



# Физика

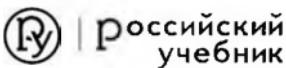
11



180°



вентана  
граф



А. В. Грачёв  
В. А. Погожев  
А. М. Салецкий  
П. Ю. Боков

# Физика

Базовый и углублённый уровни

11 класс

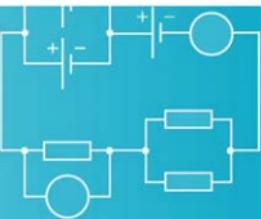
Учебник

Рекомендовано  
Министерством просвещения  
Российской Федерации

*5-е издание, переработанное*



Москва  
Изательский центр  
«Вентана-Граф»  
2019



## Электродинамика (продолжение)

Проявление электромагнитных взаимодействий очень разнообразно. Кроме взаимодействий неподвижных электрических зарядов, которые изучают в электростатике, электромагнитные взаимодействия имеют место при любом движении заряженных частиц, в том числе при их упорядоченном движении — электрическом токе. Движущиеся электрические заряды, токи, а также постоянные магниты создают магнитные поля. В то же время при изменении магнитного поля возникает электрическое поле, в результате чего индуцируются токи в проводниках. Это явление называют электромагнитной индукцией. Электрическое и магнитное поля взаимосвязаны и образуют единое электромагнитное поле. Это поле может существовать и при отсутствии зарядов — в виде электромагнитных волн. Видимый свет, инфракрасное, ультрафиолетовое излучения, которые изучают в оптике, могут быть рассмотрены как электромагнитные волны.

Таким образом, продолжение изучения электродинамики связано с изучением электрических токов, магнитных явлений, электромагнитной индукции, электромагнитных колебаний и волн, а также оптических явлений.



# Постоянный электрический ток

В 10 классе вы изучали электрические явления, при которых электрически заряженные тела покоялись в выбранной инерциальной системе отсчёта. **К**

Теперь мы будем рассматривать явления, связанные с упорядоченным движением электрически заряженных частиц — электрическим током. Можно утверждать, что электрические токи играют определяющую роль не только в современной технике. Сама жизнь биологических объектов (в том числе человека) невозможна без электрических токов.

Эта глава посвящена явлениям, которые наблюдаются при протекании электрического тока в различных средах.

## § 1

### Условия возникновения и существования электрического тока. Направление и сила тока

Электрическим током называют упорядоченное движение заряженных частиц.

Следовательно, для существования электрического тока необходимо, во-первых, *наличие заряженных частиц* и, во-вторых, *наличие причин, приводящих к упорядоченному движению этих частиц*. Отме-



Напомним, что, согласно основным положениям молекулярно-кинетической теории, частицы (в том числе имеющие электрический заряд), из которых состоит любое тело, совершают тепловое движение относительно центра масс этого тела. Однако, поскольку движение частиц является хаотическим, при изучении электростатики считают, что в среднем эти частицы покоятся.



Направление движения зарядов

**Рис. 1** Электрический ток создают ученики, несущие положительно заряженные тела

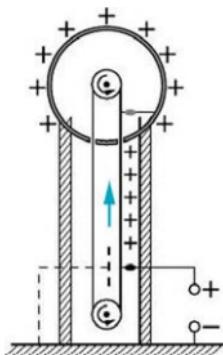


Рис. 2

тим, что причины возникновения упорядоченного движения заряженных частиц могут быть самыми разными. Поясним сказанное на примерах.

Раздадим ученикам класса заряженные тела на изолирующих ручках. Предложим этим ученикам двигаться вместе с заряженными телами друг за другом упорядоченно, например по окружности (рис. 1). В этом случае, согласно определению, мы получим электрический ток.

Другим примером электрического тока является движение зарядов, расположенных на движущейся диэлектрической ленте в генераторе Ван де Граафа (рис. 2).

Электрическим током, согласно определению, будет и движение электронов и  $\alpha$ -частиц (ядер атомов гелия  ${}^4_2\text{He}$ ), которые образуются при радиоактивном распаде (рис. 3).

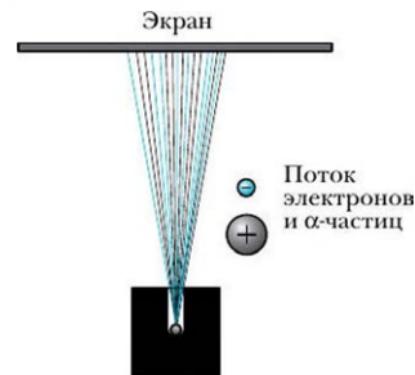


Рис. 3

Поток электронов и  $\alpha$ -частиц представляет собой электрический ток

**Направление движения зарядов****Рис. 4**

**Электрический ток** создают ученики, несущие отрицательно заряженные тела

Как же охарактеризовать электрический ток? Из рассмотренных примеров ясно, что упорядоченное движение заряженных частиц можно охарактеризовать, во-первых, его *направлением*, во-вторых, знаком заряда этих частиц и, в-третьих, *интенсивностью*. Другими словами, необходимо ответить на три вопроса:

- 1) куда упорядоченно движутся заряженные частицы;
- 2) каков знак заряда этих частиц;
- 3) какова интенсивность переноса заряда?

Обычно ответы на первые два вопроса объединяют, указывая *направление* электрического тока. Условились, что если электрический

ток обусловлен упорядоченным движением *положительно* заряженных частиц, то направление тока будет *совпадать* с направлением их движения. Напротив, если ток обусловлен упорядоченным движением *отрицательно* заряженных частиц, то направление тока будет *противоположно* направлению движения частиц.

Например, в случае, показанном на рис. 1, когда ученики несут положительно заряженные тела, направление создаваемого ими электрического тока совпадает с направлением движения учеников. Напротив, если перемещаемые учениками тела заряжены отрицательно (рис. 4), то направление тока противоположно направлению движения учеников.

Таким образом, в случаях, когда ученики несут положительно заряженные тела, двигаясь при этом по ходу часовой стрелки (см. рис. 1), и когда они несут отрицательно заряженные тела, двигаясь против хода часовой стрелки (см. рис. 4), направления электрических токов будут одинаковыми. В обоих случаях токи будут направлены по ходу часовой стрелки. Практически все физические явления, сопутствующие таким электрическим токам, будут одинаковыми.

Чтобы лучше понять, как характеризуют интенсивность переноса электрического заряда, вернёмся к рассмотрению электрического тока, пока-

занного на рис. 1. Пусть за рассматриваемый промежуток времени  $\Delta t$  через сечение  $S$ , представляющее собой правый дверной проём на рисунке, проходят  $N$  учеников с заряженными телами. Если при этом заряд каждого тела равен  $Q$ , то заряд, переносимый через рассматриваемую площадку за время  $\Delta t$ , будет равен  $\Delta q = N \cdot Q$ . В этом случае среднюю за промежуток времени  $\Delta t$  интенсивность переноса электрического заряда через сечение  $S$  логично охарактеризовать физической величиной, равной отношению перенесённого заряда к рассматриваемому промежутку времени:

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{N \cdot Q}{\Delta t}.$$

**Физическую величину, равную отношению заряда  $\Delta q$ , прошедшего через данное сечение за промежуток времени  $\Delta t$ , к длительности этого промежутка времени, называют средней силой тока  $I$ :**

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

При рассмотрении многих явлений вводят физическую величину, характеризующую интенсивность переноса электрического заряда в данный момент времени  $t$ . Её называют *мгновенной силой тока — силой тока в данный момент времени  $t$* . Для определения этой величины рассматривают достаточно малый промежуток времени  $\Delta t$ , начинающийся сразу после момента времени  $t$ .

**Силой тока  $I$  в данный момент времени  $t$  называют физическую величину, равную отношению заряда  $\Delta q$ , прошедшего через рассматриваемое сечение за достаточно малый промежуток времени  $\Delta t$ , начинающийся сразу после момента времени  $t$ , к длительности этого промежутка:**

$$I(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

В СИ единица силы тока является основной и носит название *ампер* (А). Её определение мы рассмотрим в следующей главе. Сила тока будет равна одному амперу, если через рассматриваемое сечение ежесекундно протекает заряд, равный одному кулону. Во многих используемых в повседневной жизни приборах сила тока может изменяться от микроампер (токи в запоминающих устройствах вычислительной техники) до десятков (токи в различных нагревательных приборах) и даже сотен ампер

(ток в обмотке стартёра автомобильного двигателя или мощного электромотора).

Отметим, что для человека воздействие тока силой примерно 50 мА уже может оказаться смертельным.

### Вопросы

- 1 Что называют электрическим током?
- 2 Какие условия должны быть выполнены, чтобы мог существовать электрический ток?
- 3 Капли дождя при падении на Землю электризуются. Можно ли говорить, что во время дождя существует электрический ток между дождевым облаком и Землёй?
- 4 Что принимают за направление тока?
- 5 Электроны, вылетевшие из катода и летящие к экрану кинескопа, образуют электронный пучок. В какую сторону направлен электрический ток в кинескопе?
- 6 Что называют: а) средней силой тока через данное сечение; б) силой тока через данное сечение в данный момент времени?

### Упражнения

- 1 Каждый из учеников, изображённых на рис. 1, несёт тело, заряд которого  $q = 30 \text{ нКл}$ . Зная, что расстояние между соседними заряженными телами  $l = 0,5 \text{ м}$ , а ученики движутся со скоростью, модуль которой равен  $v = 2 \text{ м/с}$ , определите среднюю силу тока через показанную на рисунке площадку  $S$ .
- 2 При радиоактивном распаде куска урана за время  $\Delta t$  из него вылетает  $N_\alpha$   $\alpha$ -частиц и  $N_\beta$  электронов. Определите среднюю силу тока, обусловленного: а) только вылетающими  $\alpha$ -частицами; б) только электронами; в) всеми заряженными частицами.



#### Для углублённого уровня

- 3 Ширина ленты генератора Бан де Граафа  $b = 20 \text{ см}$ . Заряженный участок ленты движется вертикально вверх со скоростью, модуль которой  $v = 10 \text{ см/с}$ . Поверхностная плотность избыточных зарядов на ленте  $\sigma = 40 \text{ мкКл/м}^2$ . Определите направление и силу электрического тока, обусловленного движением ленты.

## § 2

## Свободные носители заряда. Электрический ток в проводниках

В рассмотренных в предыдущем параграфе примерах электрический ток был обусловлен движением заряженных тел либо частиц. Однако наибольший практический интерес представляют токи в веществе, обусловленные упорядоченным движением заряженных частиц этого вещества.

**Носители заряда, которые могут свободно перемещаться по всему телу, называют свободными носителями заряда.**

**Вещества и состоящие из них тела, в которых свободные носители заряда присутствуют в большом количестве, называют проводниками.**

Проводниками являются тела, изготовленные из металлов и их сплавов, а также электролиты — растворы и расплавы многих солей, кислот и щелочей.

В металлах и их сплавах роль свободных носителей заряда играют электроны, потерявшие связь с ядрами своих атомов, — свободные электроны (это утверждение основано на опытах, которые будут рассмотрены в § 9). Эти электроны хаотически движутся по всему объёму вещества. При этом положительные ионы металла совершают хаотические тепловые колебания в узлах кристаллической решётки (около положений своего равновесия). Поэтому часто говорят, что свободные электроны принадлежат одновременно всем ионам данного металлического тела.

В растворах и расплавах электролитов свободные носители заряда — это положительные и отрицательные ионы (см. опыты, описанные в § 10). Они образуются в результате распада (диссоциации) молекул электролита.



**Ионы в электролитах так же, как и свободные электроны в металлах, способны перемещаться по всему объёму вещества.**

**Вещества, в которых нет свободных носителей заряда, называют диэлектриками.**

При обычных условиях диэлектриками являются, например, все газы, многие керамики, стёкла, резина, эбонит, янтарь. Тела, изготовленные из диэлектриков, часто называют изоляторами. Отметим, что при определённых условиях диэлектрик может стать проводником.

Наличие свободных носителей заряда в проводнике обеспечивает выполнение первого условия существования электрического тока. Для выполнения же второго условия необходимо наличие сил, вызывающих упорядоченное движение этих носителей заряда. Роль таких сил может выполнять, например, сила электрического поля.

**!** Если в проводнике создать электрическое поле, то свободные носители заряда, помимо хаотического (теплового) движения, начнут совершать и упорядоченное движение.

Может создаться впечатление, что под действием сил электрического поля свободные носители заряда в проводнике в соответствии со вторым законом Ньютона будут непрерывно разгоняться. Однако это не так! При движении свободные носители заряда взаимодействуют с совершающими хаотическое (тепловое) движение остальными частицами проводника. Хаотический характер этого взаимодействия нарушает упорядоченность движения свободных носителей заряда. Другими словами, проводящая среда как бы сопротивляется упорядоченному движению заряженных частиц, т. е. «тормозит» это движение. В свою очередь, действие силы электрического поля на каждый свободный носитель заряда в промежутках времени между его последовательными соударениями с другими частицами проводника «восстанавливает» упорядоченное движение свободных носителей заряда. В результате конкурирующих действий сил электрического поля и сил взаимодействия с остальными частицами проводника в проводнике устанавливается упорядоченное движение свободных носителей заряда.

Таким образом, *при наличии электрического поля в проводнике свободные носители заряда наряду с хаотическим совершают и упорядоченное движение*. Средняя скорость свободных носителей заряда относительно проводника при наличии в нём электрического поля становится отличной от нуля. Эту скорость, характеризующую упорядоченное движение носителей заряда, называют их *скоростью дрейфа*  $\bar{v}_{\text{др}}$ .

Смысль скорости дрейфа легко понять, если представить себе клубящийся рой комаров, сносимый ветром. Скорость упорядоченного движения комаров, равная скорости ветра, и будет скоростью их дрейфа. Понятно, что она равна скорости движения центра масс роя комаров относительно поверхности Земли.

Если скорость дрейфа свободных носителей заряда в проводнике отлична от нуля, то в соответствии с определением в проводнике протекает электрический ток.

Выясним, как связана сила тока  $I$ , обусловленного дрейфом свободных носителей заряда в проводнике, с их концентрацией  $n$ , зарядом  $q$  каждого носителя и модулем скорости дрейфа  $v_{\text{др}}$ .

Рассмотрим цилиндрический проводник, площадь поперечного сечения которого равна  $S$ . Пусть направление скорости дрейфа свободных носителей заряда совпадает с осью проводника (рис. 5). Тогда за время  $\Delta t$  каждый из свободных носителей заряда в результате дрейфа смещается вдоль оси проводника на расстояние  $v_{\text{др}} \cdot \Delta t$ . Следовательно, за это время через поперечное сечение 2 проводника пройдут все свободные носители заряда, находившиеся слева от этого сечения на расстояниях, не превышающих  $v_{\text{др}} \cdot \Delta t$ , т. е. все свободные носители заряда между сечениями 1 и 2. Объём участка проводника между сечениями 1 и 2 равен  $V = S \cdot v_{\text{др}} \cdot \Delta t$ . Число свободных носителей заряда в этом объёме  $N = n \cdot V$ . Следовательно, через сечение 2 за время  $\Delta t$  пройдёт заряд  $\Delta q = q \cdot N = q \cdot n \cdot S \cdot v_{\text{др}} \cdot \Delta t$ . Таким образом, сила тока в проводнике равна:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = n \cdot q \cdot S \cdot v_{\text{др}}. \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что при неизменной концентрации и скорости дрейфа носителей заряда сила тока и его направление в проводнике не будут изменяться с течением времени.

**Если сила тока и его направление через любое сечение проводника не изменяются с течением времени, то такой электрический ток называют постоянным.**

Можно показать, что скорость дрейфа свободных носителей заряда в проводнике пропорциональна напряжённости созданного в проводнике электрического поля.

**Для поддержания постоянного электрического тока в проводнике требуется наличие в нём неизменного электрического поля.**

Воспользуемся формулой (1) для оценки скорости дрейфа свободных носителей заряда при протекании электрического тока в металле, например в меди. Пусть сила тока в медной проволоке с площадью поперечного сечения  $S = 1 \text{ мм}^2$  равна  $I = 11 \text{ А}$ . Это значение силы постоянного тока соответствует предельно допустимому по техническим условиям значению

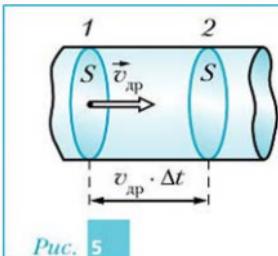


Рис. 5

для такой проволоки. Атомная масса меди  $M = 63,5$  г/моль, а её плотность  $d \approx 8,9$  г/см<sup>3</sup>. Следовательно, концентрация атомов меди  $n = \frac{N_A \cdot d}{M}$ , где  $N_A$  – число Авогадро. Известно, что каждый атом меди при образовании куска металла отдаёт «в коллективное пользование» один электрон. Поэтому концентрация свободных электронов в меди равна:

$$n = \frac{N_A \cdot d}{M} \approx 0,8 \cdot 10^{23} \text{ (см}^{-3}\text{).} \quad (2)$$

Поскольку модуль заряда электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, с учётом формулы (2) из уравнения (1) получаем:

$$v_{\text{др}} = \frac{I}{n \cdot e \cdot S} \approx 0,9 \text{ (мм/с).} \quad (3)$$

Сравним полученное значение с модулем среднеквадратичной скорости хаотического (теплового) движения свободных электронов меди. Будем считать, как принято в классической теории электропроводности металлов, что свободные электроны движутся подобно частицам одноатомного идеального газа. В этом случае модуль среднеквадратичной скорости  $v_{\text{ср.кв.}}$

их хаотического движения можно оценить по формуле  $v_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{3k \cdot T}{m}}$ , где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура вещества,  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг – масса электрона. Следовательно, при комнатной температуре  $v_{\text{ср.кв.}} \approx 120$  км/с. Таким образом, даже при предельно допустимой силе постоянного тока скорость дрейфа свободных электронов в меди примерно в  $10^8$  раз меньше среднеквадратичной скорости их теплового движения.

### Вопросы

- 1 Какие носители заряда называют свободными?
- 2 Какие тела называют: а) проводниками; б) диэлектриками?
- 3 Как называют тела, изготовленные из диэлектриков?
- 4 Движутся ли в проводнике свободные носители заряда, когда по проводнику не течёт ток?
- 5 Что называют скоростью дрейфа свободных носителей заряда?
- 6 Чем может быть вызван дрейф свободных носителей заряда?
- 7 При каких условиях скорость дрейфа свободных носителей заряда будет оставаться неизменной? Как при этом направлена скорость дрейфа?
- 8 Что называют силой тока в проводнике?

- 9** Какой ток называют постоянным? При каких условиях ток в проводнике будет постоянным?

### Упражнения

- 1** Проведите анализ формулы (1) из параграфа.
- 2** Определите силу тока в медном проводнике, через поперечное сечение которого за время  $t = 2$  с проходят электроны, суммарная масса которых  $m = 4 \cdot 10^{-9}$  г.
- 3** Сила тока, текущего по нити лампы накаливания, равна 1 А. Определите заряд, протекающий по нити накаливания за 30 мин.
- 4** Определите среднюю силу тока  $I$  через аккумулятор, пытающий стартёр при запуске двигателя автомобиля, если за время  $t = 1$  мин через него проходит заряд  $q = 18$  кКл.

### Для углублённого уровня

- 5** Плотность алюминия  $d = 2,7$  г/см<sup>3</sup>, его атомная масса  $M = 27$  г/моль. Считая, что каждый атом алюминия при образовании куска металла отдаёт «в коллективное пользование»  $z = 3$  электрона, определите концентрацию свободных электронов в алюминии.
- 6** Используя результаты из упражнения 5, определите модуль скорости дрейфа свободных электронов в проводнике с площадью поперечного сечения  $S = 0,5$  мм<sup>2</sup> при силе тока  $I = 0,5$  А.

§ 3

### Вольтамперная характеристика проводника. Закон Ома для участка цепи. Сопротивление проводника

Как реализовать постоянный ток в проводнике? Пусть проводник, по которому течёт ток, представляет собой проволоку длиной  $l$ . Вы знаете, что сила тока в проводнике будет постоянной, если напряжённость электрического поля в нём не будет изменяться. Для этого, в свою очередь, необходимо поддерживать постоянным напряжение между концами проводника. Следовательно, для существования постоянного тока в проводнике необходимо поддерживать постоянное напряжение между его концами.



Напряжением между двумя точками проводника называют отношение работы сил электрического поля при перемещении пробного заряда вдоль проводника из начальной точки в конечную к этому заряду:  $U = \frac{A}{q}$ .

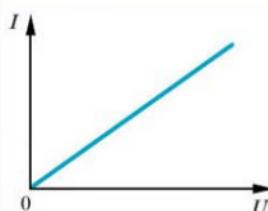


Рис. 6

А как зависит сила тока  $I$  в проводнике от напряжения  $U$  между его концами? Понятно, что при увеличении напряжения  $U$  увеличивается напряжённость электрического поля в проводнике. Это приводит к увеличению модуля силы, вызывающей упорядоченное движение свободных носителей заряда, и, следовательно, к увеличению силы тока.

Зависимость силы тока  $I$  в проводнике от напряжения  $U$  между его концами называют *вольтамперной характеристикой проводника*. Вид этой зависимости для металлических проводников впервые экспериментально был установлен в 1827 г. немецким физиком Георгом Омом (1789–1854). На рис. 6 показан график подобной зависимости при неизменной температуре металлического проводника. Из приведённой зависимости следует вывод.

**При неизменной температуре металлического проводника сила тока  $I$  в этом проводнике прямо пропорциональна напряжению  $U$  между его концами. К**

Это утверждение называют **законом Ома для участка цепи**. Прямая пропорциональность между  $I$  и  $U$  позволяет ввести физическую величину – **сопротивление**, характеризующую проводник.

**Сопротивлением  $R$  проводника называют отношение напряжения  $U$  между концами проводника к силе тока  $I$ , текущего по проводнику:**

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

Единица сопротивления проводника в СИ – *ом* (Ом);  $1 \text{ Ом} = 1 \text{ В}/1 \text{ А}$ .

Сопротивлением 1 Ом обладает проводник, в котором сила тока равна 1 А, если напряжение между его концами равно 1 В.

Таким образом, закон Ома для участка цепи может быть записан в виде:

$$U = I \cdot R \text{ или } I = \frac{U}{R}. \quad (2)$$



Согласно современным экспериментальным данным, закон Ома для проводников из металлов и их сплавов выполняется при всех достижимых напряжённостях электрического поля. Для электролитов закон Ома нарушается, если модуль напряжённости электрического поля в них превышает 5 кВ/см.

Ом также установил, что сопротивление  $R$  проводника, имеющего форму цилиндра и изготовленного из однородного вещества, при неизменной температуре прямо пропорционально его длине  $l$  и обратно пропорционально площади  $S$  поперечного сечения этого проводника.

Зависимость сопротивления проводника от его длины используют для создания резисторов, сопротивление которых можно плавно изменять за счёт перемещения подвижного контакта по поверхности проводника. Такой резистор с регулируемым сопротивлением называют *реостатом*. Он представляет собой проволоку из материала с большим удельным сопротивлением, намотанную на керамический каркас. Проволока покрыта тонким изолирующим слоем. Над обмоткой расположен металлический стержень, по которому можно перемещать подвижный контакт — ползунок (рис. 7). В местах касания ползунком обмотки изолирующий слой с проволоки удалён.

Коэффициент пропорциональности между сопротивлением  $R$  однородного цилиндрического проводника и отношением его длины  $l$  к площади  $S$  его поперечного сечения называют *удельным электрическим сопротивлением* вещества проводника.

**Удельным электрическим сопротивлением**  $\rho$  вещества проводника называют отношение сопротивления  $R$  этого проводника

к величине  $\frac{l}{S}$ :

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}.$$

Единица удельного электрического сопротивления в СИ — Ом · м. На практике площадь поперечного сечения проводников обычно измеряют в квадратных миллиметрах, а длину — в метрах. Поэтому во многих справочниках удельное электрическое сопротивление веществ указывают в Ом · мм<sup>2</sup>/м.

Удельные электрические сопротивления разных чистых металлов при комнатной температуре различаются. Наименьшим удельным сопротивлением ( $1,6 \cdot 10^{-8}$  Ом · м) обладает серебро, а наибольшим ( $22,1 \cdot 10^{-8}$  Ом · м) — свинец. Удельное сопротивление сплавов металлов обычно существенно больше, чем удельные сопротивления чистых металлов, образующих этот сплав. Так, удельное сопротивление никрома (сплав 67,5 % Ni, 15 % Cr, 16 % Fe, 1,5 % Mn) примерно равно  $10^{-6}$  Ом · м. Значительно большие удельные сопротивления имеют электролиты. Так, удельное сопротивление 10%-го

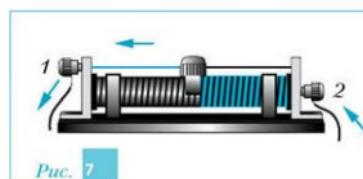


Рис. 7



водного раствора поваренной соли примерно равно  $8 \cdot 10^{-2}$  Ом · м. Удельное сопротивление  $\rho$  электролитов с ростом концентрации  $n$  растворяющего вещества вначале уменьшается, достигает минимума, а затем возрастает.

Удельное электрическое сопротивление вещества зависит от температуры. С ростом температуры удельные сопротивления металлов и их сплавов увеличиваются, а удельные сопротивления электролитов, напротив, уменьшаются.



Для металлов и их сплавов приблизительно можно считать, что их удельное сопротивление изменяется в зависимости от температуры по линейному закону:

$$\rho(t) = \rho(t_0) \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t), \quad (3)$$

где  $\rho(t_0)$  – удельное электрическое сопротивление вещества при температуре  $t_0$ ,  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления вещества,  $\Delta t = t - t_0$ .

Зависимость сопротивления металлов от температуры используют при создании термометров сопротивления. Основной частью такого термометра является платиновая проволока, намотанная на керамический каркас. Подобные термометры позволяют измерять температуры от нескольких десятков до нескольких тысяч градусов по шкале Кельвина с точностью до тысячных долей градуса.

Формула (3) тем точнее описывает зависимость удельного сопротивления проводника от температуры, чем точнее выполняется неравенство  $\alpha \cdot \Delta t < 1$ . Для чистых металлов при  $t_0 = 0$  °C  $\alpha = 1/273$  K<sup>-1</sup> = 0,004 K<sup>-1</sup>. Для сплавов  $\alpha$  обычно несколько меньше, чем для чистых металлов, образующих сплавы. Существуют сплавы, например константан (58,8 % Cu, 40 % Ni, 1,2 % Mn), для которых  $\alpha$  не превышает 10<sup>-5</sup> K<sup>-1</sup>. В отличие от металлов и сплавов, температурный коэффициент сопротивления электролитов отрицателен: в зависимости от концентрации разных электролитов  $\alpha$  обычно изменяется от -0,01 до -0,06 K<sup>-1</sup>.

В 1911 г. голландский учёный Хейке Камерлинг-Оннес (1853–1926) обнаружил, что удельное сопротивление ртути при уменьшении её температуры до 4,12 K скачком уменьшается до нуля. Подобное явление наблюдается и при охлаждении ряда других чистых металлов.



Проводники, сопротивление которых равно нулю, называют сверхпроводниками. Температуру, при которой удельное сопротивление вещества скачком падает до нуля, называют критической.

К настоящему времени установлено, что наибольшей критической температурой (9,5 К) среди чистых металлов обладает ниобий, а среди сравнительно легко получаемых сплавов — сплав ниobia с германием ( $Nb_3Ge$ ). Его критическая температура равна 23,2 К. В 2001 г. было обнаружено, что критическая температура диборида магния ( $MgB_2$ ) примерно равна 40 К. Несмотря на большие технологические трудности, оказалось возможным изготавливать из этого материала проволоку диаметром от 0,1 до 0,3 мм и длиной до сотен метров. В настоящее время этот материал считается наиболее перспективным для изготовления сверхпроводящих магнитов, создающих сильные магнитные поля, а также мощных сверхпроводящих линий электропередачи и скоростных поездов на «магнитной подушке».

В 1986 г. была обнаружена керамика, критическая температура которой оказалась равной 77 К, а в 1993 г. была получена металлокерамика  $HgBa_2Cu_3O_{8+\delta}$  с критической температурой 135 К. При давлении около 35 ГПа критическая температура этой керамики увеличивается до 164 К.

Вещества, критическая температура которых больше температуры кипения азота (77 К) при атмосферном давлении, называют *высокотемпературными сверхпроводниками*.

На рис. 8 отражена хронология открытия основных сверхпроводников. К сожалению, все известные к настоящему времени высокотемпературные

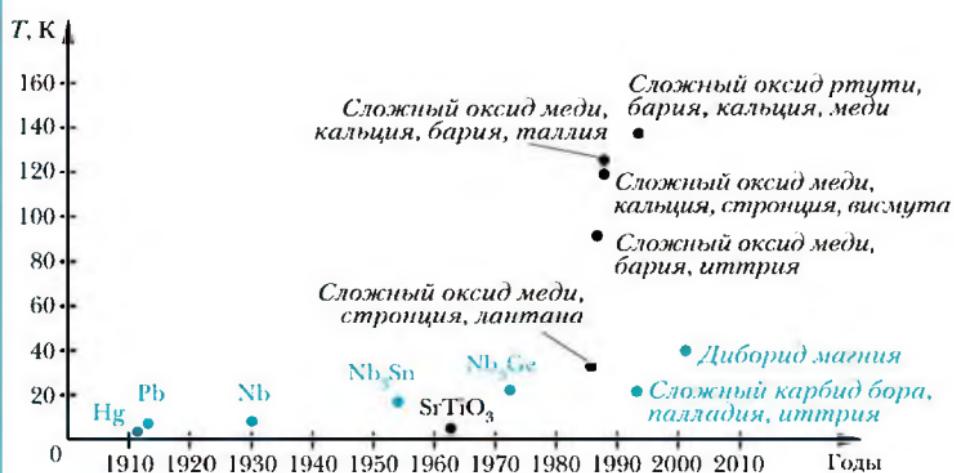


Рис.

Хронология открытия сверхпроводящих материалов

## ■ Электродинамика (продолжение)

сверхпроводники являются керамиками, которые плохо поддаются механической обработке. Это и стало основным препятствием для широкого практического использования подобных материалов.



### Вопросы

- 1 Какие условия должны быть выполнены, чтобы в проводнике существовал постоянный электрический ток?
- 2 Что называют вольтамперной характеристикой проводника?
- 3 Какой вид имеет вольтамперная характеристика металлического проводника?
- 4 Что называют электрическим сопротивлением проводника?
- 5 В каких единицах в СИ измеряют электрическое сопротивление проводников?
- 6 Что утверждает закон Ома? В каком виде обычно записывают закон Ома?
- 7 Как устроен проволочный реостат?
- 8 Что называют удельным электрическим сопротивлением вещества?



### Для углублённого уровня

- 9 Что такое температурный коэффициент сопротивления? Каковы значения этой величины для металлических проводников; для электролитов?
- 10 Как можно вычислить изменение сопротивления проводника при небольшом изменении его температуры?
- 11 Какое явление называют сверхпроводимостью?
- 12 Что такая критическая температура?
- 13 Приведите известные вам примеры применения сверхпроводников.

### Упражнения

- 1 Сопротивление проводника равно  $R = 200 \text{ Ом}$ . Определите силу тока  $I$ , текущего через проводник, если напряжение между его концами  $U = 10 \text{ В}$ .
- 2 Определите напряжение между выводами нагревателя электрического чайника, если его сопротивление равно  $R = 20 \text{ Ом}$  при силе тока  $I = 10 \text{ А}$ .

- 3** Спираль электронагревателя с сопротивлением  $R = 30 \Omega$  рассчитана на максимальную силу тока  $I = 2 \text{ A}$ . Можно ли без повреждения этой спирали поддерживать между её выводами напряжение:  $U_1 = 50 \text{ В}$ ;  $U_2 = 70 \text{ В}$ ?

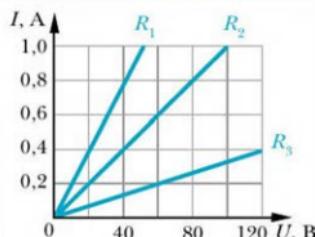
**4** На рис. 9 показаны вольтамперные характеристики трёх проводников. Определите сопротивление каждого из этих проводников.

**5** Определите сопротивление медного провода диаметром  $d = 2 \text{ мм}$  и длиной  $L = 1 \text{ км}$ . Удельное электрическое сопротивление меди считайте равным  $\rho = 1,75 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{м}$ .

**6** Максимальное сопротивление реостата, изображённого на рис. 7, равно  $R = 50 \Omega$ . Реостат содержит  $N = 200$  витков. Определите число витков между точкой контакта ползунка 1 обмотки реостата и выводом 2 его обмотки, при котором сопротивление реостата будет равно  $r = 20 \Omega$ .

**7** Определите сопротивление медной трубки длиной  $L = 1 \text{ м}$ . Толщина стенки трубы  $h = 2 \text{ мм}$ . Внутренний диаметр трубы  $d_1 = 6 \text{ мм}$ , а внешний  $d_2 = 10 \text{ мм}$ .

**Рис. 9**



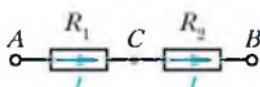
Page 9



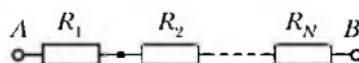
**4** Расчёт сопротивления системы, состоящей из нескольких проводников, соединённых между собой. Измерение силы тока и напряжения

На практике наиболее часто встречаются последовательные и параллельные соединения проводников (резисторов).

Последовательным называют такое соединение резисторов, при котором они соединяются один за другим — цепочкой. На рис. 10 показана схема последовательного соединения двух резисторов  $R_1$  и  $R_2$ . Будем поддерживать между точками  $A$  и  $B$  постоянное напряжение  $U > 0$ . Тогда по проводникам от точки  $A$  к точке  $B$  будет протекать постоянный ток в направлении, показанном стрелкой. При этом через поперечное сечение каждого резистора (как и соединяющего их провода) за одно и то же время



**Рис. 10** Последовательное соединение резисторов  $R_1$  и  $R_2$



**Рис. 11** Последовательное соединение  $N$  резисторов

будет протекать одинаковый заряд. Следовательно, одинаковой будет и сила тока  $I$  через каждый из соединённых проводников. Поэтому, согласно закону Ома, напряжение между выводами первого резистора  $U_1 = I \cdot R_1$ , а второго —  $U_2 = I \cdot R_2$ . Поскольку напряжение между точками  $A$  и  $B$  равно сумме напряжений на участках  $AC$  и  $CB$ , получаем:  $U = U_1 + U_2 = I \cdot (R_1 + R_2)$ . Следовательно, общее сопротивление между данными точками  $R = R_1 + R_2$ . Полученные результаты легко обобщить на любое количество последовательно соединённых резисторов (рис. 11).

! При последовательном соединении  $N$  резисторов через каждый из них протекает одинаковый ток:

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_N. \quad (1)$$

Напряжение  $U$  между крайними выводами последовательно соединённых резисторов равно сумме напряжений между выводами каждого из резисторов:

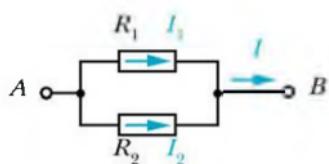
$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_N. \quad (2)$$

Последовательно соединённые резисторы можно заменить одним эквивалентным резистором, сопротивление  $R$  которого равно сумме сопротивлений всех соединённых резисторов:

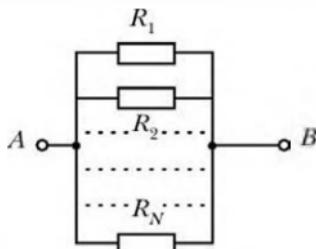
$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N. \quad (3)$$

Наряду с последовательным соединением на практике часто используют *параллельное соединение резисторов*, при котором выводы каждого из резисторов подключают к одной и той же паре клемм (рис. 12). Именно так подключаются к электрической сети различные потребители: лампы освещения, электроплиты, холодильники и т. п.

В этом случае напряжение между выводами каждого из резисторов равно напряжению  $U$  между клеммами  $A$  и  $B$ , к которым подключают эти резисторы. Согласно закону Ома, сила тока через первый резистор равна  $I_1 = \frac{U}{R_1}$ , а через второй —  $I_2 = \frac{U}{R_2}$ . Общая сила тока через рассматриваемый



*Рис.* 12 Параллельное соединение резисторов  $R_1$  и  $R_2$



*Рис.* 13 Параллельное соединение  $N$  резисторов

участок цепи (от  $A$  к  $B$ ) равна сумме сил токов:  $I = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$ . Следовательно, величина, обратная общему сопротивлению  $R$  всего участка цепи между клеммами  $A$  и  $B$ , равна  $\frac{1}{R} = \frac{I}{U} = \frac{I_1 + I_2}{U} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ . Как и в предыдущем случае, полученные результаты легко обобщить на любое количество параллельно соединённых резисторов (рис. 13).

! При параллельном соединении  $N$  резисторов общая сила тока  $I$  равна сумме сил токов, протекающих через каждый из этих резисторов:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N. \quad (4)$$

Напряжение  $U$  между крайними выводами равно напряжению между выводами каждого из параллельно соединённых резисторов:

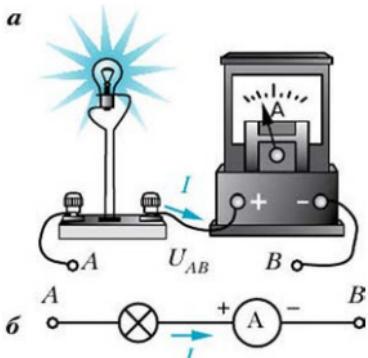
$$U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_N. \quad (5)$$

Параллельно соединённые резисторы  $R_1, R_2, \dots, R_N$  можно заменить одним эквивалентным резистором с сопротивлением  $R$  таким, что:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}. \quad (6)$$

Для экспериментальной проверки полученных соотношений необходимо измерять силу тока в участке цепи и напряжение между его концами.

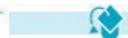
Для измерения силы тока используют *амперметры*. Амперметр соединяют последовательно с участком цепи, в котором следует измерить силу тока (рис. 14). Это обусловлено тем, что при последовательном соединении



*Рис.* 14 Измерение силы тока через лампочку: *a* – электрическая цепь; *b* – её схема

нении проводников сила постоянного тока через любое поперечное сечение неразветвлённого участка цепи одна и та же. Обратим внимание на то, что амперметр следует включать, соблюдая полярность, так, чтобы ток через него шёл от клеммы, обозначенной знаком «+», к клемме, обозначенной знаком «-».

Амперметры различаются диапазоном измеряемых сил токов и внутренним сопротивлением. Отметим, что амперметры, предназначенные для измерения слабых токов ( $I < 1 \text{ mA}$ ), обычно называют *гальванометрами*.



Пусть максимальное значение силы тока, которое можно измерить данным амперметром, равно  $I_0$ , а необходимо измерить силу тока в цепи, превышающую  $I_0$ . Для решения этой задачи в участок цепи включают параллельно соединённые амперметр и резистор  $R_{\text{ш}}$  (рис. 15). Этот резистор называют *шунтом*. Пусть внутреннее сопротивление амперметра равно  $r$ . Определим сопротивление  $R_{\text{ш}}$  шунта, при котором максимальная измеряемая сила тока в цепи в  $n$  раз превысит  $I_0$ .

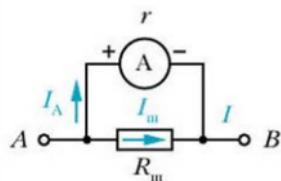
Напряжения между клеммами амперметра и между выводами шунта равны. Поэтому сила тока  $I_A$ , текущего через амперметр, и сила тока  $I_{\text{ш}}$ , текущего через шунт, удовлетворяют соотношению:

$$I_A \cdot r = I_{\text{ш}} \cdot R_{\text{ш}}. \quad (7)$$

Суммарная сила тока  $I$  в участке цепи равна сумме сил токов, текущих через амперметр и шунт:

$$I = I_A + I_{\text{ш}} = I_A \cdot \left(1 + \frac{r}{R_{\text{ш}}}\right). \quad (8)$$

Полученное соотношение позволяет по измеренной амперметром силе тока  $I_A$  рассчитывать силу тока  $I$  в участке цепи. Пусть  $I_A = I_0$ , а  $I = n \cdot I_0$ . Тогда с учётом формул (7) и (8) получаем:



*Рис.* 15

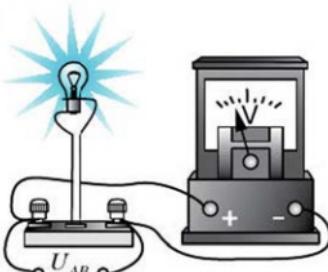
$$R_{\text{м}} = \frac{r}{n - 1} . \quad (9)$$

Из формулы (6) следует, что сопротивление участка цепи, содержащего амперметр с шунтом, равно:

$$R_{AB} = \frac{r \cdot R_{\text{м}}}{r + R_{\text{м}}} = \frac{r}{n} . \quad (10)$$

Для измерения напряжения используют *вольтметры*. Поскольку напряжения между концами параллельно соединённых проводников одинаковы, то вольтметр подключают параллельно участку цепи, между концами которого измеряют напряжение (рис. 16). Вольтметр следует включать, соблюдая полярность: клемму вольтметра со знаком «+» следует соединять с тем концом участка цепи, от которого идёт ток, а клемму со знаком «-» — с противоположным концом участка цепи. ■

а



б

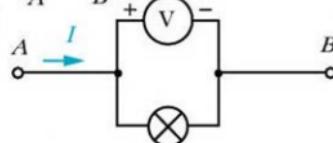


Рис. 16

Измерение напряжения между выводами лампочки:  
а — электрическая цепь;  
б — её схема

 Принцип действия практически всех используемых в настоящее время вольтметров основан на протекании через них тока.

Поэтому важной характеристикой вольтметров, обычно используемых для измерений в цепях постоянного тока, является не только максимальное значение измеряемого напряжения  $U_{\text{max}}$ , но и внутреннее сопротивление  $r$  вольтметра.

Для увеличения максимального значения напряжения, измеряемого с помощью данного вольтметра, последовательно с этим вольтметром



Отметим, что включение в схему измерительных приборов (вольтметров и амперметров), имеющих конечное сопротивление, приводит к изменению измеряемых параметров (силы тока и напряжения). Эти изменения могут быть рассчитаны с использованием формул для последовательного или параллельного соединения проводников и затем учтены при обработке результатов измерений. В идеальном случае сопротивление амперметра считают равным нулю, а сопротивление вольтметра — бесконечно большим.

