельно с ней не может справиться ни одна страна в мире. Поэтому мировое сообщество

* Он был предложен в 1955 г. английским физиком Джоном Лоусоном (1923—2008).

щество избрало оптимальный путь — разработку Международного термоядерного экспериментального реактора (ITER^{*}).

В его создании участвуют страны Евросоюза, Китай, Россия, США, Япония и др. Цель ITER состоит в создании работающего термоядерного реактора, решении физических и технологических проблем, которые могут при этом возникнуть. Проектирование ITER полностью закончено, и выбрано место его постройки — территория национального исследовательского центра в г. Кадараше (в 60 км от г. Марселя, Франция).

Если освоение УТС в рамках проекта ITER состоится, то это ознаменует наступление новой энергетической эры. Только представьте себе, осуществление УТС на Земле позволит человечеству использовать практически неисчерпаемый источник энергии, а именно воду морей и океанов, содержащую огромные запасы изотопов водорода. Например, при использовании дейтерия, содержащегося в 1 л обычной воды, в реакции термоядерного синтеза выделится столько же энергии, как при сгорании около 350 л бензина!

ЛАЗЕРНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ. Учёными также ведутся работы по реализации УТС за счёт нагрева мишени мощными лазерными импульсами. Термоядерная мишень представляет собой полый стеклянный шарик диаметром 0,1—1 мм с очень тонкими стенками. Шарик заполнен смесью дейтерия и трития. На мишень фокусируются излучения десятков мощнейших лазерных импульсов. В результате такого воздействия оболочка мишени испаряется и разлетается в стороны.

Одновременно внутренние слои мишени, согласно закону сохранения импульса, устремляются к центру. Вещество сжимается и нагревается до температур, при которых возможен термоядерный синтез. В настоящее время разрабатываются проекты лазерных реакторов, работающих в импульсном режиме.



1. Что называют термоядерными реакциями? 2. Почему для протекания термоядерных реакций необходимы высокие температуры?
3. Что является основным источником энергии Солнца и других звёзд? 4. Какая управляемая термоядерная реакция является наиболее перспективной? 5. При каких условиях возможен УТС? 6. Что представляет собой токамак?



УПРАЖНЕНИЯ

1. Для осуществления термоядерного синтеза требуется преодолеть кулоновское отталкивание ядер. Оцените (в МэВ), какой кинетической энергией должны обладать два протона, чтобы сблизиться на расстояние $2 \cdot 10^{-15}$ м. Какой температуре теплового движения соответствует такая кинетическая энергия?

* Аббревиатура от «International Thermonuclear Experimental Reactor».

2. При какой температуре в газообразном дейтерии начнётся следующая термоядерная реакция: ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He}$?
3. Найдите частоту γ -излучения, образующегося при термоядерной реакции: ${}^1_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + \gamma$, если α -частица приобретает энергию 19,7 МэВ.
4. Неподвижное ядро изотопа ${}^7_3\text{Li}$, захватывая протон, распадается на две α -частицы. Определите сумму кинетических энергий и скорости этих частиц. Кинетической энергией протона пренебречь.

§ 72

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ. Под *элементарными частицами* понимают первичные, далее неразложимые частицы, из которых состоит вся материя. Однако неделимость элементарных частиц не означает, что у них отсутствует внутренняя структура. В современной физике термин «элементарные частицы» обычно употребляют для обозначения большой группы мельчайших частиц материи, к которым не относятся атом и его ядро*.

Ещё древние греки предположили, что всё вещество состоит из мельчайших неделимых частиц — атомов (гипотеза Демокрита). К началу 1930 г. элементарными частицами считались протоны и нейтроны, входящие в состав атомного ядра, электроны, образующие электронную оболочку атома, и фотоны (кванты энергии электромагнитного поля). Впоследствии к ним были добавлены нейтрино (электронное) и антинейтрино (они возникают при β -превращениях ядер), а также пионы, которые являются переносчиками сильного взаимодействия.

Исследования космических лучей высоких энергий и эксперименты, проведённые с помощью ускорителей, позволили открыть новые элементарные частицы. Так, в 1950-е гг. сначала в космическом излучении, а затем и в лаборатории была открыта группа так называемых «*странных*» частиц: К-мезонов (каонов) и гиперонов с массами, превышающими массу нуклонов. «Странность» данных частиц заключалась, например, в том, что они всегда рождаются парами, а распадаются поодиночке. В 70-е гг. к семейству элементарных частиц прибавилась группа «*очарованных*» частиц с ещё большими массами. Кроме того, были открыты чрезвычайно короткоживущие частицы со временем жизни порядка 10^{-22} — 10^{-23} с. Эти частицы были названы *резонансами*.

АНТИЧАСТИЦЫ. Существование двойника электрона — позитрона (см. § 64) было предсказано английским физиком Полем Дираком (1902—1984) в 1931 г. Одновременно он показал, что при встрече позитрона с электроном обе частицы должны исчезать, породив фотоны большой энергии.

* За исключением протона.

При этом может происходить и обратный процесс — рождение электронно-позитронной пары, например, при столкновении фотона достаточно большой энергии (его масса должна быть больше суммы масс рождающихся частиц) с ядром.

Таким образом, наиболее важной особенностью элементарных частиц является их способность к взаимным превращениям, при этом они могут как аннигилировать, так и рождаться.

Аннигиляция — явление взаимодействия элементарной частицы с её античастицей, в результате которого они превращаются в γ -кванты (фотоны) электромагнитного поля или другие частицы.

То, что аннигиляция одних частиц и появление других при реакциях между элементарными частицами являются именно *превращением*, а не просто возникновением новой комбинации составных частей старых частиц, обнаруживается именно при аннигиляции пары «электрон — позитрон». Обе частицы обладают определённой массой и электрическими зарядами. Фотоны же, которые при этом рождаются, не имеют зарядов и не обладают массой.

Античастицы противопоставляются частицам именно потому, что при встрече любой частицы с соответствующей античастицей происходит их аннигиляция, т. е. обе частицы исчезают, превращаясь в кванты излучения или другие частицы. Впоследствии античастицы были найдены у π -мезона (антипион π^-), у протона (антипротон), у нейтрона (антинейтрон) и т. д. Экспериментально были получены атомы антиматерии, антитрития и антигелия. Атомы, ядра которых состоят из антинуклонов, а оболочка — из позитронов, образуют *антивещество*. При аннигиляции антивещества с веществом энергия покоя превращается в кинетическую энергию образующихся γ -квантов. Энергия покоя — самый грандиозный и концентрированный резервуар энергии во Вселенной. И только при аннигиляции она полностью высвобождается, превращаясь в другие виды энергии. Поэтому антивещество — самый совершенный источник энергии, который пока ещё не освоен.

Существуют и истинно нейтральные частицы, которые не имеют античастиц. К ним относят, например, фотон и π^0 -мезон.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ. К настоящему времени количество открытых элементарных частиц и их античастиц достигло более 350. Один из возможных вариантов классификации состоит в их расположении по группам в порядке возрастания масс.

Первую группу образует всего одна частица — фотон, имеющий нулевую массу. Во вторую группу входят частицы *лептоны* (от греч. *leptos* — лёгкий). Они не участвуют в сильном взаимодействии. К лептонам относятся 12 частиц, включая их античастицы. При этом имеются три сорта нейтрино: электронное нейтрино рождается вместе с электронами, мюон-

ное нейтрино — вместе с мюонами, таонное нейтрино — вместе с таонами. Особенность нейтрино состоит в том, что они способны превращаться в нейтрино других сортов или антинейтрино. Это свидетельствует о том, что нейтрино обладают ненулевой массой.

Третью группу составляют *адроны* (от греч. *hadros* — большой, сильный) — элементарные частицы, которые участвуют в сильном взаимодействии. Их, в свою очередь, делят на *мезоны* и *барионы*. Наиболее лёгкие из мезонов — π -мезоны: положительные, отрицательные и нейтральные. Как мы уже знаем, пионы являются переносчиками сильного взаимодействия. К группе барионов относят, например, нуклоны — протоны и нейтроны, гипероны и др.

КВАРКИ. В 1964 г. американские физики Марри Гелл-Манн (р. 1929) и Джордж Цвейг (р. 1937) предложили модель, согласно которой все частицы, участвующие в сильных взаимодействиях, построены из более фундаментальных (или первичных) частиц — *кварков*. Экспериментальное подтверждение кварковой структуры нуклонов пришло в 1969 г. из Стэнфордского университета (США), где изучалось рассеяние электронов с энергией 20 ГэВ на протонах и нейтронах. В этих опытах было обнаружено пространственное распределение заряда в этих частицах. С увеличением энергии рассеиваемых частиц (электронов и нейтрино) до 50 МэВ было установлено существование точечных образований в протонах и нейтронах. Так подтвердилась кварковая структура нуклонов.

Особенность кварков состоит в том, что они должны иметь дробные электрические заряды. Первый из них — *u*-кварк имеет заряд $+\frac{2}{3}e$, а *d*- и *s*-кварки имеют одинаковые заряды, равные $-\frac{1}{3}e$. Считается, что все барионы построены из трёх кварков. В состав протона входит два *u*-кварка и один *d*-кварк. Нейтрон составлен из двух *d*-кварков и одного *u*-кварка. В результате заряд протона равен e , а нейтрона — нулю. Античастицы состоят из антикварков. Для объяснения свойств тяжёлых адронов используют ещё *s*- и *c*-, а также *b*- и *t*-кварки. Предполагается, что существует всего 18 кварков и столько же антикварков. Но их не удалось обнаружить в свободном состоянии. В этом состоит ещё одна характерная особенность кварков.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ. Результаты многочисленных теоретических и экспериментальных исследований убедительно показывают, что в природе существует только *четыре типа фундаментальных взаимодействий*, не сводящихся к другим типам. К ним относятся гравитационное, электромагнитное, сильное (или ядерное) и слабое взаимодействия.

Гравитационное взаимодействие наиболее хорошо вам знакомо. Оно происходит между любыми материальными объектами. Именно благодаря гравитационному взаимодействию Земля удерживается на орбите во-

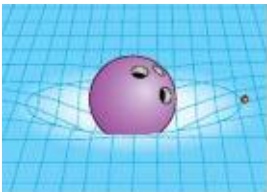


Рис. 11.19

круг Солнца. Масса является мерой инертности тел и одновременно мерой их гравитационного взаимодействия. Согласно общей теории относительности, в отсутствие материи и энергии пространство будет плоским (как гладкий пол). Тысячи лет учёные так себе представляли пространственную структуру нашей Вселенной. Массивное тело, подобное Солнцу, оказывает гравитационное действие на другие тела. Эйнштейн утверждал, что присутствие массивного тела искривляет пространство.

Это искривление влияет на другие тела, движущиеся вблизи Солнца. Используя аналогию с резиновой плёнкой и шаром для боулинга, можно показать, что если поместить на эту плёнку шарик и придать ему начальную скорость, то его траектория будет искривлена, если в центре плёнки присутствует массивный шар для боулинга (рис. 11.19). Если пренебречь силами трения, то шарик будет совершать периодические движения вокруг массивного шара. Именно это влияние кривизны пространства на движение небесных тел мы и называем гравитационным воздействием.

Важно понимать, что гравитационное взаимодействие является очень слабым. Именно поэтому большую трудность на сегодняшний момент представляет экспериментальное подтверждение существования *гравитонов* — переносчиков гравитационного взаимодействия. На малых расстояниях (10^{-15} — 10^{-18} м) действием гравитационных сил обычно пренебрегают.

Электромагнитное взаимодействие происходит между любыми электрическими заряженными частицами. Электромагнитные силы определяют свойства агрегатных состояний вещества и обеспечивают существование атомов, молекул, кристаллов. Заряд частицы играет ту же роль, что и масса в гравитационном взаимодействии, т. е. является мерой электромагнитного взаимодействия. Для того чтобы оценить масштаб электромагнитных сил по сравнению с гравитационными, представьте себе, что вы держите по электрону в каждой руке. Но чтобы сблизить эти две частицы, имеющие одинаковый заряд, придётся преодолеть электромагнитное отталкивание в 10^{42} раз сильнее, чем гравитационное взаимодействие, которое будет способствовать их сближению.

Сильное и слабое взаимодействия являются короткодействующими, т. е. они быстро убывают с расстоянием и играют существенную роль только на субатомных расстояниях — внутри атомных ядер. Именно *сильное взаимодействие* удерживает кварки внутри протонов и нейтронов; оно же удерживает протоны и нейтроны в атомном ядре. Эксперименты показали, что сильное взаимодействие примерно в 1000 раз сильнее электромагнитного и в 100 000 раз сильнее слабого взаимодействия. Переносчиками сильного взаимодействия являются пионы и частицы, называемые *глюонами* (от англ. *glue* — клей). Глюоны как бы склеивают кварки воедино.

В *слабом взаимодействии* участвуют все элементарные частицы, кроме фотонов. Радиус действия слабых сил примерно 10^{-17} м. Примером слабого взаимодействия является, например, бета-распад нейтрона. Переносчиками слабого взаимодействия являются промежуточные векторные бозоны W^+ , W^- и Z^0 , теоретически предсказанные в 70-х гг. XX в. и экспериментально обнаруженные в 1983 г. на ускорителе в центре Европейского совета ядерных исследований (ЦЕРН, Женева, Швейцария).

К настоящему времени создана и признана теория, объединяющая два фундаментальных взаимодействия — слабое и электромагнитное. Она называется единой теорией слабого и электромагнитного (электрослабого) взаимодействий. Кроме того, разработана теоретическая модель, описывающая электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия (так называемая *Стандартная модель*). Учёные надеются, что дальнейшее развитие теории элементарных частиц приведёт к объединению всех фундаментальных взаимодействий, включая и гравитационное. Но это — дело будущего.



1. Что называют элементарными частицами?
2. Назовите наиболее важную особенность элементарных частиц.
3. Приведите примеры: а) античастиц; б) истинно нейтральных частиц.
4. Какие элементарные частицы называют: а) лептонами; б) адронами? Приведите их примеры.
5. Какими особенностями обладают кварки?
6. Какие фундаментальные взаимодействия вам известны? Какие частицы являются их переносчиками?



УПРАЖНЕНИЯ

1. Позитрон и электрон соединяются, образуя два фотона. Считая, что кинетическая энергия электрона и позитрона до их столкновения была ничтожно мала, найдите: а) энергию каждого из возникших фотонов; б) длину волны фотонов.
2. При образовании электрона и позитрона из фотона энергия фотона была равна 2,62 МэВ. Чему была равна в момент возникновения суммарная кинетическая энергия позитрона и электрона?

Это любопытно...

На переднем крае науки

В последнее время большинство элементарных частиц получают и изучают на ускорительных установках на встречных пучках, которые называют *коллайдерами* (от англ. *collide* — сталкиваться). Коллайдер представляет собой вакуумированную кольцевую трубу, в которой навстречу друг другу движутся пучки частиц. В определённых местах они сталкиваются, и там, где это проис-



Рис. 11.20

ходит, находятся детекторы, регистрирующие продукты этого столкновения.

Начиная с 1972 г. в мире было построено около 18 коллайдеров. Некоторые из них уже прекратили своё существование, другие же продолжают работать. В Европе и США имеются два протон-антипротонных коллайдера, самый известный из них — в лаборатории им. Ферми («Тэватрон» с энергией 1 ТэВ). На нём, в частности, в 1995 г. был открыт t -кварк, а также получены атомы антиводорода (1996).