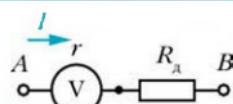


Рис. 17

включают дополнительный резистор (рис. 17). Определим сопротивление  $R_d$  такого резистора, при котором максимальное значение измеряемого напряжения в  $n$  раз превышает  $U_{\max}$  вольтметра.

Поскольку вольтметр и дополнительный резистор включены последовательно, то напряжения между клеммами вольтметра ( $U_B$ ) и выводами дополнительного резистора ( $U_d$ ) удовлетворяют соотношению:  $\frac{U_B}{r} = \frac{U_d}{R_d}$ . Суммарное напряжение между точками участка цепи, к которым подключают вольтметр с дополнительным резистором, равно сумме напряжений на вольтметре и этом резисторе:  $U = U_B + U_d = U_B \cdot \left(1 + \frac{R_d}{r}\right)$ . Полученное соотношение позволяет по измеренному вольтметром напряжению  $U_B$  рассчитывать искомое напряжение  $U$ . Пусть  $U_B = U_{\max}$ , а  $U = n \cdot U_{\max}$ . Тогда  $n \cdot U_{\max} = U_{\max} \cdot \left(1 + \frac{R_d}{r}\right)$ .

Поэтому

$$R_d = (n - 1) \cdot r. \quad (11)$$



### Вопросы

- 1 Какое соединение резисторов называют: а) последовательным; б) параллельным?
- 2 Как с точки зрения последовательного соединения резисторов объяснить зависимость сопротивления однородной с неизменным поперечным сечением проволоки от её длины?
- 3 Почему при параллельном соединении резисторов в цепи напряжения между выводами этих резисторов равны?
- 4 Как с точки зрения параллельного соединения резисторов объяснить зависимость сопротивления однородной проволоки от площади её поперечного сечения?
- 5 Как называются приборы для измерения: а) силы тока; б) напряжения?



### Для углублённого уровня

- 6 Что такое шунт и для чего он нужен?
- 7 Как можно увеличить значение максимального напряжения, измеряемого данным вольтметром?

**Упражнения**

- Изобразите схему последовательного соединения трёх резисторов с сопротивлениями 20 Ом, 50 Ом и 100 Ом и определите сопротивление между крайними точками этой схемы.
- Определите напряжение на каждом из резисторов из упражнения 1, если напряжение между крайними точками участка цепи 17 В.
- Напряжение на втором резисторе в схеме, рассмотренной в упражнении 1, равно 2 В. Определите напряжения на первом и третьем резисторах.
- Изобразите схему параллельного соединения трёх резисторов с сопротивлениями 20 Ом, 50 Ом и 100 Ом и определите сопротивление между точками соединения этих резисторов.
- Сила тока, текущего через третий резистор в схеме, рассмотренной в упражнении 4, равна 10 мА. Определите силы токов, текущих через первый и второй резисторы.

**Для углублённого уровня**

- Определите сопротивление между клеммами A и B в схеме на рис. 18. Сопротивления всех резисторов равны R.
- При каком соотношении между сопротивлениями резисторов в схеме на рис. 19 разность потенциалов между точками C и D будет равна нулю, если напряжение между точками A и B отлично от нуля?
- Определите сопротивление между клеммами a и b в схеме, показанной на рис. 20. Сопротивления всех резисторов одинаковы и равны R.

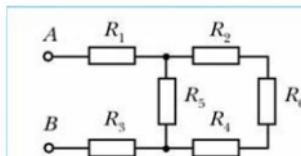


Рис. 18

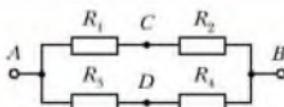


Рис. 19

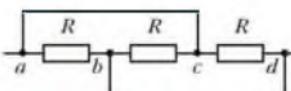


Рис. 20

## § 5

Работа и мощность постоянного тока.  
Закон Джоуля — Ленца

При упорядоченном движении свободных носителей заряда в проводнике под действием электрического поля силы этого поля совершают работу. Эту работу называют работой электрического тока.

Пусть между концами  $A$  и  $B$  проводника поддерживается постоянное напряжение  $U$ , а за рассматриваемый промежуток времени  $\Delta t$  через попечное сечение этого проводника проходит заряд  $\Delta q$ . Тогда, согласно определению напряжения, работа сил электрического поля по переносу заряда за рассматриваемый промежуток времени по участку  $AB$  проводника равна:

$$A = U \cdot \Delta q. \quad (1)$$

Если сила тока  $I$  в проводнике постоянна, то  $\Delta q = I \cdot \Delta t$ . В этом случае выражение (1) принимает вид:

$$A = U \cdot I \cdot \Delta t. \quad (2)$$

**!** Таким образом, *работа постоянного тока в проводнике за рассматриваемый промежуток времени равна произведению напряжения между концами проводника, силы тока в нём и длительности этого промежутка времени.*

Работа тока приводит к изменению энергии проводника, которая может превращаться в различные формы. Например, в электромоторе работа тока обеспечивает механическое движение ротора, благодаря чему совершается механическая работа. Подобным образом осуществляется, например, запуск двигателя автомобиля стартёром (электромотором) от аккумулятора. В электролитических устройствах работой тока обусловлено протекание химических реакций (см. § 10).

Если механическая работа тока равна нулю и в проводнике не происходят химические превращения, то в результате работы электрического тока увеличивается только внутренняя энергия проводника. Следовательно, *проводник при прохождении по нему тока нагревается*.

Причину нагревания проводника при протекании по нему тока легко понять. После создания в проводнике электрического поля свободные носители заряда, разгоняемые этим полем, взаимодействуют (столкиваются) с совершающими хаотическое (тепловое) движение остальными частицами проводника. При этих столкновениях часть энергии упорядоченного дви-

жения свободных носителей заряда переходит в энергию хаотического движения частиц проводника. В результате внутренняя энергия, а следовательно, и температура проводника возрастают, и он начинает отдавать тепло окружающей среде. По истечении некоторого времени наступает динамическое равновесие: количество теплоты  $Q$ , отдаваемое проводником окружающей среде за любой промежуток времени  $\Delta t$ , становится равным работе  $A$  тока в проводнике за то же время ( $A = Q$ ). При этом, согласно первому закону термодинамики, внутренняя энергия  $U_{\text{ин}}$  проводника и его температура перестают изменяться ( $\Delta U_{\text{ин}} = A - Q = 0, T = \text{const}$ ).

После установления динамического равновесия *при отсутствии механической работы и химических превращений* выполняется закон Ома, и количество теплоты  $Q$ , отдаваемое проводником окружающей среде за промежуток времени  $\Delta t$ , в соответствии с выражением (2) может быть рассчитано по любой из трёх формул:

$$Q = U \cdot I \cdot \Delta t = I^2 \cdot R \cdot \Delta t = \frac{U^2}{R} \cdot \Delta t, \quad (3)$$

где  $R$  – сопротивление проводника.

Экспериментально закон, позволяющий рассчитать количество теплоты, которое выделяется проводником с током в окружающую среду, был установлен независимо друг от друга английским физиком Джеймсом Джоулем (1818–1889) и русским учёным Эмилием Христиановичем Ленцем (1804–1865). Поэтому этот закон называют **законом Джоуля – Ленца**.

**Количество теплоты, выделяемое проводником, по которому течёт постоянный ток, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени  $\Delta t$ :**

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \Delta t. \quad (4)$$

Из формулы (4) становится понятным физический смысл омического сопротивления проводника. С энергетической точки зрения эта величина характеризует эффективность преобразования работы электрического тока в данном проводнике в тепловую энергию.

Тепловое действие электрического тока широко используют в различных электрических нагревательных устройствах, например в электрочайниках, утюгах, паяльниках, электропечах.

Каждое электрическое устройство характеризуют потребляемой мощностью. Поэтому наряду с работой тока вводят понятие мощности тока. При этом различают *среднюю мощность* и мощность в данный момент времени – *мгновенную мощность*.

Физическую величину, равную отношению работы  $A$  тока за промежуток времени  $\Delta t$  к длительности этого промежутка времени, называют средней мощностью тока:

$$P = \frac{A}{\Delta t}. \quad (5)$$

Отношение работы  $\Delta A$  тока за достаточно малый промежуток времени  $\Delta t$ , начинающийся в момент времени  $t$ , к длительности этого промежутка времени называют мощностью тока в момент времени  $t$ :

$$P(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta A}{\Delta t}. \quad (6)$$

Единица мощности в СИ – ватт (Вт); 1 Вт = 1 Дж/1 с.

В случае постоянного тока мгновенная и средняя мощности не изменяются с течением времени и равны друг другу. В соответствии с выражениями (2), (5) и (6) они могут быть рассчитаны по формуле:

$$P = P(t) = I \cdot U. \quad (7)$$

 При отсутствии механической работы и химических превращений мощность постоянного тока в соответствии с выражением (3) может быть рассчитана по любой из трёх формул:

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}. \quad (8)$$



Формула (8) позволяет объяснить, почему передачу электроэнергии от электростанций к потребителю стараются осуществлять при возможно более высоком напряжении. Действительно, если электростанция выдаёт в линию электропередачи (ЛЭП) мощность  $P$  при напряжении  $U$ , то сила тока в проводах ЛЭП равна  $I = \frac{P}{U}$ . Поэтому в проводах ЛЭП, имеющих сопротивление  $R$ , мощность потерь энергии на тепловыделение будет равна:

$$P_{\text{пот}} = I^2 \cdot R = \frac{P^2 \cdot R}{U^2}. \quad (9)$$

В мощных ЛЭП допустимыми считаются потери, не превышающие 8 %, т. е. максимальный коэффициент потерь не должен превышать величину  $\alpha_{\max} = \frac{P_{\text{пот}}}{P} = 0,08$ . Иными словами, для ЛЭП коэффициент полезного действия  $\eta$  – отношение мощности  $P_{\text{п}}$ , получаемой потребителем, к мощности  $P$ , поступающей в ЛЭП, равен:

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P} = \frac{P - P_{\text{пот}}}{P} = 1 - \alpha_{\text{max}}, \quad (10)$$

Для мощных ЛЭП это отношение должно быть не менее 0,92.



### Вопросы

1. Что называют работой тока?
2. В какие виды энергии может превращаться работа тока?
3. При каких условиях работа тока превращается только в тепловую энергию?
4. В каких единицах в СИ измеряют работу электрического тока?
5. Что называют: а) средней мощностью электрического тока; б) мгновенной мощностью?
6. В каких единицах в СИ измеряют мощность электрического тока?



### Для углублённого уровня

7. Что называют коэффициентом потерь ЛЭП?
8. Какими способами можно уменьшить коэффициент потерь ЛЭП?
9. Что называют КПД линии электропередачи?
10. Какими способами можно повысить КПД линии электропередачи?

### Упражнения

1. Сила тока, протекающего по спирали электрического чайника, равна  $I = 10$  А. Напряжение между выводами этой спирали  $U = 220$  В. Определите энергию, потребляемую этим чайником за время  $\tau = 5$  мин.
2. Сопротивление нагревательного элемента электрического паяльника  $r = 220$  Ом. Паяльник рассчитан на работу при напряжении  $U = 220$  В. Определите мощность тока, потребляемую паяльником.
3. Лампа накаливания за время  $\tau = 0,5$  мин при напряжении между её выводами  $U = 120$  В потребляет энергию  $W = 900$  Дж. Определите силу тока через лампу.
4. Электрическая лампа мощностью  $P = 100$  Вт зимой в среднем горит  $\tau = 8$  ч в сутки. Сколько электроэнергии в течение месяца ( $n = 30$  дней) потребляет эта лампа?



**11.5** Имеется электрическая лампа мощностью  $P_L = 50$  Вт, рассчитанная на рабочее напряжение  $U_L = 120$  В. Определите сопротивление резистора, который нужно последовательно с этой лампой подключить к источнику с напряжением  $U_s = 220$  В, чтобы напряжение на лампе соответствовало рабочему.

**Для углублённого уровня**

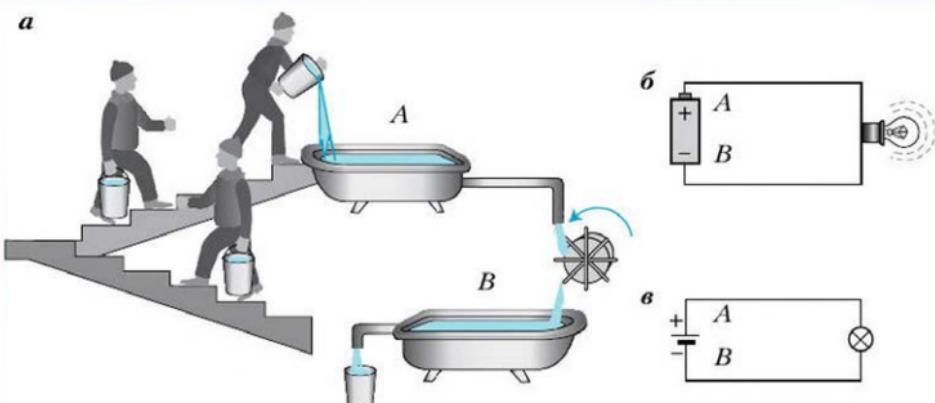
**11.6** Электрический чайник имеет две спирали. С помощью переключателя к клеммам чайника можно подключать эти спирали либо по одной, либо соединив их последовательно, либо соединив их параллельно. При этом напряжение между клеммами чайника остается неизменным. Если к клеммам подключить только первую спираль, то налитая в чайник вода закипит через время  $t_1$ , а если только вторую — через время  $t_2$ . Через какое время закипит вода, если спирали подключить: а) параллельно; б) последовательно (теплообменом с окружающей средой пренебречь)?

**11.7** Во сколько раз пришлось бы увеличить массу проводов ЛЭП, если при неизменной длине и получаемой потребителем мощности напряжение на входе линии уменьшить в  $k$  раз, оставив неизменными потери в линии?

**§ 6 Источник тока. Электродвижущая сила. Замкнутая электрическая цепь. Закон Ома для полной цепи**

Пусть напряжение между точками  $A$  и  $B$  проводника обусловлено только электростатическим полем. Тогда если потенциал электростатического поля точки  $A$  больше потенциала точки  $B$ , то электрический ток в проводнике течёт в направлении от  $A$  к  $B$ . Поэтому упорядоченное движение положительно заряженных частиц в проводнике под действием сил электрического поля можно сравнить с движением молекул воды, стекающей по трубе из сосуда  $A$  в сосуд  $B$  под действием сил тяжести (рис. 21).

Чтобы вода в трубе текла постоянно, необходимо восполнять её убыль в верхнем сосуде  $A$ . Для этого можно забирать воду из нижнего сосуда  $B$  и переносить её в сосуд  $A$ . При этом при подъёме воды необходимо совершать работу против сил тяжести. Следовательно, необходимо устройство, совершающее работу по переносу воды. На рис. 21, *a* роль этого устройства выполняют люди, поднимающие воду. Таким образом вода, постоянно

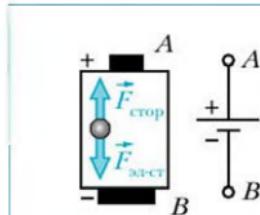


**Рис. 21** Электрический ток течёт и совершает работу за счёт работы сторонних сил в источнике тока

текущая в трубе из  $A$  в  $B$ , совершает работу (вращает турбину и соверша-ет работу против сил трения в трубе) за счёт работы людей.

Аналогично по своей роли устройство необходимо и для поддержания постоянного электрического тока в проводнике  $AB$ . Оно должно компенсировать убыль положительных зарядов в точке  $A$ , забирая их из точки  $B$ . При этом, поскольку потенциал точки  $B$  меньше потенциала точки  $A$ , в этом устройстве должны действовать силы, совершающие рабо-ту по переносу зарядов против сил электростатического поля. Эти си-лы называют *сторонними*, так как в их роли не могут выступать элек-тростатические силы.

Устройство, в котором действуют сторонние силы, называют *источ-ником тока*. Примером такого источника является батарейка (рис. 21, б). На схемах источник постоянного тока принято изображать так, как пока-зано на рис. 21, в. За счёт действия сторонних сил в источнике происходит перенос носите-лей положительных зарядов от клеммы  $B$  к клемме  $A$  либо перенос носителей отрица-тельный зарядов от клеммы  $A$  к клемме  $B$ . (Эти процессы могут происходить и одновре-менно.) Если клеммы источника не соединены друг с другом проводником (источник разомк-нут), то в источнике имеет место динамиче-ское равновесие (рис. 22): действие сторонних



**Рис. 22**



сил  $\vec{F}_{\text{стор}}$  уравновешено действием электростатических сил  $\vec{F}_{\text{эст}}$ , возникших из-за накопления зарядов на полюсах (клеммах)  $A$  и  $B$ . При этом потенциал клуммы  $A$  больше потенциала клуммы  $B$ . Клемму  $A$  называют положительным полюсом источника и обозначают знаком «+», а клемму  $B$  – отрицательным полюсом и обозначают знаком «–».

Возникновение сторонних сил может быть обусловлено разными причинами. Например, в генераторе Ван де Графа носители заряда упорядоченно перемещаются наэлектризованной движущейся диэлектрической лентой; в химических источниках тока – батарейках, аккумуляторах – сторонние силы возникают из-за протекающих в них химических реакций; в индукционных генераторах возникновение сторонних сил обусловлено действием магнитного поля на свободные носители заряда в движущихся проводниках. Сторонние силы могут возникать также под действием света, неравномерного нагрева проводников и по другим принципам.

Источник тока и подключённый к его полюсам проводник  $AB$  образуют замкнутую цепь. В этой цепи электрический ток совершает работу за счёт работы сторонних сил в источнике тока. Для характеристики работы сторонних сил используют специальную физическую величину – **электродвижущую силу** (ЭДС).

**Электродвижущей силой** (ЭДС) называют физическую величину, равную работе сторонних сил по перемещению пробного заряда внутри источника от его отрицательного полюса к положительному, делённой на этот заряд:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор}}}{q}. \quad (1)$$

Единица электродвижущей силы (ЭДС) в СИ такая же, как и единица разности потенциалов и единица напряжения, – **вольт** (В).

Обратим внимание на то, что *сторонние силы не потенциальны*: их работа над пробным зарядом при его перемещении из одной точки в другую зависит от вида траектории. Например, при перемещении пробного заряда от полюса  $B$  источника к его полюсу  $A$  (см. рис. 22) по траектории, лежащей целиком вне источника, работа сторонних сил равна нулю, так как вне источника сторонних сил нет.

Рассмотрим простейшую замкнутую цепь, состоящую из источника тока и резистора  $R$  (рис. 23).

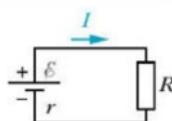


Рис. 23

**!** Сопротивление резистора  $R$ , подключённого к источнику тока, принято называть *внешним сопротивлением (или нагрузкой замкнутой цепи)*.

Напротив, сопротивление участка цепи, находящегося внутри источника, называют *внутренним сопротивлением источника*. **К**

Пусть внутреннее сопротивление показанного на рис. 23 источника равно  $r$ , его ЭДС равна  $\mathcal{E}$ , а сила тока в цепи равна  $I$ . Рассмотрим промежуток времени  $\Delta t$ . За этот промежуток времени через поперечное сечение цепи проходит заряд  $\Delta q = I \cdot \Delta t$ , а работа сторонних сил, согласно формуле (1), равна:

$$A_{\text{стор}} = \mathcal{E} \cdot \Delta q = \mathcal{E} \cdot I \cdot \Delta t. \quad (2)$$

За рассматриваемый промежуток времени в цепи на сопротивлениях  $R$  и  $r$ , согласно закону Джоуля — Ленца, выделяется количество теплоты:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \Delta t + I^2 \cdot r \cdot \Delta t. \quad (3)$$

Согласно закону сохранения энергии,  $A_{\text{стор}} = Q$ . Отсюда с учётом формул (2) и (3) получаем:

$$\mathcal{E} = I \cdot R + I \cdot r. \quad (4)$$

Из соотношения (4) получаем закон **Ома для полной (замкнутой) цепи**.

**Сила тока в замкнутой цепи равна отношению ЭДС источника тока к полному сопротивлению цепи:**

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}. \quad (5)$$

Если цепь содержит несколько последовательно соединённых источников, то при протекании тока сторонние силы каждого из источников будут совершать работу. В этом случае в числителе правой части формулы (5) будет стоять алгебраическая сумма ЭДС всех источников тока. Для расчёта алгебраической суммы ЭДС применяют *правило знаков*. Для этого вводят положительное направление обхода цепи. Например, на рис. 24 за положительное принято направление обхода цепи по часовой стрелке. *Если действие сторонних сил рассматриваемого источника стремится вызвать ток в положительном направлении обхода, то ЭДС этого источника считаю положительной. В противном случае — отрицательной.*

**К** Например, внутреннее сопротивление химического источника тока — это сопротивление его электролита и электродов; внутреннее сопротивление индукционного генератора — это сопротивление его обмоток.

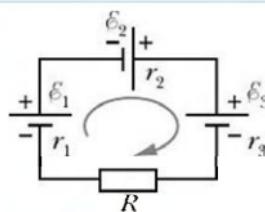


Рис. 24

В соответствии с этим правилом алгебраическая сумма ЭДС для цепи, показанной на рис. 24, равна:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = |\mathcal{E}_1| + |\mathcal{E}_2| - |\mathcal{E}_3|. \quad (6)$$

Сила тока в замкнутой цепи равна отношению алгебраической суммы ЭДС источников тока к полному сопротивлению цепи, равному сумме внешнего сопротивления и внутренних сопротивлений всех источников. Например,

для изображённой на рис. 24 цепи формула (5) имеет вид:

$$I = \frac{|\mathcal{E}_1| + |\mathcal{E}_2| - |\mathcal{E}_3|}{R + r_1 + r_2 + r_3}. \quad (7)$$

Обратим особое внимание на то, что сила тока  $I$ , рассчитанная для цепи с несколькими источниками тока, может быть как положительной, так и отрицательной. Если алгебраическая сумма ЭДС  $\mathcal{E} > 0$ , то, согласно формуле (5), сила тока  $I > 0$ . Это означает, что направление тока в цепи совпадает с положительным направлением её обхода. Напротив, если  $\mathcal{E} < 0$ , то, согласно формуле (5),  $I < 0$ . Это означает, что направление тока в цепи противоположно положительному направлению её обхода.

Графики зависимости силы тока  $I$  в замкнутой цепи (см. рис. 23) и напряжения  $U = I \cdot R$  между выводами резистора от его сопротивления  $R$  при неизменных внутреннем сопротивлении  $r$  и ЭДС  $\mathcal{E}$  источника показаны на рис. 25 и 26. Проанализируем эти графики.

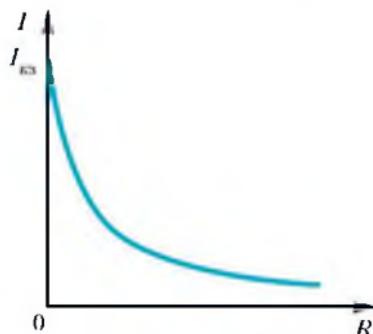


Рис. 25

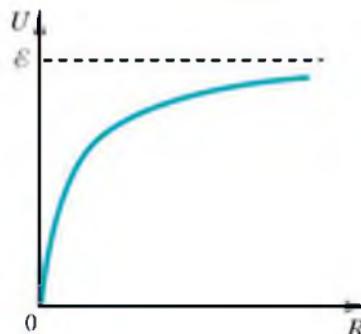


Рис. 26

Из графиков видно, что при увеличении внешнего сопротивления сила тока в цепи уменьшается, а напряжение между полюсами источника *вдоль внешнего участка цепи* увеличивается.

Случай, когда внешнее сопротивление стремится к нулю, называют *коротким замыканием*. При коротком замыкании сила тока в цепи максимальна и, согласно формуле (5), равна  $I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$ . Следовательно, при малом внутреннем сопротивлении источника сила тока в цепи будет очень большой. Поэтому при коротком замыкании соединяющий полюсы источника провод может расплавиться, а сам источник может перегреться и выйти из строя.

Напротив, когда внешнее сопротивление стремится к бесконечно большим значениям, сила тока в цепи стремится к нулю, а напряжение между полюсами источника *вдоль внешнего участка цепи* стремится к ЭДС источника.

### Вопросы

1. Что такое источник тока?
2. Какие силы действуют на заряды в источнике тока? На каком участке замкнутой цепи свободные носители заряда упорядоченно движутся против сил электростатического поля?
3. Что происходит в источнике тока под действием сторонних сил?
4. Какие известные вам причины могут вызвать появление сторонних электрических сил в источниках тока?
5. Что такое ЭДС?
6. Что называют внутренним сопротивлением источника?
7. Сформулируйте правило знаков для ЭДС источника тока.
8. Когда ток в замкнутой цепи считается положительным?
9. Сформулируйте закон Ома для полной цепи.
10. Что называют коротким замыканием? Что может произойти при коротком замыкании источника тока?
- \*11. Как связаны между собой разность потенциалов, ЭДС и напряжение между клеммами разомкнутого источника вдоль траектории, которая целиком лежит: а) вне источника; б) внутри источника?

### Упражнения

1. Нарисуйте схему простейшей замкнутой (полной) цепи. Определите силу тока в этой цепи, если ЭДС источника  $\mathcal{E} = 10$  В, его внутреннее сопротивление  $r = 30$  Ом, а сопротивление нагрузки  $R = 70$  Ом.



## ■ Электродинамика (продолжение)

- 2** ЭДС батарейки  $\mathcal{E} = 9$  В. Ученик подключил к этой батарейке лампочку, потребляющую мощность  $P = 4,5$  Вт при нормальном рабочем напряжении  $U = 4,5$  В, и обнаружил, что лампа горит полным накалом. Определите внутреннее сопротивление этой батарейки.



### Для углублённого уровня

- 3** Определите напряжение между клеммами источника с электродвижущей силой  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$  вдоль участка цепи, целиком лежащего внутри источника, если сопротивление нагрузки, подключённой к этому источнику, равно  $R$ . Рассмотрите случаи, когда  $R = 0$  и когда источник разомкнут ( $R \rightarrow \infty$ ).



§ 7

### Для углублённого уровня

## Полезная и полная мощность тока в замкнутой цепи. Как передаётся электрическая энергия

При протекании постоянного тока по замкнутой цепи *полезная мощность*  $P_{\text{п}}$  *электрического тока* — мощность, выделяемая на внешнем сопротивлении (нагрузке  $R$ ), равна:

$$P_{\text{п}} = I^2 \cdot R. \quad (1)$$

При этом *полная мощность тока* — это суммарная мощность, выделяемая на внешнем сопротивлении  $R$  и внутреннем сопротивлении  $r$  источника тока. (Сопротивлением проводов, с помощью которых нагрузка подключается к источнику тока, либо пренебрегают, либо их сопротивление суммируют с  $r$ .) Полная мощность совпадает с затрачиваемой мощностью  $P_{\text{з}}$ , которую развивают сторонние силы источника:

$$P_{\text{з}} = I^2 \cdot (R + r). \quad (2)$$

С учётом закона Ома для полной цепи эти формулы можно представить в виде:

$$P_{\text{п}} = \frac{\mathcal{E}^2 \cdot R}{(R + r)^2}, \quad (3)$$

$$P_{\text{з}} = \frac{\mathcal{E}^2 \cdot (R + r)}{(R + r)^2} = \frac{\mathcal{E}^2}{R + r}. \quad (4)$$

Следовательно, коэффициент полезного действия (КПД) источника в рассматриваемой цепи:

$$\eta = \frac{P_{\text{n}}}{P_{\text{s}}} = \frac{R}{R+r}. \quad (5)$$

Проведём анализ функций (3), (4) и (5). Для этого можно представить данные функции в виде зависимостей  $P_{\text{n}}(R)$ ,  $P_{\text{s}}(R)$  и  $\eta(R)$  и построить графики этих зависимостей (рис. 27–29).

В случае короткого замыкания, когда внешнее сопротивление стремится к нулю, из выражений (3) и (4) следует, что полезная мощность также стремится к нулю, а затрачиваемая — к значению  $\frac{\epsilon^2}{r}$ .

При этом практически вся работа сторонних сил расходуется на нагревание источника тока. Поэтому и КПД источника стремится к нулю.

При увеличении внешнего сопротивления  $R$  из уравнения (4) следует, что затрачиваемая мощность (мощность сторонних сил) непрерывно уменьшается. Полезная же мощность (см. рис. 27) вначале нарастает, достигает максимума при  $R = r$ , а затем убывает. При этом КПД источника непрерывно увеличивается. Следовательно, согласно формуле (5), из двух химических источников тока, имеющих одинаковые ЭДС, но разные внутренние сопротивления, с большим КПД будет работать тот, внутреннее сопротивление которого меньше.

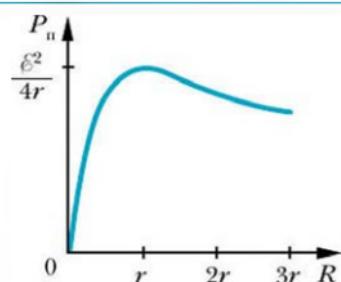


Рис. 27

График зависимости полезной (выделяемой на внешнем сопротивлении) мощности от нагрузки

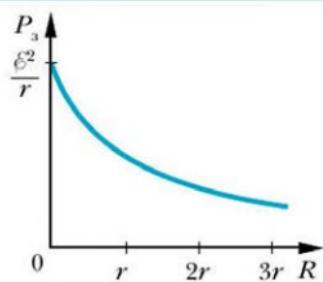


Рис. 28

График зависимости затрачиваемой мощности от нагрузки

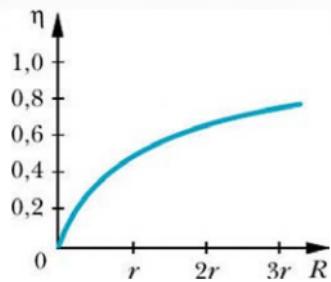


Рис. 29

График зависимости КПД источника тока от нагрузки

Обратим внимание на то, что в случае, когда полезная мощность максимальна при  $R = r$  (см. рис. 27), КПД источника равен 0,5 (или 50 %). Другими словами, при работе цепи в этом режиме (*режиме согласования*) только половина работы сторонних сил преобразуется в полезную работу, а вторая половина расходуется на нагревание источника тока.

При стремлении внешнего сопротивления (сопротивления нагрузки) к бесконечно большим значениям полезная мощность стремится к нулю. К нулю при этом стремится и затрачиваемая мощность. КПД же источника стремится к единице (100 %). Другими словами, при очень больших сопротивлениях нагрузки практически вся работа сторонних сил преобразуется в полезную работу.

Всем хорошо известно, что для передачи электрической энергии от источника тока к потребителю необходимы соединительные провода. Многие думают, что электрическая энергия передаётся по этим проводам, подобно энергии текущей по трубе воды. На самом деле с электроэнергией ситуация обстоит иначе.

Чем же и как переносится получаемая потребителем энергия? И где она столь стремительно движется, если не внутри проводов ЛЭП?

При подключении ЛЭП к источнику электрического тока вокруг проводов ЛЭП создаётся как электрическое, так и магнитное поле. Именно комбинация этих двух полей — *электромагнитное поле, окружающее проводники с током, и переносит электрическую энергию от источника к потребителю*. При этом провода ЛЭП играют роль направляющих, вдоль которых движется электромагнитная энергия со скоростью, практически равной скорости света в вакууме ( $3 \cdot 10^8$  м/с). Тепловыделение в проводах, обусловленное протеканием тока, происходит за счёт электромагнитной энергии, поступающей в них через поверхность от электромагнитного поля, окружающего провода.

### Вопросы

1. Что называют: а) полезной; б) затраченной мощностью электрического тока; в) КПД источника тока?
2. При каком условии можно получить максимальную полезную мощность от источника тока? Как называют этот режим работы источника тока?
3. Как происходит передача электрической энергии от источника тока к потребителю?
4. За счёт какой энергии происходит выделение теплоты в проводах ЛЭП?

**Упражнения**

- 1\_ Оцените время, по истечении которого потребитель начнёт получать электроэнергию после подключения ЛЭП к источнику тока, если ЛЭП имеет длину  $L = 60$  км.
- 2\_ Докажите, что отдаваемая источником тока мощность будет максимальной при условии, что внутреннее сопротивление источника равно сумме сопротивлений ЛЭП и нагрузки.
- 3\_ Сопротивление нагрузки  $R = 30$  Ом. Имеются три источника с одинаковыми ЭДС  $\mathcal{E} = 50$  В, но разными внутренними сопротивлениями:  $r_1 = 15$  Ом,  $r_2 = 25$  Ом и  $r_3 = 35$  Ом. Сопротивление проводов передающей линии  $r_l = 5$  Ом. Какой из этих источников следует использовать, чтобы выделяющаяся на нагрузке мощность была максимальной? Определите эту мощность и КПД передающей линии при использовании порознь каждого из имеющихся источников.
- ✓ 4\_ Определите мощность  $P$ , выделяющуюся во внешнем участке цепи, состоящей из двух одинаковых резисторов, если известно, что на резисторах выделяется одна и та же мощность как при их последовательном, так и при их параллельном соединении. Сопротивление одного резистора равно  $R$ , внутреннее сопротивление источника тока в этой цепи равно  $r$ , а ЭДС равна  $\mathcal{E}$ .
- ✓ 5\_ К источнику тока с  $\mathcal{E} = 15$  В и внутренним сопротивлением  $r = 2,5$  Ом подключена нагрузка, сопротивление которой равно  $R$ . Определите зависимость мощности  $P_1$ , выделяющейся в нагрузке, мощности  $P_2$ , выделяющейся в источнике тока, и мощности  $P$  сторонних сил в источнике от  $R$ . Постройте графики зависимости  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P$  от сопротивления нагрузки  $R$ .
- \* 6\_ Постройте график зависимости КПД источника в цепи, рассмотренной в упражнении 5, от отношения  $\frac{R}{r}$ .

**Для углублённого уровня****§ 8**

**Закон Ома для участка цепи с источником тока.  
Правила Кирхгофа**

Рассмотрим участок цепи между точками  $A$  и  $B$  (рис. 30,  $a$ ), на котором действуют как электростатические силы, так и сторонние силы в источнике тока. Пусть ЭДС источника равна  $\mathcal{E}$ , а разность потенциалов

электростатического поля между точками  $A$  и  $B$  равна  $\varphi_A - \varphi_B$ . Напряжение  $U$  между точками  $A$  и  $B$ , рассчитанное вдоль участка цепи  $AB$ , равно отношению суммы работ всех электрических сил (электростатических и сторонних) по перемещению пробного заряда  $q$  от  $A$  к  $B$  вдоль этого участка к этому заряду:

$$U = \frac{A_{\text{зз}}}{q} = \frac{A_{\text{зз-ст}}}{q} + \frac{A_{\text{стор}}}{q} = \varphi_A - \varphi_B + \mathcal{E}. \quad (1)$$

Пусть сопротивление резистора равно  $R$ , а внутреннее сопротивление источника тока —  $r$ . Тогда, согласно закону Ома, сила тока на участке цепи  $AB$  постоянна и равна:

$$I = \frac{U}{R+r} = \frac{\varphi_A - \varphi_B + \mathcal{E}}{R+r}. \quad (2)$$

Перепишем выражение (2) в виде:

$$I \cdot (R+r) = \varphi_A - \varphi_B + \mathcal{E}. \quad (3)$$



Таким образом, произведение силы тока на сопротивление участка цепи равно сумме двух величин: разности потенциалов между концами этого участка и ЭДС источника тока на этом участке.

Из выражения (3) следует, что если на рассматриваемом участке действуют несколько источников тока, то  $\mathcal{E}$  в выражении (3) будет равна алгебраической сумме ЭДС этих источников. В этой сумме ЭДС источника положительна, если этот источник стремится вызвать ток в направлении от  $A$  к  $B$ . Если же источник стремится вызвать ток в обратном направлении (от  $B$  к  $A$ ), то ЭДС такого источника отрицательна.

Проведём анализ выражения (3).

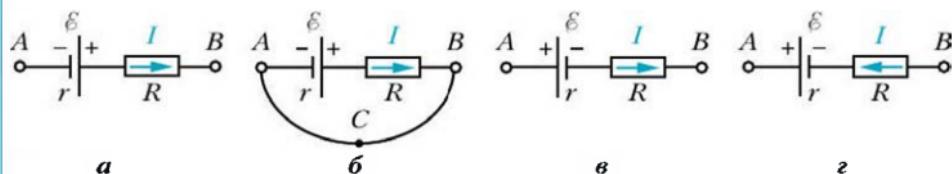


Рис. 30

Если  $\varphi_A - \varphi_B + \mathcal{E} > 0$ , то из выражения (3) следует, что  $I > 0$ . Другими словами, если сумма разности потенциалов между  $A$  и  $B$  и ЭДС на участке  $AB$  положительна, то ток направлен от  $A$  к  $B$ .

Напротив, если  $\varphi_A - \varphi_B + \mathcal{E} < 0$ , то из выражения (3) следует, что  $I < 0$ . Другими словами, если сумма разности потенциалов между  $A$  и  $B$  и ЭДС на участке  $AB$  отрицательна, то ток направлен от  $B$  к  $A$ .

Рассмотрим несколько частных случаев. Пусть  $\varphi_A - \varphi_B = 0$ . В этом случае точки  $A$  и  $B$  можно соединить проводом  $ACB$  с нулевым сопротивлением (рис. 30, б). Тогда выражение (3) принимает вид:

$$I \cdot (R + r) = \mathcal{E}. \quad (4)$$

Полученное соотношение (4) совпадает с известным вам законом Ома для полной цепи.

Пусть  $\mathcal{E} < 0$ . Тогда если  $\varphi_A - \varphi_B > |\mathcal{E}|$ , то из выражения (3) следует, что  $I > 0$ . Другими словами, если работа электростатических сил по переносу пробного заряда от  $A$  к  $B$  больше модуля отрицательной работы сторонних сил на этом участке, то ток направлен от  $A$  к  $B$  (рис. 30, в).

Напротив, если при  $\mathcal{E} < 0$  разность потенциалов  $\varphi_A - \varphi_B < |\mathcal{E}|$ , то из выражения (3) получаем, что  $I < 0$ . Другими словами, если работа электростатических сил по переносу пробного заряда от  $A$  к  $B$  меньше модуля отрицательной работы сторонних сил на этом участке, то ток будет течь от  $B$  к  $A$  (рис. 30, г).

Применение выражения (3) позволяет рассчитывать силы токов в сложных (разветвлённых) цепях. Рассмотрим, как получают систему уравнений, позволяющую выполнить такой расчёт, на примере цепи, схема которой показана на рис. 31. Пусть ЭДС источников тока равны  $\mathcal{E}_1$ ,  $\mathcal{E}_2$  и  $\mathcal{E}_3$ . Сопротивления разных участков цепи между точками  $A$  и  $B$  (учитывающие и внутренние сопротивления источников) равны соответственно  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ .

Зададим направления токов на разных участках цепи между точками  $A$  и  $B$ , указав их на рис. 31. Обозначим силы токов  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$  соответственно. Обратим внимание на то, что заранее, т. е. до решения системы уравнений, направления токов нам неизвестны. Поэтому мы задаём их произвольно. Если после решения системы уравнений

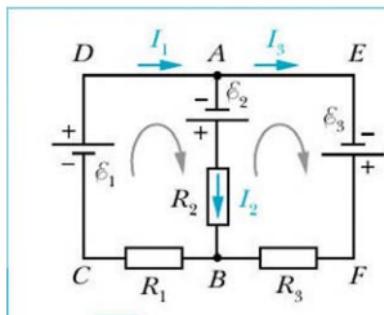


Рис. 31

выяснится, что какое-то из значений силы тока отрицательно, то это будет означать, что направление данного тока противоположно заданному.

Запишем разность потенциалов между точками  $A$  и  $B$ , используя выражение (3) для участка цепи  $ADCBA$ , т. е. участка, содержащего первый источник тока. Поскольку заданное направление тока на этом участке противоположно направлению от  $A$  к  $B$ , а ЭДС источника стремится вызвать ток от  $B$  к  $A$ , то из выражения (3) получаем:

$$\Phi_A - \Phi_B = -I_1 \cdot R_1 + |\mathcal{E}_1|. \quad (5)$$

Рассуждая аналогичным образом, для двух других участков цепи между точками  $A$  и  $B$  с учётом заданных направлений токов и полярности источников на этих участках получаем:

$$\Phi_A - \Phi_B = I_2 \cdot R_2 - |\mathcal{E}_2|; \quad (6)$$

$$\Phi_A - \Phi_B = I_3 \cdot R_3 - |\mathcal{E}_3|. \quad (7)$$

Из выражений (5) и (6) следует:

$$-I_1 \cdot R_1 + |\mathcal{E}_1| = I_2 \cdot R_2 - |\mathcal{E}_2|. \quad (8)$$

Перенесём все ЭДС в левую часть уравнения, а все произведения сил токов на сопротивления — в правую:

$$|\mathcal{E}_1| + |\mathcal{E}_2| = I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2. \quad (9)$$

Аналогичным образом из выражений (6) и (7) получаем:

$$|\mathcal{E}_3| - |\mathcal{E}_2| = I_3 \cdot R_3 - I_2 \cdot R_2. \quad (10)$$

*Будем называть контуром любой замкнутый участок разветвлённой цепи.* Элементарным контуром будем называть контур, который на данной схеме не содержит в себе других контуров. Данная схема содержит два элементарных контура:  $ABCDA$  и  $AEFBA$ . Примем за положительное направление обхода контура направление движения часовой стрелки. В этом случае уравнения (9) и (10) представляют собой запись правила, которое называют **вторым правилом Кирхгофа** (в честь немецкого физика Густава Кирхгофа (1824–1887), который сформулировал в 1847 г. правила расчёта электрических цепей).

### Второе правило Кирхгофа

При выбранном положительном направлении обхода контура алгебраическая сумма ЭДС в этом контуре равна алгебраической сумме произведений сил токов в нём на сопротивления, по которым протекают эти токи.

Обратим внимание на то, что алгебраическая сумма произведений сил токов на соответствующие сопротивления записывается с учётом правила знаков: слагаемое берётся со знаком «+», если направление тока совпадает с положительным направлением обхода контура, и со знаком «-» в противном случае. Например, в контуре  $AEFBA$  заданное направление тока  $I_3$  совпадает с положительным направлением обхода, а заданное направление тока  $I_2$  противоположно ему. Поэтому в уравнении (10) перед слагаемым  $I_2 \cdot R_3$  стоит знак «+», а перед слагаемым  $I_2 \cdot R_2$  стоит знак «-».