Грандиозной площадкой по проверке основных положений и следствий Стандартной модели является LHC (Large Hadron Collider — Большой адронный коллайдер, сокращённо БАК). Он представляет собой ускоритель заряженных частиц на встречных пучках, предназначенный для разгона протонов и тяжёлых ионов (ионов свинца) и изучения продуктов их соударений. Коллайдер построен в ЦЕРН, недалеко от Женевы.

БАК является крупнейшей экспериментальной установкой в мире. Он расположен в туннеле с длиной окружности 26,7 км, который проложен под землёй на территории Франции и Швейцарии. Для удержания, коррекции и фокусировки протонных пучков используются сверхпроводящие магниты (рис. 11.20), работающие при температуре 1,9 К (-271°C).

Используя БАК, исследователи проводят эксперименты по уточнению основных положений Стандартной модели, а также пытаются выявить отклонения от этой теоретической модели. Одним из важнейших открытий стало бы обнаружение *бозона Хиггса* — частицы, ответственной за происхождение инертной массы элементарных частиц. Она названа в честь английского физика-теоретика Питера Хиггса (р. 1929), который предсказал её существование в 1960-х гг. И вот в 2012 г. после многочисленных и продолжительных поисков представители ЦЕРН сообщили о наблюдении новой частицы с массой около 125—126 ГэВ. У специалистов есть серьёзные основания считать, что именно эта частица является бозоном Хиггса.

Примерные темы рефератов и проектов

1. Счётчики и детекторы элементарных частиц: виды, устройство, принцип действия, открытия, совершённые с их помощью.
2. Метод радиоуглеродного анализа: физические основы, датировка, применение.
3. Как избежать аварий на АЭС?
4. Управляемый термоядерный синтез: физическая сущность, проблемы, перспективы. Проект ITER.
5. Ускорители заряженных частиц: виды, устройство, принцип действия, применение. Коллайдер LHC.



Глава 12

ЭЛЕМЕНТЫ АСТРОФИЗИКИ



Астрономия — наука о Вселенной, изучающая расположение, движение, строение, происхождение и развитие небесных тел и образованных ими систем.

Астрофизика — раздел астрономии, изучающий физическую основу небесных тел и их взаимодействий.

С древнейших времён наблюдения небесных тел были основой развития наук, в частности математики и физики. Астрономические наблюдения позволяют изучать природу и гравитационное взаимодействие физических тел большой массы, находящихся на огромных расстояниях, процессы, протекающие при очень высоких значениях температуры и давления. Эти условия невозможно воспроизвести в земных физических лабораториях, поэтому именно астрономические методы исследований дают богатый экспериментальный материал для развития многих разделов физики. Среди них — общая и специальная теория относительности, квантовая механика, физика элементарных частиц и ядерная физика. Астрофизика тесно связана с *космологией* — наукой о происхождении и развитии Вселенной как единого целого.

В данной главе рассказано об основных физических свойствах разных типов небесных объектов — планет и их спутников, комет и астероидов, звёзд на разных стадиях их эволюции, звёздных скоплений, галактик и скоплений галактик. Кроме того, вы познакомитесь с представлениями о строении и эволюции Вселенной.

§ 73

СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА

ГЕОЦЕНТРИЧЕСКАЯ И ГЕЛИОЦЕНТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМЫ МИРА. Солнечная система включает в себя Солнце, все объекты, обращающиеся вокруг него, — большие и карликовые планеты с их спутниками, астероиды, кометы и межпланетные частицы — метеороиды. Объекты Солнечной системы

движутся по небу относительно далёких звёзд. Это позволяло древним астрономам выделять их в особую группу небесных светил — планет. При этом физическая природа Солнечной системы долго оставалась неясной.

До изобретения телескопа человечеству было известно семь объектов Солнечной системы, не считая самой Земли. Это Солнце, Луна и пять планет: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн. Солнце и Луна — самые яркие объекты неба и единственные светила, видимые глазом в виде дисков. Планеты были видны как точечные объекты и отличались от звёзд своим перемещением. Юпитер, изредка Марс и особенно Венера также выделялись своей яркостью; при хорошей и безоблачной погоде зоркие люди могли увидеть Венеру на дневном небе.

Большинство древнегреческих учёных считали Землю центром всей Вселенной. Солнце, Луна и планеты в этой картине обращались вокруг Земли. Хотя это представление и было ошибочным, точность математического представления, доведённого до совершенства Клавдием Птолемеем, позволяла вычислять положения планет на небе в произвольный момент времени. Но *геоцентрическая система мира* Аристотеля — Птолемея (рис. 12.1) была чисто кинематической: она не объясняла физическую причину движения небесных тел.

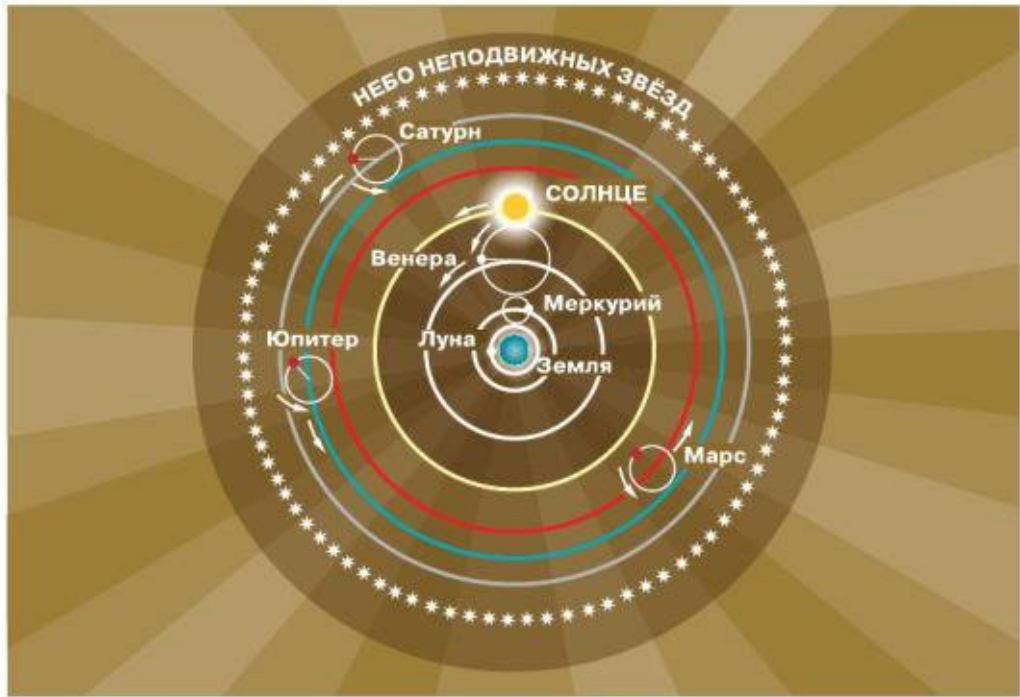


Рис. 12.1



Рис. 12.2

Гелиоцентрическая система мира (рис. 12.2), предложенная польским астрономом Николаем Коперником (1473—1543), давала более простое математическое объяснение характера видимого движения планет. Земля в этой системе также являлась планетой, обращающейся вокруг Солнца. Но и эта теория была кинематической и не описывала в точности видимые движения планет.

ПЛАНЕТЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ. Понять физическую основу движения тел в Солнечной системе стало возможно после открытия Кеплером трёх законов обращения планет вокруг Солнца. Их описание было приведено в учебнике физики для 10 класса.

Третий закон Кеплера принимает простой вид, если выразить период T в годах (периодах обращения Земли вокруг Солнца), а среднее расстояние a — в астрономических единицах (а. е.)^{*}.

^{*} Напомним, что астрономическая единица — среднее расстояние между Землёй и Солнцем (1 а. е. ≈ 150 млн км).

Тогда постоянная величина в третьем законе Кеплера обращается в единицу. Математическое выражение третьего закона Кеплера можно получить из закона всемирного тяготения для случая круговой орбиты с радиусом a . В соответствии со вторым законом Ньютона

$$F = G \frac{Mm}{a^2} = m \frac{v^2}{a}; \quad v = \sqrt{\frac{GM}{a}},$$

где v — орбитальная скорость планеты.

Период обращения планеты вокруг Солнца будет равен

$$T = \frac{2\pi a}{v} = \frac{2\pi \cdot a \sqrt{a}}{\sqrt{GM}}; \quad \frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi}{GM}.$$

Последнее выражение называют *обобщённым третьим законом Кеплера*. Он может использоваться для описания любого движения тела в центральном поле тяготения. Планеты Солнечной системы обращаются вокруг Солнца с массой M . Если тело обращается вокруг другой центральной массы, то отношение $\frac{T^2}{a^3}$ будет иным, и по нему можно будет определить массу центрального тела. Справедливость третьего закона Кеплера была подтверждена для спутников Юпитера, и в дальнейшем это позволило определить массу Юпитера (примерно 318 масс Земли). Подобным образом были определены массы всех планет Солнечной системы (кроме Меркурия и Венеры*, у которых нет спутников), а также массы многих двойных звёзд.

После изобретения телескопа прошло много времени, прежде чем в 1781 г. английский астроном Уильям Гершель (1738—1822) открыл седьмую планету — Уран. В ходе наблюдений было замечено отклонение Урана от траектории, соответствующей закону всемирного тяготения. Это отклонение не исчезало, даже если учесть влияние на Уран всех известных больших планет. Учёные предположили, что это вызвано гравитационным воздействием на Уран ещё одной неизвестной планеты. Более того, французскому астроному и математику Урбену Леверье (1811—1877) удалось вычислить её положение на небе. В указанном им месте в 1846 г. была обнаружена планета Нептун**. Эта планета стала первым объектом, найденным благодаря точным расчётам на основе физических законов. Её среднее расстояние от Солнца составляет около 30 а. е.

* Массы Меркурия и Венеры были в точности определены только в XX в. на основе анализа движения космических аппаратов около этих планет.

** Независимо от Леверье аналогичные расчёты выполнил английский математик и астроном Джон Адамс (1819—1892). На основе расчётов Леверье немецкий астроном Иоганн Галле (1812—1910) обнаружил планету Нептун.



Рис. 12.3

По своим физическим свойствам восемь больших планет Солнечной системы (рис. 12.3) чётко делятся на две группы: *планеты земной группы* (Меркурий, Венера, Земля и Марс) и *планеты-гиганты* (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун). Планеты земной группы располагаются ближе к Солнцу, имеют меньший размер, более высокую среднюю плотность вещества и твёрдую поверхность. Эти планеты обладают ядрами, богатыми железом. Меркурий, самая маленькая и близкая к Солнцу планета, практически не имеет атмосферы, так как молекулы горячего газа не удерживаются слабым притяжением планеты и улетают в космос. Среди планет земной группы Венера обладает самой плотной атмосферой, состоящей в основном из углекислого газа. Задерживая собственное инфракрасное излучение планеты, он создаёт сильный парниковый эффект, увеличивая температуру поверхности Венеры почти до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Несмотря на относительно малое содержание углекислого газа, парниковый эффект наблюдается и на Земле, увеличение температуры составляет $35\text{—}40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Атмосфера Марса разрежена, а средняя температура поверхности равна $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

По сравнению с планетами земной группы планеты-гиганты характеризуются существенно бóльшими размерами и массой, меньшей средней плотностью вещества и не имеют твёрдой поверхности. Самые большие планеты Солнечной системы — Юпитер и Сатурн — примерно в 10 раз больше Земли по размерам. Они состоят в основном из водорода и гелия. Ядра этих планет, находящиеся под огромным давлением, состоят из металлического водорода. Юпитер и Сатурн быстро вращаются вокруг своих осей (примерно за 10 часов), и их диски заметно сплюснуты у полюсов. Отличительной особенностью Сатурна является кольцо*, заметное уже в небольшие телескопы. Оно очень тонкое (всего около 1 км в толщине) и состоит из отдельных частиц и камней, обращающихся вокруг Сатурна. К настоящему времени тонкие кольца открыты у всех остальных планет-гигантов.

* Оно было обнаружено в 1656 г. Гюйгенсом.

Значительную часть недр Урана и Нептуна составляет водяной лёд. Как и в случае Юпитера и Сатурна, в их атмосферах много водорода и гелия. Кроме того, водородные соединения — метан, аммиак и сероводород — при низких температурах могут образовывать облака. Уран и Нептун быстро вращаются вокруг своей оси (период около 16 ч).

По современным представлениям, планетная система образовалась около 4,5 млрд лет назад вместе с самим Солнцем. В то время молодая Солнечная система была заполнена большим количеством протопланетных тел разных размеров. В процессе своего движения они могли сталкиваться под действием гравитационных сил, образуя более крупные тела. Менялись и орбиты будущих планет — некоторые тела перемещались ближе к Солнцу, а другие, наоборот, покидали Солнечную систему. Процесс формирования планетной системы в её современном виде занял около 100 млн лет.

ЛУНА И СПУТНИКИ ПЛАНЕТ. Планеты Солнечной системы могут сами выступать в роли центральной массы для своих спутников. Спутники есть у всех планет, кроме Меркурия и Венеры, изучение их движения использовалось для определения масс планет. Больше всего спутников у планет-гигантов: у Юпитера к настоящему моменту известно 79 спутников, у Сатурна — 62 спутника. Большая часть спутников имеет малые размеры, но имеются и крупные. В частности, спутник Юпитера Ганимед и спутник Сатурна Титан превосходят по диаметру планету Меркурий (однако они уступают ему по массе). Низкая температура позволяет Титану иметь плотную азотную атмосферу с облаками из жидкого метана. Титан и четыре спутника Юпитера (Ио, Европа, Ганимед и Каллисто) видны в небольшие телескопы (рис. 12.4). У планеты Уран к настоящему моменту известно 27 спутников, у планеты Нептун — 14 спутников, среди которых наиболее крупным является Тритон.



Рис. 12.4



Рис. 12.5

У планет земной группы спутников гораздо меньше, и ими обладают только Земля и Марс. Спутники Марса — Фобос и Деймос — представляют собой каменные глыбы неправильной формы размером 15—20 км. Единственный естественный спутник Земли — Луна (рис. 12.5) — входит в число семи самых крупных спутников планет Солнечной системы. Но Луна — единственный среди них спутник планеты земной группы, и она уступает своей планете, Земле, по массе всего в 81 раз — для всех остальных спутников это число значительно больше. Поэтому Землю можно называть двойной планетой.

Значительная масса Луны приводит к тому, что и Земля вращается вокруг общего с Луной центра масс. Но так как масса Земли всё же больше, этот центр масс располагается ближе к центру Земли, внутри нашей планеты. Среднее расстояние между центрами Земли и Луны равно 384 400 км. Как и большинство спутников планет, Луна вращается с одинаковой угловой скоростью вокруг Земли и вокруг своей оси (рис. 12.6, а) и повернута к Земле одной стороной. Если бы Луна вообще не вращалась вокруг своей оси (рис. 12.6, б), мы бы видели её разные полушария.