Отметим, что второе правило Кирхгофа можно применить и к сложному контуру, содержащему несколько элементарных. Однако легко убедиться в том, что полученное уравнение будет суммой уравнений, записанных для элементарных контуров, содержащихся в данном сложном контуре. Например, для контура  $AEFBCDA$  (см. рис. 31) полученное уравнение будет суммой уравнений (9) и (10). Следовательно, *число независимых уравнений, получаемых на основании второго правила Кирхгофа, равно числу элементарных контуров в схеме.*

В схеме, показанной на рис. 31, есть два элементарных контура, а число неизвестных токов равно трём. Следовательно, для решения задачи требуется ещё одно уравнение. Это уравнение получают, используя **первое правило Кирхгофа**. Чтобы сформулировать его, введём понятие узла электрической схемы.

*Узлом электрической схемы называют точку соединения более чем двух проводников.*

### Первое правило Кирхгофа

**Сумма сил постоянных токов, втекающих в данный узел, равна сумме сил постоянных токов, вытекающих из этого узла.**

Сразу же отметим, что это правило Кирхгофа следует из того, что мы рассматриваем цепи *постоянного тока* и справедлив закон *сохранения электрического заряда*.

В данном случае на схеме имеется два узла:  $A$  и  $B$ . Применим первое правило Кирхгофа к узлу  $A$ :

$$I_1 = I_2 + I_3. \quad (11)$$

Легко убедиться в том, что, применяя первое правило Кирхгофа к узлу  $B$ , мы получим точно такое же уравнение. *Можно доказать, что число независимых уравнений, составленных на основании первого правила Кирхгофа, всегда будет на одно меньше, чем число узлов в схеме.*

Решение системы уравнений (9), (10) и (11), полученных на основании двух правил Кирхгофа, позволит рассчитать силы токов в рассматриваемой цепи.

### Вопросы

- Какой контур называют элементарным?
- Как выбирают направление: а) обхода контура; б) тока в участке цепи?
- Что называют узлом в электрической схеме?
- Когда ЭДС данного источника считают положительной, а когда — отрицательной?
- Сформулируйте первое правило Кирхгофа. Следствием чего является это правило? Сколько независимых уравнений можно составить, используя первое правило Кирхгофа?
- Сформулируйте второе правило Кирхгофа. Следствием чего является это правило? Сколько независимых уравнений можно составить, используя второе правило Кирхгофа?
- Как в данном участке направлен ток, если в результате расчёта его значение получилось отрицательным?

### Упражнения

- На рис. 32 указаны номиналы резисторов в омах и сила тока в одном из резисторов. Определите ЭДС  $\mathcal{E}$  батареи и силу тока через резистор номиналом 5 Ом.
- Три одинаковые батареи соединены так, как показано на рис. 33. Определите показание вольтметра  $V$ . Считайте, что внутреннее сопротивление вольтметра очень велико. Укажите полярность клеммы вольтметра, соединённой с точкой  $a$ .
- Определите показания амперметра  $A$  и вольтметра  $V$  в схеме, изображённой на рис. 34. Считайте, что внутренние сопротивления амперметра и источников тока пренебрежимо малы, а внутреннее сопротивление вольтметра очень велико.

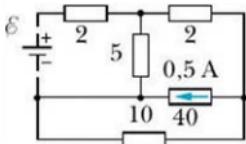


Рис. 32

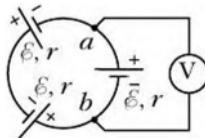


Рис. 33

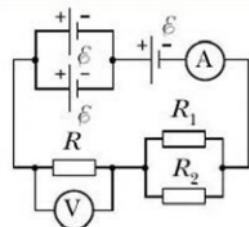


Рис. 34

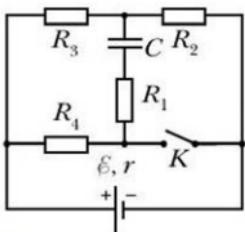


Рис. 35

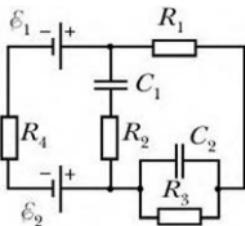


Рис. 36

- \*4 Определите, какой заряд протечёт через резистор  $R_1$ , после размыкания ключа  $K$  (рис. 35), если  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 20\ \Omega$ ;  $\epsilon = 500\text{ В}$ ,  $r = 10\ \Omega$ ,  $C = 10\ \mu\text{Ф}$ .
- \*5 Определите заряды конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  в схеме, показанной на рис. 36.

Для углублённого уровня



## § 9

### Экспериментальные обоснования электронной проводимости металлов и сплавов

Как уже неоднократно говорилось, в металлах и сплавах электрический ток обусловлен движением только свободных электронов. Ионы в указанных веществах в переносе электричества не участвуют. Последнее утверждение впервые экспериментально было доказано в 1901 г. немецким физиком Карлом Рикке (1845–1915). Для выяснения, участвуют ли в переносе электричества ионы металлов, Рикке в течение года пропустил через последовательно прижатые друг к другу медный, алюминиевый и ещё один медный цилиндры огромный заряд ( $\sim 3,5 \cdot 10^6$  Кл). После этого места стыков цилиндров были тщательно исследованы и сопоставлены со стыками аналогичных прижатых друг к другу цилиндров, через которые ток не пропускался. Обнаружить различия в проникновении металлов друг в друга не удалось. В обоих случаях оно было обусловлено только диффузией. Неизменными (с точностью  $\pm 0,03$  мг) остались и массы цилиндров. На основании этого опыта был сделан вывод, что перенос электрического заряда в металлах осуществляется частицами, не имеющими признаков химического элемента, т. е. не являющимися ионами.

Идея опыта, позволившего идентифицировать свободные носители заряда в металлах, впервые была предложена в 1913 г. российскими физиками Леони-

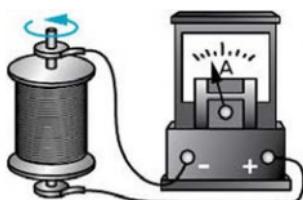


Рис. 37

дом Исааковичем Мандельштамом (1879–1944) и Николаем Дмитриевичем Папалекси (1880–1947). Опыт основывался на том, что при придании проводнику ускорения (относительно инерциальной системы отсчёта) имеющиеся в нём свободные носители заряда должны начать двигаться по инерции относительно этого проводника. Такое движение подобно движению пассажиров в автобусе при его резком торможении или ускорении. Следовательно, при придании проводнику ускорения в нём должен возникать электрический ток. Направление этого тока определяется знаком заряда свободных носителей и направлением их движения относительно проводника, которое, очевидно, противоположно направлению ускорения проводника. В эксперименте использовали катушку с намотанным на неё проводом. Концы этого провода были присоединены к наушникам. При попарном вращении катушки вокруг её оси в наушниках, как и предполагалось, регистрировался звук, обусловленный возникающим в цепи током. Однако начавшаяся Первая мировая война помешала Мандельштаму и Папалекси завершить начатые исследования.

Эти исследования продолжили американские учёные Ричард Толмен (1881–1948) и Томас Стюарт (1890–1958). В своих опытах они раскручивали катушку с проволокой, а затем резко тормозили её. Для регистрации возникающего при торможении катушки электрического тока они использовали гальванометр (рис. 37). Преодолев серьёзные экспериментальные трудности, американские учёные в 1916 г. сумели установить:

1) свободные носители заряда в проволоках из разных металлов имеют отрицательный заряд;

2) отношение модуля  $q$  заряда этих носителей к их массе  $m$  во всех исследованных проволоках одинаково и равно  $(1.9 \pm 0.1) \cdot 10^{11}$  Кл/кг. Полученное значение лишь на 8 % отличалось от известного к тому времени отношения модуля заряда электрона к его массе.

В результате было сделано заключение, что *свободными носителями заряда в металлах являются именно электроны*.

### Вопросы

1. Опишите опыты Рикке.
2. На чём основана идея инерционных опытов Мандельштама и Папалекси?

- 3 Как Мандельштам и Папалекси фиксировали возникновение тока в катушке при её ускоренном движении? Как это делали Толмен и Стюарт?
- 4 Как соотносится полученное Толменом и Стюартом отношение модуля заряда электрона к его массе с современными данными?

## § 10

### Электрический ток в электролитах. Электролиз и его применение

При растворении в воде (и в некоторых других жидкостях) щёлочей, кислот и солей молекулы или кристаллы этих веществ распадаются на ионы. Этот процесс называют **электролитической диссоциацией**.



Вещества, способные к электролитической диссоциации, называют **электролитами**.

Растворы и расплавы этих веществ проводят электрический ток. Если же растворы и расплавы веществ не проводят электрический ток, то такие вещества называют **неэлектролитами**. Например, неэлектролиты – сахар и глюкоза.

Чтобы лучше понять, как происходит процесс электролитической диссоциации, рассмотрим, например, молекулу поваренной соли ( $\text{NaCl}$ ), помещённую в воду. Молекулы воды являются полярными, т. е. положительные и отрицательные заряды в этих молекулах смешены друг относительно друга. Другими словами, эти молекулы имеют положительные и отрицательные полюсы. Поэтому около каждого из ионов ( $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ ) молекулы воды собираются, ориентируясь определённым образом (рис. 38). К положительному иону  $\text{Na}^+$  молекулы воды притягиваются своими отрицательными полюсами, а к отрицательному иону  $\text{Cl}^-$  – своими положительными полюсами.

Процесс «облепливания» ионов растворённого вещества полярными молекулами растворителя называют **сольватацией**.



Тем не менее известно, что в растворах электролитов имеются нераспавшиеся молекулы. Это экспериментально подтверждается тем, что при больших ( $> 5 \text{ кВ/см}$ ) напряжённостях закон Ома для электролитов нарушается.

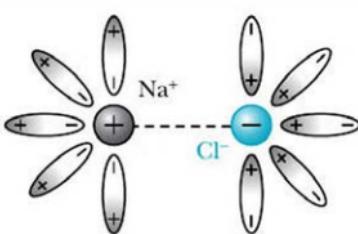


Рис.

38

*тацией*. Если растворителем является вода, то этот процесс обычно называется *гидратацией*.

В результате сольватации (гидратации) связь между ионами в молекуле поваренной соли ослабевает настолько, что энергии теплового (хаотического) движения в растворе оказывается достаточно, чтобы при столкновении молекул происходило их разрушение на ионы. В результате в растворе образуются гидратированные положительные и отрицательные ионы, т. е. ионы, окружённые молекулами воды.

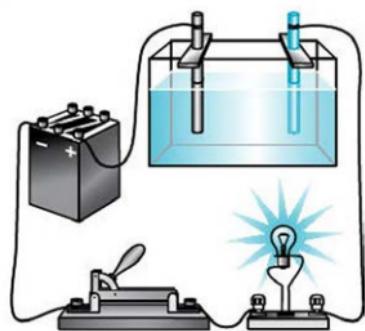
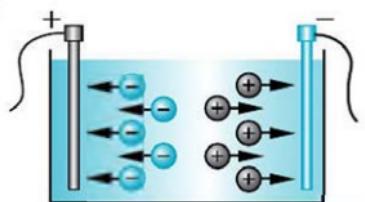
Наряду с диссоциацией в растворе происходит и обратный процесс — процесс воссоединения разноимённых ионов в нейтральные молекулы. Этот процесс называют *рекомбинацией*. В результате двух «конкурирующих» процессов (диссоциации и рекомбинации) в растворе устанавливается динамическое равновесие, при котором число ионов, образующихся вследствие диссоциации, равно числу ионов, рекомбинирующих за то же время. Динамическое равновесие характеризуют *степенью диссоциации* — отношением числа молекул электролита, распавшихся на ионы, к общему числу его молекул.

Ясно, что степень диссоциации зависит от температуры раствора, концентрации электролита и электрических свойств растворителя.

Электролитическая диссоциация возможна не только при растворении электролита, но и при его нагревании до плавления, когда энергии хаотического движения становится достаточно для отделения ионов молекулы электролита в расплаве друг от друга.

Таким образом, в растворах и расплавах электролитов в результате диссоциации образуются свободные носители заряда, представляющие собой положительно и отрицательно заряженные ионы. Следовательно, если в растворе (или расплаве) электролита создать электрическое поле, то возникнет упорядоченное движение заряженных частиц (ионов) — электрический ток.

Для создания в растворе электролита электрического поля в этот

**a****б**

*Рис. 39* Протекание электрического тока в растворе электролита

раствор опускают два электрода (рис. 39, а). Первый электрод (его называют *анодом*) подсоединяют к положительному полюсу источника тока, а второй (его называют *катодом*) — к отрицательному полюсу. Под действием созданного в растворе электрического поля отрицательные ионы электролита (*анионы*) будут упорядоченно двигаться к аноду, а положительные (*карионы*) — к катоду (рис. 39, б). Достигнув анода, отрицательные ионы отдают ему свои лишние электроны (происходит окислительная реакция). Напротив, положительные ионы, достигнув катода, получают от него недостающие электроны (происходит восстановительная реакция). Таким образом, источник тока, подключённые к нему электроды и раствор электролита в сосуде образуют замкнутую цепь, по которой течёт электрический ток.

 Электрический ток в электролите сопровождается переносом ионов веществ. При окислительной реакции на аноде выделяется одно вещество, а при восстановительной реакции на катоде — другое. Явление выделения веществ на электродах называют **электролизом**.



Электролиз используют для получения чистых металлов (например, алюминия и меди), для нанесения тонких металлических покрытий (серебрения, никелирования, хромирования и т. п.), для получения копий рельефных поверхностей, для изготовления микросхем и печатных плат различных электронных устройств и т. д.



Пусть на участке цепи, показанной на рис. 39, установился постоянный ток и сила этого тока равна  $I$ . Тогда за промежуток времени  $\Delta t$  через любое поперечное сечение цепи протекает заряд  $\Delta q = I \cdot \Delta t$ . Следовательно, за рассматриваемый промежуток времени катода достигает число положительных ионов, равное  $N = \Delta q / q_0$ , где  $q_0$  — заряд положительного иона. Заряд положительного иона определяется его валентностью  $z$  и равен  $q_0 = z \cdot e$ , где  $e$  — модуль заряда электрона. Таким образом,

$$I \cdot \Delta t = N \cdot z \cdot e. \quad (1)$$

За рассматриваемый промежуток времени на катоде выделится масса  $m$  вещества, равная произведению числа  $N$  положительных ионов, достигших катода, и массы  $m_0$  одного такого иона (она равна отношению молярной массы  $M$  соответствующего вещества к числу Авогадро:  $m_0 = M / N_A$ ).

Поэтому

$$m = \frac{M}{N_A} \cdot N. \quad (2)$$

Выражая  $N$  из формулы (1) и подставляя в (2), получаем:

$$m = \frac{M}{z \cdot e \cdot N_A} \cdot I \cdot \Delta t. \quad (3)$$

Зависимость массы выделяющегося при электролизе вещества от его молярной массы и валентности, а также прошедшего через электролит заряда впервые была установлена экспериментально в 1834 г. М. Фарадеем в виде:

$$m = \frac{M \cdot \Delta q}{F \cdot z}. \quad (4)$$

**Масса вещества, выделившегося на электроде за время  $\Delta t$ , пропорциональна произведению отношения молярной массы выделяющегося вещества к его валентности ( $M/z$ ) и заряда ( $\Delta q = I \cdot \Delta t$ ), прошедшего через электролит.**

В настоящее время эту зависимость называют **законом Фарадея для электролиза**.

Согласно измерениям Фарадея, коэффициент  $F$  в этом выражении для всех выделяющихся при электролизе веществ одинаков и равен  $F = 9,65 \cdot 10^4$  Кл/моль. В честь Фарадея это число называют *постоянной Фарадея*. Из сопоставления формул (3) и (4) следует, что число Фарадея  $F = e \cdot N_A$ . Поэтому знание числа Фарадея  $F$  и приближённого значения числа Авогадро  $N_A$  позволило ирландскому физику Джорджу Стони (1826–1911) в 1874 г. оценить модуль элементарного электрического заряда.

Соотношение (3) подтверждается всеми известными экспериментами для токов в электролитах. Совпадение числа Фарадея с зарядом одного моля электронов доказывает, что *в электролитах свободными носителями заряда являются только ионы*.

Отметим, что свободными носителями заряда в расплавах металлов и их сплавов, а также селена и многих сульфидов являются электроны и протекание тока в них не сопровождается какими-либо химическими реакциями.

Отдельно отметим, что при электролизе на электродах выделяются *разные вещества*. В результате между электродами возникает дополнительная разность потенциалов, величина которой зависит от выделяющихся на электродах веществ. Это явление называют *поляризацией* электрородов. Так, при электролизе слабого раствора серной кислоты в воде изготовленный из платины катод покрывается водородом, а анод — кислородом. При этом ток через электролит при неизменной разности потенциалов между платиновыми электрородами уменьшается за счёт возникающей *ЭДС поляризации* ( $\sim 1,15$  В), направленной против внешнего напряжения. Следовательно, длительно

электролиз может протекать лишь при условии, что приложенное к электродам напряжение превышает ЭДС поляризации.



### Вопросы

- 1 Какие вещества называют электролитами? Приведите примеры таких веществ.
- 2 Какие вещества называют неэлектролитами? Приведите примеры таких веществ.
- 3 Какой процесс называют: а) электролитической диссоциацией; б) рекомбинацией?
- 4 Какую величину называют степенью диссоциации?
- 5 Какой процесс называют электролизом?
- 6 Какие ионы называют: а) катионами; б) анионами?



### Для углублённого уровня

- 7 Будут ли наблюдаться какие-либо химические реакции при прохождении тока через ртуть, находящуюся в жидком состоянии? Ответ обоснуйте.
- 8 Что такое поляризация электродов? Почему она возникает?
- 9 Возможен ли длительный электролиз, если к электродам ванны приложено напряжение, меньшее ЭДС поляризации?
- 10 Сформулируйте закон Фарадея для электролиза.



### Упражнения

- 1 При электролитическом способе получения алюминия расходуется энергия  $W_1 = 50 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$  на килограмм, если электролиз ведётся при напряжении на электродах ванны  $U_1 = 16,2 \text{ В}$ . Оцените расход  $W_2$  электроэнергии для получения килограмма алюминия при напряжении на электродах ванны, равном  $U_2 = 8,1 \text{ В}$ , пренебрегая поляризацией электродов.
- 2 Две электролитические ванны подключены последовательно к источнику тока. В первой ванне находится раствор хлористого железа ( $\text{FeCl}_2$ ), а во второй — хлорного железа ( $\text{FeCl}_3$ ). Определите массы выделившегося железа и хлора на электродах первой и второй ванн к тому моменту, когда через источник прошёл заряд  $Q = 96,5 \text{ МКл}$ . Молярная масса железа  $M_{\text{Fe}} = 55,8 \text{ г/моль}$ , хлора —  $M_{\text{Cl}} = 35,5 \text{ г/моль}$ .

- 3** Процесс серебрения  $N = 12$  ложек проводили в течение  $t = 5$  ч при силе тока  $I = 1,8$  А. Площадь поверхности каждой ложки была  $S = 50 \text{ см}^2$ . Определите толщину  $h$  слоя серебра, считая, что серебро оседало на ложках равномерно. Плотность серебра  $\rho = 10,5 \text{ г}/\text{см}^3$ , молярная масса  $M = 108 \text{ г}/\text{моль}$ .
- 4** Сила тока, текущего через электролитическую ванну, равна  $I$ . Сколько анионов ( $n_-$ ) и катионов ( $n_+$ ) ежесекундно: а) подходит к катоду; б) подходит к аноду; в) проходит через поперечное сечение в середине этой ванны? Валентность катионов равна  $z_+$ , а валентность анионов —  $-z_-$ .



## § 11

### Электрический ток в газах. Плазма

При нормальных условиях газ состоит из нейтральных молекул. Поэтому он является хорошим изолятором. Однако заряженные тела в воздухе, например электрометр, хотя и медленно, но разряжаются. Если влажность окружающего электрометра воздуха увеличить или вблизи электрометра поместить зажжённую горелку, то скорость разряда возрастёт. Следовательно, при повышении влажности воздуха или его нагревании проводимость воздуха увеличивается. Чем это обусловлено?

Электрический ток в среде может возникнуть только при наличии свободных носителей заряда. Откуда же в газе берутся такие носители и почему при нагревании и увеличении влажности их число увеличивается? Свободные носители заряда образуются в газе в результате его *ионизации* — распада нейтральных молекул газа на разноимённо заряженные частицы. Причины такого распада могут быть самыми разными. Например, при нагревании газа кинетическая энергия хаотического движения его молекул увеличивается. В результате образуется большое число молекул, модуль скорости которых достаточно велик. При столкновении таких молекул с другими молекулами происходит их распад на ионы и электроны. Этот процесс называют *ударной ионизацией*.

При высокой влажности в воздухе имеется большое количество полярных молекул воды. Поэтому в таком воздухе, как и в растворах электролитов (см. § 10), происходит процесс гидратации. Это увеличивает вероятность распада молекул газов на положительно и отрицательно заряженные части.

Ионизация газа может быть также вызвана взаимодействием его молекул с внешним излучением (радиоактивным, рентгеновским, ультрафиолетовым или космическим).

Кроме того, ионизация газа может произойти и под действием внешнего электрического поля с достаточно большой напряжённостью. (Ионизация воздуха при нормальных условиях происходит при напряжённостях поля, превышающих 30 кВ/см.) В результате действия такого поля на положительно и отрицательно заряженные частицы нейтральной молекулы газа она может разорваться, образовав разноимённо заряженные частицы.

Отметим, что паряду с процессом ионизации в газе всегда происходит и обратный процесс — **рекомбинация** — объединение разноимённо заряженных частиц в нейтральную молекулу.

**!** Таким образом, механизм проводимости газов похож на механизм проводимости электролитов. Различие в том, что проводимость электролитов обусловлена движением *только ионов*, в то время как проводимость газов обусловлена движением *и ионов, и электронов*, причём основную роль в переносе заряда в газах играют электроны.

Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, масса электронов много меньше массы ионов. Поэтому в электрическом поле они разгоняются существенно быстрее, чем ионы. Во-вторых, размеры электронов много меньше размеров ионов. В результате вероятность столкновения электронов с другими частицами существенно меньше, чем у ионов. По этим причинам модуль скорости дрейфа электронов существенно больше модуля скорости дрейфа ионов. Это и приводит к тому, что электроны переносят значительно больший заряд, чем ионы.

**Процесс прохождения электрического тока через газ называют газовым разрядом.**

Для исследования газового разряда используют стеклянную трубку, заполненную газом, в которую впаяны два электрода (рис. 40). Электрод, подключаемый к положительному полюсу источника, называют *анодом*, а электрод, подключаемый к отрицательному полюсу, — *катодом*. Для измерения силы тока в цепь последовательно включают амперметр.

Будем ионизировать газ в трубке, например, с помощью ультрафиолетового (или другого) излучения. Тогда при неизменной интенсивности этого излучения с ростом напряжения  $U$  между анодом и катодом вплоть до некоторого значения  $U_1$  сила тока  $I$  будет возрастать (рис. 41). Это обусловлено тем, что при увеличении  $U$  всё большее число образовавшихся при ионизации заряженных частиц, не успев рекомбинировать, долетают до электродов.

После достижения значения  $U_1$  и при дальнейшем увеличении напряжения вплоть до некоторого значения  $U_2$  сила тока будет оставаться неизмен-

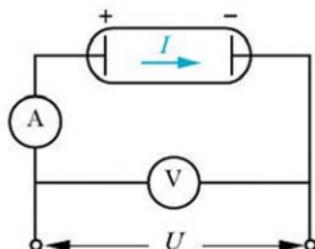


Рис. 40

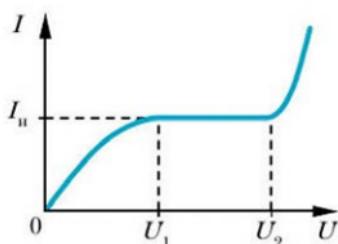


Рис. 41

Изменение силы тока при газовом разряде с ростом напряжения между анодом и катодом

ной. Этот не изменяющийся при увеличении напряжения ток называют *токо насыщения*. Сила тока насыщения  $I_n$  определяется количеством образовавшихся при ионизации внешним излучением свободных носителей заряда. Другими словами, при насыщении все образовавшиеся заряженные частицы достигают электродов. Именно поэтому увеличение напряжения между электродами не изменяет силу тока. Если же увеличить интенсивность ультрафиолетового излучения, то увеличится количество ионизируемых молекул. В результате увеличится количество свободных носителей заряда, а следовательно, возрастёт и сила тока насыщения  $I_n$ . Понятно, что при этом увеличится и значение напряжения  $U_1$ , при котором наступает насыщение. **К**

Если при напряжении  $U$ , которое меньше  $U_2$ , прекратить ионизировать молекулы газа, то прекратится и газовый разряд. Поэтому такой разряд называют *несамостоятельным*.

**Разряд, происходящий в газе за счёт воздействия на него внешних ионизаторов, называют несамостоятельным.**

Если напряжение между электродами превысит  $U_2$ , то сила тока в газовом разряде резко увеличится. Уже при  $U \approx 1,1 \cdot U_2$  сила тока может в тысячи раз превысить силу тока насыщения. При этом отпадает необходимость во внешнем ионизаторе для поддержания газового разряда. Поэтому такой разряд называют *самостоятельным*.



На явлении зависимости тока насыщения газового разряда от интенсивности внешнего излучения основано действие *дозиметров* — приборов для измерения поглощённой дозы радиоактивного излучения.

**Разряд, происходящий в газе без воздействия на него внешних ионизаторов, называют самостоятельным.**

В чём же состоит механизм самостоятельного разряда?

Дело в том, что в реальном газе в результате действия космических лучей и естественного радиационного фона всегда имеется некоторое число заряженных частиц. Однако при  $U < U_2$  заряженная частица, разгоняясь под действием электрического поля, между двумя последовательными столкновениями с молекулами газа не может приобрести кинетическую энергию, достаточную для ударной ионизации этих молекул. Кроме того, при нормальных условиях число заряженных частиц много меньше числа нейтральных молекул. Поэтому при  $U < U_2$  и не наблюдается газовый разряд при отсутствии достаточно сильных внешних ионизаторов.

Ситуация изменяется, когда  $U$  становится больше  $U_2$ . Заряженная частица, разгоняясь под действием электрического поля с большой напряжённостью, успевает между двумя последовательными столкновениями приобрести кинетическую энергию, достаточную для ударной ионизации молекул газа. Образовавшиеся при этом разноимённо заряженные частицы также будут разгоняться в электрическом поле и вызывать ионизацию следующих нейтральных молекул газа. В результате число заряженных частиц в газе будет нарастать лавинообразно.



Частично или полностью ионизированный газ, в котором концентрации положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы, называют *плазмой*.

В состоянии плазмы находится большая часть (~99 %) вещества нашей Вселенной.

Принципиальное отличие свойств плазмы от свойств нейтрального газа объясняется в основном двумя причинами.

Во-первых, частицы плазмы взаимодействуют друг с другом электрическими силами, которые сравнительно медленно убывают с расстоянием. По этой причине в плазме одновременно взаимодействует друг с другом огромное число частиц. Такое взаимодействие часто называют «коллективным». Именно благодаря «коллективному» взаимодействию плазму можно рассматривать как упругую среду, в которой легко возбуждаются и распространяются различные возмущения и колебания.

Во-вторых, плазма весьма подвержена действию электрических и магнитных полей, которые вызывают появление в ней объёмных зарядов и токов, что приводит к возникновению ряда специфических эффектов.

Эти особые свойства позволяют рассматривать плазму как особое, четвёртое агрегатное состояние вещества.

В заключение отметим, что высокотемпературная плазма ( $T \sim 10^8$  К) из дейтерия и трития является основным перспективным объектом для получения энергии при управляемом термоядерном синтезе.

### Вопросы

1. Почему проводимость газа повышается при его нагревании?
2. Почему изменяется проводимость газа при увеличении его влажности?
3. Что называют ударной ионизацией?
4. Какие носители обеспечивают проводимость в газах?
5. Какой разряд в газе называют: а) несамостоятельным; б) самостоятельным?
6. Что такое плазма? Почему плазму называют четвёртым агрегатным состоянием вещества?



### Для углублённого уровня

#### § 12

### Электрический ток в газах. Газовые разряды

Различают несколько типов самостоятельного разряда: *искровой, коронный, дуговой и тлеющий*.

**Искровой разряд** (или *искровой пробой*) возникает между находящимися в воздухе электродами, когда напряжение между ними на короткое время ( $<10^{-3}$  с) превышает так называемое *напряжение пробоя*  $U_p$ . При этом между электродами в очень малый промежуток времени ( $10^{-10}\text{--}10^{-8}$  с) наблюдается ярко светящийся искровой канал. Если расстояние между электродами превышает несколько миллиметров, то этот канал имеет вид, показанный на рис. 42. Свечение искрового канала обусловлено процессами ионизации и рекомбинации заряженных частиц. Звуковые же эффекты, сопровождающие искру, порождаются резким повышением давления из-за нагревания газа. Напряжение пробоя зависит от рода газа и его плотности, формы электродов и расстояния между ними.



В воздухе при нормальных условиях пробой возникает, когда модуль напряжённости однородного электрического поля достигает  $-30$  кВ/см.

Примеры искрового разряда: искры, возникающие при расчёсывании сухих волос, разделении слежавшихся листов бумаги, снятии одежды из синтетических тканей.

Красивое, но небезопасное явление природы — молния — представляет собой искровой разряд в атмосфере. Молния может возникать внутри грозового облака,

между грозовыми облаками, а также между облаком и Землёй. Напряжение между облаком и Землёй может достигать  $10^8$  В. При этом сила тока в молнии может превысить 100 кА, а переносимый на Землю отрицательный заряд может достигать 30 Кл. Диаметр светящегося канала молнии обычно не превышает 20 см, а её длина может превышать несколько километров.

Искровой разряд используют в свечах зажигания в двигателях внутреннего горения. Свойство электрической искры вызывать разрушение металла анода используют при электроискровой обработке сверхтвёрдых проводящих материалов.

**Коронный разряд** наблюдается, когда напряжение между электродами недостаточно для пробоя газового промежутка, но напряжённость электрического поля вблизи одного из электродов достаточна для ионизации газа. Это происходит, когда электрод имеет форму острия или достаточно тонкой проволоки. Вблизи такого электрода создаётся сильно неоднородное электрическое поле с большой напряжённостью. В этом поле происходит ионизация газа. Кроме того, образовавшиеся заряженные частицы, ускорившись, вызывают ударную ионизацию других молекул газа. В результате при коронном разряде вблизи электрода наблюдается свечение — **корона**. Такой электрод называют **коронирующим**.

Коронный разряд используют в электрофильтрах для очистки газов от твёрдых примесей. Коронный разряд лежит в основе действия счётчиков элементарных частиц, способных вызывать ионизацию газа. Чувствительность таких счётчиков (их называют счётчиками Гейгера — Мюллера) столь высока, что ими можно зарегистрировать даже единичный электрон.

Коронный разряд, возникающий вокруг проводов высоковольтных ЛЭП, может вызвать потери энергии, сопоставимые с тепловыми. Чтобы уменьшить потери, обусловленные коронным разрядом, в ЛЭП с напряжением



Рис. 42

Вид искрового канала при искровом разряде



Со времён Средневековья свечение, вызванное коронным разрядом, возникающим на верхушках корабельных мачт и высоких деревьев во время грозы и перед ней, называют огнями святого Эльма. В настоящее время коронные разряды наблюдаются на крыльях и других выступающих частях самолётов.

500 кВ каждый провод линии расщепляют на три. В более высоковольтных линиях каждый провод расщепляют на четыре или даже пять проводов.

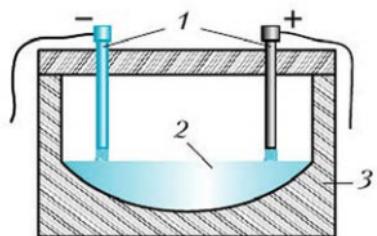
**Дуговой разряд** впервые был получен профессором физики Василием Владимировичем Петровым (1761–1834) в Петербурге в 1802 г. При дуговом разряде ионизация газа между электродами обусловлена, во-первых, сильным его нагреванием и, во-вторых, ударной ионизацией молекул огромным числом электронов, испускаемых раскаленным катодом.

Во время горения дуги при атмосферном давлении расстояние между электродами, изготовленными из графита, делают близким к 5 мм при силе тока 6–25 А и напряжении между электродами около 30–50 В. При горении дуги катодный графитовый электрод заостряется, а в анодном образуется углубление — кратер дуги. Температура в кратере достигает 4000 К, а при увеличении давления воздуха до 100 атм возрастает до 10 000 К. (Для сравнения напомним, что температура поверхности Солнца близка к 6000 К.)

Электрическая дуга между угольными электродами впервые была применена в 1876 г. русским электротехником Павлом Николаевичем Яблочковым (1847–1894) для уличного освещения. В настоящее время она как источник света широко применяется в прожекторах и проекционной аппаратуре, так как дуговые лампы имеют более высокий КПД по сравнению с лампами накаливания.

Русский изобретатель Николай Николаевич Бенардос (1842–1905) в 1882 г. впервые осуществил с помощью электрической дуги сварку металлов. В настоящее время дуговой разряд используют в *дуговых электропечах* (рис. 43), в которых выплавляют значительную часть инструментальной и почти все специальные стали.

Дуговой разряд используют и в современных лампах *дневного света*. В таких лампах электрическая дуга горит внутри стеклянной трубки, заполненной парами ртути. Возникающее при этом ультрафиолетовое излучение поглощается насыщенным изнутри на стекло трубки специальным веществом — *люминофором*. Люминофор преобразует ультрафиолетовое излучение в видимый свет. КПД ламп дневного света примерно в 5–6 раз больше КПД ламп накаливания.



*Рис. 43* Дуговая плавильная печь:  
1 — графитовые электроды;  
2 — расплавленный металл;  
3 — стальной кожух,  
выложенный огнеупорным  
кирпичом

**Тлеющий разряд**, в отличие от рассмотренных выше видов самостоятельного разряда, наблюдается при давлениях газа, значительно меньших атмосферного.

Тлеющий разряд применяют в газоразрядных трубках. Цвет свечения этих трубок зависит от рода газа. Наиболее часто используют трубы, наполненные неоном. Они светятся оранжевым светом. Миниатюрные неоновые лампочки тлеющего разряда используют для индикации включения в сеть тех или иных приборов (электрических чайников, утюгов и т. п.). Если тлеющий разряд происходит в атмосфере аргона, то трубка светится синевато-зеленоватым светом. В промышленности тлеющий разряд используют для получения различных металлических покрытий. Для этого из подлежащего распылению сплава изготавливают катод.

### Вопросы

- 1 Какие виды самостоятельного разряда вы знаете?
- 2 При каких условиях возникает искровой разряд?
- 3 Что такое молния?
- 4 Какой разряд используют при обработке очень твёрдых проводящих веществ?
- 5 Что такое электрическая дуга? При каких условиях она возникает и для чего используется?
- 6 Что такое коронный разряд? При каких условиях он возникает?
- 7 Почему провода сверхвысоковольтных линий передачи сплетают из нескольких скреплённых между собой проводников?
- 8 Что такое тлеющий разряд? Когда он возникает?

### § 13

### Электрический ток в вакууме

Рассмотрим стеклянный баллон, в торцы которого вна掸ыны два металлических электрода 1 и 2. Откачаем воздух из баллона, создав в нём вакуум. Соединим электроды 1 и 2 с клеммами источника постоянного тока (рис. 44). Внутри баллона между электродами нет вещества. Следовательно, там нет и носителей заряда. Поэтому если пренебречь *током утечки* (током по стеклу баллона), то электрическую цепь можно считать разомкнутой, а силу тока в ней равной нулю.

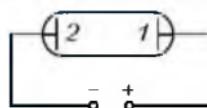


Рис. 44

А можно ли создать условия, при которых ток через вакуумный промежуток между впаянными в баллон электродами станет отличным от нуля? Оказывается, можно! Для этого в этот промежуток необходимо ввести носители заряда. Роль таких носителей могут выполнять, например, вылетевшие с поверхности одного из электродов свободные электроны.

**Выход электронов с поверхности металла называют эмиссией электронов.**

Эмиссия электронов может происходить по разным причинам: под действием электрического поля очень большой ( $\sim 10^7$  В/м) напряжённости (*автоэлектронная*, или *холодная*, эмиссия), в результате ударов падающих частиц (например, электронов или ионов) о поверхность металла (*вторичная эмиссия*), под действием падающего на металл излучения (*фотоэмиссия*) и в результате нагрева металла (*термоэлектронная эмиссия*).

Чтобы вырваться из металла при отсутствии внешнего электрического поля, электрон должен иметь проекцию  $v_n$  скорости на направление нормали к поверхности металла, удовлетворяющую условию:

$$\frac{m \cdot v_n^2}{2} \geq A,$$

где  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг — масса электрона,  $A$  — так называемая *работа выхода*.

Отсутствие сколько-нибудь заметной эмиссии электронов из металла при комнатной температуре объясняется двумя причинами.

Во-первых, электроны, вылетевшие в результате хаотического (теплового) движения с поверхности металла, испытывают со стороны положительных ионов решётки действие сил притяжения.

Во-вторых, электроны, кинетическая энергия которых недостаточна для того, чтобы удалиться от поверхности металла на значительное расстояние, как бы «зависают» над этой поверхностью. В результате над поверхностью металла образуется электронное облако. Это облако находится в состоянии динамического равновесия. Новые электроны приходят в облако, находящиеся в нём возвращаются обратно в металл. При комнатной температуре такое облако располагается на расстоянии  $\sim 10^{-9}$  м от поверхности металла. Электронное облако так же, как и заряженная положительно поверхность металла, создаёт электрическое поле, которое препятствует вылету электронов.

Нагреем электрод 2 (см. схему на рис. 44). Тогда в результате термоэлектронной эмиссии из этого электрода будут вылетать электроны. Под действием электрического поля, обусловленного разностью потенциалов между электродами, часть электронов из образовавшегося над поверхностью электрода 2 (катода) электронного облака устремится к электроду 1

(аноду). В результате между электродами возникнет упорядоченное движение электронов — электрический ток. По мере увеличения разности потенциалов сила тока будет нарастать, пока не исчезнет электронное облако. Другими словами, нарастание силы тока с ростом разности потенциалов будет происходить до тех пор, пока все электроны из нагретого электрода не начнут двигаться к аноду. Силу тока, при которой между электродами нет электронного облака, называют *силой тока насыщения*.



Работу выхода обычно измеряют в *электрон-вольтах* (эВ). **№1**

Опыт показывает, что работа выхода электрона из разных металлов изменяется примерно от 1 до 6 эВ. На рис. 45 приведён график зависимости силы тока насыщения  $I_n$ , обусловленного термоэлектронной эмиссией с поверхности вольфрама площадью 1 см<sup>2</sup>, от температуры  $T$ . Видно, что сила тока резко возрастает при температурах, превышающих ~2200 К. Работа выхода электронов из вольфрама равна 4,54 эВ. Известны проводники, работа выхода электронов из которых близка к 1 эВ. Это позволяет получать значительные токи, нагревая проводники до температуры ~500 К.

Простейшим из вакуумных электронных приборов является *вакуумный диод* (рис. 46, а). **№2** Он состоит из стеклянного баллона, из которого откачен воздух (давление внутри не превышает  $10^{-7}$ – $10^{-6}$  мм рт. ст.). Внутри баллона находятся анод и катод. Анод имеет вид цилиндра. Внутри этого цилиндра располагают катод, представляющий собой металлическую трубку, которую можно нагревать. Обычно этот нагрев осуществляют, пропуская электрический ток по нити накала внутри катода. Катоды современных вакуумных диодов в рабочем режиме имеют температуру от 700 до ~2400 К.

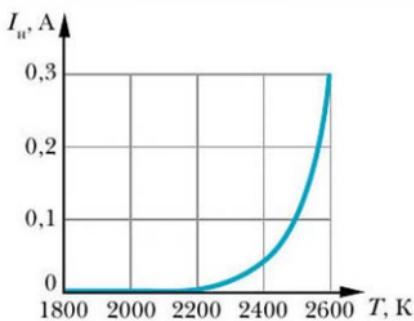


Рис. 45



**№1** Один электрон-вольт — это работа, совершаемая электрическим полем над электроном, который проходит разность потенциалов в один вольт.  $1 \text{ эВ} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .

**№2** Хотя электровакуумные приборы во многих случаях могут быть заменены полупроводниковыми и другими современными устройствами, они незаменимы в ряде специальных областей.

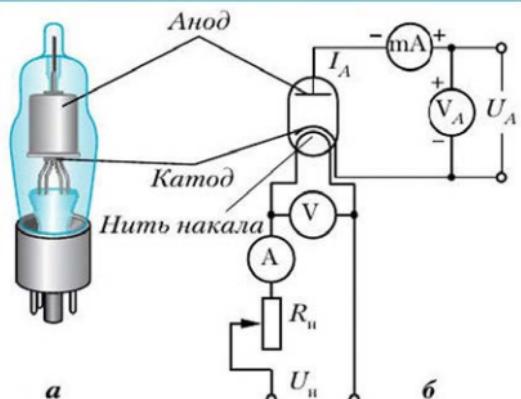


Рис. 46

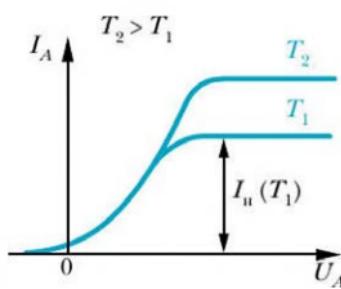


Рис. 47

На рис. 46, б приведена схема для исследования характеристик вакуумного диода. Разность потенциалов  $U_A$  между анодом и разогретым катодом называют *анодным напряжением*.

Зависимость силы тока  $I_A$  от анодного напряжения  $U_A$  называют *вольтамперной характеристикой диода*. Вольтамперные характеристики диода при двух разных температурах его катода показаны на рис. 47. Видно, что зависимость  $I_A(U_A)$  не является линейной. Следовательно, закон Ома для диода не выполняется.

Из рисунка следует, что при  $U_A > 0$  сила тока  $I_A$  положительна и растёт с увеличением анодного напряжения. Это объясняется тем, что при увеличении  $U_A$  увеличивается напряжённость электрического поля между анодом и катодом. В результате всё большее количество электронов вылетает из образованного вблизи катода электронного облака и достигает анода.