Притяжение Луны вызывает на Земле явление приливов, особенно заметное на скалистых берегах морей и океанов. Приливное взаимодействие приводит к медленному увеличению среднего расстояния между Землёй и Луной (на 4 см в год). На ранних стадиях существования Солнечной системы Луна располагалась значительно ближе к Земле. По современным представлениям, Луна образовалась из множества осколков столкновения молодой Земли с протопланетой размером с Марс, полностью разрушившейся при ударе. Эти осколки двигались по близкой околоземной орбите, частично объединяясь друг с другом. Столь мощное столкновение стало причиной быстрого осевого вращения Земли, которого нет у Меркурия и Венеры. Угловая скорость Земли раньше была существенно выше, чем сейчас, в настоящее время осевое вращение Земли замедляет-

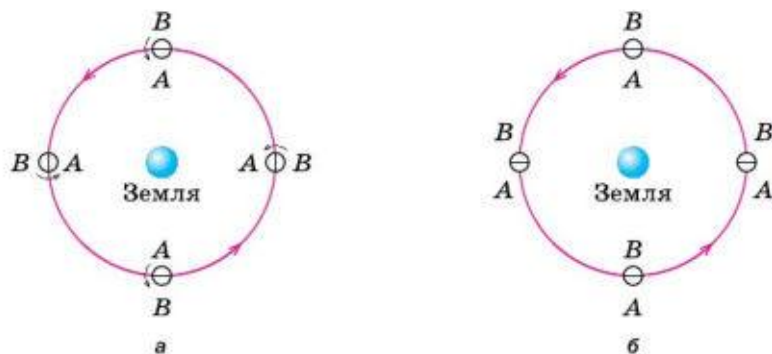


Рис. 12.6

ся. Через несколько миллиардов лет Земля будет повернута к Луне одной стороной, как и Луна к Земле, а длительность земных суток увеличится в 50 с лишним раз.

КАРЛИКОВЫЕ ПЛАНЕТЫ И АСТЕРОИДЫ. В конце XVIII в. было высказано предположение, что между орбитами Марса и Юпитера должна существовать ещё одна планета. Были начаты её поиски, и 1 января 1801 г. итальянский астроном Джузеппе Пиацци (1746—1826) обнаружил планету, названную Церерой (рис. 12.7). Она не была видна невооружённым глазом, и её малая яркость указывала на достаточно небольшие размеры (по современным данным, диаметр Цереры составляет около 1000 км). В последующие годы в этой же области Солнечной системы было обнаружено ещё несколько похожих объектов меньших размеров. Стало понятно, что вместо одной планеты был обнаружен новый класс объектов Солнечной системы, которые были названы *астероидами* («звёздоподобными») или *малыми планетами*. Бóльшая часть астероидов обращается вокруг Солнца по орбитам, близким к круговым, и расположенным между орбитами Марса и Юпитера. Некоторые астероиды имели вытянутые эллиптические орбиты и подходили близко к Земле. Сейчас подобные объекты являются объектами особого внимания (в силу астероидной опасности), их орбиты уточняются на основе постоянных наблюдений.

Общее число астероидов в Солнечной системе оценивается в сотни тысяч. Их размеры составляют от долей километра до тысячи километров. В течение многих десятилетий между учёными продолжались дискуссии о происхождении астероидов. Было высказано предположение, что искомая планета между Марсом и Юпитером действительно существовала, но по каким-то причинам была расколота на части, которые мы и наблюдаем в виде астероидов. Гипотетическая планета даже получила название Фазтон. Однако подобная гипотеза не объясняла ряд некоторых наблюдаемых фактов, в частности малую массу астероидов. Даже будучи собранными вместе, астероиды образуют объект, в 1000 раз уступающий по массе Земле. В настоящее время считается, что астероиды представляют собой остаток «строительного материала» для планет, а Фазтон, напротив, не смог образоваться из-за гравитационного воздействия Юпитера на движение протопланет в этой области Солнечной системы.

В XX в., с увеличением размеров и проникающей силы телескопов, стало возможным открывать не только малые астероиды «главного пояса» (между Марсом и Юпитером), но и объекты на окраинах Солнечной



Рис. 12.7



Рис. 12.8



Рис. 12.9

системы. После открытия Нептуна было высказано предположение о существовании за ним ещё одной, девятой большой планеты. В 1930 г. американский астроном Клайд Томбо (1906—1997) открыл Плутон (рис. 12.8), который считался девятой большой планетой до начала XXI в. Однако её свойства, в первую очередь размеры и масса, существенно отличались от свойств планет-гигантов.

В первые годы XXI в. было открыто большое количество похожих объектов за орбитой Нептуна — транснептуновых объектов. В соответствии с решением Международного астрономического союза от 2006 г. крупнейшие транснептуновые объекты (включая Плутон), а также самый большой астероид Церера стали называться *карликовыми планетами*.

Некоторые из транснептуновых тел имеют вытянутые эллиптические орбиты. Один из таких объектов, Седна, в настоящее время располагается в 76 а. е. от Солнца, но наиболее удалённая точка её орбиты находится от Солнца более чем на 1000 а. е. На рисунке 12.9 показана орбита Седны (красная) в сравнении с орбитами Юпитера (оранжевая), Сатурна (жёлтая), Урана (зелёная), Нептуна (синяя) и Плутона (сиреневая).

В последние годы в движении самых далёких известных объектов Солнечной системы была обнаружена особенность, которая может быть вызвана воздействием настоящей большой девятой планеты с массой, существенно большей массы Земли. Так это или нет — покажут наблюдения.

КОМЕТЫ И МЕТЕОРНЫЕ ПОТОКИ. С древних времён люди обращали внимание на странные «хвостатые светила» (кометы), подчас очень яркие. В XVII в. английский астроном Эдмунд Галлей (1656—1742) обратил внимание, что несколько ярких комет, наблюдавшихся в последние века, имели похожие орбиты, и предположил, что это одна и та же комета, движущаяся по сильно вытянутой орбите, подходя к Солнцу и Земле один раз в 75—76 лет.



Рис. 12.10

Он предсказал следующее появление кометы в XVIII в., которое подтвердилось. Комета получила имя Галлея (рис. 12.10).

К настоящему времени известно, что большинство наблюдавшихся комет, особенно ярких, имеют орбитальные периоды в сотни и тысячи лет либо же движутся по параболическим траекториям, приходя во внутренние области Солнечной системы только один

раз. И лишь малая часть комет, испытав тесные сближения с планетами-гигантами, переходят на орбиты с меньшим периодом.

Размеры кометных ядер не превышают нескольких километров. Они состоят из водяного льда и частиц пыли. По мере приближения к Солнцу лёд начинает испаряться, образующийся газ под действием давления света улетает от Солнца и увлекает за собой частицы пыли. Рассеянный на газе и пыли солнечный свет виден как хвост кометы.

В каждое приближение к Солнцу ядро кометы теряет свою массу. Продукты распада — небольшие камни и пылинки (их называют *метеорными частицами* или *метеороидами*) продолжают движение вокруг Солнца по орбите, близкой к орбите «родительской» кометы. Если в какой-то момент Земля в своём движении вокруг Солнца пересекает орбиту кометы, то метеороиды могут вторгнуться в атмосферу Земли на скорости от 11 до 72 км/с и сгореть в ней. Оптическое явление, которое при этом наблюдается с Земли, называют *метеором* (или, что терминологически неверно, «падающей звездой»).

Если Земля попадёт в плотный рой метеороидов, то можно будет наблюдать явление, называемое *метеорным потоком* или *метеорным дождём*.