При увеличении анодного напряжения электронное облако рассасывается: все электроны, вылетающие из катода, достигают анода. Поскольку число вылетающих из катода электронов ограничено и обусловлено его температурой, при дальнейшем росте анодного напряжения (и неизменной температуре катода) сила тока  $I_A$  перестаёт увеличиваться. Это явление называют *насыщением*. При увеличении температуры катода число вылетающих из него электронов увеличивается. Поэтому сила тока насыщения в диоде с более разогретым катодом больше (см. рис. 47).

При  $U_A = 0$  и даже небольших отрицательных анодных напряжениях ( $-0,5 \text{ В} < U_A$ ) ток в цепи всё же отличен от нуля. Это объясняется тем, что небольшое число вылетающих из разогретого катода электронов способно

достигнуть анода, преодолев тормозящее электрическое поле. Если же  $U_A < -0,5$  В, то анодный ток диода практически равен нулю. В этом случае говорят, что диод «заперт».

**!** Таким образом, диод обладает односторонней проводимостью, т. е. пропускает ток только в одну сторону. Это свойство диода используют для выпрямления переменного тока, направление которого изменяется с течением времени.

Выделяющаяся на аноде диода мощность  $P_A = I_A \cdot U_A$  приводит к разогреву анода. Поэтому для увеличения теплоотдачи анодов их чернят, а аноды мощных диодов специально охлаждают.

Если в аноде сделать отверстие, то часть электронов будет вылетать из анода, образуя за ним электронный пучок. Характеристиками этого пучка можно управлять. Поместив между катодом и анодом дополнительный электрод — *управляющую сетку* (випелт), можно регулировать количество вылетающих электронов. За управляющей сеткой (*B*) часто помещают два анода ( $A_1$  и  $A_2$ ) — цилиндрические электроды с отверстиями в их донышках (рис. 48). На этих анодах создают такие положительные потенциалы относительно катода (*K*), при которых электроны образуют сходящийся пучок. Полученное устройство называют *электронной пушкой*. Созданные электронными пушками мощные электронные пучки используют для получения сверхчистых металлов путём их плавки в вакууме или для получения рентгеновского излучения.

Электронная пушка является одним из основных элементов *электронно-лучевой трубки* (ЭЛТ) (рис. 49), представляющей собой стеклянный баллон, из которого откачен воздух. Вылетевшие из пушки электроны, пролетая между двумя парами вертикально и горизонтально расположенных пластин, попадают на экран. Этот экран покрыт люминофором — веществом, которое при попадании на него электрона испускает свет. Если напряжения между парами пластин 6 и 7 равны нулю, то электронный пучок будет создавать светящуюся точку в центре экрана. Если же между парой пластин создать разность потенциалов, то электрическое поле между пластинами будет отклонять пучок электронов. В результате светящаяся точка на экране сместится в соответствующую сторону. Это свойство ЭЛТ используют для исследования быстроизменяющихся напряжений.

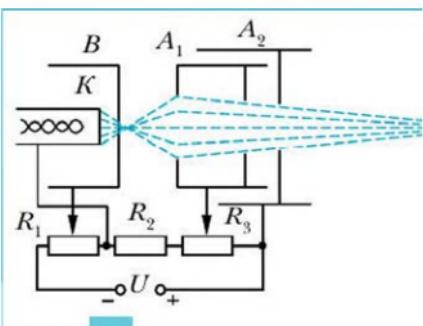


Рис. 48

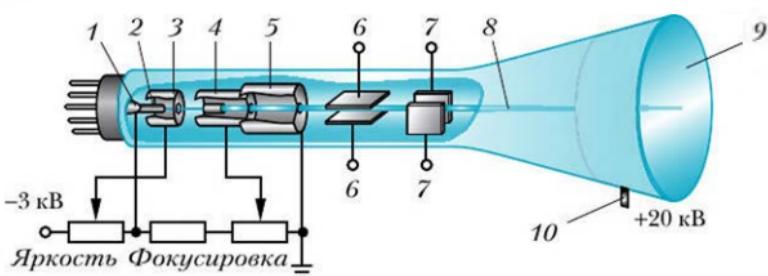


Рис. 49

Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ):

1–5 – электроды электронной пушки (см. рис. 48);

6 – вертикально отклоняющие пластины;

7 – горизонтально отклоняющие пластины; 8 – пучок электронов; 9 – экран; 10 – вывод ускоряющего анода

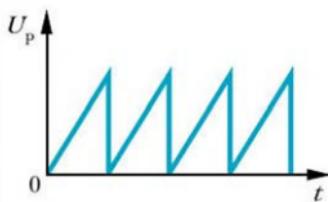


Рис. 50

Чтобы наблюдать, как изменяется с течением времени напряжение на исследуемом участке цепи, его либо непосредственно, либо через усилитель подают на пластины ЭЛТ, которые отклоняют пучок электронов в вертикальном направлении. При этом на вторую пару пластин подают пилюобразное напряжение  $U_p$  – *напряжение развёртки* (рис. 50). Это напряжение приводит к равномерному смещению светящейся точки на экране по горизонтали.

Современные скоростные осциллографы позволяют исследовать процессы, длительность которых не превышает долей наносекунды.



### Вопросы

- 1 Возможен ли электрический ток в вакууме?
- 2 Какое явление называют эмиссией электронов?
- 3 Какие виды эмиссии электронов вы знаете? При каких условиях они возникают?
- 4 Что называют работой выхода электрона?



## Для углублённого уровня

- 5 Как устроен вакуумный диод?
- 6 Что такое электронная пушка? Для чего её используют?
- 7 Из каких основных элементов состоит ЭЛТ?



## Упражнения

- 1 При разности потенциалов между анодом и катодом вакуумного диода  $\Delta\phi = 200$  В сила анодного тока  $I = 20$  мА. Определите число электронов, ежесекундно попадающих на анод диода.
- 2 Определите модуль средней скорости электронов, попадающих на анод диода, который рассмотрен в предыдущем упражнении. Считайте, что средняя скорость электронов вблизи катода диода равна нулю.
- 3 Определите мощность, выделяющуюся на аноде диода, рассмотренного в упражнении 1.

## § 14

## Электрический ток в полупроводниках

К *полупроводникам* относят вещества, удельное сопротивление  $\rho$  которых имеет промежуточное значение между удельным сопротивлением чистых металлов и удельным сопротивлением диэлектриков:  $10^{-8}$  Ом · м  $< \rho < 10^{17}$  Ом · м.

Другой отличительной особенностью полупроводников является то, что при *понижении температуры их удельное сопротивление резко возрастает*. (Напомним, что удельное сопротивление чистых металлов при понижении температуры незначительно уменьшается.) Так, уменьшение температуры германия от комнатной всего на 10 К приводит к увеличению его удельного сопротивления в 2 раза. При низких (менее 70 К) температурах удельное сопротивление многих полупроводников становится близким к удельному сопротивлению таких почти идеальных диэлектриков, как фторопласт и янтарь. Такая зависимость удельного сопротивления полупроводников от температуры позволяет изготавливать из них *термосопротивления (термисторы)*. Они позволяют измерять температуру с точностью до сотых долей градуса.

На значительном уменьшении удельного сопротивления полупроводников при их освещении (*внутренний фотозефект*) основано действие

**фоторезисторов.** Эти приборы используют для регистрации инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучений.

Полупроводниками являются: бор, углерод, кремний, фосфор, сера, германий, мышьяк, селен, олово, сурьма, теллур и иод. Полупроводниками являются и многие оксиды и сульфиды металлов, а также некоторые органические вещества. Масса полупроводниковых веществ составляет примерно 80 % массы земной коры. Основными полупроводниковыми материалами, широко используемыми в настоящее время в технике, являются кремний, германий, соединения мышьяка с галлием (GaAs) и другими химическими элементами.

**!** Принято различать собственную и примесную проводимости полупроводников.

Чтобы понять *механизм собственной проводимости*, рассмотрим природу связей, удерживающих атомы полупроводникового вещества друг возле друга в кристалле. Рассмотрение проведём на примере кристалла кремния — четырёхвалентного полупроводника.

Каждый атом кремния имеет четыре валентных электрона. В кристалле он взаимодействует с четырьмя такими же соседними атомами. Взаимодействие двух соседних атомов кремния осуществляется общей парой валентных электронов (рис. 51). До образования кристаллической решётки каждый электрон из этой пары принадлежал своему атому, а в решётке эта пара электронов стала общей для обоих атомов.

При достаточно низких температурах все валентные электроны прочно связаны с атомами и поэтому при отсутствии внешних воздействий на кристалл не могут стать свободными. При повышении температуры или под действием облучения может произойти разрыв электронной связи между соседними атомами. В результате один из электронов, осуществлявших эту связь, покидает своё место и становится свободным. В том месте, откуда

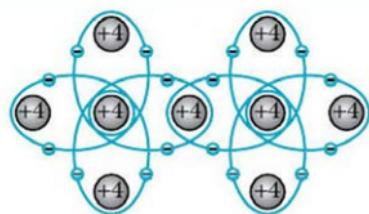


Рис. 51 Взаимодействие соседних атомов кремния в кристалле

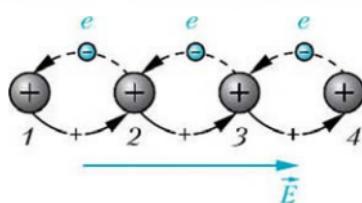


Рис. 52 Движение электронов и дырок под действием электрического поля

ушёл электрон, образуется вакансия — *дырка*. На вакантное место может перейти электрон от другого атома. Тогда на его прежнем месте образуется дырка. На это освободившееся место, в свою очередь, может перейти электрон от следующего атома и т. д. (рис. 52). Таким образом, получается, что дырка перемещается по кристаллу.

Наличие дырки означает недостаток отрицательного заряда в данном месте кристаллической решётки. Это равнозначно присутствию в данном месте равного по модулю положительного заряда. Поэтому движущаяся дырка ведёт себя как свободный носитель положительного заряда, равного по модулю заряду электрона.

При создании в кристалле электрического поля свободные электроны и дырки, наряду с хаотическим движением, приобретают упорядоченное движение. При этом скорости дрейфа свободных электронов и дырок будут направлены противоположно.

**Проводимость полупроводника, обусловленную движением свободных электронов (отрицательно заряженных носителей), называют проводимостью *n*-типа (от лат. *negativus* — «отрицательный»).**

**Напротив, проводимость полупроводника, обусловленную движением дырок (положительно заряженных носителей), называют проводимостью *p*-типа (от лат. *positivus* — «положительный»).**

Обратим внимание на то, что реальными носителями заряда в обоих случаях являются электроны. Только в первом случае это свободные электроны, а во втором — электроны, перескакивающие от атома к атому.

Таким образом, если в полупроводнике нет примесей, то его проводимость обусловлена движением его собственных электронов. Такую проводимость называют *собственной*.

**Проводимость полупроводника, обусловленную движением в нём электронов вещества, из которого состоит данный полупроводник, называют *собственной проводимостью*.**

Существует и принципиально другой механизм возникновения носителей заряда в полупроводниках. Он обусловлен внедрением в полупроводник *примесей*, валентность которых отличается от валентности полупроводника.

**Проводимость полупроводника, обусловленную внедрением в него примесей, называют *примесной проводимостью*.**

Поясним сказанное на примере. Пусть в кристалл кремния внедрён атом пятивалентного мышьяка. Атом мышьяка образует ковалентные связи (общие пары электронов) с четырьмя окружающими его в решётке атомами кремния. В результате пятый валентный электрон атома мышьяка оказывается незанятым в связях. Энергия, необходимая для отрыва такого электрона от атома мышьяка, достаточно мала. Поэтому даже при комнатной температуре многие из таких электронов становятся свободными. Например, при добавлении одной десятимиллионной доли атомов мышьяка концентрация электронов становится равной  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , что на несколько порядков превышает концентрацию свободных носителей в беспримесном монокристалле кремния.

**Полупроводники, в которых в результате внедрения примесей образуются свободные электроны, называют полупроводниками с примесной электронной проводимостью (полупроводники *n*-типа). Примеси, создающие электронную проводимость, называют донорными (отдающими) примесями.**

Иной тип проводимости возникает после внедрения в кристаллическую решётку примесей с валентностью меньшей, чем у атомов решётки (например, после внедрения в кремний трёхвалентного галлия). В этом случае в структуре решётки образуется место, в котором «не хватает» электрона, в результате чего появляется дырка.

**Полупроводники, в которых в результате внедрения примесей образуются дырки, называют полупроводниками с примесной дырочной проводимостью (полупроводники *p*-типа). Примеси, создающие дырочную проводимость, называют акцепторными (принимающими) примесями.**

Обратим внимание на то, что после внедрения примесей полупроводник в целом остаётся электрически нейтральным, но его удельное сопротивление резко падает. Так, удельное сопротивление монокристалла кремния при комнатной температуре при внесении в него всего 0,1 % фосфора уменьшается от  $10^7$  до  $10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Поэтому примесная проводимость обычно в миллионы раз превышает собственную.

В полупроводниках *n*-типа концентрация свободных электронов на много порядков больше концентрации дырок. Поэтому в таких полупроводниках электроны являются *основными* носителями заряда, а дырки — *неосновными*. Напротив, в полупроводниках *p*-типа дырки являются *основными* носителями заряда, а электроны — *неосновными*.

**Вопросы**

- 1 Какие вещества называют полупроводниками? Назовите известные вам полупроводниковые материалы.
- 2 Какие устройства называют термосопротивлениями (термисторами) и для чего их используют?
- 3 Какое явление называют внутренним фотоэффектом?
- 4 Какие устройства называют фоторезисторами и для чего их используют?
- 5 Какую проводимость называют: а) собственной; б) примесной?
- 6 Какие носители заряда являются основными, а какие — неосновными в полупроводниках *p*-типа?
- 7 Как называют примеси, создающие: а) электронную проводимость; б) дырочную проводимость?



## § 15 Полупроводниковые приборы

Необычайно широкое применение полупроводниковых материалов стало возможным после того, как были освоены технологии получения сверхчистых материалов и технологии введения в заданные микроскопические области различных примесей в строго определённых количествах.

Особый интерес представляет случай, когда в две соседние области одного монокристалла вносят примеси, атомы которых имеют разную валентность. Например, если в одну область монокристалла четырёхвалентного кремния внести атомы пятивалентного мышьяка, а в соседнюю область — атомы трёхвалентного галлия, то получатся *две соседние области с разными типами примесной проводимости*. В области, куда внесли мышьяк, появится большое число свободных электронов. Она станет областью с проводимостью *n*-типа (полупроводником *n*-типа). Напротив, в области, куда внесли галлий, образуется много дырок. Поэтому она станет областью с проводимостью *p*-типа (полупроводником *p*-типа).

**Границу между областями с проводимостями *p*-типа и *n*-типа называют *p—n*-переходом.**

Вблизи *p—n*-перехода свободные электроны из полупроводника *n*-типа диффундируют в полупроводник *p*-типа. В свою очередь, дырки из полупроводника *p*-типа диффундируют в полупроводник *n*-типа. В результате примыкающие к *p—n*-переходу области с разным типом проводимости

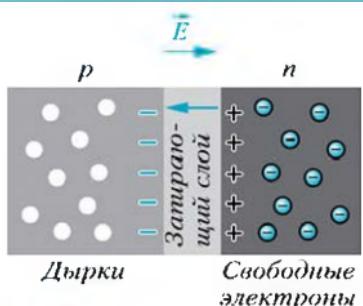


Рис. 53

Образование двух разноимённо заряженных электрических слоёв в области  $p$ - $n$ -перехода

В результате этих процессов в области  $p$ - $n$ -перехода образуются два разноимённо заряженных электрических слоя. Эти слои, подобно двум разноимённо заряженным пластинам конденсатора, создают в пространстве между собой электрическое поле (рис. 53). Напряжённость этого поля направлена от полупроводника  $n$ -типа к полупроводнику  $p$ -типа. Поэтому между  $n$ - и  $p$ -областями возникает определённая разность потенциалов. Например, между  $p$ -областью кремния с примесью галлия и  $n$ -областью кремния с примесью мышьяка эта разность потенциалов близка к 0,6 В, а разность потенциалов между  $p$ - и  $n$ -областями германия с теми же примесями близка к 0,3 В.

Образовавшееся электрическое поле препятствует диффузии носителей заряда. В результате «конкурирующих» действий этого поля и диффузии в области  $p$ - $n$ -перехода устанавливается динамическое равновесие.

Свойства  $p$ - $n$ -перехода используют для создания различных полупроводниковых приборов. Одним из самых распространённых приборов является **полупроводниковый диод**.

**Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с одним  $p$ - $n$ -переходом и двумя внешними выводами для подключения в электрическую цепь.**

На электрических схемах полупроводниковый диод изображают символом , в котором направление стрелки соответствует направлению от  $p$ -области к  $n$ -области.

Соберём электрическую схему, содержащую полупроводниковый диод. Пусть к выводу, идущему от полупроводника  $p$ -типа, подключен положительный полюс источника тока, а к другому выводу – отрицательный полюс

приобретают избыточные заряды разного знака.

Примыкающая к  $p$ - $n$ -переходу область полупроводника  $p$ -типа приобретает избыточный отрицательный заряд. Этот заряд создаётся как диффундировавшими из полупроводника  $n$ -типа свободными электронами, так и отрицательными ионами, образовавшимися после ухода дырок в полупроводник  $n$ -типа. На против, примыкающая к  $p$ - $n$ -переходу область полупроводника  $n$ -типа приобретает избыточный положительный заряд.

(рис. 54). Такое подключение диода называют *прямым*.

При прямом подключении через  $p-n$ -переход свободные электроны движутся из  $n$ -области (где их много) в  $p$ -область, а дырки — из  $p$ -области (где их много) в  $n$ -область.

**!** Таким образом, при прямом подключении диода электрический ток через  $p-n$ -переход обусловлен движением основных носителей заряда.

Поэтому при прямом подключении проводимость диода велика, а его сопротивление мало.

Зависимость силы тока  $I$  через диод от напряжения  $U$  между его выводами показана на рис. 55 сплошной линией.

Изменим полярность подключения диода (рис. 56). Такое подключение диода называют *обратным*. Сила тока через диод в этом случае мала.

Это можно объяснить следующим образом. При обратном подключении через  $p-n$ -переход свободные электроны движутся из  $p$ -области, а дырки — из  $n$ -области. Однако число свободных электронов в  $p$ -области весьма мало, так как примесная проводимость этой области обусловлена дырками. Другими словами, в этой области свободные электроны являются неосновными носителями заряда, их число в миллионы раз меньше числа основных носителей. То же самое можно сказать и о числе дырок, идущих из  $n$ -области: они также являются неосновными носителями заряда.

**!** Таким образом, при обратном подключении диода электрический ток через  $p-n$ -переход обусловлен движением неосновных носителей заряда.

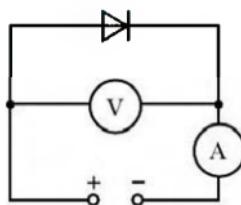


Рис. 54

Схема прямого подключения диода

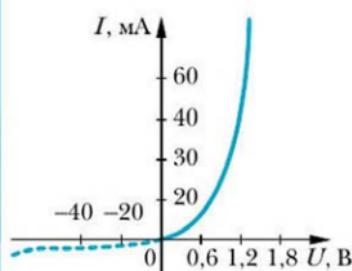


Рис. 55

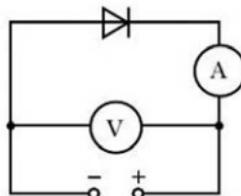


Рис. 56

Схема обратного подключения диода

При обратном подключении проводимость диода мала, а его сопротивление велико.

Зависимость силы тока  $I$  через диод от напряжения  $U$  между его выводами для этого случая подключения показана на рис. 55 пунктирной линией.

При изменении полярности напряжения между выводами диода сила тока через него может изменяться в сотни тысяч раз. Такую зависимость силы тока от полярности приложенного к диоду напряжения используют в выпрямителях — устройствах, преобразующих переменный ток.

Разнообразные свойства  $p-n$ -перехода позволяют использовать диоды в самых разных областях науки и техники. Приведём несколько примеров.

Если  $p-n$ -переход полупроводникового диода освещить, то в результате поглощения света между выводами диода возникнет определённая разность потенциалов. Это явление называют *внутренним фотозефектом*. Его используют в *солнечных батареях* для преобразования световой энергии в электрическую, например на искусственных спутниках Земли и на межпланетных аппаратах. Известны конструкции солнечных батарей, используемых для освещения жилищ и в качестве источников энергии в автомобилях и даже самолётах.

При освещении  $p-n$ -перехода у диода, подключённого к источнику в обратном направлении, сопротивление диода резко падает. Это свойство лежит в основе работы *фотодиода*, предназначенного для регистрации электромагнитных излучений.

При пропускании тока через диод в  $p-n$ -переходе в результате рекомбинации носителей заряда при определённых условиях возникает генерация светового излучения. Это свойство используют при производстве *светодиодов* и диодов, генерирующих лазерное излучение (*лазерные диоды*). Простота устройства, компактность и высокий КПД таких приборов привели к их широкому распространению.

Другими широко применяемыми полупроводниковыми приборами являются *транзисторы*. Транзисторы используют для усиления, преобразования и генерирования электрических сигналов.

Современная электроника базируется на микросхемах и микропроцессорах. При их изготовлении на пластинку из полупроводникового материала наносят последовательно слои примесей, диэлектриков и металлов. В результате на одном кристалле одновременно создают тысячи транзисторов, диодов, конденсаторов и резисторов, соединённых между собой заданным образом. Например, современные микропроцессоры содержат десятки миллионов таких элементов.

Современные технологии изготовления полупроводниковых микросхем позволили создать лёгкие портативные компьютеры, потребляющие малые (менее 300 Вт) мощности, но во много раз превосходящие по производительности вычислительные машины, собранные на отдельных транзисторах. Такие машины в прошлом занимали большие помещения и потребляли десятки киловатт электроэнергии.



Различают *биполярные* и *полевые* транзисторы. Ограничимся рассмотрением биполярного транзистора, который часто называют просто транзистором.

**Биполярным транзистором (транзистором)** называют полупроводниковый прибор с двумя *p–n*-переходами и тремя внешними выводами для подключения в электрическую цепь.

В биполярном транзисторе имеются три области (рис. 57, а). Две из них имеют примесную проводимость одного типа. Между ними расположена отделяющая эти области друг от друга тонкая область с другим типом примесной проводимости. Её называют *базой*. Толщина базы обычно составляет всего несколько микрометров. Концентрация примеси в базе незначительна. Сравнительно небольшой делают и концентрацию примеси в крайней области, имеющей с базой наибольшую площадь соприкосновения. Эту область называют *коллектором* (рис. 57, б). Напротив, в другой крайней области, имеющей небольшую площадь соприкосновения с базой, концентрацию примеси делают значительной. Эту область называют *эмиттером*. Область между базой и коллектором называют *коллекторным переходом*, а между базой и эмиттером — *эмиттерным переходом*.

Промышленность выпускает *n–p–n*- и *p–n–p*-транзисторы. Принципы их работы сходны. Поэтому мы ограничимся рассмотрением работы *p–n–p*-транзистора в схеме, предназначеннной для усиления слабых электрических сигналов. Упрощённая схема такого усилителя на *p–n–p*-транзисторе показана на рис. 58.

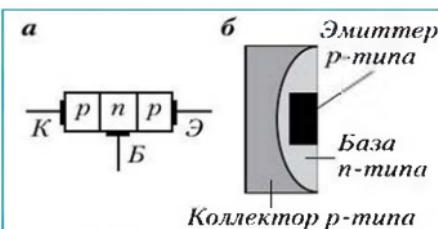


Рис. 57

Упрощённая схема структуры биполярного *p–n–p*-транзистора (*Э* — вывод эмиттера, *Б* — вывод базы и *К* — вывод коллектора)

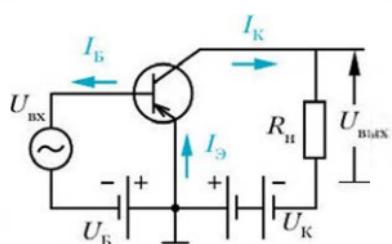


Рис. 58

тере концентрация дырок (из-за большой концентрации примеси) большая. Это позволяет эмиттеру впрыскивать (инжектировать) в базу большое количество неосновных для неё носителей — дырок. В результате сопротивление эмиттерного перехода оказывается малым. Поэтому при небольшом изменении потенциала базы, обусловленном изменением усиливаемого сигнала  $U_{\text{вх}}$ , сила тока  $I_{\text{эмиттера}}$  из-за малого сопротивления эмиттерного перехода будет сильно изменяться.

Коллектор транзистора через резистор  $R_{\text{L}}$  подключен к отрицательному полюсу источника, напряжение между полюсами которого равно  $U_{\text{K}}$ . Это напряжение по модулю значительно больше модуля напряжения базы. Поэтому коллекторный переход включен в обратном направлении. Благодаря этому дрейф электронов (основных носителей в базе) из базы в коллектор будет незначительным, а дырки (неосновные носители в базе) будут энергично извлекаться (экстрагироваться) коллектором из базы. Этому же способствует достаточно большая площадь коллекторного перехода. Напомним, что толщина базы очень мала. Кроме того, мала и концентрация электронов в ней. Поэтому большая часть дырок, попадающих в базу из эмиттера, будет пролетать в коллектор, не успев рекомбинировать с электронами в базе. В результате сила тока  $I_{\text{K}}$  коллектора будет лишь незначительно (на силу тока  $I_{\text{B}}$  базы) меньше силы тока  $I_{\text{Э}}$  эмиттера.

Как уже говорилось, небольшое изменение напряжения на базе вызывает значительное изменение силы тока  $I_{\text{Э}}$  эмиттера, а следовательно, и силы тока  $I_{\text{K}}$  коллектора. Поскольку  $|U_{\text{K}}| \gg |U_{\text{Э}} + U_{\text{вх}}|$ , то между концами включенного в цепь коллектора резистора  $R_{\text{L}}$  можно получить изменение напряжения  $U_{\text{вых}}$ , значительно превышающее изменение напряжения  $U_{\text{вх}}$  усиливаемого сигнала, т. е. получить усиление по напряжению. Поскольку сила тока коллектора практически равна силе тока эмиттера, то в рассмотренной схеме происходит усиление не только по напряжению, но

В этой схеме потенциалы коллектора и базы измеряют относительно потенциала эмиттера, который считают равным нулю. На базу транзистора вместе с усилившимся сигналом  $U_{\text{вх}}$  подают постоянное отрицательное напряжение  $U_{\text{Б}}$ . Величина этого напряжения ( $|U_{\text{Б}}| \leq 3$  В) выбирается такой, чтобы при всех значениях усилившегося сигнала эмиттерный  $p-n$ -переход был включен в прямом направлении. В эмит-

и по мощности. Таким образом, рассмотренная схема представляет собой *транзисторный усилитель — устройство, в котором входной сигнал усиливается и по напряжению, и по мощности.*

### Вопросы

- 1 Что такое *p-n*-переход?
- 2 Почему при отсутствии внешнего электрического поля электроны практически не переходят через *p-n*-переход из *n*-полупроводника в *p*-полупроводник?
- 3 В чём заключаются преимущества полупроводниковых диодов по сравнению с вакуумными диодами?
- 4 Какое включение диода называют: а) прямым; б) обратным?
- \*5 Почему для снятия вольтамперной характеристики диода в прямом и обратном включениях используют разные схемы (сравните рис. 54 и 56)?



### Для углублённого уровня

- 6 Что называют биполярным транзистором (транзистором)?
- 7 Какие типы транзисторов вы знаете?
- 8 Как устроен транзистор?
- 9 На чём основана способность транзистора усиливать электрические сигналы?

### Для углублённого уровня



### § 16

### Перезарядка конденсатора

Исследуем процессы, происходящие при подключении конденсатора к источнику постоянного тока. Начнём со случая, когда подключаемый к источнику конденсатор разряжен.

Чтобы визуально контролировать наличие тока, включим в цепь последовательно с конденсатором лампу (рис. 59). Будем считать, что сопротивление лампы постоянно и равно  $R$ . Эксперимент показывает, что сразу после замыка-

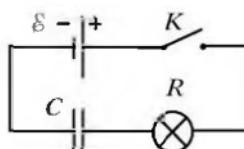


Рис. 59

ния ключа  $K$  лампа ярко вспыхивает. Это означает, что в цепи появляется электрический ток. С течением времени свечение лампы быстро затухает и скоро перестает быть заметным. Следовательно, сила тока в цепи уменьшается до пренебрежимо малых значений. Как же это объяснить?

После замыкания ключа, согласно закону Ома для замкнутой цепи, в любой момент времени справедливо уравнение:

$$\mathcal{E} = U_L + U_C = I \cdot R + \frac{q}{C}, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}$  – ЭДС источника постоянного тока,  $U_L$  – напряжение между выводами лампы, а  $U_C = \frac{q}{C}$  – разность потенциалов между пластинами конденсатора в тот момент, когда его заряд равен  $q$ . Отметим, что сопротивление проводов и ключа мы считаем пренебрежимо малыми.

В начальный момент времени ( $t = 0$ ) конденсатор разряжен, т. е. его заряд  $q = 0$ . Поэтому разность потенциалов  $U_{C0}$  между пластинами конденсатора также равна нулю. Следовательно, сила тока  $I_0$  в цепи при  $t = 0$ , согласно формуле (1), равна:

$$I_0 = \frac{\mathcal{E} - U_{C0}}{R} = \frac{\mathcal{E}}{R}. \quad (2)$$

С течением времени в результате протекания по цепи тока конденсатор заряжается (рис. 60). Увеличение его заряда  $q$  приводит к увеличению разности потенциалов  $U_C$  между пластинами конденсатора.

Поэтому, согласно формуле (1), когда заряд конденсатора станет равен  $q$ , сила тока  $I$  будет равна:

$$I = \frac{\mathcal{E} - U_C}{R} = \frac{\mathcal{E} - \frac{q}{C}}{R}. \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что чем больше с течением времени становится заряд  $q$  конденсатора, тем меньше сила тока в цепи. Следовательно, после замыкания ключа  $K$  с течением времени заряд  $q$  конденсатора и разность потенциалов  $U_C$  между его пластинами увеличиваются, а сила тока в цепи при этом, напротив, уменьшается.

Сила тока равна скорости изменения заряда конденсатора:

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (4)$$

Таким образом, уравнение (3) может быть записано в виде дифференциального (содержащего производные) уравнения:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\mathcal{E} - \frac{q}{C}}{R}. \quad (5)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$q(t) = q_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}}), \quad (6)$$

где  $q_0 = \mathcal{E} \cdot C$  – значение, к которому стремится заряд конденсатора,  $e$  – основание натурального логарифма,  $\tau = R \cdot C$  – время релаксации, в течение которого сила тока при зарядке конденсатора уменьшается в  $e$  раз.

Полученное решение позволяет построить графики зависимости от времени силы тока  $I$  (рис. 61) и разности потенциалов  $U_C$  между пластинами конденсатора (рис. 62). Из уравнения (3) также следует, что, когда разность потенциалов  $U_C$  между пластинами конденсатора сравняется с ЭДС источника, сила тока в цепи станет равна нулю. При этом заряд конденсатора станет равен  $q = \mathcal{E} \cdot C$ .

Подведём итог. После подключения разряженного конденсатора к источнику постоянного тока в цепи в течение некоторого времени наблюдается электрический ток. После того как конденсатор зарядится до разности потенциалов, равной ЭДС источника, ток в цепи прекратится.

Обратим внимание на несколько важных моментов.

Во-первых, из формулы (3) следует, что чем больше сопротивление лампы  $R$ , тем меньше сила тока  $I$  (при данном  $q$ ). Следовательно, тем медленнее будет заряжаться конденсатор. Кроме того, чем больше ёмкость  $C$  конденсатора, тем больший заряд  $q$  требуется для зарядки конденсатора до заданной разности потенциалов. Таким образом, чем больше  $R$  и  $C$ , тем медленнее будет заряжаться конденсатор и тем дольше будет течь ток в цепи.

Во-вторых, из формулы (3) следует, что, когда разность потенциалов  $U_C$  становится практически равной  $\mathcal{E}$ , сила тока  $I$  в цепи спадает до весьма малых значений. Следовательно, зарядка конденсатора на этом этапе проходит очень медленно.

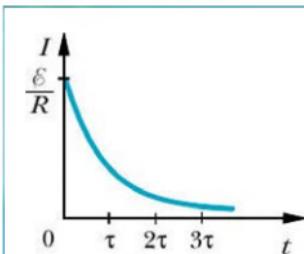


Рис. 61

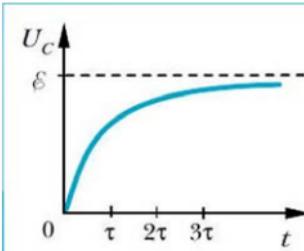


Рис. 62

Отметим, что обкладки конденсатора разделены диэлектриком. Поэтому заряды не могут перемещаться с одной его пластины на другую. То есть в том месте цепи, где находится конденсатор, фактически имеет место разрыв цепи. Тем не менее, пока конденсатор заряжается, в цепи течёт ток. Сила этого тока в любой момент времени во всех поперечных сечениях проводов одинакова. Поэтому при изменении заряда конденсатора говорят, что и через него течёт ток, равный тому в цепи. Этот ток Дж. Максвелл назвал *током смещения*.

Поясним смысл введённого термина. Наличие тока в цепи приводит к непрерывному увеличению заряда конденсатора. Следовательно, увеличивается модуль напряжённости  $\vec{E}$  электрического поля между пластинами конденсатора. В результате этого изменяется поляризация диэлектрика. Это изменение сопровождается упорядоченным движением зарядов внутри каждой молекулы диэлектрика. Таким образом, ток смещения в диэлектрике реально представляет собой упорядоченное движение зарядов. Ток смещения в вакууме (при отсутствии диэлектрика) не связан с движением реальных зарядов, однако как физическое явление проявляет ряд свойств, присущих электрическому току.

Ток смещения характеризуют плотностью, модуль  $j$  которой равен отношению модуля изменения вектора напряжённости  $\Delta\vec{E}$  электрического поля за достаточно малый промежуток  $\Delta t$  к этому промежутку времени.

Можно показать, что ток смещения, равный для плоского конденсатора произведению модуля плотности тока смещения  $j = \epsilon_0 \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta t}$  на площадь  $S$  пластины конденсатора, равен силе тока  $I$ , изменяющего заряд конденсатора:  $I = j \cdot S$ .

В заключение рассмотрим примеры решения задач о перезарядке конденсаторов.

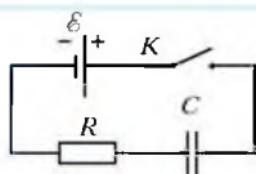
### Задача 1

Конденсатор ёмкостью  $C$ , имеющий заряд  $q_0$ , подключают к источнику постоянного тока (с ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$ ) через сопротивление  $R = 2r$  так, как показано на рис. 63. Определите количество теплоты, которое выделится на сопротивлении  $R$  за время перезарядки конденсатора.

*Решение.*

После замыкания ключа  $K$  в цепи будет течь ток до тех пор, пока напряжение  $U_C$  на конденсаторе не станет равным ЭДС источника тока. Поэтому после перезарядки конденсатора его заряд  $q$  станет равным:

Рис. 63



$$q = C \cdot U_C = C \cdot \mathcal{E}. \quad (7)$$

Следовательно, по цепи за время перезарядки протечёт заряд  $\Delta q$ , равный разности конечного  $q$  и начального  $q_0$  зарядов конденсатора:

$$\Delta q = q - q_0 = C \cdot \mathcal{E} - q_0. \quad (8)$$

Таким образом, за время перезарядки источник совершил работу  $A$ , равную произведению ЭДС источника и протекшего через него заряда  $\Delta q$ :

$$A = \mathcal{E} \cdot \Delta q. \quad (9)$$

До замыкания ключа начальная энергия  $W_0$  электрического поля конденсатора была равна:

$$W_0 = \frac{q_0^2}{2C}. \quad (10)$$

После окончания перезарядки конечная энергия  $W_k$  электрического поля конденсатора будет равна:

$$W_k = \frac{q^2}{2C}. \quad (11)$$

Согласно закону изменения энергии, сумма начальной энергии  $W_0$  и работы  $A$  источника должна быть равна сумме конечной энергии  $W_k$  системы и энергии  $Q$ , выделившейся в виде количеств теплоты на сопротивлениях  $r$  и  $R$  и излучения, обусловленного ускоренным движением зарядов в цепи при перезарядке конденсатора:

$$W_0 + A = W_k + Q. \quad (12)$$

Из выражения (12) с учётом (9)–(11) получаем:

$$Q = (W_0 - W_k) + A = \frac{q_0^2 - q^2}{2C} + \mathcal{E} \cdot (q - q_0). \quad (13)$$

Таким образом, выделившаяся энергия  $Q$  равна сумме двух слагаемых. Первое – это разность начальной и конечной энергий электрического поля конденсатора. Второе – это работа источника тока. Прежде чем подставлять в формулу (13) значение  $q$  из (7), обсудим полученный результат.

Если начальное напряжение  $U_{C0} = \frac{q_0}{C}$  на конденсаторе меньше, чем ЭДС  $\mathcal{E}$  источника, то  $q_0 < q$ . В этом случае заряд конденсатора и его энергия при перезарядке будут увеличиваться. Поэтому первое слагаемое в формуле (13) будет отрицательным. Напротив, поскольку в этом случае  $\Delta q = q - q_0 > 0$ , то второе слагаемое – работа источника тока – будет положительным.

Если же начальное напряжение на конденсаторе  $U_{C0}$  больше ЭДС  $\mathcal{E}$  источника, то  $q_0 > q$ . В этом случае при перезарядке заряд конденсатора и его энергия будут уменьшаться. Следовательно, первое слагаемое в формуле (10) будет положительным. Напротив, так как  $\Delta q = q - q_0 < 0$ , то второе слагаемое — работа источника тока — будет отрицательным.

Понятно, что если  $U_{C0} = \mathcal{E}$ , то  $q_0 = q$  и перезарядки не будет. Другими словами, при таком условии тока в цепи после замыкания ключа  $K$  не будет. Поэтому из выражения (13) получим:  $Q = 0$ .

Теперь подставим выражение (7) в (13). После элементарных преобразований получаем:

$$Q = \frac{(q_0 - C \cdot \mathcal{E})^2}{2C}. \quad (14)$$

Обратим внимание на то, что полученное значение  $Q$  всегда неотрицательно. Это означает, что количество выделившейся энергии  $Q$  (за исключением случая  $q_0 = C \cdot \mathcal{E}$ ) будет положительным.

Будем считать, что потери энергии на излучение, обусловленное ускоренным движением зарядов в цепи при перезарядке, пренебрежимо малы. Тогда количество выделившейся теплоты определяется соотношением (14).

Чтобы определить, какое количество теплоты  $Q_R$  выделилось на сопротивлении  $R$ , а какое  $Q_r$  — на внутреннем сопротивлении  $r$  источника, воспользуемся законом Джоуля — Ленца. Сила тока в цепи при перезарядке конденсатора непрерывно изменяется. Поэтому рассмотрим достаточно малый промежуток времени  $\Delta t$ , в течение которого силу тока в цепи можно считать постоянной. За этот промежуток времени на внутреннем сопротивлении  $r$  источника и сопротивлении  $R$  выделяются соответственно количества теплоты  $\Delta Q_r$  и  $\Delta Q_R$ :

$$\Delta Q_r = I^2 \cdot r \cdot \Delta t, \quad (15)$$

$$\Delta Q_R = I^2 \cdot R \cdot \Delta t, \quad (16)$$

где  $I$  — сила тока в цепи в течение промежутка времени  $\Delta t$ .

По условию  $R = 2r$ . Поэтому из формул (15) и (16) получаем:

$$\frac{\Delta Q_R}{\Delta Q_r} = \frac{R}{r} = 2. \quad (17)$$

Соотношение (17) справедливо для любого достаточно малого промежутка времени  $\Delta t$ . Следовательно, оно верно и для всего времени перезарядки:

$$\frac{Q_R}{Q_r} = 2. \quad (18)$$

Поскольку общее количество выделившейся теплоты  $Q = Q_R + Q_r$ , с учётом формул (18) и (14) получаем ответ:

$$Q_R = \frac{(q_0 - C \cdot \mathcal{E})^2}{2C} \cdot \frac{R}{R+r} = \frac{(q_0 - C \cdot \mathcal{E})^2}{3C}.$$

### Задача 2

Определите количество теплоты, которое выделяется на резисторе  $R$  после переключения ключа  $K$  из положения 1 в положение 2 в схеме, показанной на рис. 64. Потерями энергии на излучение пренебречь.

*Решение.*

Будем считать, что ключ  $K$  находится в положении 1 достаточно долго. Тогда сила тока в цепи равна нулю. Поэтому напряжение между выводами резистора также равно нулю. Следовательно, напряжение между левой и правой пластинами конденсатора равно:  $U = 3\mathcal{E} - \mathcal{E} = 2\mathcal{E}$ . Таким образом, начальный заряд  $q_0$  конденсатора равен:

$$q_0 = C \cdot U = C \cdot 2\mathcal{E}. \quad (19)$$

При этом левая пластина конденсатора заряжена положительно, а правая — отрицательно. Начальная энергия заряженного конденсатора:

$$W_0 = \frac{q_0^2}{2C} = 2C \cdot \mathcal{E}^2. \quad (20)$$

После переключения ключа  $K$  в положение 2 начнётся перезарядка конденсатора и в цепи потечёт электрический ток. Соответственно, на резисторе  $R$  будет выделяться определённое количество теплоты. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока между правой и левой пластинами конденсатора не установится разность потенциалов, равная ЭДС источника тока в образованной цепи:  $\Delta\Phi = \mathcal{E}$ . Заряд конденсатора станет равен  $q_k = C \cdot \mathcal{E}$ . При этом правая пластина конденсатора будет заряжена положительно, а левая — отрицательно. Таким образом, за время перезарядки конденсатора по цепи пройдёт заряд  $\Delta q = q_0 + q_k$ , так как при разрядке конденсатора до нулевой разности потенциалов протекает заряд  $q_0$ , а при зарядке конденсатора до конечной разности потенциалов противоположной полярности протекает заряд  $q_k$ .

Следовательно, за время перезарядки стороны силы совершают работу, равную произведению ЭДС источника на прошедший через него заряд:

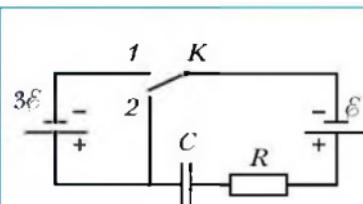


Рис. 64

$$A = \mathcal{E} \cdot \Delta q = \mathcal{E} \cdot (q_0 + q_k) = \mathcal{E} \cdot (2C \cdot \mathcal{E} + C \cdot \mathcal{E}) = 3C \cdot \mathcal{E}^2. \quad (21)$$

Конечная энергия конденсатора равна:

$$W_k = \frac{q_k^2}{2C} = \frac{C \cdot \mathcal{E}^2}{2}. \quad (22)$$

Согласно закону сохранения энергии, сумма начальной энергии  $W_0$  конденсатора и работы сторонних сил по переносу заряда  $\Delta q$  равна сумме конечной энергии  $W_k$  конденсатора и выделившегося на резисторе  $R$  количества теплоты  $Q$ :

$$W_0 + A = W_k + Q. \quad (23)$$

Подставив формулы (20)–(22) в (23), получаем ответ:

$$Q = 2C \cdot \mathcal{E}^2 + 3C \cdot \mathcal{E}^2 - \frac{C \cdot \mathcal{E}^2}{2} = \frac{9}{2}C \cdot \mathcal{E}^2.$$

### Вопросы

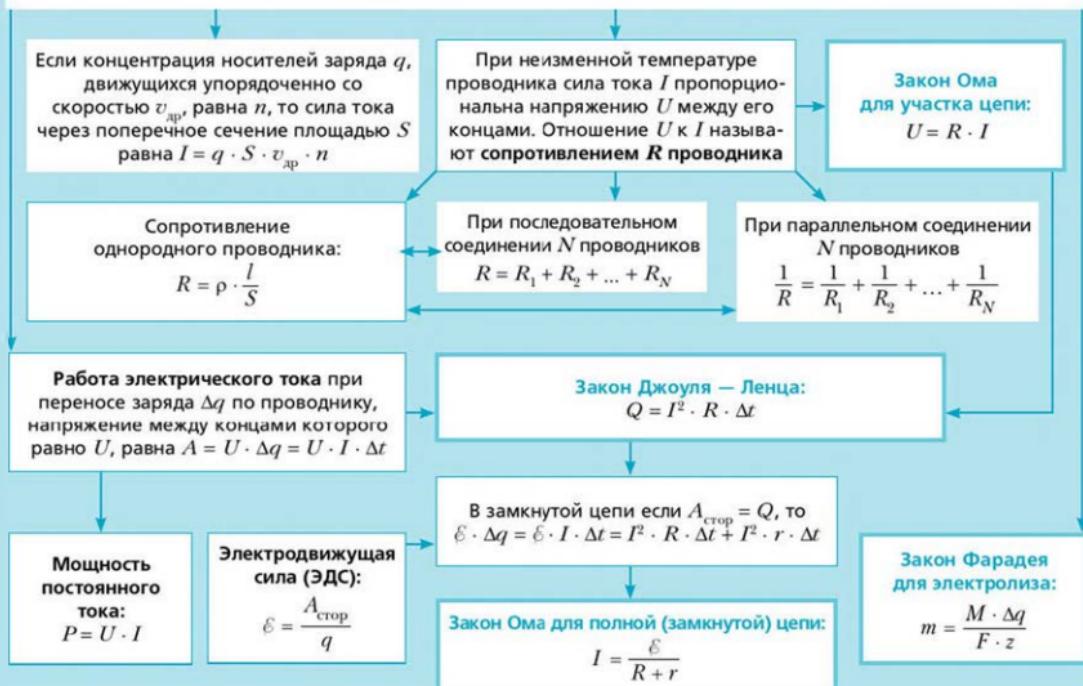
- 1 Как изменяется с течением времени сила тока при подключении к источнику разряженного конденсатора? Как при этом изменяются заряд конденсатора и энергия создаваемого им электрического поля? Какую работу совершают при этом сторонние силы в источнике тока?
- 2 Изменятся ли ответы на предыдущие вопросы, если подключаемый конденсатор предварительно заряжен? Рассмотрите все возможные случаи.

### Упражнения

- 1 Конденсатор ёмкостью  $C = 2 \text{ мкФ}$ , имеющий заряд  $q_0 = 40 \text{ мкКл}$ , подключают к источнику постоянного тока (с ЭДС  $\mathcal{E} = 10 \text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $r = 0,5 \text{ кОм}$ ) через резистор, сопротивление которого  $R = 2 \text{ кОм}$ , так, как показано на рис. 63. Определите количество теплоты, которое выделится на резисторе  $R$  за время перезарядки конденсатора.
- 2 Определите количество теплоты, которое выделится на резисторе  $R$  после переключения ключа  $K$  из положения 2 в положение 1 в схеме, показанной на рис. 64. Потерями энергии на излучение пренебречь.

# ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Упорядоченное движение заряженных частиц — электрический ток — характеризуют силой тока  $I = \Delta q / \Delta t$ , где  $\Delta q$  — заряд, прошедший через данное сечение за время  $\Delta t$ .



В 8 классе вы познакомились с некоторыми проявлениями *магнитного взаимодействия*. В отличие от гравитационного, это взаимодействие (как и электрическое) возникает только при определённых условиях. В этой главе и далее, при изучении электромагнитной индукции, вы более подробно узнаете о свойствах магнитного взаимодействия и его проявлениях.

## § 17

## Магнитное взаимодействие

Ещё в древности, более 2500 лет назад, в окрестностях города Магнесия находили минерал, куски которого могли притягивать к себе железные предметы. Этот минерал называли магнетитом. (Согласно современным данным, этот минерал состоит из окислов железа: 31 % FeO и 69 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.) Вероятно, поэтому тела, способные притягивать к себе подобно магнетиту железные предметы, стали называть *магнитами*, а сами взаимодействия — *магнитными взаимодействиями*.

Сведения, накопленные о магнитах и магнитных взаимодействиях, опи-сал английский врач и физик Уильям Гильберт (1544–1603) в своей книге «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле». Можно выделить в его описании следующие свойства постоянных магнитов.

1. В разных частях магнита сила притяжения различна; наибольшей она оказывается на двух противоположных концах магнита — *полюсах*.
2. Разноимённые полюса двух магнитов притягиваются, одноимённые — отталкиваются.
3. Если подвесить полосовой магнит (например, магнитную стрелку — стрелку компаса) за середину на нитке, то при отсутствии других магнитов он установится так, что один его полюс будет указывать на север, а другой — на юг.



4. Земля — большой магнит. Южный магнитный полюс ( $S_m$ ) Земли находится вблизи её Северного географического полюса. Напротив, северный магнитный полюс ( $N_m$ ) Земли находится вблизи её Южного географического полюса.

**Полюс магнитной стрелки, обращённый в сторону географического Севера ( $N_g$ ), называют северным магнитным полюсом, а в сторону географического Юга ( $S_g$ ) — южным магнитным полюсом.**

Отметим, что положение 4 является следствием положений 2 и 3, установленных в результате многочисленных наблюдений.

**Направленный отрезок прямой, идущий вдоль магнитной стрелки от её южного полюса к северному, называют магнитной осью стрелки.**

Вплоть до 1820 г. учёные считали, что электрические и магнитные явления имеют разную природу и не связаны друг с другом. Однако в 1820 г. датский физик Ханс Эрстед (1777–1851) обнаружил, что стоящая под проводом магнитная стрелка после подключения провода к источнику тока, поворачиваясь, изменяет своё положение в пространстве.

Повторим этот эксперимент. Расположим длинный провод параллельно магнитной оси стрелки, которая при отсутствии тока в проводе ориентирована в направлении юг — север (рис. 66, а). После под-

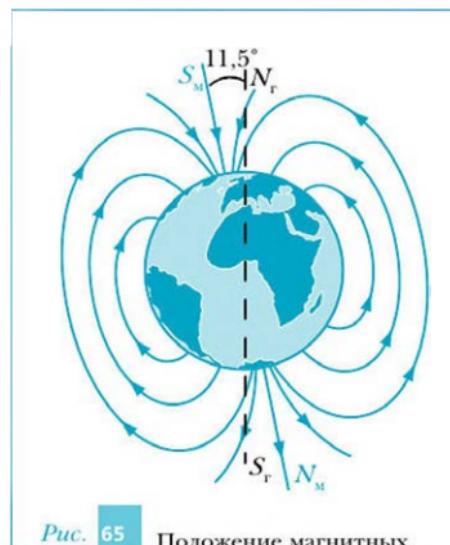


Рис. 65

Положение магнитных полюсов Земли

**Согласно современным данным, южный магнитный полюс Земли имеет координаты примерно 82° с. ш. и 114° з. д., северный магнитный полюс Земли в настоящее время имеет координаты примерно 63° ю. ш. и 138° в. д. Прямая, проходящая через оба магнитных полюса Земли, не проходит через центр Земли и составляет с её осью вращения угол, близкий к 11,5° (рис. 65). За 170 млн лет магнитные полюсы Земли 300 раз изменяли свою полярность, последний раз 30 000 лет назад.**

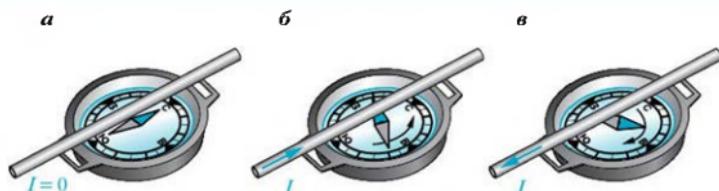


Рис. 66

ключения провода к источнику тока стрелка изменяет начальную ориентацию, поворачиваясь в горизонтальной плоскости. По мере увеличения силы тока ось стрелки всё сильнее отклоняется от исходного направления, стремясь установиться перпендикулярно проводу (рис. 66, б). При изменении направления тока в проводе (рис. 66, в) магнитная стрелка отклоняется в противоположном направлении.

Последующие эксперименты показали, что электрический ток действует не только на магнитную стрелку, но и на любые магниты.

Удалось также доказать, что и магниты *действуют на проводники, по которым течёт электрический ток*. Например, при поднесении к проводу с током магнита такой провод отклоняется от исходного положения. Это отклонение тем больше, чем больше сила тока в проводе. Изменение направления тока в проводе на противоположное приводит к соответствующему изменению и направления отклонения проводника.

**!** Из всех этих опытов следует, что проводник с током и магнит взаимодействуют между собой.

При этом характер взаимодействия зависит как от направления тока в проводнике, так и от взаимного расположения магнита и провода с током.

Поскольку магниты взаимодействуют друг с другом, а проводники с током взаимодействуют с магнитами, можно предположить, что проводники с током также взаимодействуют между собой. Это взаимодействие в 1820 г. обнаружил и исследовал французский физик Андре Ампер (1775–1836). Он, в частности, установил: *два параллельных провода притягиваются друг к другу, если токи в них текут в одном и том же направлении. Если же токи в параллельных проводах текут в противоположных направлениях, то провода отталкиваются друг от друга* (рис. 67).



Отметим, что при отсутствии тока хотя бы в одном из проводов заместных сил взаимодействия между ними не наблюдается. Обратим внимание и на то, что силы электростатического взаимодействия между проводами с токами достаточно малы, так как провода имеют очень малый электрический заряд.

Из описанных опытов следует, что *между проводами с токами действуют силы, подобные силам взаимодействия магнитов*. Это позволило Амперу выдвинуть смелую гипотезу, что *все магнитные свойства вещества обусловлены электрическими токами в этом веществе*. Поэтому такие токи стали называть *токами Ампера* (более подробно о токах Ампера см. § 24). С учётом гипотезы Ампера можно считать:

**!** все магнитные взаимодействия тел имеют одну природу и обусловлены наличием в этих телах электрических токов, т. е. связаны с упорядоченным движением заряженных частиц.

Отметим ещё раз, что в рассмотренных экспериментах взаимодействующие тела были электрически нейтральны. Следовательно, магнитные взаимодействия тел обусловлены не тем, что в телах имеются носители электрических зарядов, а тем, что эти носители *упорядоченно движутся*. Это позволяет предположить, что электрически нейтральный магнит или провод с током должны действовать на пролетающую рядом с ними заряженную частицу. Все известные к настоящему времени эксперименты подтверждают это предположение. Более того, опыты показывают, что *любые движущиеся заряженные частицы взаимодействуют друг с другом не только электростатическими силами (которые проявляются и при отсутствии движения), но и магнитными*. При этом если хотя бы одна из частиц покоятся в выбранной инерциальной системе отсчёта, то силы их магнитного взаимодействия, в отличие от электростатических, равны нулю.

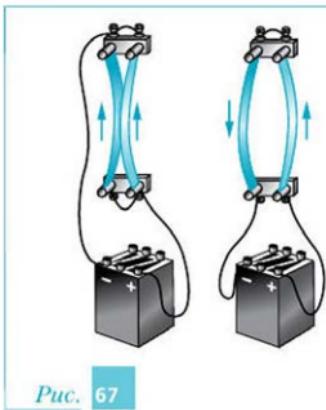


Рис. 67

### Вопросы

- 1 Какие тела называют магнитами?
- 2 Какими свойствами обладают магнитные полюсы?

- 3 Какой полюс магнита называют северным, а какой — южным?
- 4 Что называют магнитной осью стрелки?
- 5 В каких случаях возникают силы магнитного взаимодействия?
- 6 Какие силы могут существовать между двумя частицами?
- 7 Как направлены силы магнитного взаимодействия между двумя параллельными проводами, по которым протекают электрические токи?
- 8 В чём состоит гипотеза Ампера?
- 9 Можно ли с помощью магнитной стрелки с известными полюсами определить, где располагаются магнитные полюсы у намагниченного тела? Ответ обоснуйте.
- \*10 Можно ли, не используя какие-либо другие тела, определить, намагнчен ли кусок стальной проволоки?



§ 18

## Магнитное поле. Индукция магнитного поля. Сила Лоренца

Согласно современным представлениям (*теории близкодействия*), взаимодействие двух тел, находящихся на некотором расстоянии друг от друга, осуществляется посредством возникающего между этими телами силового поля. Другими словами, одно из тел создаёт силовое поле, которое распространяется в пространстве. Достигнув второго тела, это поле оказывает на него силовое действие. В свою очередь, второе тело создаёт своё силовое поле, которое, распространяясь в пространстве, достигает первого тела и оказывает на него силовое действие.

*Силовое поле является одной из форм материи.* Другими словами, оно так же реально, как и вещество.

Магнитное взаимодействие осуществляется посредством *магнитного поля*. Источниками магнитного поля являются движущиеся электрически заряженные частицы и любые тела, в которых имеется упорядоченное движение носителей заряда. Такими телами являются проводники с током и магниты (намагниченные тела). Ещё одним источником магнитного поля является изменяющееся во времени электрическое поле.

Магнитное поле действует только на движущиеся электрически заряженные частицы и тела, в которых имеется упорядоченное движение носителей заряда, — на проводники с током и магниты.

Магнитное поле в данной точке пространства характеризуют его действием на указанные выше объекты. Для характеристики этого действия используют специальную физическую векторную величину, которую называют *вектором магнитной индукции* (или *вектором индукции магнитного поля*). Часто для краткости её называют *магнитной индукцией*. Вектор магнитной индукции обозначают символом  $\vec{B}$ .

За направление вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  в данной точке пространства принимают направление магнитной оси помещённой в эту точку магнитной стрелки, которая ориентируется под действием только магнитных сил (рис. 68, а).

Для определения модуля вектора магнитной индукции в данной точке рассмотрим частицу с электрическим зарядом  $q$ , пролетающую через эту точку со скоростью  $\vec{v}$ . Пусть на частицу действует только магнитное поле, а её скорость  $\vec{v}$  в рассматриваемый момент времени составляет угол  $\alpha$  с вектором  $\vec{B}$  (рис. 68, б). Опыты показывают, что модуль  $F_m$  магнитной силы, действующей на частицу, прямо пропорционален произведению модуля заряда  $q$ , модуля  $v$  скорости и синуса угла  $\alpha$  между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ :

$$F_m \sim |q| \cdot v \cdot \sin \alpha. \quad (1)$$

Эксперименты показывают, что коэффициент пропорциональности между  $F_m$  и произведением  $|q| \cdot v \cdot \sin \alpha$  одинаков для всех заряженных частиц, пролетающих через данную точку этого поля.

Из соотношения (1) видно, что при  $\alpha = 0$  (или  $\alpha = 180^\circ$ ), когда  $\sin \alpha = 0$ , магнитное поле не действует на частицу. Напротив, при  $\alpha = 90^\circ$ , когда значение синуса максимально ( $\sin \alpha = 1$ ), модуль силы, с которой магнитное поле действует на частицу, принимает максимальное значение. Обозначим это значение через  $F_{\max}$ .

Однаковое для всех частиц, пролетающих через данную точку поля, отношение  $F_{\max}$  к произведению  $|q| \cdot v$  может служить характеристикой магнитного поля в этой точке. В СИ это отношение считают равным модулю вектора индукции магнитного поля.

**Модуль магнитной индукции в данной точке в СИ равен отношению максимального значения модуля силы, действующей со стороны магнитного поля на пролетающую через эту точку**

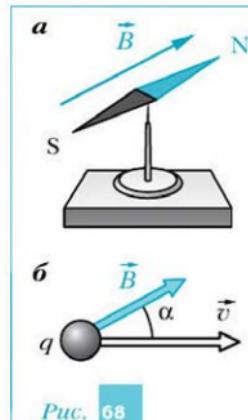


Рис. 68

заряженную частицу, к произведению модуля заряда этой частицы и модулю её скорости:

$$\mathbf{B} = \frac{\mathbf{F}_{\max}}{|q| \cdot v}. \quad (2)$$

В СИ единица магнитной индукции — *тесла* (Тл). Эта единица названа в честь сербского физика-экспериментатора Николы Теслы (1856–1943).

Если вектор индукции магнитного поля одинаков (как по направлению, так и по модулю) во всех точках некоторой области пространства, то магнитное поле в этой области называют *однородным*.

Особый интерес представляет движение заряженных частиц в области пространства, где одновременно имеют место электрическое и магнитное поля. Одним из первых исследовал и описал такое движение голландский физик Хендрик Лоренц (1853–1928). В его честь сумму сил, действующих на движущуюся в электрическом и магнитном полях заряженную частицу, называют *силой Лоренца*.

Различают электрическую и магнитную составляющие силы Лоренца.

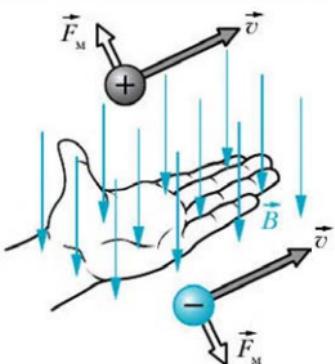
*Электрической составляющей силы Лоренца* называют силу, с которой на частицу действует электрическое поле:  $\vec{F}_{\text{эл}} = q \cdot \vec{E}$ , где  $q$  — заряд частицы,  $\vec{E}$  — напряжённость электрического поля в точке, в которой в данный момент находится частица.

*Магнитной составляющей силы Лоренца* называют силу, с которой на частицу действует магнитное поле. Если известен вектор магнитной индукции, то модуль  $F_{\text{маг}}$  магнитной составляющей силы Лоренца рассчитывают по формуле:

$$F_{\text{маг}} = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha. \quad (3)$$

Рис. 69

Использование правила левой руки для определения направления магнитной составляющей силы Лоренца



!

Магнитная составляющая силы Лоренца всегда перпендикулярна плоскости, в которой располагаются вектор скорости частицы и вектор индукции магнитного поля  $\vec{B}$ . Для



Другие способы определения вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  будут использованы в § 21 и 23.

определения направления магнитной составляющей силы Лоренца используют правило левой руки.

### *Правило левой руки*

1. Ладонь левой руки располагают так, чтобы вытянутые четыре пальца совпадали с направлением вектора скорости частицы.

2. После этого ладонь поворачивают, не изменяя направление вытянутых четырёх пальцев, так, чтобы вектор индукции магнитного поля входил в ладонь.

3. Большой палец располагают так, чтобы он, оставаясь в одной плоскости с остальными пальцами, был перпендикулярен к ним.

Если частица заряжена положительно, то большой палец показывает направление магнитной составляющей  $\vec{F}_m$  силы Лоренца (рис. 69). Если же частица заряжена отрицательно, то направление магнитной составляющей  $\vec{F}_m$  силы Лоренца противоположно направлению большого пальца.

### **Вопросы**

1. Что такое магнитное поле?
2. Чем может быть создано магнитное поле?
3. На какие объекты действует магнитное поле?
4. Что такое вектор индукции магнитного поля?
5. Как определить направление вектора индукции магнитного поля?
6. Как определить модуль вектора индукции магнитного поля?
7. Как называют единицу модуля индукции магнитного поля в СИ?
8. Какое магнитное поле называют однородным?
9. Какую силу называют силой Лоренца?
10. Как определить направление магнитной составляющей силы Лоренца?

### **Упражнения**

1. Получите размерность единицы индукции магнитного поля в СИ.
2. Определите модуль силы, действующей на электрон, движущийся в однородном магнитном поле перпендикулярно вектору индукции магнитного поля со скоростью, модуль которой  $v = 100 \text{ км/с}$ . Модуль индукции магнитного поля  $B = 0,1 \text{ Тл}$ .
- \*3. Частица массой  $m$ , имеющая заряд  $q$ , движется в области однородного магнитного поля перпендикулярно вектору индукции этого поля со скоростью, модуль которой равен  $v$ . При этом модуль ускорения частицы равен  $a$ . Определите модуль индукции магнитного поля в этой области.



## § 19 Линии магнитной индукции. Картины магнитных полей

Для наглядности магнитные поля, так же как и электрические, изображают с помощью линий. Эти линии называют *линиями магнитной индукции* или *магнитными линиями*. Иногда используют термин *линии магнитного поля*.

Магнитную линию проводят так, чтобы касательная к ней в каждой её точке совпадала с осью установившейся магнитной стрелки, помещённой в эту точку. Как и на силовых линиях электрического поля, на линиях магнитного поля задают положительное направление. За *положительное направление линии принимают направление, вдоль которого ориентируется магнитная ось стрелки* (от южного полюса стрелки к северному; см. рис. 68, а). Если магнитная линия перпендикулярна плоскости рисунка, то для указания её направления используют специальные символы. Линию, уходящую за плоскость рисунка, изображают символом  $\otimes$  (хвост улетающей стрелы). Если же линия выходит из плоскости рисунка, то её изображают символом  $\odot$  (остриё приближающейся стрелы).

Магнитную линию можно провести через любую точку пространства, где есть магнитное поле. Договорились проводить линии магнитной индукции так, чтобы их густота была пропорциональна модулю индукции магнитного поля в данной области. Таким образом, в области, где модуль индукции магнитного поля больше, магнитные линии расположены гуще. Напротив, в области, где модуль индукции магнитного поля меньше, расстояния между магнитными линиями больше.

Получить наглядное представление о форме линий магнитной индукции можно с помощью мелких железных опилок. Для получения таких картин на картон равномерно насыпают железные опилки. После внесения картона с опилками в исследуемое магнитное поле опилки намагничиваются этим полем и превращаются в маленькие магнитики. После этого по картону несколько раз слегка постукивают для того, чтобы образовавшиеся магнитики, подпрыгивая, смогли преодолеть действие на них сил сухого трения и выстроиться вдоль силовых линий.

Рассмотрим примеры полученных так картин магнитного поля.

На рис. 70, а показан длинный вертикальный провод, по которому течёт постоянный ток  $I$  в указанном направлении. Провод проходит через середину горизонтального листа картона, на котором расположились железные опилки. Видно, что в магнитном поле, созданном током, опилки ориентировались вдоль окружностей, центры которых лежат

в точке пересечения картона и провода. Эксперимент показывает, что перемещение листа картона вверх (или вниз) вдоль провода не приводит к изменению картины поля. Следовательно, *линии магнитного поля прямолинейного провода с током представляют собой окружности, расположенные в плоскостях, перпендикулярных проводу. Центры всех этих окружностей лежат на оси провода* (рис. 70, б).

Отметим, что такая форма линий магнитного поля прямолинейного тока соответствует осевой симметрии источника магнитного поля.

Эксперименты показывают, что по мере удаления от оси провода с током ориентирующее действие его магнитного поля на опилки уменьшается. Следовательно, это магнитное поле ослабевает. Другими словами, *модуль индукции магнитного поля прямолинейного провода с током по мере удаления от провода уменьшается*.

Чтобы определить положительные направления магнитных линий, подвесим на нитях вблизи прямолинейного провода с током  $I$  несколько магнитных стрелок (рис. 71, а).

На этом же рисунке показаны *правый винт* (буравчик) и *правая рука*. Видно, что положительное направление линии магнитной индукции можно определить, пользуясь правилом буравчика (см. рис. 71, а) или правилом правой руки (рис. 71, б).



### Правило буравчика (правило Максвелла)

Положительное направление на магнитной линии совпадает с направлением вращения рукоятки буравчика (*правого винта*), при котором буравчик ввинчивается в направлении тока в проводе.



Существует правило буравчика для проводника с током, имеющего вид кольца: *если ввинчивать буравчик в положительном направлении магнитной линии, проходящей через центр кольца, то направление вращения его рукоятки будет совпадать с направлением тока в этом кольце*.

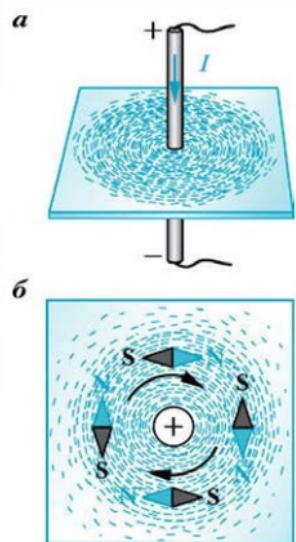


Рис. 70

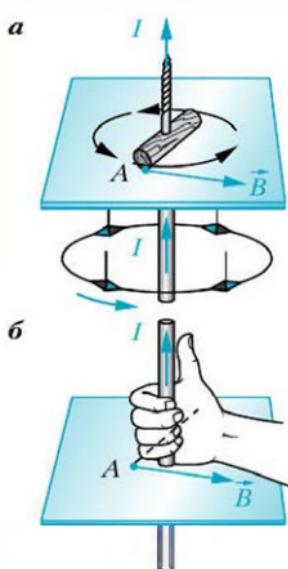


Рис. 71

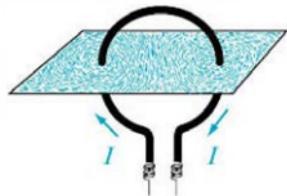


Рис. 72

**Правило правой руки**

Если большой палец правой руки расположить так, чтобы он указывал направление тока в проводе, то остальные согнутые пальцы, охватывающие провод, указуют положительное направление линий магнитного поля, создаваемого током в этом проводе.

На рис. 72 показана картина магнитного поля, создаваемого витком с током  $I$ .

Обратим внимание на то, что и на этой картине все магнитные линии представляют собой замкнутые кривые.

**Поля, силовые линии которых всегда замкнуты, называют вихревыми.**

Эксперименты показывают, что **любое магнитное поле является вихревым**. Это утверждение, как и невозможность создания магнита с одним полюсом, означает, что *в природе нет магнитных зарядов, подобных электрическим*.

Экспериментально также доказано, что индукция магнитного поля удовлетворяет **принципу суперпозиции**.

Вектор индукции магнитного поля, создаваемого несколькими источниками в данной точке, равен сумме векторов индукций магнитных полей, создаваемых каждым из этих источников в данной точке при отсутствии остальных.

На практике для получения магнитных полей часто используют **соленоиды** – цилиндрические катушки, состоящие из некоторого количества витков провода, намотанного по спирали. На рис. 73 представлены картины магнитных полей, полученные с помощью железных опилок при различном числе витков в соленоидах. Видно, что при увеличении числа витков и, соответственно, длины соленоида магнитное поле внутри соленоида становится всё более однородным. Эксперимент показывает, что внутри достаточно длинного соленоида с плотной намоткой магнитное поле вдали

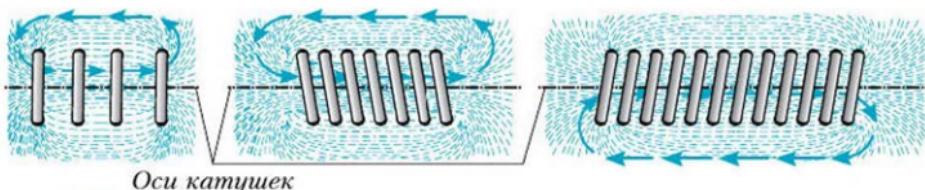


Рис. 73

от концов соленоида можно считать однородным. При этом направление вектора индукции этого поля в указанной области совпадает с осью соленоида.

На рис. 74 приведены качественные картины магнитных полей, создаваемых полосовым магнитом и соленоидом. Видно, что эти картины за пределами магнита и соленоида совпадают. Можно предположить, что магнитные поля внутри этих объектов также одинаковы. Однако исследовать линии магнитной индукции внутри постоянного магнита с помощью магнитных стрелок или железных опилок невозможно. В настоящее время такое исследование можно провести, облучая магнит потоком нейтронов. Опыты с нейтронами показали, что линии магнитной индукции внутри полосового постоянного магнита идут так же, как внутри соленоида.

В заключение отметим, что магнитное поле порождается не только электрическими токами, обусловленными упорядоченным движением заряженных частиц, но и *изменяющимся с течением времени электрическим полем*. Например, при зарядке конденсатора магнитное поле создаётся не только электрическим током в проводах, но и изменяющимся электрическим полем между пластинами конденсатора (рис. 75).

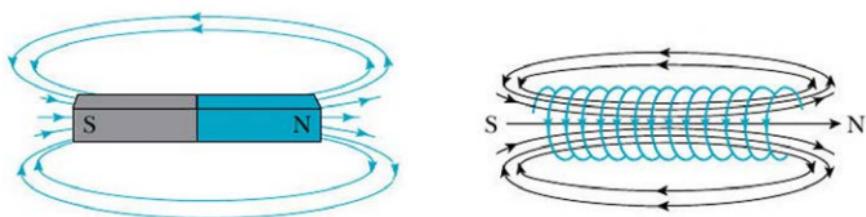


Рис. 74

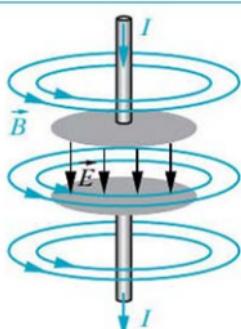


Рис. 75

Предположение о том, что изменяющееся во времени электрическое поле порождает магнитное поле, впервые было высказано Максвеллом. Экспериментально это было подтверждено в 1901 г. профессором Московского университета Александром Александровичем Эйхенвальдом (1863–1944). Явление возникновения магнитного поля в результате изменения электрического поля играет принципиальную роль в электромагнетизме.



В конце 1820 г. французский учёный Пьер Лаплас (1749–1827), обобщив результаты опытов французских физиков Жана-Батиста Био (1774–1862) и Феликса Савара (1791–1841), сформулировал закон (закон Био – Савара – Лапласа), позволяющий рассчитывать индукцию магнитного поля, созданного маленьким отрезком  $\Delta l$  тонкого прямого провода с током – элементом тока в некоторой точке, находящейся на расстоянии  $r$  от элемента тока. В соответствии с этим законом в СИ модуль индукции  $\Delta B$  магнитного поля, созданного элементом тока  $\Delta l$  в некоторой точке, обратно пропорционален квадрату расстояния  $r$  от элемента тока до этой точки:

$$\Delta B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot \Delta l \cdot \sin \alpha}{r^2}$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\alpha$  – угол между направлением тока в элементе  $\Delta l$  и радиусом-вектором  $\vec{r}$ , проведённым от элемента  $\Delta l$  к заданной точке. В СИ магнитная постоянная  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Н/А<sup>2</sup> (см. § 22).

Используя закон Био – Савара – Лапласа и принцип суперпозиции, можно показать, что картины магнитных полей, созданных токами в прямолинейном проводнике, тонком кольце и соленоиде, соответствуют приведённым выше. Кроме того, можно получить формулы для расчёта модулей векторов магнитной индукции для каждого из этих полей.

1. Модуль магнитной индукции поля, созданного прямолинейным проводом с током  $I$  на расстоянии  $r$  от оси провода:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r}. \quad (1)$$

2. Модуль магнитной индукции в центре тонкого кольца радиусом  $r$  с током  $I$  равен:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2r}, \quad (2)$$

3. Модуль магнитной индукции однородного поля внутри соленоида с плотной намоткой равен:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{l}, \quad (3)$$

где  $I$  – сила тока,  $N$  – число витков соленоида,  $l$  – длина соленоида. Формула (3) справедлива с точностью не менее 1 % при  $\frac{l}{r} \geq 30$  (где  $r$  – радиус витка) для области внутри соленоида, расстояние от границ которой до его торцов не меньше  $r$ .

### Вопросы

1. Какие линии называют линиями магнитной индукции?
2. Какое направление на магнитных линиях принимают за положительное?
3. Как договорились проводить линии магнитной индукции?
4. Могут ли пересекаться магнитные линии? Ответ обоснуйте.
5. Какие поля называются вихревыми? Чем такое поле отличается от потенциального?
6. Как можно экспериментально получить представление о форме линий магнитной индукции?
7. Какую форму имеют линии магнитной индукции поля, созданного длинным прямым проводником с током?
8. Сформулируйте правило: а) правого винта (буравчика); б) правой руки.
9. Могут ли электрические поля порождать магнитные поля? Если да, то при каких условиях?



### Упражнения

1. Вычислите модуль индукции магнитного поля на расстоянии  $r = 5$  см от тонкого прямого проводника, сила тока в котором  $I = 20$  А.
2. Вычислите модуль индукции магнитного поля в центре тонкого соленоида длиной  $l = 10$  см, содержащего  $N = 200$  витков провода, при силе тока в нём  $I = 10$  А. Считайте, что радиус соленоида многое меньше его длины.



§ 20 Движение заряженных частиц  
в магнитном поле

Рассмотрим примеры решения задач о движении заряженных частиц в магнитном поле.

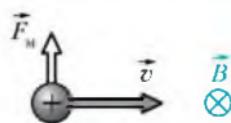


Рис. 76

**Задача 1**

Частица массой  $m$  и зарядом  $q$  влетает со скоростью  $\vec{v}$  в однородное магнитное поле. Вектор  $\vec{B}$  магнитной индукции поля направлен перпендикулярно начальной скорости частицы. Пренебрегая действием на эту частицу всех сил, кроме сил со стороны магнитного поля, определите вид траектории этой частицы.

*Решение.*

На рис. 76 показано взаимное расположение векторов  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . На движущуюся в магнитном поле частицу действует магнитная составляющая силы Лоренца  $\vec{F}_M$ . Будем для определённости считать, что заряд частицы положителен. Тогда, согласно правилу левой руки, в начальный момент времени сила  $\vec{F}_M$  будет направлена так, как показано на рисунке. В результате действия этой силы направление движения частицы будет изменяться.

Магнитная составляющая силы Лоренца всегда перпендикулярна вектору скорости частицы. Следовательно, под действием этой силы будет изменяться только направление движения частицы, а модуль её скорости будет оставаться постоянным.

Поэтому в любой момент времени модуль магнитной составляющей силы Лоренца будет равен:

$$\vec{F}_M = q \cdot \vec{v} \cdot \vec{B}. \quad (1)$$

Согласно второму закону Ньютона, в любой момент времени направление ускорения частицы совпадает с направлением вектора  $\vec{F}_M$ . Следовательно, ускорение частицы будет всё время перпендикулярно её скорости. Модуль этого ускорения будет постоянным и равным:

$$a = \frac{\vec{F}_M}{m}. \quad (2)$$

Таким образом, *частица в однородном магнитном поле, индукция которого перпендикулярна её скорости, будет равномерно двигаться*.

ся по окружности. Следовательно, её ускорение является центростремительным ускорением, а его модуль может быть рассчитан по формуле:

$$a_{\text{нс}} = \frac{v^2}{R}, \quad (3)$$

где  $R$  – радиус окружности, по которой движется частица.

Приравнивая формулы (2) и (3), с учётом (1) получаем:

$$R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}. \quad (4)$$

Определим время  $\tau$ , за которое частица совершает полный оборот по окружности радиусом  $R$ .

С учётом формулы (4) получаем:

$$\tau = \frac{2\pi \cdot R}{v} = \frac{2\pi \cdot m}{q \cdot B}. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что период обращения частицы не зависит от модуля её скорости. Используя этот факт, в 1931 г. американский физик Эрнест Лоуренс (1901–1958) создал ускоритель заряженных частиц – *циклотрон*. В циклотроне заряженная частица, двигаясь в однородном магнитном поле, перпендикулярном её скорости, многократно проходит зазор, в котором создано ускоряющее её движение электрическое поле.



Циклотрон (рис. 77) состоит из двух полых металлических полуцилиндров 1 и 2 – *дуантов*. Они находятся в вакуумной камере между полюсами мощного электромагнита, создающего постоянное однородное магнитное поле с индукцией  $B$ , перпендикулярной плоскостям оснований полуцилиндров. Заряженные частицы из специального устройства со скоростью  $v$  влетают вблизи центра камеры в дуант 1. В результате действия магнитного поля частица, двигаясь внутри дуанта 1 по дуге радиусом  $R$ , через время  $0,5\tau$  вновь подлетает к зазору между дуантами. К этому моменту напряжение между дуантами увеличивают до амплитудного значения  $U_0$ , а его полярность делают такой, чтобы электрическое поле в зазоре ускоряло частицу. В результате пролёта зазора кинетическая энергия частицы увеличивается на величину  $q \cdot U_0$ , где  $q$  – заряд частицы. Поэтому внутри дуанта 2 частица будет двигаться по дуге окружности большего радиуса. Однако она вновь подлетит к зазору между дуантами через время  $0,5\tau$ . К этому времени полярность напряжения между дуантами изменяют на противоположную и т. д. Другими словами, период  $T$  изменения полярности напряжения между дуантами выбирают равным периоду  $\tau$  обращения частицы. Ус-

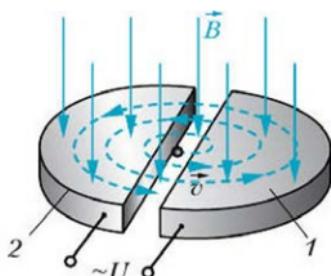


Рис. 77

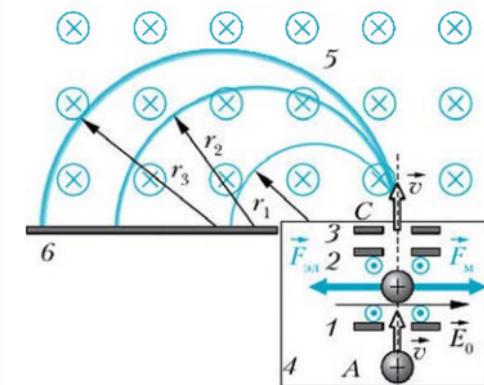


Рис. 78

ловие равенства периодов ( $T = \tau$ ) называют *условием синхронизации*. При выполнении условия синхронизации разгоняющаяся частица будет двигаться по спирали, каждый раз увеличивая свою кинетическую энергию (и модуль скорости) при прохождении зазора.

Обычно ускоряемая в циклотроне заряженная частица до её вывода из циклотрона пролетает зазор между дуантами  $n = 10^4\text{--}10^5$  раз. В настоящее время созданы источники, вырабатывающие напряжение с амплитудой  $U_0 \sim 10\text{--}40$  кВ, полярность которого изменяется с периодом  $T \sim 10^{-7}$  с. Поэтому с помощью циклотрона удается увеличить кинетическую энергию частицы до  $K = q \cdot U_0 \cdot n = q \cdot (10\text{--}40) \cdot 10^7$  Дж.

Для получения заряженных частиц с большими кинетическими энергиями в настоящее время используют фазотроны, синхротроны, синхрофазотроны. При конструировании этих приборов учитывают изменения уравнения движения заряженных частиц, обусловленные приближением значений их скорости к значению скорости света в вакууме.

В экспериментальной физике широко используют прибор, принцип действия которого основан на соотношении (4), — *масс-спектрограф*. Масс-спектрограф применяют для измерения масс ионов разных веществ.

На рис. 78 схематически показано устройство масс-спектрографа. Одним из основных узлов этого прибора является *фильтр скоростей*. Входящие в него элементы обведены на рисунке рамкой. Через диафрагму 1 в фильтр влетает узкий пучок положительно заряженных ионов, испускаемых источником 4. Чтобы из этого пучка выделить ионы, имеющие строго определённые скорости, их пропускают через диафрагмы 2 и 3. Между диафрагмами

1 и 2 ионы движутся в электрическом и магнитном однородных полях. Вектор  $\vec{E}_0$  напряжённости электрического поля направлен перпендикулярно прямой  $AC$ , проходящей через центры всех трёх диафрагм, и расположен в плоскости рисунка. Вектор  $\vec{B}_0$  индукции магнитного поля перпендикулярен плоскости рисунка. Магнитная составляющая  $\vec{F}_m$  силы Лоренца, действующая на летящий вдоль прямой  $AC$  положительный ион, направлена противоположно электрической составляющей  $\vec{F}_{\text{эл}}$  силы Лоренца. Поэтому действие электрического и магнитного полей компенсируется только для ионов, летящих вдоль прямой  $AC$  со скоростью, модуль которой

$$v = \frac{E_0}{B_0}. \quad (6)$$

Только эти ионы и смогут пролететь через маленькое отверстие в диафрагме 3 в область 5. В этой области создано однородное магнитное поле, вектор  $\vec{B}$  индукции которого перпендикулярен плоскости рисунка. Поэтому все ионы в области 5 движутся по дугам окружностей, радиусы которых удовлетворяют соотношению (4). Описав полуокружность, ионы попадают на экран 6. Измерив расстояние от точки  $C$  влёта иона в область 5 до точки его оседания на экране, можно определить массу иона по формуле:

$$m_i = r_i \cdot \frac{q \cdot B_0 \cdot B}{E_0}. \quad (7)$$

Именно с помощью таких приборов были измерены массы атомов и показано, что практически все химические элементы имеют изотоны.

Действие магнитной составляющей силы Лоренца на движущиеся перпендикулярно магнитным линиям зарженные частицы используют в *магнитогидродинамических генераторах* (МГД-генераторах). В таких генераторах раскаленная плазма (электролит или жидкий металл) с большой скоростью впрыскивается в зону действия сильного магнитного поля. При этом разноимённо зарженные частицы разделяются магнитной составляющей силы Лоренца и попадают на разные электроды. В результате между этими электродами возникает разность потенциалов. Подобные генераторы используют для непосредственного преобразования тепловой энергии в электрическую. Важным достоинством таких генераторов является отсутствие в них движущихся механических частей. Однако создать подобный работающий генератор удалось лишь в середине прошлого века. К настоящему времени мощность плазменных МГД-генераторов удалось довести до 10–20 МВт при КПД ≈ 20 %.