Частицы, образующие метеорный поток, движутся по параллельным линиям, но из-за эффекта перспективы (аналогично сходящимся вдали прямым железнодорожным путям) они будут казаться вылетающими по направлению из одной точки, называемой *радиантом потока*. Обычно метеорные потоки называют по созвездиям, содержащим радиант. Наиболее известные метеорные потоки: Персеиды (рис. 12.11) в августе (комета Свифта — Туттля), Орио-



Рис. 12.11



ниды в октябре (комета Галлея), Леониды в ноябре (комета Темпеля — Туттля). Особенно эффектно вспышки активности Леонид каждые 33 года, во время приближения кометы и наиболее плотной части потока к Земле. В 1833 и 1965 гг. можно было наблюдать до 150 000 метеоров в час!

Кометы являются самыми короткоживущими объектами Солнечной системы. Источник комет находится на самой окраине Солнечной системы, возможно, уже в межзвёздном пространстве. Облако ледяных кометных ядер получило название *облака Оорта* в честь нидерландского астронома Яна Оорта (1900—1992). Вероятно, облако Оорта — остаток протопланетного диска, из которого 4,5 млрд лет назад образовалась Солнечная система.



1. Какие объекты включает в себя Солнечная система? **2.** Чем отличается гелиоцентрическая система мира от геоцентрической? **3.** На какие группы принято разделять планеты Солнечной системы? **4.** Перечислите три самых ярких объекта земного неба. **5.** У каких планет нет естественных спутников? **6.** Что называют: а) астероидами; б) карликовыми планетами; в) кометами; г) метеорными потоками? Приведите их примеры.



1. У какого небесного тела период обращения вокруг Солнца больше — у астероидов главного пояса или у комет?

2. Период обращения самой далёкой от Солнца известной малой планеты Седны вокруг Солнца составляет около 12 000 лет. Большую его часть она проводит очень далеко от Солнца, за пределами возможностей наблюдения современными телескопами. Однако именно сейчас, в эпоху своего открытия, Седна подошла к ближайшей к Солнцу точке орбиты. Является ли это «счастливым случаем» для астрономов Земли?



УПРАЖНЕНИЯ

- 1.** Планета Юпитер находится в 5,2 раз дальше от Солнца, чем Земля. За какое время она совершает полный оборот вокруг Солнца?
- 2.** Расстояние от Земли до Луны равно 384 400 км, расстояние от Юпитера до его спутника Ио — 421 600 км. У какого из спутников период обращения вокруг планеты больше и во сколько раз? Учтите, что Юпитер существенно массивнее Земли.



§ 74

СОЛНЦЕ

АТМОСФЕРА СОЛНЦА. Центр Солнечной системы и главный источник энергии для её тел, включая Землю, — *Солнце*. Свечение Луны, планет, астероидов и комет, которое мы можем наблюдать на небе, — это отражённый свет Солнца. В настоящее время известно, что Солнце излучает энергию

в различных диапазонах электромагнитного спектра с общей мощностью примерно в $4 \cdot 10^{26}$ Вт. Даже на расстоянии Земли (150 млн км) участок с площадью 1 м^2 , расположенный перпендикулярно потоку солнечного излучения, освещается с мощностью 1360 Вт (эту величину называют *солнечной постоянной*).

Масса Солнца в 330 000 раз больше массы Земли и в 1000 раз больше массы самой большой из планет — Юпитера. Поэтому именно Солнце является центром вращения тел Солнечной системы, хотя, строго говоря, движение всех тел, включая Солнце, происходит вокруг центра тяжести всей системы, расположенного рядом с Солнцем, вблизи его поверхности.

Саму поверхность Солнца, с которой к нам приходит его видимое излучение, называют *фотосферой*. Её температура составляет около 6000 К. Разумеется, что ни о какой твёрдой поверхности при этом говорить не приходится. Солнце — это полностью газовый шар без определённых границ, плотность которого уменьшается от центра к внешним областям. Фотосфера — это слой, начиная с которого газ становится прозрачным для оптического излучения, поэтому мы и видим его как поверхность Солнца.

На фотографиях фотосферы можно обнаружить в ней светлые ячейки — гранулы. Каждая гранула представляет собой восходящий поток горячего газа из недр Солнца. Таким образом, передача энергии в подповерхностном слое происходит за счёт конвекции. Этот процесс затормаживается в сильном магнитном поле, поэтому активные области поверхности Солнца, где магнитные силовые линии выходят в фотосферу, более холодные и выглядят темнее окружающих областей. Это солнечные пятна, заметные на многих фотографиях Солнца. На рисунке 12.12 приведена фотография пятен и гранул на поверхности Солнца. В то же время в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах активные области фотосферы, напротив, выглядят очень яркими.

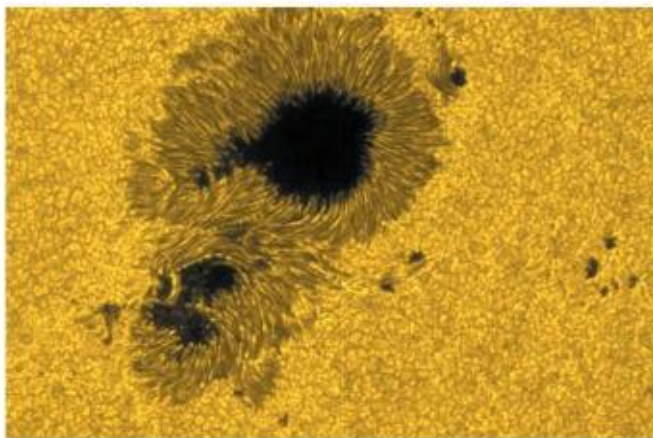


Рис. 12.12



Рис. 12.13

Солнечная активность — показатель, определяемый количеством активных областей на Солнце, — меняется периодически, достигая максимума раз в 11 лет. В эпоху максимума активности на Солнце чаще происходят вспышки, сопровождающиеся высокоэнергичным излучением и выбросом в окружающее пространство заряженных частиц, образующих солнечный ветер. Достигая окрестностей Земли, частицы увлекаются земным магнитным полем к полюсам нашей планеты. Там они сталкиваются с атомами кислорода и азота верхней атмосферы, вызывая их свечение. Так возникают полярные сияния.

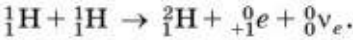
Атмосфера Солнца, называемая *коронай*, светит примерно в миллион раз слабее самого Солнца и поэтому не видна на ярком фоне дневного неба на Земле. С поверхности нашей планеты её можно увидеть только во время полных солнечных затмений, когда Солнце в пределах фотосферы закрыто Луной. Корона состоит из множества светлых лучей, соответствующих магнитным силовым линиям и выходящих из активных областей поверхности Солнца. Корона значительно горячее фотосферы — её температура составляет 1—2 млн градусов. Вещество короны полностью ионизировано, частицы имеют большие тепловые скорости. Самые быстрые из них преодолевают солнечное притяжение и улетают в космическое пространство. С поверхности Солнца в нижнюю атмосферу выбрасывается более холодное и плотное вещество, образующее *протуберанцы*, также видимые во время затмений. На рисунке 12.13 показаны протуберанцы и корона Солнца во время полного солнечного затмения.

Переходный слой между фотосферой и атмосферой (коронай) Солнца называется его *хромосферой*. Происхождение названия этой части солнечной атмосферы связано с красным цветом хромосферы, видимым во время полных солнечных затмений. Красный цвет создаётся атомами

водорода, которые в верхней хромосфере находятся преимущественно в ионизированном состоянии.

ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ СОЛНЦА. Как только стало известно расстояние до Солнца, и, следовательно, его размеры и светимость, возник вопрос о механизме его энерговыделения. В XIX в. предполагали, что Солнце светит за счёт постепенного сжатия под действием собственной гравитации. Такой процесс действительно протекает, но на самой ранней стадии жизни звёзд, которая длится примерно десятки миллионов лет. Но возраст Земли и жизни на ней существенно больше — он достигает нескольких миллиардов лет. Всё это время светимость Солнца была практически постоянной. Природа такого большого запаса энергии стала понятна лишь в XX в. с развитием ядерной физики.