Мы рассмотрели движение заряженной частицы в однородном магнитном поле, индукция которого перпендикулярна скорости частицы. Рассмотрим более сложный случай.

**Задача 2**

Частица массой  $m$ , имеющая положительный заряд  $q$ , влетает в однородное магнитное поле со скоростью  $\vec{v}$ , направленной под углом  $\alpha$  к вектору  $\vec{B}$  индукции этого поля. Определите вид траектории частицы при  $\alpha < 90^\circ$ .

*Решение.*

Будем считать, что на частицу не действуют никакие силы, кроме магнитных. Разложим, как показано на рис. 79, вектор  $\vec{v}$  на две составляющие: перпендикулярную  $\vec{v}_\perp$  и параллельную  $\vec{v}_\parallel$  вектору  $\vec{B}$  индукции магнитного поля. Из рисунка видно, что  $v_\perp = v \cdot \sin \alpha$ , а  $v_\parallel = v \cdot \cos \alpha$ .

Будем рассматривать движение частицы как суперпозицию (сумму) движения в плоскости, перпендикулярной магнитной линии, и движения вдоль магнитной линии.

Начнём с составляющей скорости  $\vec{v}_\perp$ . Из решения задачи 1 этого параграфа следует, что частица, скорость которой перпендикулярна линиям индукции магнитного поля, испытывает действие магнитной составляющей силы Лоренца. Это действие направлено перпендикулярно как скорости, так и магнитным линиям. Следовательно, изменение вектора скорости будет лежать в плоскости, перпендикулярной магнитным линиям. В результате частица будет равномерно двигаться по окружности, плоскость которой перпендикулярна магнитным линиям. Радиус этой окружности, согласно формуле (4), равен:

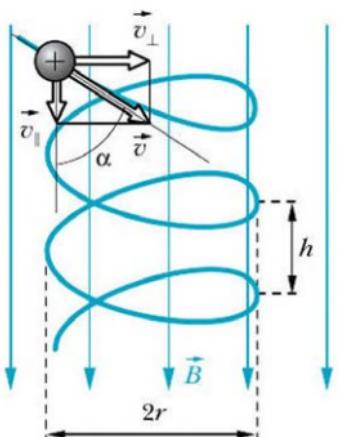


Рис. 79 Траектория движения заряженной частицы в однородном магнитном поле

$$r = \frac{m \cdot v_\perp}{q \cdot B} = \frac{m \cdot v \cdot \sin \alpha}{q \cdot B}. \quad (8)$$

Теперь перейдём к составляющей скорости  $\vec{v}_\parallel$ . Поскольку эта составляющая параллельна  $\vec{B}$ , то движение заряженной частицы вдоль магнитной линии не вызывает действия магнитного поля на эту частицу. Следовательно, скорость  $\vec{v}_\parallel$  движения частицы вдоль магнитной линии будет оставаться неизменной.

Таким образом, складывая два движения, получаем, что в рассматриваемом случае частица будет двигаться по спирали, показанной на рис. 79. Поскольку время оборота

$$\tau = \frac{2\pi \cdot r}{v_\perp} = \frac{2\pi \cdot m}{q \cdot B}, \quad (9)$$

$$\text{то шаг } h \text{ спирали } h = v_{\parallel} \cdot \tau = \frac{2\pi \cdot m \cdot v \cdot \cos\alpha}{q \cdot B}. \quad (10)$$

Полученные результаты позволяют понять принцип *магнитной фокусировки* пучков заряженных частиц.

Рассмотрим пучок вылетающих из одной точки одинаковых заряженных частиц. Пусть скорости этих частиц равны по модулю, но немного различаются по направлениям. Тогда если направления скоростей составляют небольшие углы с магнитной линией однородного поля, то через некоторый промежуток времени все частицы вновь пролетят через одну точку. Это явление и называют *магнитной фокусировкой*. Магнитную фокусировку используют, например, для фокусировки электронных пучков в электронно-лучевой трубке (рис. 80).

В 1950 г., основываясь на том, что заряженные частицы, направление скоростей которых почти совпадает с магнитными линиями, движутся как бы наливаясь на эти линии, советские физики Игорь Евгеньевич Тамм (1895–1971) и Андрей Дмитриевич Сахаров (1921–1989) предложили способ магнитной термоизоляции полностью ионизованной высокотемпературной плазмы от стенок вакуумной камеры. Этот способ используют в установках «Токамак», с помощью которых надеются осуществить управляемую термоядерную реакцию синтеза ядер гелия.

До сих пор мы анализировали характер движения заряженных частиц в однородном магнитном поле. А какие новые эффекты могут возникнуть, если магнитное поле будет неоднородным?

Рассмотрим движение заряженной частицы в неоднородном магнитном поле, созданном двумя одинаковыми катушками 1 и 2. Оси этих катушек совпадают, а расстояние между ними в несколько раз больше их радиуса (рис. 81). По катушкам текут одинаковые токи в направлениях, указанных синими стрелками. Серой спиральной линией показана часть траектории движущейся положительно заряженной частицы. Тонкими голубыми линиями изображены магнитные линии создаваемого катушками поля. Когда частица удаляется от левой катушки, радиус  $r$  витков её траектории увеличивается. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, по мере удаления от катушки уменьшается модуль индукции магнитного поля. Во-вторых, действующая на частицу магнитная со-

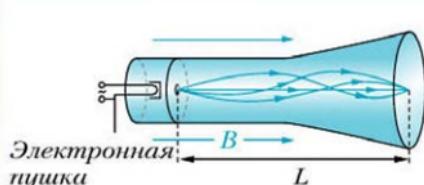
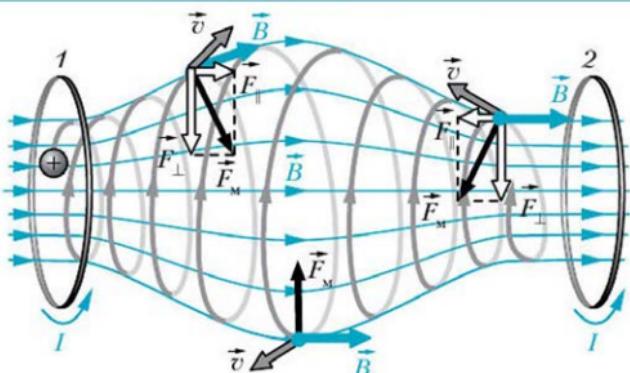


Рис. 80

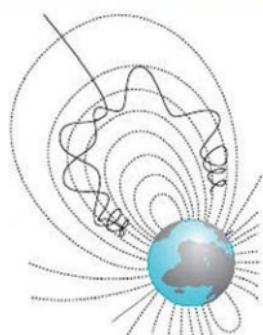


**Рис. 81** Траектория движения заряженной частицы в неоднородном магнитном поле

ставляющая силы Лоренца  $\vec{F}_m$  не только изменяет направление скорости частицы (за счёт действия компоненты  $\vec{F}_{\perp}$ , перпендикулярной оси катушек), но и увеличивает её модуль (за счёт действия компоненты  $\vec{F}_{\parallel}$ , параллельной оси катушек). В результате увеличивается и шаг  $h$  спирали. Это продолжается до тех пор, пока частица не пролетит область наименее слабого магнитного поля. После этого радиус витков траектории частицы и шаг спирали уменьшаются. При определённых условиях проекция скорости частицы на ось катушек изменяет знак на противоположный, т. е. частица начинает удаляться от правой катушки, возвращаясь к левой. В результате частица движется в области пространства между катушками туда и обратно, оказываясь запертой в этой области. Эту область называют *магнитной ловушкой*.

Магнитные ловушки используют в установках для исследования свойств плазмы, нагретой до очень высоких температур ( $10^6$ – $10^7$  К).

Отметим, что магнитное поле Земли является своеобразным щитом, защищающим живые организмы планеты от губительного действия быстрых заряженных космических частиц, летящих в основном от Солнца. На рис. 82 показана траектория одной из таких частиц, которая, влетев в магнитное поле Земли, оказалась в магнитной ловушке. Установлено, что вокруг Земли существуют *радиационные пояса* – области с повышенной концентрацией заряженных частиц.



**Рис. 82**

Внутренний радиационный пояс, в котором накапливаются тяжёлые частицы, располагается от поверхности Земли на высотах 2400–6000 км. Во внешнем радиационном поясе накапливаются в основном электроны. Этот пояс удалён от поверхности Земли на расстояние 12 000–60 000 км. Попавшие в эти пояса заряженные частицы движутся, «навиваясь» на магнитные линии поля Земли, от одного магнитного полюса Земли к другому и обратно. При этом время движения заряженных частиц в направлении от одного полюса к другому лежит в пределах от ~0,1 до 1 с. Лишь в полярных областях некоторые частицы, попавшие в магнитные ловушки, вырываются из них и влетают в верхние слои атмосферы. В результате столкновения таких частиц с молекулами воздуха возникают полярные сияния.

### Вопросы

- 1 Какой вид может иметь траектория заряженной частицы, летящей в однородном магнитном поле?
- 2 От каких величин и как зависят параметры траектории такой частицы?

### Для углублённого уровня

- 3 Что такое циклотрон и для чего его используют?
- 4 Что такое масс-спектрограф и для чего его используют?
- 5 Для чего необходим фильтр скоростей в масс-спектрографе? Опишите принцип действия этого устройства.
- 6 Что такое МГД-генератор? Какие преимущества он имеет по сравнению с другими источниками тока?
- 7 Что такое магнитная ловушка? Где применяют такие ловушки?
- 8 Что такое магнитная фокусировка?

### Упражнения

- 1 Определите знак заряда частицы, траектория которой показана на рис. 77.
- 2 Определите максимальную энергию протонов в циклотроне, радиус дуантов которого  $R = 1$  м. Модуль индукции магнитного поля  $B = 1$  Тл.
- 3 Оцените изменение периода вращения заряженной частицы, движущейся в однородном магнитном поле перпендикулярно его линиям, при увеличении модуля индукции магнитного поля в  $n$  раз.

**4** Определите отношение масс ионов, траектории движения которых показаны на рис. 78.

**15** Модуль индукции магнитного поля в циклотроне равен  $B = 1,5 \text{ Тл}$ . Кинетическая энергия  $K$  двукратно ионизированного иона бериллия массой  $m_0 = 15 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$  к моменту вывода иона из циклотрона стала равной 100 МэВ. Определите минимальный радиус дуанта циклотрона и время оборота в нём иона бериллия.

## § 21 Действие магнитного поля на проводник с током. Сила Ампера

Внутри любого проводника имеется огромное количество свободных носителей заряда, которые совершают непрерывное хаотическое (тепловое) движение. Поэтому после внесения проводника в магнитное поле на каждый движущийся в проводнике носитель заряда будет действовать магнитная составляющая силы Лоренца. В результате взаимодействия этих носителей заряда с остальными частицами проводника действие сил магнитного поля будет передаваться проводнику. Однако из-за хаотического характера движения носителей заряда суммарное действие магнитного поля на весь проводник в целом будет равно нулю.

Ситуация изменится, если в проводнике будет происходить упорядоченное движение электрических зарядов. В этом случае суммарное действие магнитного поля на проводник будет отлично от нуля.

Рассмотрим прямолинейный участок проводника с током в однородном магнитном поле. Пусть длина этого участка равна  $l$ , сила тока в проводнике равна  $I$ , а вектор  $\vec{B}$  магнитной индукции составляет с рассматриваемым участком угол  $\alpha$ . Эксперименты показывают, что на такой участок проводника с током действует магнитная сила. Эту силу называют **силой Ампера**.

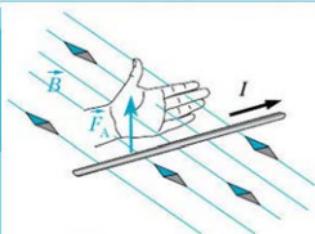


Рис. 83

Определение направления силы Ампера по правилу левой руки

**Модуль силы Ампера:**

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



Сила Ампера всегда перпендикулярна плоскости, в которой располагаются участок проводника и



вектор  $\vec{B}$  индукции магнитного поля. Для определения направления силы Ампера используют *правило левой руки* (рис. 83).

- Ладонь левой руки располагают так, чтобы вытянутые четыре пальца совпадали с направлением тока в участке проводника.
- После этого ладонь поворачивают вокруг оси проводника (направление вытянутых четырёх пальцев) до тех пор, пока вектор индукции магнитного поля не будет входить в ладонь.
- Большой палец располагают так, чтобы он находился в одной плоскости с остальными пальцами и был перпендикулярен им. Тогда большой палец будет показывать направление силы Ампера.

Формулу (1) с правилом определения направления силы Ампера называют **законом Ампера**.

При  $\sin\alpha = 1$  модуль силы Ампера принимает максимальное значение  $F_{A \max}$ . Измерив это значение, можно по формуле (1) рассчитать модуль индукции магнитного поля:

$$B = \frac{F_{A \max}}{I \cdot l}. \quad (2)$$

Использовать такой способ определения модуля  $B$  магнитной индукции в реальном эксперименте практически невозможно. Это обусловлено тем, что крайне сложно измерить силу, действующую со стороны магнитного поля на отдельный участок проводника с током. Однако формулу (2) удобно использовать при расчёте действия известного магнитного поля на проводники с токами.

### Вопросы

- Какую силу называют силой Ампера?
- По какому правилу можно определить направление силы Ампера? Сформулируйте это правило.

### Упражнения

- Определите модуль силы Ампера, действующей на прямолинейный отрезок тонкого провода длиной  $L = 15$  см, находящийся в однородном магнитном поле, вектор индукции которого образует угол  $\alpha = 30^\circ$  с вектором скорости дрейфа свободных носителей заряда в проводе. Модуль индукции поля  $B = 0,5$  Тл, а сила тока в проводе  $I = 2$  А.



## ■ Электродинамика (продолжение)

- 2** На прямолинейный отрезок тонкого провода длиной  $L = 10$  см, находящийся в однородном магнитном поле, действует сила Ампера, модуль которой  $F = 20$  мН. Сила тока в проводнике  $I = 3$  А. Вектор индукции образует с осью провода угол  $\alpha = 30^\circ$ . Определите модуль индукции магнитного поля.



Для углублённого уровня

- ✓3** Используя выражение (1) из § 2, выражение (3) из § 18 и правило левой руки, докажите закон Ампера.

### § 22

## Магнитное взаимодействие проводников с токами. Единица силы тока — ампер

Теперь, когда нам известны картина магнитного поля, порождаемого прямолинейным проводом с током, и закон Ампера, мы можем объяснить явления взаимодействия проводов с токами в опытах Ампера.

Пусть имеются два параллельных прямолинейных провода с токами. Сила тока в первом проводе равна  $I_1$ , а во втором —  $I_2$ . Сначала рассмотрим случай, когда направления токов совпадают (рис. 84).

Обозначим индукцию магнитного поля, порожденного током  $I_1$ , символом  $\vec{B}_1$ . Определим направление вектора индукции  $\vec{B}_1$  там, где находится второй провод. Для этого рассмотрим пересекающую второй провод линию магнитного поля, созданного током  $I_1$ . На рис. 84 эта линия показана голубым цветом. Стрелкой на ней указано определенное по правилу буравчика положительное направление. Таким образом, на рисунке, плоскость которого совпадает с плоскостью, содержащей провода, вектор  $\vec{B}_1$  должен быть изображен символом  $\otimes$  (хвост улетающей стрелы).

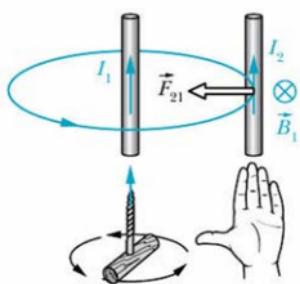


Рис. 84

Для определения направления силы Ампера  $\vec{F}_{21}$ , действующей на второй провод со стороны магнитного поля, созданного током  $I_1$ , воспользуемся правилом левой руки. Согласно этому правилу, сила  $\vec{F}_{21}$  направлена от второго про-

вода к первому. Другими словами, в случае, когда направления токов в проводах совпадают, второй провод притягивается к первому.

Если направление тока во втором проводе изменить на противоположное, то направление силы  $\vec{F}_{21}$  также изменится на противоположное. Другими словами, в случае, когда направления токов в проводах противоположны, второй провод отталкивается от первого.

Сила Ампера  $\vec{F}_{12}$ , действующая на первый провод со стороны магнитного поля, созданного током  $I_2$ , направлена противоположно силе  $\vec{F}_{21}$ .

Подведём итог.

 Если направления токов в параллельных прямолинейных проводах совпадают, то провода притягиваются друг к другу. Напротив, если направления токов в параллельных прямолинейных проводах противоположны, то провода отталкиваются друг от друга.

Явление магнитного взаимодействия проводов с токами используют в СИ для определения одной из основных единиц — силы тока. В честь Ампера её назвали ампер (А).

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



 Вернёмся к рассмотрению взаимодействия двух параллельных прямолинейных проводов с токами. Получим формулу для расчёта модуля силы Ампера  $\vec{F}_{21}$ , действующей на участок второго провода длиной  $l$  со стороны магнитного поля, созданного током  $I_1$ .

Модуль магнитной индукции поля, созданного прямолинейным проводом с током  $I_1$  на расстоянии  $r$  от его оси, равен (см. формулу (1) из § 19):

$$B_1 = \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2\pi \cdot r} \quad (1)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная.

Согласно закону Ампера, на участок второго провода длиной  $l$  действует сила, модуль которой равен:

$$F_{21} = I_2 \cdot l \cdot B_1 \quad (2)$$

Подставив формулу (1) в (2), получаем:

$$F_{21} = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{2\pi \cdot r}. \quad (3)$$

Аналогичным образом можно показать, что формула для расчёта модуля силы Ампера  $\vec{F}_{12}$ , действующей на участок длиной  $l$  первого провода со стороны магнитного поля, созданного током  $I_2$ , будет иметь такой же вид:

$$F_{12} = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{2\pi \cdot r}. \quad (3')$$

Обратим внимание на то, что равенство модулей сил  $\vec{F}_{12}$  и  $\vec{F}_{21}$ , как и противоположность их направлений, никоим образом не следует из третьего закона Ньютона. Действительно, сила  $\vec{F}_{12}$  действует на участок провода с током  $I_1$  со стороны *всего* провода с током  $I_2$ . В свою очередь, сила  $\vec{F}_{21}$  действует не на весь провод с током  $I_2$ , а только на участок этого провода. При этом она действует не со стороны участка провода с током  $I_1$ , а со стороны *всего* этого провода. Таким образом, силы  $\vec{F}_{12}$  и  $\vec{F}_{21}$ , действующие на участки проводов, не являются силами взаимодействия этих участков.

Используя формулу (3) и определение единицы силы тока 1 А, определим значение магнитной постоянной в системе СИ:

$$\mu_0 = \frac{2\pi \cdot r \cdot F_{21}}{I_1 \cdot I_2 \cdot l} = \frac{2\pi \cdot 1 \text{ м} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}}{1 \text{ А}^2 \cdot 1 \text{ м}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}. \quad (4)$$



### Вопросы

- 1 Как взаимодействуют друг с другом два прямых параллельных провода, токи в которых направлены: а) в одну сторону; б) в противоположные стороны?
- 2 Сформулируйте определение единицы силы тока в СИ.

### Упражнение

Определите модуль силы Ампера, действующей на каждый метр длины провода троллейбусной линии. Расстояние между проводами линии считайте равным  $h = 50$  см, а силу тока в каждом из проводов равной  $I = 2$  кА.



§ 23

**Действие магнитного поля на рамку с током.  
Электромотор постоянного тока.  
Гальванометр. Динамик**

Рассмотрим проволочную прямоугольную рамку с током  $I$ . Введём понятие положительной нормали  $\vec{n}$  к плоскости рамки с током.

Положительной нормалью  $\vec{n}$  к плоскости рамки с током называют вектор, направление которого совпадает с направлением движения острия ввинчивающегося в плоскость рамки буравчика (правого винта) при вращении его ручки по направлению тока в этой рамке (рис. 85).

Поместим рассматриваемую рамку в однородное магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$ . Будем удерживать её так, чтобы две стороны рамки были параллельны линиям индукции магнитного поля, а две другие — перпендикулярны им (рис. 86, а). Пусть длины сторон рамки равны  $a$  и  $b$ , а ток направлен в ней, как указано на рисунке. Будем считать, что магнитное поле, создаваемое током в рамке, пренебрежимо мало по сравнению с внешним полем. В этом случае действующие на стороны рамки магнитные силы обусловлены только внешним магнитным полем.

Синус угла между вектором  $\vec{B}$  и направлениями тока в участках провода, параллельных  $\vec{B}$ , равен нулю. Поэтому, согласно закону Ампера, магнитное поле на эти участки не действует.

Напротив, силы, действующие со стороны магнитного поля на две дру-

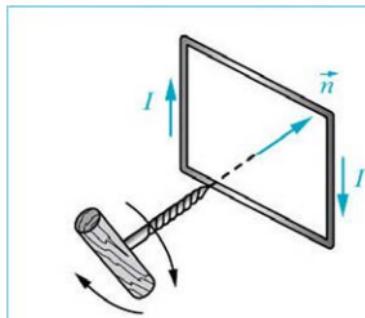


Рис. 85

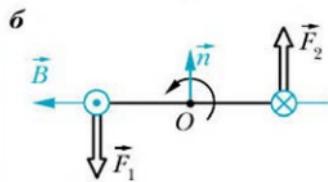
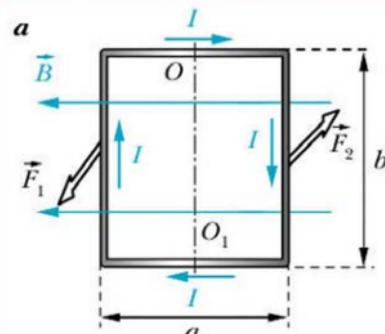


Рис. 86

гие стороны рамки, отличны от нуля. Эти силы, согласно правилу левой руки, направлены перпендикулярно плоскости рамки в разные стороны. Модули этих сил по закону Ампера равны между собой:

$$F_1 = F_2 = I \cdot b \cdot B. \quad (1)$$

Сумма этих сил равна нулю. Следовательно, если отпустить рамку, то при отсутствии других сил, кроме магнитных, её центр масс останется неподвижным. Однако суммарное вращающее действие магнитных сил на рамку будет отлично от нуля. Поэтому рамка начнёт поворачиваться вокруг оси  $OO_1$ , проходящей через её центр масс (см. рис. 86, а).

Для определения вращающего момента магнитных сил рассмотрим проекцию рамки на плоскость, перпендикулярную оси  $OO_1$  (рис. 86, б). Направления токов в участках рамки, перпендикулярных плоскости рисунка, обозначим символами  $\odot$  и  $\otimes$ , направление положительной нормали — вектором  $\vec{n}$ , а направление суммарного вращающего момента — изогнутой стрелкой. В рассматриваемом случае плечо каждой из сил  $F_1$  и  $F_2$  равно  $a/2$ . Поэтому сумма вращающих моментов этих сил:

$$M = 2F \cdot \frac{a}{2} = I \cdot a \cdot b \cdot B = I \cdot S \cdot B, \quad (2)$$

где  $S = a \cdot b$  — площадь рамки.

В процессе поворота рамки угол  $\alpha$  между её нормалью  $\vec{n}$  и вектором  $\vec{B}$  уменьшается. При этом уменьшаются плечи сил  $F_1$  и  $F_2$ . В момент, показанный на рис. 87, а, плечо каждой из этих сил равно  $0,5a \cdot \sin \alpha$ . Отметим, что при этом действующие на две другие стороны магнитные силы становятся отличными от нуля. Однако они параллельны оси  $OO_1$ . Поэтому их момент относительно этой оси равен нулю. Следовательно, суммарный вращающий момент, действующий на рамку, равен:

$$M = 2F \cdot 0,5a \cdot \sin \alpha = F \cdot a \cdot \sin \alpha. \quad (3)$$

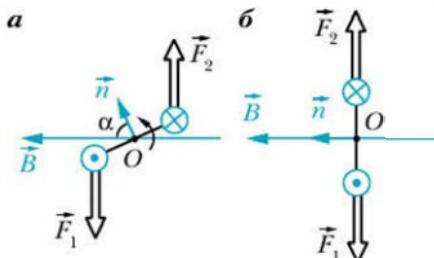


Рис. 87

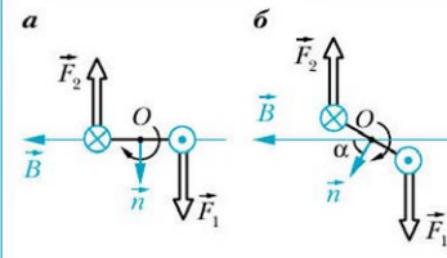


Рис. 88

Из уравнения (3) видно, что при уменьшении угла  $\alpha$  вращающий момент уменьшается и становится равным нулю тогда, когда положительная нормаль  $\vec{n}$  устанавливается вдоль направления вектора  $\vec{B}$  (рис. 87, б).

Если бы начальное положение рамки и направление тока были такими, как показано на рис. 88, а или б, то вращающий момент магнитных сил всё равно стремился бы установить её в положение, показанное на рис. 87, б.

Это положение рамки, при котором направления положительной нормали  $\vec{n}$  и вектора  $\vec{B}$  индукции внешнего поля совпадают, является *положением устойчивого равновесия*. Данное свойство рамки с током позволяет использовать её вместо магнитной стрелки для определения направления вектора индукции магнитного поля в определённом месте.

Отметим, что положение рамки с током, показанное на рис. 89, а, является положением неустойчивого равновесия. Действительно, при малейшем повороте рамки (рис. 89, б, в) сразу возникает вращающий момент, стремящийся ещё больше развернуть рамку и установить её в положение устойчивого равновесия.

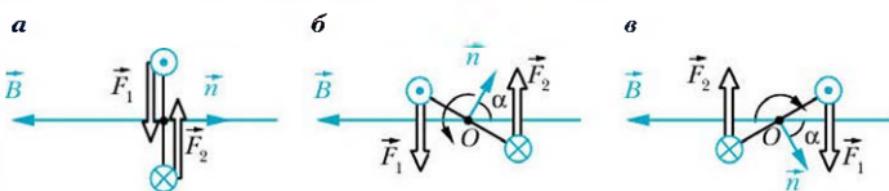


Рис. 89

Из уравнений (2) и (3) следует, что вращающий момент, действующий на рамку с током в однородном магнитном поле, прямо пропорционален модулю  $B$  индукции этого поля. Это свойство рамки позволяет использовать её для экспериментального определения магнитной индукции. ■

С этой целью после определения направления вектора  $\vec{B}$  рамку устанавливают так, чтобы угол  $\alpha$  между её нормалью  $\vec{n}$  и вектором  $\vec{B}$  стал равен  $90^\circ$ . В этом случае вращающий момент магнитных сил максимален. Измерение этого момента  $M_{\max}$  позволяет из формулы (2) рассчитать модуль индукции магнитного поля:

$$B = \frac{M_{\max}}{I \cdot S}. \quad (4)$$



Отметим, что именно с помощью маленькой рамки с током в XIX — начале XX в. определяли и модуль, и направление внешнего магнитного поля.

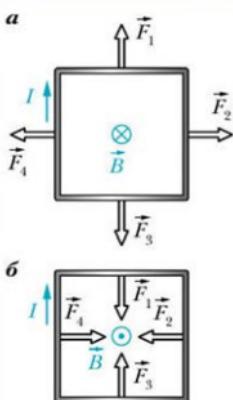


Рис. 90

Рассмотрим рамку с током, находящуюся в положениях устойчивого (рис. 90, а) и неустойчивого (рис. 90, б) равновесий. Направления токов, векторов индукции  $\vec{B}$  внешнего однородного магнитного поля и сил, действующих на стороны рамок, показаны на рисунках. Видно, что в положении устойчивого равновесия силы магнитного поля стремятся растянуть рамку, а в положении неустойчивого равновесия — сжать её.

Теперь рассмотрим рамку с током, находящуюся в неоднородном магнитном поле, созданном, например, полосовым магнитом. Рамка, на которую действуют только магнитные силы, как и в однородном поле, займёт положение, при котором направление её положительной нормали  $\vec{n}$  будет совпадать с направлением вектора  $\vec{B}$  в центре рамки (рис. 91).

При этом силы магнитного поля будут стремиться растянуть рамку. Однако этим действие неоднородного магнитного поля на рамку с током не ограничится. Если воспользоваться правилом левой руки, то можно убедиться в том, что сумма сил Ампера, действующих на рамку, будет направлена в область более сильного магнитного поля (к полюсу магнита). Поэтому часто говорят, что рамка с током в неоднородном магнитном поле, ориентируясь по магнитному полю, втягивается в область более сильного поля под действием сил, стремящихся растянуть её.

На действии магнитного поля на рамку с током основана работа многих приборов, без которых трудно представить себе современную жизнь. Одним из таких приборов является **электродвигатель** (электромотор). На рис. 92 показан коллекторный двигатель постоянного тока. Он состоит из индуктора 1, создающего магнитное поле, и якоря 2, обмотки которого представляют собой многовитковые рамки.

Источниками магнитного поля в индукторе являются катушки 3. В маломощных двигателях вместо катушек часто используют постоян-

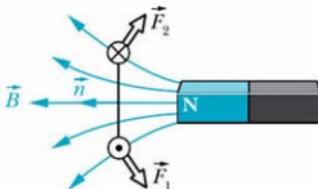


Рис. 91



ные магниты. Индуктор прикреплён к корпусу мотора и обычно не подвижен. В этом случае его называют статором.

Якорь состоит из вала 4, на котором закреплены стальной сердечник 5 и диэлектрический цилиндр коллектора 6. В пазы сердечника вложены многовитковые катушки — рамки. На диэлектрический цилиндр коллектора наклеены изолированные друг от друга медные пластины 7. Выводы от каждой катушки (рамки) припаяны соответственно к двум диаметрально противоположным медным пластинам. К пластинам коллектора с двух противоположных сторон прижимается прикреплённая к корпусу пара щёток 8 из графита. Через эти щётки пара пластин коллектора и припаянная к ним катушка (рамка) якоря подключаются к источнику тока. Обычно вал якоря закреплён на двух подшипниках 9. В этом случае он может вращаться вокруг своей оси и его называют ротором.

После подключения двигателя к источнику тока по его катушкам протекает ток. В результате действующие на витки катушек ротора силы Ампера вызывают вращение ротора. При вращении на коллекторе происходит смена подключаемых к щёткам пар медных пластин. В результате в процессе работы ток пропускается через ту катушку ротора, в плоскости которой лежит вектор индукции магнитного поля индуктора. Поэтому вращающий момент сил Ампера, действующих на ротор, всё время получается максимальным.

Коллекторные двигатели применяют во многих бытовых приборах, например электробритвах, пылесосах, электродрелях. В автомобилях такие электродвигатели — *стартёры* — используют для запуска двигателей внутреннего сгорания. В последнее время всё большее распространение получают электромобили — автомобили, которые приводятся в движение электродвигателями, питаящимися от аккумуляторов. Электродвигатели постоянного тока приводят в движение электропоезда и троллейбусы.

Современные электродвигатели могут иметь мощность от долей ватта до тысяч киловатт. КПД мощных электродвигателей достигает 90 %. Такого КПД не имеют никакие другие двигатели. К преимуществам электродвигателей по сравнению с двигателями внутреннего сгорания относятся

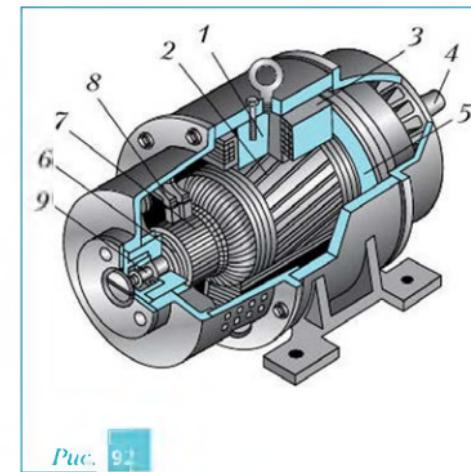


Рис. 91

также их малые габариты, высокая надёжность, простота управления и экологичность.



На явлении вращения рамки с током в магнитном поле основано также действие весьма распространённых *стрелочных электроизмерительных приборов*: амперметра, вольтметра и омметра — прибора для измерения сопротивления.

На рис. 93 показано устройство чувствительного амперметра — гальванометра магнитоэлектрической системы. Он состоит из подковообразного постоянного магнита 3, между полюсами которого расположена лёгкая рамка 1 с прикреплённой к ней стрелкой 4. Рамка может поворачиваться вокруг горизонтальной оси. На рамку намотано несколько витков изолированной проволоки. Концы этой проволоки через спиральные пружинки 5 соединяются с клеммами гальванометра. При отсутствии тока спиральные пружинки удерживают рамку в горизонтальном положении. При этом стрелка указывает на нулевое деление шкалы.

Чтобы повысить чувствительность гальванометра и сделать его шкалу равномерной, внутрь рамки помещают неподвижный железный цилиндр 2, а полюсным наконечникам 6 магнита придают специальную форму. При этом модуль вектора индукции магнитного поля в этом зазоре постоянен в пределах рабочих углов поворота рамки. Поэтому модуль сил Ампера прямо пропорционален силе тока, текущего по обмотке.

Современные гальванометры рассмотренного типа позволяют измерять силу тока от десятых долей микроампера до десятков миллиампер. Сопротивление катушек гальванометров, позволяющих измерять токи  $\sim 10^{-7}$  А, составляет 100–300 Ом, а у гальванометров для измерения токов  $\sim 10$  мА и более это сопротивление не превышает 5 Ом.

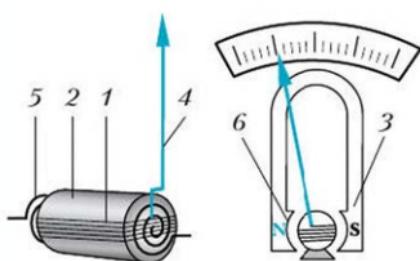


Рис. 93

На явлении возникновения сил, стремящихся втянуть рамку с током в область более сильного магнитного поля (или вытолкнуть её при изменении направления тока), основано действие *электродинамических громкоговорителей (динамиков)* — устройств, преобразующих переменный электрический ток в звуковые колебания.

На рис. 94 показано устройство динамика. Он состоит из кольцево-

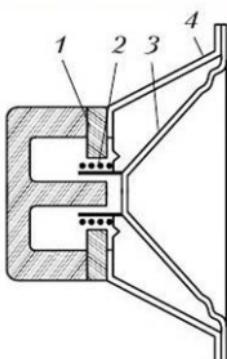


Рис. 94

го магнита 1, в зазор между полюсами которого помещена намотанная на лёгкий каркас катушка 2. Эта катушка жёстко скреплена с бумажным диффузором 3. В свою очередь, диффузор крепится к магниту и корпусу 4 динамика на упругих шайбах, позволяющих диффузору с катушкой совершать колебания вдоль оси катушки.

Современные динамики воспроизводят звук в диапазоне частот от 10 Гц до 20 кГц без заметных искажений. Общий недостаток таких устройств — довольно низкий КПД. Обычно он не превышает 2–3 % подводимой электрической мощности.



### Вопросы

- 1 Что называют положительной нормалью к плоскости рамки с током?
- 2 Чему равен врачающий момент, действующий на рамку с током в однородном магнитном поле?
- 3 Как следует расположить рамку с током в однородном магнитном поле, чтобы она находилась в положении: а) устойчивого равновесия; б) неустойчивого равновесия?
- 4 Как рассчитать модуль магнитной индукции однородного магнитного поля, если известен действующий на рамку с током со стороны поля максимально возможный суммарный врачающий момент?
- 5 На чём основан принцип действия:
  - а) электромотора;



### Для углублённого уровня

- б) стрелочных электроизмерительных приборов магнитоэлектрической системы; в) динамика?

### Упражнения

- 1 Определите модуль и направление сил Ампера, действующих на стороны одновитковой прямоугольной рамки, если нормаль

- к плоскости рамки перпендикулярна вектору индукции однородного магнитного поля, модуль которого равен  $B$ . Сила тока в рамке равна  $I$ . Длина стороны рамки, перпендикулярной  $\vec{B}$ , равна  $a$ , соседней стороны —  $b$ .
2. Определите силы натяжения проводов рамки, рассмотренной в предыдущем упражнении, обусловленные действием силы Ампера, когда рамка находится в положении: а) устойчивого равновесия; б) неустойчивого равновесия.



### Для углублённого уровня

3. Квадратная рамка гальванометра содержит  $n$  витков тонкого провода. Длина стороны рамки равна  $a$ . К рамке прикреплены две спиральные пружины, создающие врачающий момент  $M$  при повороте рамки на угол  $\alpha$  от положения равновесия. Считайте, что векторы индукции магнитного поля, в котором находится рамка, при силе тока в рамке меньшей  $I_{\max}$  перпендикулярны плоскости рамки, а модуль индукции равен  $B$ . Определите угол поворота рамки, если сила тока в ней равна  $I$  ( $I < I_{\max}$ ).
4. Определите модуль суммы сил, действующих на виток катушки динамика, если радиус витка равен  $r$ , сила тока в витке равна  $I$ , вектор магнитной индукции в каждой точке витка направлен под углом  $\alpha$  к его плоскости, а его модуль равен  $B$ .

### § 24

## Магнитные свойства вещества

Любое вещество, рассматриваемое с точки зрения его магнитных свойств, называют *магнетиком*. По интенсивности взаимодействия с магнитным полем все вещества делят на два класса: *слабо магнитные* и *сильно магнитные*. В свою очередь, все слабо магнитные вещества подразделяют на *диамагнетики* и *парамагнетики*. К сильно магнитным веществам относят *ферромагнетики*, *ферриты* и ряд других веществ.

Пусть  $\vec{B}_0$  — индукция магнитного поля, которое существовало в данной точке пространства до его заполнения магнетиком. После заполнения пространства магнетиком индукция магнитного поля в рассматриваемой точке изменяется и становится равной  $\vec{B}$ . Если магнетик слабый и заполняет всё пространство, то направления векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{B}_0$  совпадают. В тех случаях,

когда направления этих векторов совпадают, магнитные свойства среды характеризуют отношением модулей векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{B}_0$ . 

**Отношение  $\frac{B}{B_0}$  называют магнитной проницаемостью вещества.**

Магнитную проницаемость вещества обозначают буквой  $\mu$ . Магнитные проницаемости диамагнетиков и парамагнетиков близки к единице. При этом *магнитная проницаемость диамагнетиков меньше единицы* ( $\mu < 1$ ), а *парамагнетиков – больше единицы* ( $\mu > 1$ ). Из-за малого отличия магнитной проницаемости диамагнетиков и парамагнетиков от единицы их магнитные свойства проявляются только в достаточно сильных магнитных полях.

У сильных магнетиков магнитная проницаемость существенно больше единицы и зависит от индукции внешнего поля (рис. 95). Эту зависимость называют *кривой Столетова* в честь её первого исследователя, профессора физики Московского университета Александра Григорьевича Столетова (1839–1896).

Диамагнетиками являются почти все газы (кроме кислорода и окиси азота), вода, серебро, золото, медь, алмаз, графит, свинец и многие органические соединения. Наиболее сильно от единицы отличается магнитная проницаемость висмута – она равна 0,999824. Менее всего от единицы отличается магнитная проницаемость водорода. При нормальных условиях она равна 0,999999937.

Из неоднородного магнитного поля диамагнетики выталкиваются. Так, если между полюсами мощного электромагнита зажечь свечу, то её пламя будет выталкиваться из поля (рис. 96).

Парамагнетиками являются марганец, платина, алюминий, вольфрам, все щелочные и щёлочноземельные металлы, кислород, окись

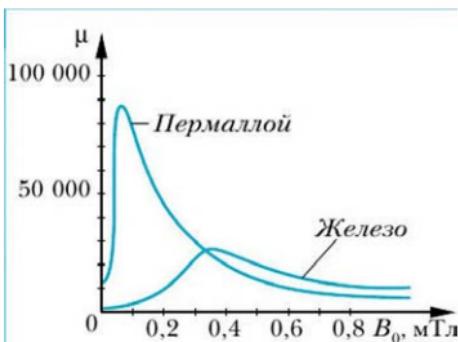


Рис. 95

Зависимость  $\mu$  от  $B_0$  у магнитного сплава пермаллоя и мягкого железа



В анизотропных сильных магнетиках направления векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{B}_0$  могут не совпадать. В этом случае магнитную проницаемость вещества описывают более сложным образом, который требует привлечения математических понятий, выходящих за рамки школьной программы. Поэтому такие случаи мы рассматривать не будем.



Рис. 96

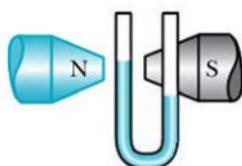


Рис. 97

азота. Наибольшей ( $\mu = 1,003460$ ) магнитной проницаемостью из парамагнетиков обладает кислород при температуре  $-183^{\circ}\text{C}$ . Минимальную ( $\mu = 1,00000038$ ) магнитную проницаемость из парамагнетиков имеет воздух при нормальных условиях. В отличие от диамагнетиков, парамагнетики втягиваются в область сильного магнитного поля. На рис. 97 изображена U-образная стеклянная трубка, одно из колен которой находится между полюсами мощного электромагнита. В трубку налита парамагнитная жидкость. Видно, что уровень жидкости в колене, находящемся между полюсами магнита, значительно выше, чем в другом колене.

При охлаждении некоторые парамагнетики становятся сильными магнетиками. Напротив, сильные магнетики при сильном нагревании становятся парамагнетиками. Переход

магнетика из одного состояния в другое происходит при определённой температуре. Её называют *температурой Кюри*. Разные вещества имеют разную температуру Кюри. Например, температура Кюри у тербия равна  $-53^{\circ}\text{C}$ , у железа температура Кюри —  $768^{\circ}\text{C}$ .

Ферромагнетиками могут становиться многие сплавы железа, кобальта, никеля и ряда других веществ. В свою очередь, *ферриты* представляют собой соединения оксидов железа, бария, кобальта, никеля и ряда других веществ. Одним из известных с древних времён ферритов является магнетит. В отличие от металлических ферромагнетиков, ферриты имеют достаточно большое удельное сопротивление. Поэтому их использование в быстро изменяющихся магнитных полях является более предпочтительным, чем использование металлических ферромагнетиков.



Магнитная проницаемость сильного магнитика зависит не только от индукции  $B_0$  магнитного поля, в которое помещено это вещество, но и от предшествующих по времени внешних условий. Явление, состоящее в том, что физическая величина, характеризующая состояние системы в данный момент времени, определяется внешними условиями не только в тот же, но и в предшествующие моменты времени, называют *гистерезисом* (от греч. ὑστέρησις — «запаздывание»).

Попытку объяснить магнитные свойства разных веществ ещё в 1820 г. предпринял Ампер. Он предположил, что эти свойства обусловлены электрическими токами в молекулах — *молекулярными токами*. В начале XX в., когда была предложена планетарная модель атома (см. § 71), токи Ампера пытались отождествить с движением электронов по орбитам внутри атомов. Действительно, движущийся по орбите электрон подобно витку с током создаёт магнитное поле, которое называют *орбитальным*. Кроме того, позже было установлено, что электрон создаёт ещё и своё собственное магнитное поле, которое называют *спиновым* (от англ. spin — «верчение»). Эксперименты показывают, что учёт орбитального и спинового магнитных полей электрона, а также движения протонов в ядрах атомов позволяет объяснить большинство наблюдаемых свойств магнетиков.

*Если суммарное магнитное поле, созданное всеми электронами атома, при отсутствии внешнего поля равно нулю, то вещество, состоящее из таких атомов, будет диамагнетиком.* При помещении диамагнетика во внешнее магнитное поле орбитальное движение электронов изменяется так, что вектор индукции создаваемого ими суммарного магнитного поля оказывается отличным от нуля и направленным противоположно вектору индукции внешнего поля.  Поэтому индукция магнитного поля в диамагнетике оказывается меньше индукции внешнего поля.

В отличие от диамагнетика, у *парамагнетика суммарное магнитное поле всех электронов атома при отсутствии внешнего поля отлично от нулевого*. Атомы такого вещества можно уподобить маленьким магнитам. При отсутствии внешнего магнитного поля векторы индукции магнитных полей атомов ориентированы хаотически из-за их теплового движения. Поэтому сумма этих векторов равна нулю. При помещении парамагнетика во внешнее магнитное поле векторы индукции магнитных полей атомов начинают тем сильнее ориентироваться по внешнему полю, чем больше его индукция и чем ниже температура вещества. Конечно, и в этих веществах происходит изменение орбитального движения электронов, подобное тому, которое происходит в диамагнетиках. Однако увеличение суммарного магнитного поля в парамагнетике всегда больше его уменьшения. Поэтому говорят, что диамагнетизм свойствен всем веществам, но в парамагнетиках он маскируется болееенным парамагнитным эффектом.

*Парамагнетик может стать сильным магнетиком.* Для этого необходимо, чтобы сумма векторов индукции спиновых магнитных полей электронов его отдельного атома была отлична от нуля. В этом случае между электронами соседних атомов возникают так называемые *обменные силы*. В некоторых кристаллах их действие приводит к тому, что при темпе-



Это объясняется законом электромагнитной индукции (см. § 27).

ратурах ниже температуры Кюри векторы индукции спиновых магнитных полей электронов соседних атомов устанавливаются параллельно друг другу. Если размеры кристалла достаточно малы, то это происходит во всём кристалле. В этом случае суммарное магнитное поле, создаваемое кристаллом, становится максимальным, а о веществе говорят, что оно намагничено до насыщения. Отметим, что направление, вдоль которого выстраиваются векторы индукции всех магнитных полей атомов при насыщении, определяется особенностями строения кристаллической решётки.

Иная картина наблюдается в больших кристаллах. В таких кристаллах образуются *домены* — области, в каждой из которых вещество намагничено до насыщения.

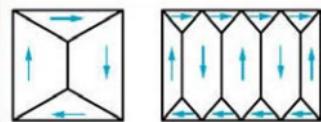


Рис. 98

Однако направления векторов  $\vec{B}_{si}$  (индекс  $s$  у вектора  $\vec{B}_{si}$  означает насыщение) в соседних доменах различаются. Объёмы доменов у разных сильных магнетиков изменяются в пределах от  $10^{-12}$  до  $10^{-6}$  см<sup>3</sup>. На рис. 98 показаны примеры простейших доменных структур в небольших монокристаллах при отсутствии внешнего магнитного поля.

Между соседними доменами существуют области, в которых направление векторов индукции магнитного поля изменяется от направления в одном домене до направления в соседнем домене. Эти области называют *доменными стенками*. Обычно их толщина не превышает 0,6 мкм.

Причиной образования доменов является хорошо известное вам из механики положение, согласно которому устойчивым является то состояние системы, которому соответствует минимум потенциальной энергии. Пусть парамагнитный кристалл остывает до температуры, меньшей его температуры Кюри. Образующийся сильный магнетик может иметь либо однодоменную, либо многодоменную структуру. От чего это зависит?

Если кристалл не разбивается на домены, то он подобно большому магниту создаёт в окружающем пространстве сильное магнитное поле, которое обладает большой энергией. В то же время для образования доменных стенок также требуется энергия. Таким образом, разобьётся ли кристалл на домены или станет однодоменным, зависит от того, какой из вариантов будет энергетически более выгодным.

Отметим, что если образец из сильного магнетика не создаёт магнитного поля в окружающем его пространстве, то такой образец называют *полностью размагниченным*. Поместим такой образец (рис. 99, а) во внешнее магнитное поле с индукцией  $\vec{B}_0$ . По мере увеличения индукции внешнего поля размеры выгодно ориентированных относительно этого поля доменов будут возрастать (рис. 99, б). Это происходит за счёт смещения доменных стенок. Возможна ситуация, когда все невыгодно ориентированные домены ис-

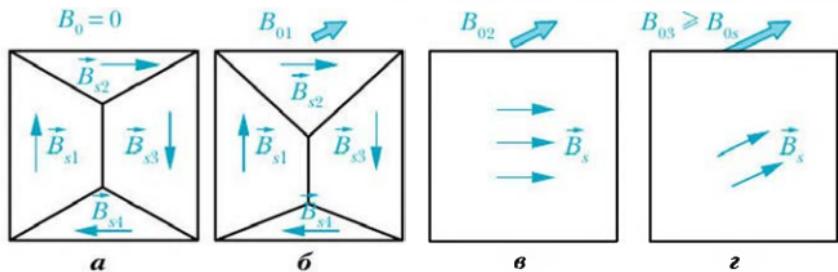


Рис. 99

чезают, а направление вектора  $\vec{B}_s$  индукции магнитного поля в образце ещё не совпадает с направлением вектора  $\vec{B}_0$  (рис. 99, *в*). Тогда при дальнейшем увеличении модуля вектора  $\vec{B}_0$  намагничивание образца будет происходить за счёт поворота вектора  $\vec{B}_s$ . Когда образец становится однодоменным и направления векторов  $\vec{B}_s$  и  $\vec{B}_0$  совпадают (рис. 99, *г*), говорят, что *образец намагничен полем до насыщения*. Значение модуля индукции внешнего поля, при котором это происходит, называют *индукцией насыщения* и обозначают символом  $B_{0s}$ . Следует отметить, что для данного образца величина  $B_{0s}$  зависит от взаимной ориентации внешнего поля и образца.

Пусть образец намагнистили до насыщения. Выключим внешнее поле. Эксперимент показывает, что образец останется намагниченным, хотя среднее значение индукции поля в нём и уменьшится до некоторого значения  $B_c$ . Это значение называют *остаточной индукцией*. Уменьшение среднего значения индукции поля в образце может быть обусловлено как его частичным разбиением на домены, так и изменением направлений векторов  $\vec{B}_{si}$  в каждом домене.

Чтобы полностью размагнитить ранее намагниченный образец, его нужно поместить во внешнее магнитное поле, индукция которого направлена противоположно остаточной индукции магнитного поля образца. Значение индукции внешнего поля, при котором образец будет полностью размагнчен, называют *коэрцитивной силой* (от лат. coērcitio — «удерживание») и обозначают символом  $B_c$ .

Сильные магнетики, коэрцитивная сила  $B_c$  которых не превышает  $10^{-5}$  Тл, называют *магнитно-мягкими*. К ним относятся сплавы железа с никелем (пермаллои), электротехнические стали, никель-цинковые и марганец-цинковые ферриты. Индукция насыщения таких материалов лежит в пределах от 0,2 до 2,2 Тл, а максимальная проницаемость может достигать 300 000. Такие материалы используют в качестве сердечников электрических машин.

тромагнитов, трансформаторов, электродвигателей и индукционных генераторов.

**Магнитно-твёрдыми** (или **магнитно-жёсткими**) называют материалы, коэрцитивная сила которых превышает  $10^{-3}$  Тл. Остаточная индукция таких материалов обычно лежит в пределах от 0,2 до 1,5 Тл. К ним относятся различные сплавы кобальта с хромом, ванадием, вольфрамом, алюминием, сплавы платины с кобальтом. Магнитно-твёрдые материалы, у которых  $B_s = B_r$ , а коэрцитивная сила не превышает нескольких тысячных долей теслы, применяют для изготовления элементов памяти компьютеров, магнитных лент и дисков, кредитных карт и проездных билетов. В настоящее время получены сплавы марганца с висмутом, коэрцитивная сила которых достигает  $\sim 4$  Тл. Материалы с большим значением коэрцитивной силы ( $B_c \geq 10^{-2}$  Тл) используют для изготовления постоянных магнитов в различных электротехнических и радиотехнических изделиях, в том числе для изготовления магнитных стрелок компасов.



### Вопросы

- 1 Какие вещества называют магнетиками?
- 2 На какие два класса делятся все магнетики?
- 3 Что называют магнитной проницаемостью вещества?
- 4 Какие магнетики называют: а) диамагнетиками; б) парамагнетиками; в) ферромагнетиками; г) ферритами?
- 5 В чём заключается различие в поведении диамагнетиков и парамагнетиков в неоднородном магнитном поле?
- 6 Что такая температура Кюри?



### Для углублённого уровня

- 7 Что называют гистерезисом?
- 8 При каких условиях данное вещество будет: а) диамагнетиком; б) парамагнетиком; в) сильным магнетиком?
- 9 Что такое домены?
- 10 Какое поле называют: а) орбитальным магнитным; б) спиновым?
- 11 Какой образец называют: а) полностью размагниченным; б) намагниченным до насыщения?
- 12 Что называют: а) остаточной индукцией; б) коэрцитивной силой?
- 13 Какие ферромагнетики называют: а) магнитно-мягкими; б) магнитно-твёрдыми? Для каких целей их используют?

# МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Магнитное поле – особый вид материи.

Посредством магнитного поля осуществляется магнитное взаимодействие

Магнитное поле **порождают**:

- движущиеся заряженные частицы
- электрические токи
- намагниченные тела
- изменяющееся электрическое поле

Направления  $\vec{F}_m$  и  $\vec{F}_A$  определяют по правилу левой руки

Магнитное поле **действует**:

на движущуюся со скоростью  $\vec{v}$  частицу с зарядом  $q$  силой  $\vec{F}_m$  (магнитная составляющая силы Лоренца):  
$$F_m = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha,$$
 где  $\alpha$  — угол между  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$

на проводник длиной  $l$ , сила тока в котором равна  $I$ , силой  $\vec{F}_A$  (сила Ампера):

$$F_A = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \alpha,$$
 где  $\alpha$  — угол между  $\vec{B}$  и осью проводника

на рамку площадью  $S$ , сила тока в которой равна  $I$ , создавая врачающий момент с максимальным значением  $M = I \cdot S \cdot B$ . Если плоскость рамки перпендикулярна  $\vec{B}$ , то  $M = 0$

на постоянные магниты и намагничающиеся тела

Магнитное поле **характеризуют**:

вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ , который определяется по действию на различные объекты.

1. Индукция магнитного поля удовлетворяет принципу суперпозиции.
2. Линии магнитной индукции всегда замкнуты — магнитное поле является вихревым. Это означает, что в природе нет магнитных зарядов, подобных электрическим

Магнитная проницаемость вещества  $\mu = B / B_0$ , где  $B$  — магнитная индукция в безграничном веществе,  $B_0$  — магнитная индукция в той же точке при отсутствии вещества

## Электромагнитная индукция

### § 25

#### Опыты Фарадея.

#### Открытие электромагнитной индукции

После того как стало известно, что электрический ток создаёт магнитное поле, учёные задались вопросом: нельзя ли, наоборот, с помощью магнитного поля создать электрический ток? Более десяти лет никто не мог ответить на этот вопрос. И лишь в 1831 г. М. Фарадей экспериментально обнаружил, что в катушке, подключённой к гальванометру, возникает электрический ток, когда в эту катушку вдвигают магнит. Проведя ряд экспериментов, Фарадей исследовал особенности и закономерности обнаруженного явления. В настоящее время все опыты Фарадея можно повторить в школьной лаборатории. Рассмотрим их.

Подсоединим выводы катушки с большим числом витков к гальванометру. Возьмём магнит и будем вдвигать его северным полюсом в катушку (рис. 100, а). Эксперимент показывает, что *при движении магнита относительно катушки стрелка гальванометра отклоняется от нуля, т. е. в цепи*

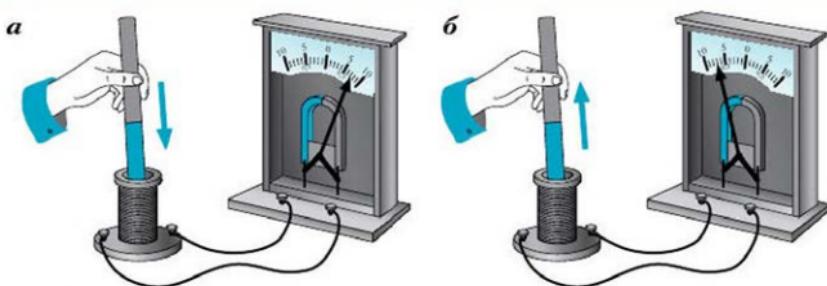


Рис. 100

возникает электрический ток. При этом чем больше скорость движения магнита, тем больше сила тока в цепи. При уменьшении скорости движения сила тока уменьшается и становится равной нулю при остановке магнита.

Если начать вынимать магнит из катушки, то стрелка гальванометра вновь отклонится, но в другую сторону (рис. 100, б). Следовательно, изменение направления движения магнита относительно катушки вдоль её оси приводит к изменению направления тока.

Если вдвигать магнит в катушку не северным, а противоположным — южным — полюсом, то направление тока будет противоположным. Следовательно, при изменении полюса, которым вдвигают магнит в катушку, направление тока также изменяется.

Понятно, что при одновременном изменении полюса магнита, обращённого к катушке (при повороте магнита), и изменении направления его движения вдоль оси катушки направление тока останется прежним.

Эксперименты показывают, что такие же явления наблюдаются не только при движении магнита относительно неподвижной катушки, но и при движении катушки относительно неподвижного магнита.

Фарадей установил, что во всех рассмотренных опытах вместо магнита можно использовать другой источник магнитного поля, например вторую катушку, в которой протекает постоянный электрический ток (рис. 101).

При проведении опыта с двумя катушками Фарадей обнаружил, что стрелка гальванометра отклоняется и при неподвижных друг относительно друга катушках, если изменяется магнитное поле, создаваемое второй катушкой. Это можно реализовать, увеличивая или уменьшая силу тока во второй катушке с помощью реостата (рис. 102). При этом чем быстрее изменяется сила тока во второй катушке, тем больше будет сила тока в цепи первой катушки и гальванометра.



Рис. 101

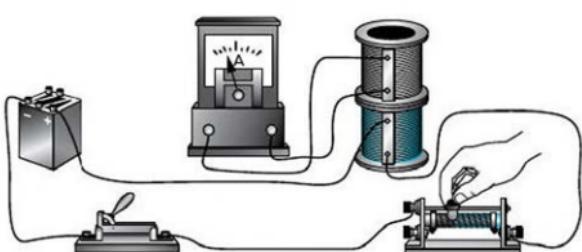


Рис. 102

Если же ток во второй катушке остаётся неизменным и отсутствует относительное движение катушек, то тока в первой катушке нет. Но если при этих же условиях во вторую катушку вставлять непамагниченный ферромагнитный сердечник, то в первой катушке возникнет ток. Его направление будет таким же, как в уже рассмотренном случае увеличения силы тока во второй катушке с помощью реостата.

Фарадей также установил, что электрический ток в катушке, замкнутой на гальванометр, возникает и тогда, когда в постоянном магнитном поле начинают либо поворачивать эту катушку относительно линий магнитного поля, либо изменять площадь, ограниченную витками этой катушки, например увеличивая или уменьшая диаметр самой катушки.

Явления возникновения тока в замкнутой цепи в опытах Фарадея назвали *электромагнитной индукцией*, а возникающий при этом электрический ток — *индукционным током*.

Если, как и Фарадей, изображать магнитное поле с помощью магнитных линий, то из рассмотренных опытов вслед за Фарадеем легко прийти к выводу:

**!** индукционный ток в замкнутой цепи возникает всякий раз, когда изменяется число магнитных линий, пронизывающих поверхность, ограниченную этой цепью. При этом чем быстрее происходит это изменение, тем больше сила индукционного тока в замкнутой цепи.

В заключение обратим внимание на то, что изменение числа магнитных линий, пронизывающих поверхность, ограниченную замкнутой цепью, может быть обусловлено двумя причинами: 1) движением замкнутой цепи (или её отдельных элементов) относительно источника магнитного поля; 2) изменением магнитного поля с течением времени (например, при смещении ползунка реостата, как на рис. 102).



### Вопросы

- 1 В чём состоит явление электромагнитной индукции?
- 2 Кто и когда открыл явление электромагнитной индукции?
- 3 Какой ток называют индукционным?
- 4 От чего зависит сила индукционного тока?
- 5 Когда в катушку вводили магнит северным полюсом, стрелка гальванометра отклонилась вправо. В какую сторону отклонится стрелка гальванометра, если из катушки вынимать магнит, ранее вставленный в неё южным полюсом?

- 6 Какими причинами может быть обусловлено появление индукционного тока в замкнутой цепи?
- \*7 Можно ли вызвать появление индукционного тока в замкнутой катушке, если в находящейся внутри неё другой катушке сила тока остаётся неизменной?
- \*8 Полосовой магнит падает в длинной вертикальной медной трубе, из которой откачен воздух. При этом магнит не касается стенок трубы. Будет ли движение магнита свободным падением?



## § 26 ЭДС индукции в движущемся проводнике

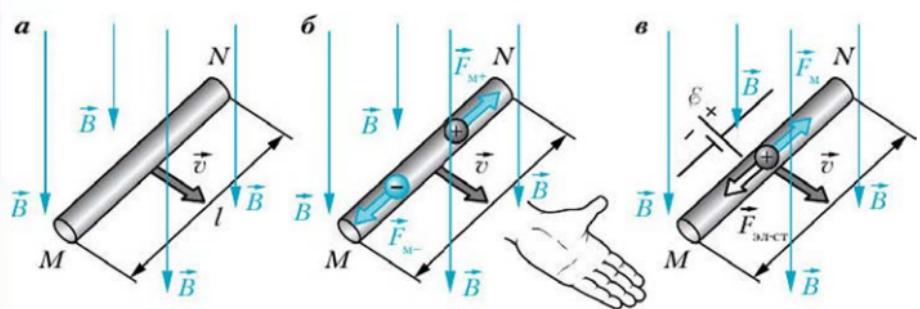
Появление индукционного тока в замкнутой цепи означает, что в ней возникают сторонние силы, вызывающие упорядоченное движение свободных носителей заряда. Исследуем природу возникновения этих сил. Начнём со случая, когда индукционный ток обусловлен движением отдельных элементов цепи относительно источника постоянного магнитного поля.

Рассмотрим проводящий стержень  $MN$  длиной  $l$ . Расположим его перпендикулярно магнитным линиям постоянного однородного магнитного поля с индукцией  $\vec{B}$  и начнём поступательно двигать стержень так, как показано на рис. 103, а. Вместе со стержнем начнут упорядоченно двигаться и имеющиеся в нём носители заряда. В результате этого движения на заряженные частицы начнут действовать магнитные силы. Направление магнитной силы, которое можно определить по правилу левой руки, зависит от знака заряда частицы (рис. 103, б). При этом магнитные силы, действующие на положительно и отрицательно заряженные частицы, направлены в противоположные стороны. Под действием таких сил свободные носители заряда начнут смещаться вдоль стержня. Это приведёт к их перераспределению в стержне, в результате чего в нём возникнет электростатическое поле.

Если скорость стержня перестанет изменяться, то перераспределение свободных носителей заряда в нём прекратится — наступит динамическое равновесие. Другими словами, действие на заряженную частицу стержня магнитной силы  $\vec{F}_m$ , обусловленной его движением, будет скомпенсировано действием силы  $\vec{F}_{эст}$  со стороны возникшего электростатического поля (рис. 103, в):

$$\vec{F}_{эст} = -\vec{F}_m \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует, что магнитная сила  $\vec{F}_m$  является силой, совершающей работу по переносу зарядов против сил электростатического по-



**Рис. 103** Возникновение сторонних сил при движении проводника в однородном магнитном поле

ля, т. е. *сторонней силой*. Напомним, что для характеристики работы сторонних сил используют физическую величину, которую называют *электродвижущей силой* (ЭДС).

Пусть скорость движения рассматриваемого стержня равна  $\vec{v}$ . В этом случае модуль магнитной силы  $F_m$  (магнитной составляющей силы Лоренца), действующей на частицу с зарядом  $q$ , равен:

$$F_m = q \cdot v \cdot B. \quad (2)$$

Работа этой силы по переносу пробного заряда  $q$  вдоль стержня от точки  $M$  к точке  $N$ , т. е. на расстояние  $l$ , равна:

$$A = F_m \cdot l = q \cdot v \cdot B \cdot l. \quad (3)$$

Следовательно, модуль ЭДС, возникающей в стержне на участке  $MN$ , равен:

$$|\mathcal{E}| = \frac{A}{q} = v \cdot B \cdot l. \quad (4)$$

ЭДС, возникающую в проводнике, который движется в магнитном поле, называют *электродвижущей силой индукции* (ЭДС индукции).

Теперь определим модуль напряжённости электростатического поля в рассматриваемом стержне. С учётом уравнений (1) и (2) получаем:

$$E_{\text{эл-ст}} = \frac{F_{\text{эл-ст}}}{q} = \frac{F_m}{q} = v \cdot B. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что напряжённость электростатического поля одинакова во всех точках стержня. Поэтому разность потенциалов между его концами  $N$  и  $M$  равна:

$$\Phi_N - \Phi_M = E_{\text{эл-ст}} \cdot l = v \cdot B \cdot l. \quad (6)$$

Обратим внимание на то, что, несмотря на разность потенциалов между концами стержня, сила тока в нём равна нулю. Это объясняется наличием в нём ЭДС индукции, которая и создала эту разность потенциалов. Таким образом, движущийся в магнитном поле проводник можно рассматривать как источник тока, выводы которого разомкнуты (см. рис. 103, в).

Чтобы действие ЭДС индукции вызвало появление индукционного тока, создадим замкнутую цепь. Для этого положим движущийся стержень  $MN$  на два неподвижных проводящих рельса, которые соединены резистором (рис. 104). Если стержень движется по рельсам в однородном магнитном поле со скоростью  $\vec{v}$ , то сила индукционного тока в образованной замкнутой цепи будет отлична от нуля.

Напомним, что при протекании электрического тока по проводнику, находящемуся в магнитном поле, на этот проводник действует сила Ампера. Из рис. 104 видно, что, согласно правилу левой руки, сила Ампера  $\vec{F}_A$ , действующая на движущийся стержень  $MN$ , направлена противоположно его скорости. Следовательно, сила Ампера будет тормозить стержень. Это явление легко объяснить с энергетической точки зрения. Действительно, индукционный ток совершает работу, результатом которой будет, например, выделение в цепи определённого количества теплоты. Эта работа совершается за счёт уменьшения кинетической энергии движущегося стержня при его торможении.

Чтобы сила тока в цепи не изменялась, необходимо поддерживать неизменной скорость движения стержня  $MN$ . Для этого следует уравновешивать тормозящее действие силы Ампера внешней силой  $\vec{F}$ . В этом случае кинетическая энергия движущегося стержня будет оставаться неизменной, а электрический ток будет совершать работу за счёт работы внешней силы.

Подведём итог.

**!** При движении проводника в магнитном поле в этом проводнике может возникать ЭДС индукции. Если этот проводник является частью замкнутой цепи, остальные элементы которой неподвижны, то в такой цепи может возникать индукционный ток.

В заключение рассмотрим пример решения задачи на расчёт силы индукционного тока.

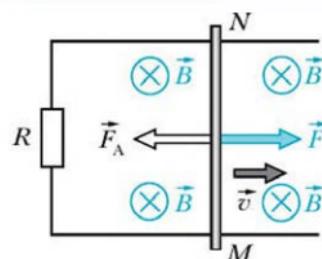


Рис. 104

Схема для получения индукционного тока в замкнутой цепи, находящейся в однородном магнитном поле

**Задача**

Тонкий проводник с малым сопротивлением согнут под углом  $\alpha$  и помещён в однородное магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$ . Плоскость, в которой расположен проводник, перпендикулярна магнитным линиям. По проводнику с постоянной скоростью  $\vec{v}$  скользит тонкий проводящий стержень так, что  $\angle OCA = 90^\circ$  (рис. 105). Сопротивление единицы длины стержня равно  $\rho$ . Определите силу индукционного тока в цепи в тот момент, когда расстояние  $OC$  равно  $L$ . Магнитным полем индукционного тока пренебречь.

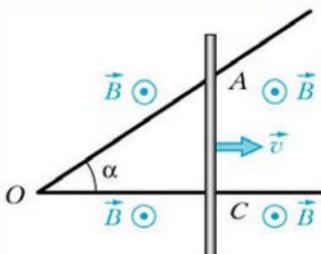


Рис. 105

**Решение.**

Поскольку стержень движется перпендикулярно магнитным линиям, в нём возникает ЭДС индукции. Однако в замкнутой цепи  $C\Lambda O C$  действует только та часть ЭДС индукции, которая обусловлена работой сторонних сил на участке стержня между точками  $A$  и  $C$ .

В тот момент, когда расстояние  $OC$  равно  $L$ , расстояние  $AC = L \cdot \operatorname{tg} \alpha$ . Поэтому в интересующий нас момент времени модуль ЭДС индукции в цепи равен:

$$\mathcal{E} = v \cdot B \cdot L \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (7)$$

По условию сопротивление проводника мало. Следовательно, сопротивление  $R$  всей цепи равно сопротивлению того участка стержня, по которому течёт ток, т. е. сопротивлению участка  $AC$ . Поэтому

$$R = \rho \cdot AC = \rho \cdot L \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (8)$$

Подставив формулы (7) и (8) в закон Ома, получаем:  $I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{v \cdot B}{\rho}$ .

*Ответ:*  $I = \frac{v \cdot B}{\rho}$ .

**Вопросы**

- Почему в проводнике, который движется в магнитном поле, возникает ЭДС? Как называют силу, создающую ЭДС индукции в таком проводнике?
- Как следует расположить и двигать проводящий стержень в однородном магнитном поле с постоянной скоростью, чтобы модуль возникающей в нём ЭДС индукции был: а) максимальным; б) минимальным?

3. Почему при установившемся движении проводящего стержня в однородном магнитном поле сила тока в нём равна нулю?



*Для углублённого уровня*

4. Будет ли возникать ЭДС индукции в вертикально расположенному на земном экваторе проводящем стержне, если его перемещать в магнитном поле Земли с запада на восток?

### Упражнения

- Определите разность потенциалов между концами крыльев самолёта, летящего горизонтально со скоростью  $v = 800 \text{ км/ч}$ . Размах крыльев самолёта  $l = 30 \text{ м}$ . Вертикальная составляющая индукции магнитного поля Земли в месте нахождения самолёта  $B = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$ .
- В однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  поступательно равномерно движется перпендикулярно вектору  $\vec{B}$  плоская прямоугольная проволочная рамка со сторонами  $a$  и  $b$ . Плоскость рамки перпендикулярна линиям индукции. Сопротивление рамки равно  $r$ . Определите ЭДС индукции и силу тока в рамке, если модуль её скорости равен  $v$ .
- Расстояние между рельсами, показанными на рис. 104, составляет  $l = 5 \text{ см}$ . Модуль индукции магнитного поля  $B = 1,5 \text{ Тл}$ . Модуль скорости движения стержня  $v = 10 \text{ см/с}$ . Сопротивление резистора  $R = 10 \text{ Ом}$ . Пренебрегая сопротивлением остальных элементов схемы, определите силу тока в цепи и модуль тормозящей стержень силы Ампера.
- Определите, как изменится ответ в упражнении 3, если вектор индукции магнитного поля будет составлять угол  $\alpha = 30^\circ$  с плоскостью рисунка.



### § 27

### Магнитный поток. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца

В предыдущем параграфе мы установили, что ЭДС индукции может возникать в замкнутой цепи, если один из элементов цепи движется в магнитном поле. Однако из опытов Фарадея следует, что ЭДС индукции может возникать и в других случаях, например когда все элементы цепи непо-

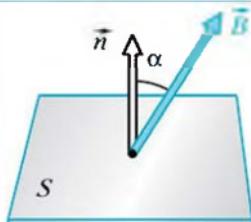


Рис. 106

движны, а изменяется индукция магнитного поля. Чтобы сформулировать условие возникновения ЭДС индукции в общем случае, Максвелл предложил использовать понятие *магнитный поток*.

Для того чтобы ввести это понятие, рассмотрим плоский контур — замкнутую цепь, образованную тонким проводником, расположенным в одной плоскости. Пусть площадь, ограниченная этим контуром, равна  $S$ , а сам контур находится в однородном магнитном поле. Вектор индукции  $\vec{B}$  этого поля составляет угол  $\alpha$  с нормалью  $\vec{n}$  к плоскости контура (рис. 106).

**Магнитным потоком  $\Phi$  (потоком вектора магнитной индукции)** через плоскую поверхность площадью  $S$  называют физическую величину, равную произведению модуля вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ , площади  $S$  и косинуса угла  $\alpha$  между  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  к этой поверхности:

$$\Phi = \vec{B} \cdot S \cdot \cos \alpha. \quad (1)$$

Единица магнитного потока в СИ — *вебер* (Вб);  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$ .

Обратим внимание на два важных момента. Во-первых, из рис. 106 легко понять, что *магнитный поток пропорционален числу магнитных линий, пронизывающих поверхность, ограниченную контуром*.

Во-вторых, из формулы (1) следует, что в зависимости от угла  $\alpha$  поток может быть равен нулю (при  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , в этом случае вектор  $\vec{B}$  лежит в плоскости контура), может быть положительным (при  $0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}$ ) или отрицательным

(при  $\frac{\pi}{2} < \alpha \leq \pi$ ). При заданной ориентации контура знак магнитного потока зависит от выбора направления нормали  $\vec{n}$  к плоскости контура. Для выбора этого направления принято задавать *положительное направление обхода контура*.

Если оно задано, то направление  $\vec{n}$  определяют

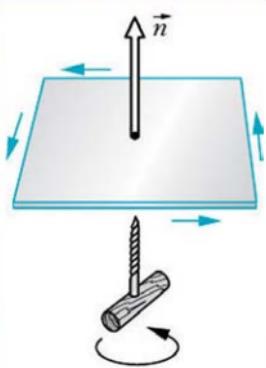


Рис. 107



Нормалью  $\vec{n}$  к контуру является единичный вектор, направленный перпендикулярно плоскости контура.

по правилу буравчика: направление нормали  $\vec{n}$  совпадает с направлением, в котором ввинчивается буравчик в плоскость контура при вращении его рукоятки в положительном направлении обхода контура (рис. 107).

Таким образом, знак магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, зависит от выбора положительного направления обхода этого контура.

В случаях, когда магнитное поле не является однородным или рассматриваемая поверхность не является плоской, эту поверхность разбивают на **элементарные площадки**. Площадку называют элементарной, если она столь мала, что, во-первых, её можно считать частью плоскости, а во-вторых, индукцию магнитного поля во всех её точках можно считать одинаковой как по модулю, так и по направлению. После этого рассчитывают магнитные потоки через каждую элементарную площадку. Сумму этих потоков и называют магнитным потоком через рассматриваемую поверхность.

Вернёмся к рассмотренной в предыдущем параграфе замкнутой цепи, находящейся в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  (рис. 108). Выберем за положительное направление обхода контура  $NMPK$  направление движения часовой стрелки. Тогда направление нормали  $\vec{n}$  будет совпадать с направлением вектора  $\vec{B}$ .

Согласно определению, магнитный поток через площадь, ограниченную контуром  $NMPK$ , в момент, показанный на рисунке, положителен и равен  $\Phi = \vec{B} \cdot S$ , где  $S$  — площадь прямоугольника  $NMPK$ . За время  $\Delta t$  стержень  $MN$  перемещается на расстояние  $v \cdot \Delta t$ . При этом площадь прямоугольника  $NMPK$  увеличивается на  $\Delta S = l \cdot v \cdot \Delta t$ . Соответственно, поток через поверхность, ограниченную данным контуром, увеличится на величину:

$$\Delta\Phi = \vec{B} \cdot \Delta S = v \cdot B \cdot l \cdot \Delta t. \quad (2)$$

Отсюда с учётом уравнения (4) из предыдущего параграфа следует, что модуль ЭДС индукции, возникающей в рассматриваемом контуре, равен:

$$|\mathcal{E}| = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (3)$$

Таким образом, в рассмотренном случае модуль ЭДС индукции в

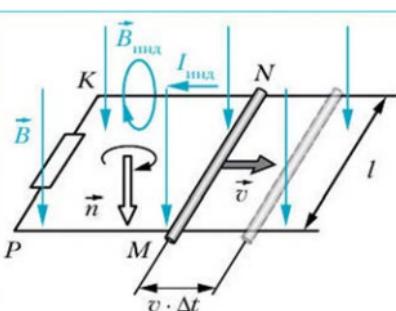


Рис. 108

контуре равен скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром. Эксперименты показывают, что соотношение (3) позволяет рассчитывать модуль ЭДС индукции в любом случае. Однако оно не позволяет определить направление индукционного тока.

Правило определения направления индукционного тока экспериментально установил в 1833 г. Ленц. Прежде чем сформулировать это правило, напомним, что любой электрический ток создаёт магнитное поле. Следовательно, индукционный ток также создаёт своё магнитное поле.

### Правило Ленца

**Индукционный ток в замкнутой цепи имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле стремится компенсировать изменение  $\Delta\Phi$  магнитного потока, вызвавшее этот ток.**

Покажем, как пользоваться правилом Ленца, на примере рассмотренного контура *NMPK* (см. рис. 108). Пронизывающий площадь этого контура магнитный поток внешнего поля с индукцией  $B$  увеличивается. Поэтому индукционный ток должен создавать магнитное поле с индукцией  $B_{\text{инд}}$ , направленной (внутри контура) в противоположную внешнему полюю сторону. Легко убедиться, что такое поле будет создано током, направление которого на рис. 108 противоположно выбранному положительному направлению обхода контура. Следовательно, в рассматриваемом случае возникающая в контуре ЭДС индукции действует в направлении, противоположном положительному направлению обхода. Поэтому, согласно правилу определения знака ЭДС (см. § 6), ЭДС индукции следует считать отрицательной. Обратим внимание на то, что в рассматриваемом случае скорость изменения потока внешнего поля положительна. Следовательно, в рассмотренном случае **знак ЭДС индукции противоположен знаку скорости изменения потока**. Можно показать, что это утверждение выполняется во всех случаях. Поэтому соотношение (3) может быть записано в виде:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (4)$$



**Знак ЭДС индукции противоположен знаку скорости изменения магнитного потока.**

Отметим, что в общем случае скорость изменения потока может изменяться с течением времени. В этом случае для определения ЭДС индукции рассматривают достаточно малый промежуток времени  $\Delta t$ , а выражение (4) принимает вид:

$$\mathcal{E} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right). \quad (5)$$

Полученное соотношение выполняется для любого контура. Оно является математической формой записи закона электромагнитной индукции Фарадея — Максвелла.

**ЭДС индукции в замкнутом контуре равна взятой с противоположным знаком скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.**

На явлении электромагнитной индукции основан принцип действия **электродинамического микрофона**, который превращает звуковые колебания воздуха в колебания электрического напряжения (рис. 109). Звуковая катушка 1 помещена в кольцевой зазор постоянного магнита 2. Жёстко скреплённая с катушкой тонкая диафрагма 3 упруго соединена с корпусом магнита. Звуковая волна, действуя на диафрагму, вызывает её колебания вместе с катушкой. В результате таких движений в неоднородном магнитном поле в катушке возникает ЭДС индукции. Это приводит к появлению переменного напряжения между выводами катушки.

В заключение рассмотрим пример решения задачи с применением закона электромагнитной индукции.

### Задача

Плоская прямоугольная рамка из тонкого провода расположена в однородном магнитном поле с индукцией  $\bar{B}$ . В начальный момент времени плоскость рамки перпендикулярна магнитным линиям. Площадь поверхности, ограниченной рамкой, равна  $S$ . Общее сопротивление провода рамки равно  $R$ . Рамку медленно поворачивают вокруг одной из её сторон на  $180^\circ$ . Определите заряд  $q$ , который протечёт через поперечное сечение провода рамки в результате её поворота.

### Решение.

В процессе поворота рамки магнитный поток  $\Phi$  через поверхность, ограниченную рамкой, изменяется. Это изменение, согласно закону электромагнитной индукции, приводит к возникновению в проводе рамки ЭДС индукции, которая вызывает появление индукционного тока.

Выберем положительное направление обхода рамки так, чтобы положительная нормаль к плоскости рамки в начальный момент времени совпадала по направлению с вектором  $\bar{B}$ . Тогда магнитные потоки через поверхность, ограниченную рамкой, в начальный и конечный моменты времени будут соответственно равны  $\Phi_n = \bar{B} \cdot S$  и  $\Phi_k = -\bar{B} \cdot S$ .

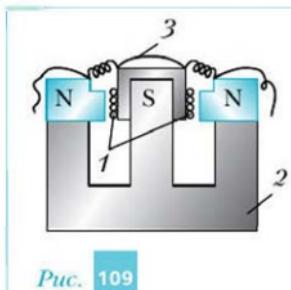


Рис. 109

Разобъём время поворота рамки на достаточно малые промежутки времени, в течение каждого из которых скорость изменения потока  $\Phi$  можно считать постоянной. Рассмотрим один из таких промежутков. Пусть длительность этого промежутка равна  $\Delta t$ , а магнитный поток за этот промежуток времени изменяется на  $\Delta\Phi$ . Тогда в течение  $\Delta t$  в рамке действует ЭДС, равная  $\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ , а сила тока, соответственно, равна  $I = \frac{\mathcal{E}}{R}$ . Следовательно, за рассматриваемый промежуток времени через поперечное сечение провода протекает заряд  $\Delta q = I \cdot \Delta t = \frac{\mathcal{E}}{R} \cdot \Delta t = -\frac{\Delta\Phi}{R}$ .

Искомый заряд  $q$  равен сумме всех зарядов  $\Delta q$ , которые протекают через поперечное сечение провода за всё время поворота рамки на  $180^\circ$ . Следовательно, искомый заряд равен взятому с противоположным знаком отношению общего изменения магнитного потока к сопротивлению провода рамки:

$$q = -\frac{\Phi_k - \Phi_u}{R} = \frac{2B \cdot S}{R}.$$

Положительное значение искомого заряда означает, что в рассмотренном случае направление индукционного тока совпадает с выбранным положительным направлением обхода рамки.

*Ответ:*  $q = \frac{2B \cdot S}{R}$ .

### Вопросы

1. Что называют магнитным потоком?
2. Как следует ориентировать проволочную рамку в однородном магнитном поле, чтобы магнитный поток через ограниченную ею поверхность был: а) равен нулю; б) максимален по модулю и отрицателен; в) максимален; г) равен половине максимального значения?
3. Сформулируйте: а) правило Ленца; б) закон электромагнитной индукции.
4. Как устроен электродинамический микрофон?

### Упражнения

1. Плоский проволочный виток, ограничивающий площадь  $S = 10 \text{ см}^2$ , расположен так, что его нормаль составляет угол  $\alpha = 60^\circ$  с линиями-

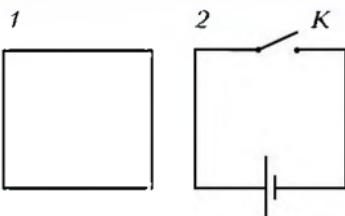


Рис. 110

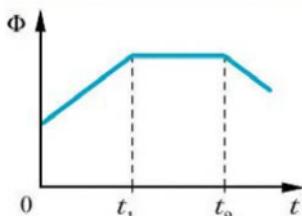


Рис. 111

- ми индукции однородного магнитного поля. Модуль индукции этого поля за время  $\tau = 2$  с равномерно убывает от  $B_1 = 1$  Тл до  $B_2 = 0.2$  Тл. Сопротивление витка  $r = 1$  кОм. Определите: а) начальный и конечный магнитные потоки через поверхность, ограниченную витком; б) ЭДС индукции в витке; в) силу тока в витке.
2. Проволочные контуры 1 и 2 расположены в одной плоскости (рис. 110). Определите направление индукционного тока, возникающего в контуре 1 после замыкания ключа K в контуре 2.
3. Плоскость квадратного проволочного витка со стороной  $l = 0,1$  м перпендикулярна линиям магнитного поля, модуль индукции которого  $B = 0,5$  Тл. Определите, какой заряд протечёт по витку при его повороте на угол  $\alpha = 60^\circ$ , если сопротивление витка  $r = 0,5$  кОм.
4. На рис. 111 показан график зависимости от времени магнитного потока, пронизывающего площадь, ограниченную проводящим контуром. Постройте график зависимости от времени возникающей в этом контуре ЭДС индукции.

**§ 28****Вихревое электрическое поле**

Ранее (см. § 26) были установлены причины возникновения ЭДС индукции в проводниках, которые движутся в постоянном магнитном поле. Но как объяснить возникновение ЭДС индукции в неподвижном контуре при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром, ведь магнитное поле не может действовать на неподвижные заряды?



Отметим, что действие магнитного поля на хаотически движущиеся носители заряда в проводнике не может вызвать их упорядоченное движение.

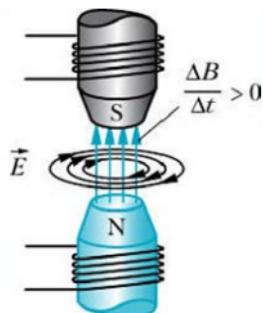
Какова же природа возникновения индукционных токов, обнаруженных Фарадеем в неподвижной замкнутой катушке? Поскольку индукционный ток появляется при изменении магнитного поля, Максвелл предположил, что *изменяющееся* магнитное поле порождает так называемое *вихревое электрическое поле*. Действие этого поля на свободные носители заряда в замкнутом проводящем контуре и приводит к появлению индукционного тока в этом контуре.