Химический состав Солнца известен из спектральных наблюдений, он представлен в основном двумя самыми лёгкими элементами — водородом и гелием. В недрах Солнца температура достигает 15 млн К, в таких условиях начинаются *термоядерные реакции горения водорода*. Первая из них фактически определяет темп энерговыделения Солнца и время его жизни. Это соединение двух протонов в ядро дейтерия:



Ядро дейтерия ^2_1H состоит из одного протона и одного нейтрона, т. е. в ходе этой реакции один протон превращается в более тяжёлую частицу — нейтрон. При этом выделяются позитрон и электронное нейтрино.

Такая реакция возможна только при большой кинетической энергии сталкивающихся протонов, которые должны преодолеть кулоновское отталкивание. В условиях недр Солнца с каждым отдельно взятым протоном такая реакция может произойти один раз за 10—12 млрд лет. Именно этим и определяется время жизни Солнца как нормальной звезды. При иной скорости данной реакции светимость Солнца и время его жизни могли резко измениться, что сделало бы невозможным появление жизни на Земле.

В последующих двух реакциях уже не происходит взаимного превращения нуклонов (протонов и нейтронов), и они протекают существенно быстрее:

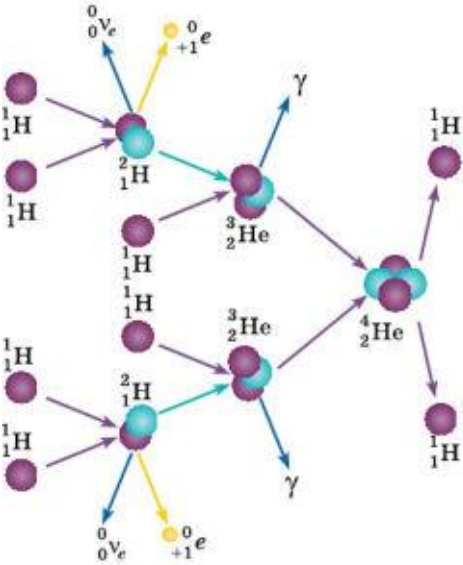
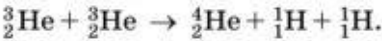


Рис. 12.14

В итоге четыре протона превращаются в ядро ${}^4_2\text{He}$ с выделением двух позитронов 0_1e (которые аннигилируют с электронами), двух нейтрино ${}^0_0\nu_e$ и двух γ -квантов (рис. 12.14). При этом выделяется энергия около 25 МэВ. Эту цепочку термоядерных реакций называют *протон-протонным* (или *водородным*) *циклом*. Его предложил американский астрофизик Ханс Бете (1906—2005). Водород может превращаться в гелий и посредством других циклов реакций, но их вклад для звёзд типа Солнца существенно меньше. Освободившаяся энергия переносится из недр Солнца к его поверхности сначала в виде жёсткого излучения, а затем конвективным путём.

Возраст Солнца составляет около 4,5 млрд лет, что находится в хорошем согласии с данными о возрасте Земли и различных форм жизни. Запасов водорода в центре Солнца достаточно ещё на 6 млрд лет, после чего оно войдёт в позднюю стадию своей эволюции.



1. Какое строение имеет атмосфера Солнца? 2. Что представляет собой гранула фотосферы? 3. Почему солнечное пятно кажется тёмным? 4. Когда можно наблюдать солнечную корону и протуберанцы? 5. Как изменяется солнечная активность с течением времени? 6. За счёт чего Солнце продолжает светить в течение миллиардов лет? 7. Опишите протон-протонный цикл, происходящий в недрах Солнца.



Почему водород в фотосфере Солнца находится преимущественно в нейтральном состоянии, а выше (в короне) и ниже (в недрах) ионизирован?



УПРАЖНЕНИЕ

Сколько пар протонов вступают в реакцию соединения каждую секунду в недрах Солнца?

§ 75

ЗВЁЗДЫ

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВЁЗД. Подавляющее большинство небесных объектов, видимых невооружённым глазом на небе, не относятся к Солнечной системе. Речь идёт о звёздах. В отличие от планет, они не обладают заметным перемещением относительно друг друга (в действительности оно, конечно, происходит, но становится заметным только за тысячи лет). Звёзды не имеют заметных угловых размеров, даже если использовать телескопы с большим увеличением. На протяжении многих веков это затрудняло понимание физической природы звёзд. Измерить расстояние до какой-либо звезды и попутно подтвердить гелиоцентрическую систему мира Коперника можно было, зафиксировав её *годовой параллакс* — смещение видимого положения звезды на небе за счёт перемещения



Рис. 12.15

наблюдателя вместе с Землёй (угол π на рис. 12.15).

Попытки заметить это смещение предпринимались в течение нескольких веков и оказались безуспешными — из-за огромного расстояния до звёзд их параллакс был крайне мал. Лишь в 1838 г. были впервые измерены параллаксы нескольких звёзд. В частности, российский астроном, первый директор Пулковской обсерватории Василий Яковлевич Струве (1793—1864) измерил параллакс одной из самых ярких звёзд неба — Веги (созвездие Лиры).

Расстояния до звёзд оказались столь велики, что для их выражения были

неудобны не только привычные земные единицы (километры), но и астрономические единицы, используемые в Солнечной системе. В связи с этим было введено понятие *светового года* (св. год).

Световой год — расстояние, которое свет, распространяющийся со скоростью 300 000 км/с, проходит за один земной год.

1 св. год = $9,5 \cdot 10^{12}$ км = $63,3 \cdot 10^3$ а. е.

Кроме того, используется ещё одна единица расстояния — *парсек* (пк).

Парсек — расстояние, с которого земная орбита видна под углом $1''$.

1 пк* $\approx 3,26$ св. года.

Расстояние до звезды Вега оказалось равным 25 св. годам. Из этого следовало, что она излучает в пространство энергию, в 40 раз большую, чем Солнце. Таким образом, первые же измерения расстояний до звёзд показали не только истинные масштабы мира, но и то, что Солнце является весьма заурядной звездой. Данные факты стали ещё более удивительными, когда выяснилось, что Вега тоже далеко не самая яркая и при этом одна из самых близких к нам звёзд.

После открытия параллакса были измерены расстояния и светимости большого количества звёзд. Измерения их спектра (или цвета) позволяли судить о температуре их поверхности. В этом отношении Солнце, температура поверхности которого 6000 К, занимало промежуточную позицию между самыми горячими бело-голубыми звёздами (температура поверхности до 20 000 К) и холодными красными звёздами (температура поверхности около 3000 К).

* На практике используют и кратные единицы парсека: *килопарсек* (кпк), *мегапарсек* (Мпк): 1 кпк = 10^3 пк; 1 Мпк = 10^6 пк.

Если известна температура T и мощность излучения L звезды (или её светимость), то её размер можно определить на основании закона Стефана—Больцмана:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4,$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ — постоянная Стефана—Больцмана; R — радиус фотосферы звезды.

Данный закон связывает радиус, температуру и светимость звезды и позволяет найти одну из этих характеристик, если известны две другие.

Значительная часть всех звёзд образует двойные и кратные системы, в которых звёзды обращаются вокруг общего центра тяжести. Некоторые двойные звёзды видны в телескоп напрямую, более тесные пары исследуют, измеряя лучевую (радиальную) скорость звёзд по *эффекту Доплера*^{*} либо фиксируя взаимные затмения компонент системы.

У таких звёзд можно определить массу — важнейшую характеристику, определяющую весь сценарий существования звезды. Массы звёзд меняются от 0,1 до примерно 100 масс Солнца, т. е. и по этому параметру Солнце является типичной звездой.

ДИАГРАММА ГЕРЦШПРУНГА—РАССЕЛА И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД. После того как были измерены расстояния до большого количества звёзд, стало понятно, что они существенно различаются по температуре и светимости. В 1910 г. датский астроном Эйна́р Герцшпру́нг (1873—1967) и американский астроном Генри Рассел (1877—1957) независимо друг от друга построили диаграмму (рис. 12.16), на которой по оси абсцисс была отложена температура звезды (растущая справа налево), а по оси ординат — её светимость (выраженная в единицах светимости Солнца).

Положения звёзд, для которых температура и светимость были известны, не были расположены на этой диаграмме хаотично. Напротив, они концентрировались к определённым участкам диаграммы.

Большая часть звёзд располагалась вдоль полосы, идущей от левого верхнего угла (яркие горячие звёзды) к нижнему правому углу (слабые холодные звёзды). Эта полоса называется *главной последовательностью* диаграммы Герцшпрунга—Рассела. К данной группе звёзд относится и Солнце, расположенное в середине главной последовательности.

Выделяется также группа *гигантов* (холодные яркие звёзды, правая верхняя часть диаграммы красные гиганты; левая верхняя — белые ги-

^{*} Согласно этому эффекту, при увеличении расстояния между звездой и наблюдателем длина волны принимаемого излучения увеличивается, поэтому спектральные линии смещаются к красному концу спектра. При уменьшении расстояния длина волны уменьшается, а линии смещаются к фиолетовому концу спектра. В астрофизике с помощью эффекта Доплера определяют значения скоростей движения звёзд вдоль луча зрения (по смещению спектральных линий).

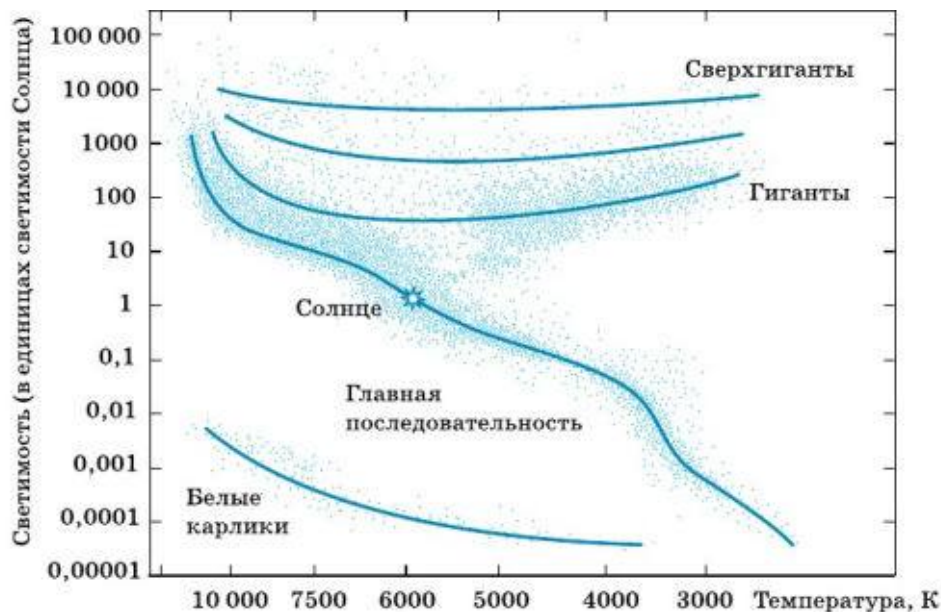


Рис. 12.16

ганты) и ветвь *сверхгигантов* (самые яркие звёзды, от левого верхнего к правому верхнему углу). С ростом точности измерений были открыты *белые карлики* — горячие, но слабые звёзды, находящиеся внизу диаграммы. Среди первых открытых белых карликов были спутники ярких звёзд земного неба — Сириуса и Прокциона.

Главная последовательность заполнена звёздами, находящимися на основном этапе своей эволюции, — в их недрах идут термоядерные реакции превращения водорода в гелий. Положение звезды на главной последовательности, т. е. её температура и светимость, определяется массой M звезды: чем она больше, тем звезда горячее и ярче. Зависимость «масса — светимость» для звёзд главной последовательности обычно выражают как $L \approx M^N$, где показатель степени N меняется с массой звезды. Для звёзд типа Солнца он близок к 4.

Наиболее массивные звёзды главной последовательности (голубые сверхгиганты) имеют светимость, в сотни тысяч раз большую, чем Солнце, а самые маленькие (красные карлики) светят в тысячи раз слабее Солнца. Получается, что массивные звёзды, изначально имея большие запасы водородного топлива в недрах, тратят его значительно быстрее. Их время жизни исчисляется десятками и сотнями миллионов лет, что существенно меньше, чем для Солнца. Напротив, маломассивные звёзды могут поддерживать свою светимость десятки миллиардов лет, что больше нынешнего возраста Вселенной.

Пока в недрах звезды идёт горение водорода, её физические характеристики и положение на диаграмме Герцшпрунга — Рассела практически не изменяются. Силы тяготения, стремящиеся сжать звезду, уравновешены газовым давлением недр, разогретых термоядерными реакциями. Спустя достаточно продолжительный промежуток времени в недрах звезды (типа Солнца или меньше) прекращаются термоядерные реакции синтеза. После выгорания водорода в центральной части звезды образуется плотное гелиевое ядро, состоящее из газа, давление которого уже не зависит от температуры*. При этом вокруг такого ядра образуется тонкий слой, в котором начинают протекать термоядерные реакции.

Внешняя оболочка звезды, напротив, расширяется и охлаждается. Звезда превращается в красный гигант, смещаясь на диаграмме Герцшпрунга — Рассела вправо и вверх (см. рис. 12.16).

Через 6—7 млрд лет, когда Солнце станет красным гигантом, его поверхность может достичь нынешнего положения Земли, а её температура станет вдвое меньшей, чем сейчас. При этом светимость Солнца будет в несколько сотен раз выше текущего значения. Мы можем наблюдать на небе красные гиганты, похожие на будущее Солнце, например звезду Арктур (ярчайшую в созвездии Волопаса) или Альдебаран (ярчайшую в созвездии Тельца).

Этап красного гиганта — сравнительно короткий в жизни звезды, его длительность для звёзд солнечного типа не превышает 1 млрд лет, для более массивных звёзд он ещё короче. После этого разреженная холодная оболочка рассеивается в космическом пространстве, образуя *планетарную туманность*. Подобный класс объектов получил такое название из-за внешнего сходства с планетами. Самый известный его представитель — туманность «Кольцо» в созвездии Лиры (рис. 12.17).

На месте звезды остаётся её ядро — маленький и плотный белый карлик. Хотя его масса может быть равной массе Солнца, по размерам он больше похож на Землю. При массе, почти равной солнечной, белый карлик имеет гигантскую среднюю плотность около 10^9 кг/м³. В самом белом карлике никаких реакций уже не происходит, и он светит только за счёт своего остывания. Темп энерговыделения из-за малых размеров невелик, и остывание с дальнейшим превращением в *чёрный карлик* может длиться многие миллиарды лет — дольше, чем время жизни этой звезды на главной последовательности.

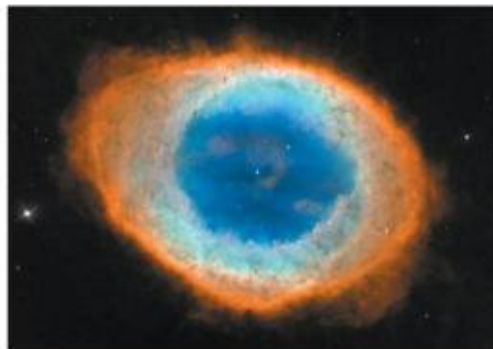


Рис. 12.17

* Такой газ называют *вырожденным*.