**Изменяющееся магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.**

Вихревое электрическое поле имеет принципиальное отличие от электростатического поля, порождаемого неподвижными электрическими зарядами. Отличие состоит в том, что для появления вихревого электрического поля не требуется заряженных тел — зарядов, на которых начинаются или оканчиваются силовые линии поля. *Силовые линии (линии напряжённости) вихревого электрического поля всегда замкнуты*. Они не имеют ни начала, ни конца. Поэтому это поле и называют вихревым.

Пример возникновения вихревого электрического поля показан на рис. 112. Изменение силы тока в обмотках электромагнита приводит к изменению магнитного поля между его полюсами. В результате этого возникает вихревое электрическое поле. Силовые линии этого поля представляют собой концентрические окружности, лежащие в плоскостях, перпендикулярных оси симметрии изменяющегося магнитного поля. Работа сил вихревого электрического поля по переносу пробного электрического заряда по замкнутому контуру вдоль одной из таких силовых линий будет отлична от нуля. Следовательно, в отличие от электростатического поля, *вихревое электрическое поле не является потенциальным*.



*Рис. 112* Изменение магнитного поля порождает вихревое электрическое поле

Чем быстрее изменяется магнитное поле, тем больше напряжённость вихревого электрического поля. Направление вектора напряжённости вихревого электрического поля может быть определено по правилу Ленца.

Поясним сказанное на примере. Поместим в область между полюсами электромагнита, изображённого на рис. 112, проволочное кольцо так, чтобы его плоскость была

перпендикулярна силовым линиям магнитного поля. Тогда при изменении (увеличении) индукции магнитного поля в кольце возникнет индукционный ток. Направление этого тока определяется по правилу Ленца. Таким образом, при увеличении индукции магнитного поля направление индукционного тока совпадает с направлением вызвавшего его вихревого электрического поля. Аналогичным образом можно показать, что при уменьшении индукции магнитного поля направление напряжённости вихревого электрического поля изменится на противоположное.

Вихревое электрическое поле проявляется в действии на электрические заряды.



Рассмотрим пример такого действия.

### Задача

Заряд  $Q$  равномерно распределён по тонкому диэлектрическому кольцу массой  $M$ , лежащему на гладкой горизонтальной плоскости. Кольцо находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B$ , магнитные линии направлены вертикально. Определите угловую скорость, которую приобретёт кольцо после выключения магнитного поля.

### Решение.

При изменении индукции магнитного поля возникает вихревое электрическое поле. Рассмотрим достаточно малый промежуток времени  $\Delta t$ . Пусть модуль индукции магнитного поля за этот промежуток времени изменяется на  $\Delta B$ . Тогда магнитный поток через поверхность, ограниченную кольцом, изменяется на  $\Delta\Phi = \Delta B \cdot \pi \cdot R^2$ , где  $R$  – радиус кольца. Следовательно, в течение промежутка времени  $\Delta t$  в кольце будет действовать ЭДС, модуль которой равен:

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Delta B \cdot \pi \cdot R^2}{\Delta t}. \quad (1)$$

Как и в случае с рассмотренным выше электромагнитом, силовая линия вихревого электрического поля, действующего на заряды кольца, представляет собой окружность, совпадающую с кольцом. Следовательно, модуль  $E$  напряжённости вихревого электрического поля во всех точках кольца одинаков. Поэтому ЭДС индукции по модулю равна работе вихревого поля по переносу пробного заряда по замкнутому контуру, совпадающему с кольцом, отнесённой к этому заряду:

$$\mathcal{E} = E \cdot 2\pi \cdot R. \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) получаем:

$$E = \frac{R}{2} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t}. \quad (3)$$

Рассмотрим малый элемент кольца  $\Delta l$ . Заряд этого элемента

$$\Delta Q = \frac{Q \cdot \Delta l}{2\pi \cdot R}. \quad (4)$$

Со стороны вихревого поля на этот элемент действует сила, направленная перпендикулярно радиусу, соединяющему этот элемент с центром кольца. Модуль этой силы

$$\Delta F = E \cdot \Delta Q. \quad (5)$$

Масса рассматриваемого элемента кольца равна:

$$\Delta M = \frac{M \cdot \Delta l}{2\pi \cdot R}. \quad (6)$$

Согласно второму закону Ньютона, модуль ускорения элемента кольца

$$a = \frac{\Delta F}{\Delta M}. \quad (7)$$

Приращение модуля скорости элемента кольца за промежуток времени  $\Delta t$  равно:

$$\Delta v = a \cdot \Delta t. \quad (8)$$

Поэтому приращение модуля угловой скорости кольца за рассматриваемый промежуток времени с учётом соотношений (1)–(8) равно:

$$\Delta \omega = \frac{\Delta v}{R} = \frac{Q}{2M} \cdot \Delta B. \quad (9)$$

Суммируя приращения угловых скоростей, получаем ответ.

*Ответ:*  $\omega = \frac{Q \cdot B}{2M}$ .



### Вопросы

- 1 Какова природа сторонних электрических сил, вызывающих появление ЭДС индукции в неподвижных проводниках?
- 2 Чем вихревое электрическое поле отличается от электростатического?
- 3 От чего зависит напряжённость вихревого электрического поля?



## Упражнение

Квадратная проволочная рамка со стороной 40 см лежит на столе. Линии индукции однородного магнитного поля перпендикулярны плоскости рамки. Модуль индукции этого поля за время  $t = 10$  с равномерно убывает от  $B = 1$  Тл до нуля. Сопротивление витка  $r = 0,5$  кОм. Определите работу, которую совершает вихревое электрическое поле в рамке за это время.

## § 29

## Индуктивность. Самоиндукция

Рассмотрим замкнутый контур с током. Ток в контуре порождает магнитное поле. Модуль индукции  $B$  магнитного поля в любой точке прямо пропорционален силе  $I$  породившего это поле тока:  $B \sim I$ . В свою очередь, созданный полем магнитный поток  $\Phi$  прямо пропорционален модулю  $B$  индукции магнитного поля:  $\Phi \sim B$ . Следовательно, магнитный поток  $\Phi$  и сила тока  $I$  прямо пропорциональны друг другу:  $\Phi \sim I$ . Поэтому отношение  $\Phi$  к  $I$  может служить физической величиной, характеризующей замкнутый контур.

**Физическую величину, равную отношению магнитного потока  $\Phi$ , порождённого током в контуре, через поверхность, ограниченную этим контуром, к силе тока  $I$  в данном контуре, называют индуктивностью контура (или коэффициентом самоиндукции):**

$$L = \frac{\Phi}{I}. \quad (1)$$

Единица индуктивности в СИ – генри (Гн);  $1 \text{ Гн} = 1 \frac{\text{Вб}}{\text{А}}$ .



Определим индуктивность длинного соленоида. Пусть его длина равна  $l$ , площадь поперечного сечения витка равна  $S$ , число витков равно  $N$ , а сила тока в обмотке –  $I$ . Тогда, согласно формуле (3) из § 19, модуль индукции магнитного поля внутри соленоида  $B = \mu_0 \cdot l \cdot \frac{N}{l}$ . Магнитный поток через поверхность, ограниченную одним витком,  $\Phi_1 = B \cdot S$ . Поскольку соленоид состоит из  $N$  витков, общий поток  $\Phi = N \cdot \Phi_1$ . Следовательно, из формулы (1) получаем:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot S}{l}. \quad (2)$$

Если всё пространство внутри соленоида заполнить однородным магнетиком с магнитной проницаемостью  $\mu$ , то индуктивность соленоида увеличится в  $\mu$  раз.



Пусть в силу каких-либо причин за достаточно малый промежуток времени  $\Delta t$  сила тока в рассматриваемом контуре изменяется на  $\Delta I$ . Из определения (1) следует, что в этом случае магнитный поток  $\Phi$  через поверхность, ограниченную контуром, изменяется на величину  $\Delta\Phi = L \cdot \Delta I$ . Следовательно, согласно закону электромагнитной индукции, в контуре будет возникать ЭДС индукции, равная:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (3)$$

*Возникновение такой ЭДС в контуре обусловлено изменением силы тока в самом контуре.* Поэтому эту ЭДС называют *ЭДС самоиндукции*, а явление её возникновения называют *самоиндукцией*.

Обратим внимание на то, что знак ЭДС самоиндукции противоположен знаку скорости изменения силы тока.

**!** Можно сказать, что ЭДС самоиндукции препятствует изменению силы тока в контуре.

Явление самоиндукции подобно явлению инерции в механике, а индуктивность контура подобна массе тела. Как вы помните, чем больше масса тела, тем труднее изменить его скорость за заданное время. Аналогично чем больше индуктивность контура, тем труднее изменить силу тока в нём за заданное время.

Из формулы (3) следует, что чем меньше промежуток времени  $\Delta t$ , за который происходит заданное изменение силы тока  $\Delta I$ , тем больше модуль возникающей ЭДС самоиндукции.

С одной стороны, это свойство самоиндукции используют в различных устройствах для получения высоковольтных импульсов напряжения. Например, при быстром размыкании цепи с достаточно большой индуктивностью, в которой протекал ток, из-за резкого изменения силы тока возникает большая ЭДС самоиндукции. Это приводит к искровому пробою между контактами размыкающего цепь ключа. Такое явление, в частности, используют для поджигания горючей смеси в двигателях внутреннего сгорания.

**K** Отметим, что в общем случае индуктивность контура зависит от силы тока в нём. Это может быть обусловлено, в частности, наличием вблизи контура сильных магнитиков, магнитная проницаемость которых зависит от индукции магнитного поля, создаваемого током в контуре.

С другой стороны, большая ЭДС самоиндукции, возникающая при быстром размыкании цепи, может привести как к повреждению элементов цепи (например, обмоток электромагнитов), так и к возникновению пожара из-за искрового пробоя. Поэтому в промышленных установках параллельно элементам, имеющим большую индуктивность, подключают резисторы, а перед выключением подобных установок силу тока уменьшают с помощью специальных устройств (например, реостатов).

Понятно, что при подключении цепи с индуктивностью к источнику тока сила тока в этой цепи не сразу достигает максимального значения. При этом сила тока будет нарастать тем медленнее, чем больше общая индуктивность и меньше общее сопротивление этой цепи.



Напомним, что в опыте Фарадея с двумя неподвижными катушками ЭДС индукции во второй катушке была обусловлена изменением силы тока в первой катушке. В отличие от явления самоиндукции, в подобных случаях говорят о взаимной индукции и вводят физическую величину, которую называют *взаимной индуктивностью* (или коэффициентом взаимной индукции).

**Физическую величину, равную отношению магнитного потока  $\Phi_2$  через поверхность, ограниченную вторым контуром, к силе тока  $I_1$ , вызвавшего во втором контуре магнитный поток  $\Phi_2$ , называют взаимной индуктивностью этих контуров (или коэффициентом их взаимной индукции):**

$$L_{21} = \frac{\Phi_2}{I_1}. \quad (4)$$

Если по каким-либо причинам за достаточно малый промежуток времени  $\Delta t$  сила тока в первом контуре изменяется на  $\Delta I_1$ , то магнитный поток  $\Phi_2$  через поверхность, ограниченную вторым контуром, изменяется на  $\Delta\Phi_2 = L_{21} \cdot \Delta I_1$ . Следовательно, согласно закону электромагнитной индукции, во втором контуре будет возникать ЭДС индукции, равная:

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t} = -L_{21} \cdot \frac{\Delta I_1}{\Delta t}. \quad (5)$$



### Вопросы

1. Что называют: а) индуктивностью контура (коэффициентом самоиндукции); б) ЭДС самоиндукции?
2. В чём состоит явление самоиндукции?

3. Почему знак ЭДС самоиндукции противоположен знаку скорости изменения силы тока в контуре?
4. Почему в промышленных установках параллельно элементам, имеющим большую индуктивность, подключают резисторы?



*Для углублённого уровня*

5. В чём состоит явление взаимной индукции?
6. Что называют взаимной индуктивностью контуров?

### Упражнения

1. Сила тока в катушке с индуктивностью 0,5 Гн равна 2 А. Определите пронизывающий эту катушку поток магнитного поля, созданного этим током.
2. Сила тока в катушке равномерно изменяется от 0,1 до 0,5 А за время, равное 2 с. При этом в катушке возникает ЭДС самоиндукции, равная 50 мВ. Определите коэффициент самоиндукции (индуктивность) катушки.
3. На рис. 113 показана зависимость от времени силы тока в катушке с индуктивностью 1 Гн. Постройте график зависимости от времени ЭДС самоиндукции в этой катушке.

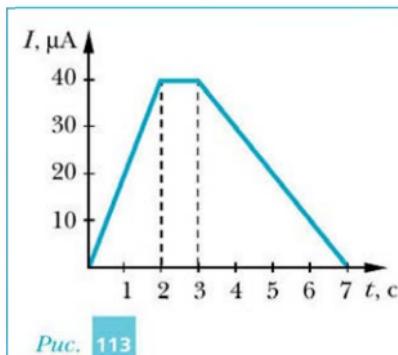


Рис. 113

**§ 30**

### Энергия магнитного поля тока

Подключим цепь с индуктивностью  $L$  и сопротивлением  $R$  к источнику тока с ЭДС, равной  $\mathcal{E}$ , и очень малым внутренним сопротивлением (рис. 114). После замыкания ключа сила тока в цепи увеличивается с течением времени от нуля до максимального значения  $I = \frac{\mathcal{E}}{R}$ . С увеличением силы тока в цепи увеличивается модуль индукции  $B$ , следовательно, и энергия создаваемого этим током магнитного поля. Таким образом, в течение време-

ни нарастания силы тока источник совершаєт работу, которая идёт не только на выделение определённого количества теплоты на сопротивлении  $R$ , но и на увеличение энергии магнитного поля тока.

Как вы помните, увеличение силы тока в цепи с индуктивностью приводит к возникновению ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}$ , которая препятствует нарастанию этого тока. Поэтому источник должен совершать работу по преодолению ЭДС самоиндукции. Именно эта работа и приводит к увеличению силы тока в цепи и, соответственно, энергии магнитного поля. Расчёт такой работы позволяет получить формулу для вычисления энергии магнитного поля тока  $I$ , проходящего по цепи с индуктивностью  $L$ :

$$W_m = \frac{L \cdot I^2}{2}. \quad (1)$$

Именно такая энергия выделяется при размыкании цепи с индуктивностью  $L$ , когда сила тока в этой цепи уменьшается от  $I$  до нуля.

Отметим, что энергию магнитного поля можно вычислить, не только зная индуктивность цепи и силу тока в ней, но и зная модуль индукции магнитного поля. Расчёты показывают, что плотность энергии магнитного поля (энергия магнитного поля, приходящаяся на единицу объёма) равна:

$$w_m = \frac{B^2}{2\mu \cdot \mu_0}, \quad (2)$$

где  $B$  – модуль индукции магнитного поля, а  $\mu$  – магнитная проницаемость в рассматриваемой области пространства.



Выведем формулу (1). Для этого обратимся к цепи, подключаемой к источнику тока (см. рис. 114). Рассмотрим достаточно малый промежуток времени  $\Delta t$ , в течение которого сила тока в цепи увеличивается на  $\Delta I$ . Будем считать, что  $\Delta I$  мало по сравнению со средней силой тока  $I$  в цепи в рассматриваемый промежуток времени. Согласно закону Ома для замкнутой цепи:

$$I \cdot R = \mathcal{E} + \mathcal{E}_c = \mathcal{E} - L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (3)$$

Умножив выражение (3) на  $I \cdot \Delta t$ , получим:

$$\mathcal{E} \cdot I \cdot \Delta t = I^2 \cdot R \cdot \Delta t + L \cdot I \cdot \Delta I. \quad (4)$$

Проанализируем полученное соотношение. Стоящая в левой части выражения (4) работа источника равна сумме двух членов: выделившегося количества теплоты и увеличения энергии магнитного поля за то же время.

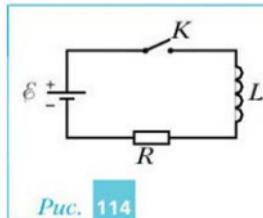


Рис. 114

Рассчитаем увеличение энергии магнитного поля за всё время установления силы тока в цепи от нуля до конечного значения  $I$ . Для этого определим общее изменение энергии магнитного поля, просуммировав все вторые слагаемые из правой части формулы (4) за всё время установления тока.

Разобъём всё время установления тока на  $N$  таких достаточно малых промежутков, чтобы за каждый из этих промежутков сила тока в цепи увеличивалась на одинаковую величину  $\Delta I$ . Тогда средняя сила тока  $I_n$  на  $n$ -м промежутке времени ( $1 \leq n \leq N$ ) будет равна:

$$I_n = n \cdot \Delta I. \quad (5)$$

Интересующая нас сумма с учётом формулы суммы  $N$  членов арифметической прогрессии принимает вид:

$$\sum_{n=1}^N L \cdot I_n \cdot \Delta I = \sum_{n=1}^N L \cdot n \cdot (\Delta I)^2 = L \cdot (\Delta I)^2 \cdot \sum_{n=1}^N n = L \cdot (\Delta I)^2 \cdot \frac{N \cdot (N + 1)}{2}. \quad (6)$$

Поскольку  $N$  много больше единицы, а сила установившегося тока  $I = N \cdot \Delta I$ , из формулы (6) получаем:

$$W_m = \frac{L \cdot (N \cdot \Delta I)^2}{2} = \frac{L \cdot I^2}{2}. \quad (7)$$

Отметим, что, подставляя в (7) формулу (2) из § 29 для расчёта индуктивности соленоида с учётом формулы (3) из § 19 и считая магнитное поле, созданное током в обмотке, однородным и сосредоточенным внутри соленоида, можно убедиться в справедливости формулы (2).



### Вопросы

- 1 Почему для увеличения силы тока в цепи источник должен совершить работу?
- 2 В какие виды энергии превращается эта работа?

### Упражнения

- 1 В результате увеличения силы тока в катушке энергия создаваемого ею магнитного поля увеличилась в 9 раз. Определите, во сколько раз изменилась сила тока в катушке.
- 2 Определите энергию магнитного поля тока в катушке из упражнения 1 § 29.
- 3 Модуль индукции магнитного поля в ферромагнитном сердечнике с проницаемостью  $\mu = 10^3$  равен  $B = 0,5$  Тл. Определите энергию магнитного поля, приходящуюся на  $1 \text{ см}^3$  сердечника.

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

## Опыты Фарадея

При движении проводника в магнитном поле в нём может возникать ЭДС индукции, обусловленная действием магнитной составляющей силы Лоренца на свободные носители заряда проводника

Магнитный поток через поверхность контура площадью  $S$ :

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

Закон электромагнитной индукции Фарадея — Максвелла:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Явление электромагнитной индукции — возникновение ЭДС индукции при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром. Если этот контур является замкнутым проводящим, то в нём возникает индукционный ток

Изменяющееся магнитное поле порождает вихревое электрическое поле

## Правило Ленца

Индукционный ток в замкнутой цепи имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле стремится компенсировать вызвавшее этот ток изменение магнитного потока через поверхность, ограниченную этой цепью

## Явление самоиндукции

Индуктивность (коэффициент самоиндукции) контура:

$$L = \frac{\Phi}{I},$$

где  $\Phi$  — порождённый током в контуре магнитный поток через поверхность, ограниченную этим контуром

Если индуктивность  $L$  контура не зависит от силы тока в нём, то ЭДС индукции прямо пропорциональна скорости изменения силы тока в контуре:

$$\mathcal{E} = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Энергия магнитного поля, создаваемого контуром с индуктивностью  $L$  при силе тока  $I$  в контуре:  $W_m = \frac{L \cdot I^2}{2}$



## Колебания и волны

Рассмотренные в предыдущих главах физические явления и процессы обладали общим свойством: количественно характеризующие их физические величины либо были постоянными, либо изменялись с течением времени равномерно. Теперь мы приступаем к изучению более сложных явлений и процессов. Они лежат в основе работы телекоммуникационных систем, компьютеров и других устройств, без которых невозможно представить современную жизнь.

Изучению таких явлений посвящён специальный раздел — физика колебаний и волн. В нём рассматривают процессы, характеристики которых периодически изменяются, повторяясь точно или приблизительно через определённые промежутки времени.

Традиционно изучение физики колебаний начинают с механических колебаний. Их можно непосредственно наблюдать в окружающем нас мире без каких-либо специальных приборов и устройств. В то же время, как вы скоро убедитесь, полученные при рассмотрении механических колебаний количественные закономерности с точки зрения математики справедливы и для электромагнитных колебаний. Другими словами, уравнения, описывающие механические и электромагнитные колебания, имеют один и тот же вид, получаются одинаковыми способами и имеют одинаковые по виду решения. Именно поэтому, несмотря на различия в природе вызывающих эти колебания причин, их изучают в одном разделе физики.



## § 31

## Механические колебания.

## Условия возникновения свободных колебаний

Колебательные движения (колебания) широко распространены в окружающем мире. Примеры таких движений показаны на рис. 115. В чём же состоит особенность колебательного движения?

Пусть твёрдый шарик находится на вогнутой поверхности в положении устойчивого равновесия (рис. 116). Сместим его из этого положения на край жёлоба и отпустим. В результате суммарного действия сил тяжести и реакции опоры шарик с ускорением устремится к положению равновесия, проскочит его и будет смещаться, замедляясь, в противоположную сторону. В крайней точке смещения он остановится и вновь, ускоряясь, устремится к положению равновесия. Если силы трения, действующие на шарик, малы, то движение шарика то в одну, то в другую сторону будет продолжаться достаточно долго. Особенность такого движения состоит в том, что *через определённые промежутки времени все характеристики движения (положение в пространстве, скорость и ускорение) будут практически повторяться*.

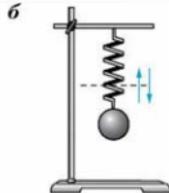
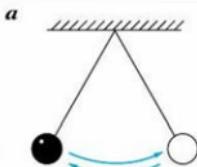


Рис. 115

Примеры колебаний: *а* – нитяного маятника; *б* – пружинного маятника



Рис. 116

**Движения, обладающие той или иной степенью повторяемости во времени, называют колебаниями.**

Такие повторения могут происходить через равные промежутки времени. В этом случае говорят о периодических колебаниях и вводят понятие *период*.

**Движения, все характеристики которых повторяются через равные промежутки времени, называют периодическими колебательными движениями (периодическими колебаниями).**

**Минимальный промежуток времени  $T$ , через который повторяются все характеристики периодического колебательного движения, называют периодом колебаний.**

Период колебаний  $T$  измеряют в СИ в *секундах* (с).

Из определения периода следует, что он равен времени одного полного колебания, т. е. времени, за которое колеблющееся тело, пройдя все возможные положения, возвращается в то же место пространства и имеет в нём те же скорость и ускорение.

Пусть колеблющееся с периодом  $T$  тело совершает  $N$  полных колебаний за  $t$  секунд. Тогда период колебаний этого тела, согласно определению, равен:

$T = \frac{t}{N}$ . При этом тело за одну секунду будет совершать  $\frac{N}{t}$  колебаний.

**Число периодических колебаний за единицу времени (например, за секунду) называют частотой колебаний.**

Частоту колебаний обозначают греческой буквой  $v$ . Единицу частоты в СИ называют *герц* ( $\text{Гц}$ );  $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$ .

**!** 1 Гц — это частота таких колебаний, при которых за 1 с совершается одно полное колебание.

Частота  $v$  периодических колебаний и их период  $T$  связаны соотношением:

$$v = \frac{1}{T}$$

В рассмотренной системе тел «шарик на вогнутой поверхности – Земля» колебания происходят без действия каких-либо внешних сил.

**Колебания в системе тел, обусловленные действием только внутренних сил, называют свободными колебаниями.**

*Системы тел, в которых возможны свободные колебания, называют колебательными системами.*

Основным свойством колебательной системы является наличие у неё положения устойчивого равновесия. Тогда при выводе системы из положения равновесия появляются силы, стремящиеся вернуть её в это положение. Эти силы называют *возвращающими*. При малых силах трения в системе колебания под действием возвращающих сил могут продолжаться достаточно долго.

Таким образом, чтобы в системе тел могли происходить свободные колебания, необходимо выполнение двух условий:

- 1) наличие у системы положения устойчивого равновесия;
- 2) силы трения в системе должны быть достаточно малы.

Чтобы свободные колебания начались, необходимо вывести колебательную систему из положения равновесия. С энергетической точки зрения это означает, что системе необходимо передать начальный запас механической энергии. Начальный запас энергии может представлять собой либо потенциальную, либо кинетическую, либо сумму потенциальной и кинетической энергий. Например, если шарик (см. рис. 116) сместить из положения равновесия и отпустить, то начальная энергия системы будет потенциальной. Если этому же шарику, находящемуся в положении равновесия, сообщить горизонтально направленную скорость (рис. 117, а), то начальная энергия системы будет кинетической. Если же смещённому из положения равновесия шарику сообщить начальную скорость так, как показано на рис. 117, б, то начальная энергия системы будет представлять собой сумму потенциальной и кинетической энергий.

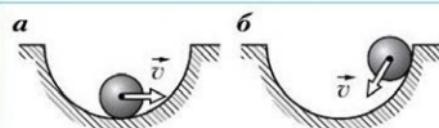


Рис. 117



! При свободных колебаниях при отсутствии сил трения полная механическая энергия колебательной системы, согласно закону сохранения механической энергии, остаётся неизменной.

При этом в процессе таких колебаний потенциальная энергия системы переходит в кинетическую энергию и обратно.

### Вопросы

1. Какие движения называют колебаниями?
2. Какие колебания называют периодическими?

- 3 Что называют: а) периодом колебаний; б) частотой колебаний?  
В каких единицах в СИ измеряют период и частоту колебаний?
- 4 Как связаны частота и период колебаний?
- 5 Какие колебания называют свободными?
- 6 Какие системы тел называют колебательными системами? Приведите примеры.
- 7 Какие условия должны выполняться, чтобы в системе тел могли происходить свободные колебания? Приведите примеры.
- 8 Что необходимо сделать, чтобы в колебательной системе начались свободные колебания? Приведите примеры, разъяснив их с энергетической точки зрения.
- 9 Как изменяются полная механическая, потенциальная и кинетическая энергии колебательной системы при свободных колебаниях при отсутствии сил трения?



## § 32 Кинематика колебательного движения

Чтобы научиться описывать изменения кинематических характеристик (координаты, скорости и ускорения) колеблющегося тела с течением времени, вспомним, как описывают равномерное движение точечного тела (точки) по окружности.

Рассмотрим точку  $B$ , которая равномерно с угловой скоростью  $\omega$  движется по окружности радиусом  $R$  (рис. 118). Систему отсчёта выберем таким

образом, чтобы её начало совпадало с центром окружности. Пусть в начальный момент времени ( $t_0 = 0$ ) радиус-вектор  $\vec{r}_B$ , описывающий положение точки  $B$  на окружности, составляет с осью  $X$  начальный угол  $\phi_0$ . За время  $t$  радиус-вектор  $\vec{r}_B$  поворачивается на угол  $\omega \cdot t$ . Поэтому к моменту времени  $t$  угол  $\phi(t)$  между координатной осью  $X$  и  $\vec{r}_B$  будет равен сумме начального угла  $\phi_0$  и угла поворота  $\omega \cdot t$ . Следовательно, закон равномерного движения точки по окружности (за-

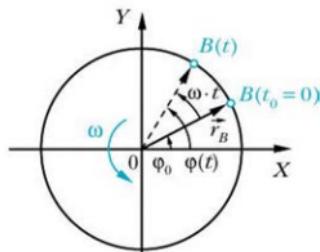


Рис. 118

вистимость угла, определяющего положение точки на окружности, от времени) имеет вид:

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \omega \cdot t. \quad (1)$$

Напомним, что равномерное движение по окружности с угловой скоростью  $\omega$  можно характеризовать периодом  $T$  (временем, за которое тело совершает один оборот) и частотой  $v$  (числом оборотов за единицу времени). Их можно рассчитать по формулам:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad v = \frac{1}{T}, \quad (2)$$

Исследуем, как изменяются с течением времени координаты  $x$  и  $y$  равномерно движущейся по окружности точки  $B$ . Для этого построим графики  $x(t)$  и  $y(t)$  и определим аналитический вид этих функций.

Будем для простоты считать, что в момент включения часов ( $t_0 = 0$ ) угол между  $\vec{r}_B$  и положительным направлением оси  $X$  равен нулю:  $\varphi_0 = 0$ . Тогда координаты точки  $B$  в начальный момент времени равны  $(R; 0)$ . Рассмотрим несколько моментов времени  $t_1, t_2, t_3$  и т. д., следующих за начальным моментом  $t_0 = 0$  через одинаковые интервалы. Положения точки  $B$  на окружности в эти моменты показаны на рис. 119, а.

Построим график зависимости координаты  $y$  точки  $B$  от времени (рис. 119, б). Видно, что функция  $y(t)$  представляет собой знакомую вам из курса математики синусоиду. Построение графика зависимости координаты  $x$  точки  $B$  от времени  $t$  даёт нам косинусоиду (рис. 119, в).

К этим же зависимостям можно прийти, обратившись к рис. 120. Действительно, координата  $y$  точки  $B$  есть проекция точки  $B$  на координатную ось  $Y$ . Поэтому в любой момент времени  $t$ :

$$y(t) = R \cdot \sin \varphi(t) = R \cdot \sin (\omega \cdot t). \quad (3)$$

Из рис. 120 следует также, что зависимость  $x(t)$  для точки  $B$  имеет вид:

$$x(t) = R \cdot \cos \varphi(t) = R \cdot \cos (\omega \cdot t). \quad (4)$$

Ограничимся рассмотрением изменения с течением времени одной из проекций точки  $B$ , например  $x$ . Понятно, что в общем случае, когда начальный угол  $\varphi_0$  отличен от нуля, закон движения (4) будет иметь вид:

$$x(t) = R \cdot \cos (\omega \cdot t + \varphi_0). \quad (5)$$

Из уравнения (5) и графика  $x(t)$  на рис. 119, в следует, что координата  $x$  точки  $B$  повторяется через одинаковые промежутки времени. Следовательно, проекция  $x$  этой точки совершает колебания.

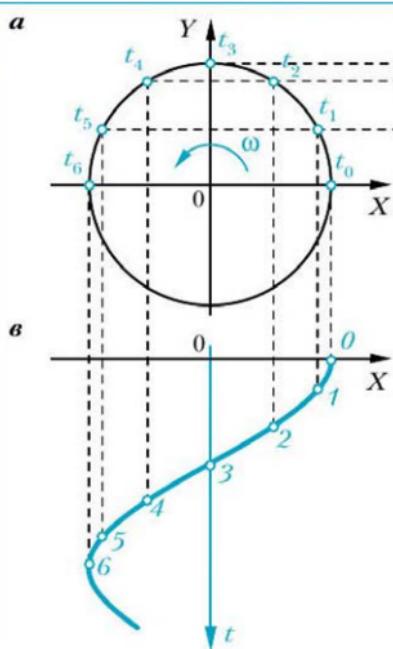


Рис. 119

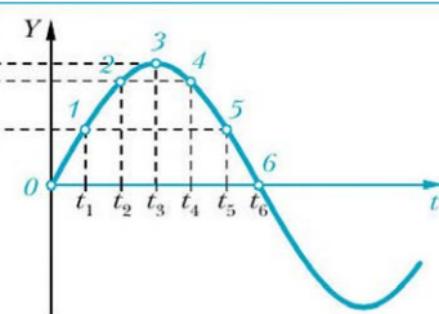


Рис. 119

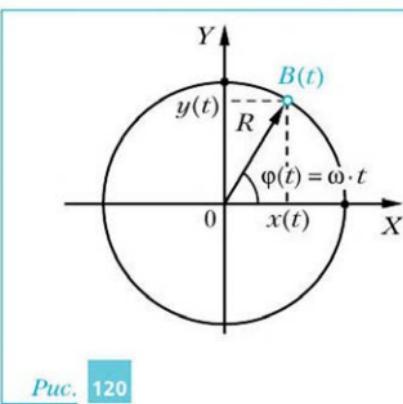


Рис. 120

Колебания, для которых зависимость физической величины от времени представляет собой косинусоиду (или синусоиду), называют гармоническими.

Таким образом, из закона движения (5) следует, что проекция  $x$  точки, которая равномерно движется по окружности, совершает гармонические колебания.

Обозначим максимальное значение координаты  $x$ , равное  $R$ , через  $x_m$ . Величину  $x_m$ , стоящую перед гармонической функцией (косинусом или синусом), называют амплитудой гармонических колебаний. С учётом этого обозначения



закон гармонических колебаний имеет вид:

$$x(t) = x_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_0). \quad (6)$$

Величину  $(\omega \cdot t + \phi_0)$ , являющуюся аргументом косинуса (или синуса), называют фазой колебаний.

Величину  $\phi_0$ , равную значению фазы в начальный момент времени  $t_0 = 0$ , называют *начальной фазой* колебаний. Величину  $\omega$  называют *циклической* (или *круговой*) *частотой* гармонических колебаний. Понятно, что циклическая частота является скоростью изменения фазы колебаний.

Из курса математики вы знаете, что значения функции косинуса (или синуса) повторяются при изменении аргумента на  $2\pi$ . Следовательно, будут повторяться и значения координаты  $x$  в законе (6) при изменении фазы на  $2\pi$ , т. е. через промежутки времени  $\frac{2\pi}{\omega}$ . Другими словами, период  $T$  гармонических колебаний с циклической частотой  $\omega$  равен:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (7)$$

Определим зависимости от времени проекций скорости и ускорения точки, гармонически колеблющейся вдоль оси  $X$  по закону (6).

Согласно определению, проекция на ось  $X$  скорости точки, движущейся вдоль этой оси, в момент  $t$  равна пределу отношения проекции  $\Delta x$  её перемещения за промежуток времени от  $t$  до  $t + \Delta t$  к этому промежутку времени при его стремлении к нулю:

$$v_x(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}.$$

Из курса математики вы знаете, что такой предел является производной функции  $x(t)$  по времени:

$$v_x(t) = \frac{dx}{dt} = \dot{x}. \quad (8)$$

Подставляя уравнение (6) в (8), в соответствии с правилами нахождения производной получаем:

$$v_x(t) = -x_m \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_0). \quad (9)$$

Из выражения (9) видно, что проекция скорости гармонически колеблющейся точки изменяется также по гармоническому закону, причём с той же циклической частотой. Из выражения (9) также следует, что проекция скорости изменяется в пределах от  $-x_m \cdot \omega$  до  $x_m \cdot \omega$ . Другими словами, амплитуда проекции скорости  $v_m = x_m \cdot \omega$ , т. е. численно в  $\omega$  раз отличается от амплитуды колебаний координаты.

Согласно определению, проекция на ось  $x$  ускорения рассматриваемой точки равна производной по времени проекции её скорости на эту ось (или второй производной координаты  $x$  по времени):

$$a_x(t) = \frac{dv}{dt} = \ddot{v} = \ddot{x} = -x_m \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_0). \quad (10)$$

Таким образом, проекция ускорения изменяется также по гармоническому закону, причём с той же циклической частотой, что и координата и проекция скорости. При этом проекция ускорения изменяется в пределах от  $-x_m \cdot \omega^2$  до  $x_m \cdot \omega^2$ . Следовательно, амплитуда проекции ускорения  $a_m = x_m \cdot \omega^2$ , т. е. численно в  $\omega^2$  раз отличается от амплитуды колебаний координаты.

Графики полученных зависимостей  $x(t)$ ,  $v_x(t)$  и  $a_x(t)$  при  $\Phi_0 = 0$  приведены на рис. 121. Видно, что рассматриваемые функции принимают минимальные и максимальные значения в разные моменты времени. Рассмотрим промежутки времени, в течение которых эти функции изменяют свои значения от минимального до максимального. Эти участки графиков изображены на рис. 121 синим цветом.

В начальный момент времени  $t_0 = 0$  минимальное значение  $(-x_m \cdot \omega)$  имеет проекция ускорения. Проекция скорости принимает минимальное значение  $(-x_m \cdot \omega)$  на четверть периода позже. Видно, что и максимального значения проекция скорости достигает на четверть периода позже.

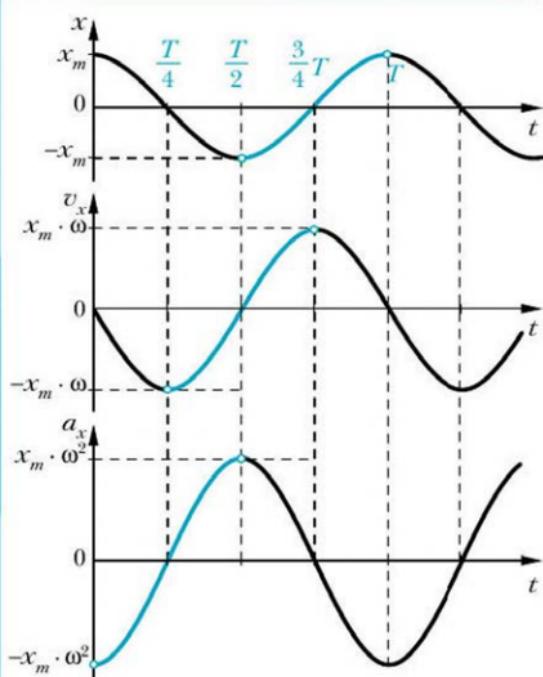


Рис. 121

То же можно сказать и о других соответствующих промежуточных значениях. Поэтому говорят, что *колебания проекции скорости отстают от колебаний проекции ускорения на четверть периода*.

Сравнивая графики  $x(t)$  и  $v_x(t)$ , приходим к выводу, что *колебания координаты отстают от колебаний проекции скорости также на четверть периода*.

Из этого следует, что три рассматриваемые зависимости можно представить в виде трёх гармонических функций, каждая из которых представляет собой, например, косинусоиду. Ясно, что амплитуды этих функций будут различными, их фазы также будут различными.

Изменение времени на четверть периода соответствует изменению фазы на  $\frac{\pi}{2}$ . Поэтому, считая, что зависимость координаты от времени имеет вид (6), функции (9) и (10) можно представить в виде:

$$v_x(t) = x_m \cdot \omega \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \phi_0 + \frac{\pi}{2}\right), \quad (11)$$

$$a_x(t) = x_m \cdot \omega^2 \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \phi_0 + \pi\right). \quad (12)$$

Отметим, что преобразование уравнений (9) и (10) к виду (11) и (12) соответствует известным из тригонометрии формулам приведения.

Соотставление уравнений (6), (11) и (12) позволяет переформулировать выводы, полученные ранее из графиков.

**!** При гармонических колебаниях вдоль координатной оси колебания проекции скорости опережают колебания координаты по фазе на  $\frac{\pi}{2}$ . В свою очередь, колебания проекции ускорения опережают колебания координаты по фазе на  $\pi$ .

Гармонические колебания занимают особое место в физике колебаний. Это обусловлено двумя причинами.

Во-первых, многие реально наблюдаемые в природе колебания являются гармоническими или почти гармоническими. В этом можно убедиться экспериментально. Например, на рис. 122 показаны совершающий колебания пружинный маятник и равномерно движущийся по окружности шарик. Амплитуда колебаний груза равна радиусу окружности. Всю систему освещают параллельным пучком света. При совпадении периода колебаний груза маятника и периода движения шарика, а также их проекций (теней) на экран в начальный момент времени проекции обоих тел будут совпадать и в последующие моменты времени. Это доказывает, что рассматриваемый пружинный маятник колебается гармонически.

Во-вторых, любое периодическое колебание можно представить в виде суммы (суперпозиции) гармонических колебаний с кратными частотами. Это утверждение называют теоремой Фурье

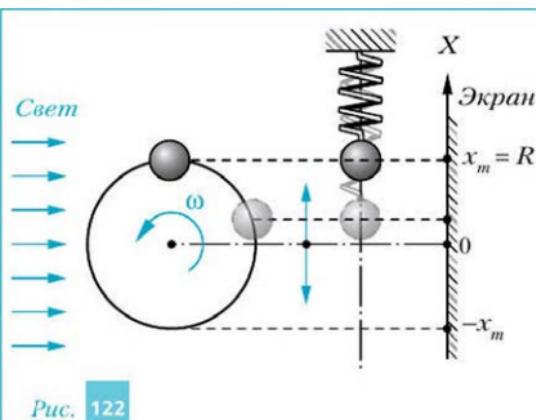


Рис. 122

в честь французского математика и физика Жана Фурье (1768–1830), который сформулировал и доказал эту теорему.

В заключение рассмотрим примеры решения задач.

### Задача 1

Пусть точка совершает гармонические колебания вдоль оси  $X$  с амплитудой  $x_m$  и периодом  $T$ . Определите амплитуды колебаний проекций скорости и ускорения на ось  $X$ .

*Решение.*

Согласно уравнению (7), угловая частота колебаний  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ . Следовательно, согласно уравнениям (11) и (12), искомые амплитуды колебаний проекций скорости и ускорения соответственно равны:

$$v_m = \frac{2\pi}{T} \cdot x_m \text{ и } a_m = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot x_m.$$

### Задача 2

Точка совершает гармонические колебания вдоль оси  $X$  около начала отсчёта. Известно, что закон изменения проекции скорости точки на ось  $X$  имеет вид  $v_x(t) = v_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$ . Определите закон движения этой точки и зависимость проекции её ускорения от времени.

*Решение.*

Согласно (11), амплитуда колебаний  $x_m = \frac{v_m}{\omega}$ . Амплитуду же колебаний проекции ускорения на ось  $X$  определяем, используя соотношение (12):  $a_m = v_m \cdot \omega$ . Поскольку фаза колебаний координаты на  $\frac{\pi}{2}$  меньше фазы колебаний проекции скорости, а фаза колебаний проекции ускорения превышает фазу колебаний проекции скорости на ту же величину, то искомые зависимости имеют вид:

$$x(t) = \frac{v_m}{\omega} \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right); \quad a_x(t) = v_m \cdot \omega \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right).$$



### Задача 3

Колебательная система состоит из насаженного на гладкий горизонтальный стержень шарика и лёгкой пружины, которая одним концом прикреплена к шарику. Другой конец пружины закреплён. Шарик совершает гармонические колебания с периодом  $T$  и амплитудой  $x_m$  (рис. 123, а). Определите, каким станет период колебаний этого шарика, если на расстоянии  $0,5x_m$  от положения его равновесия установить жёсткую стенку так, как показано на рис. 123, б. Удар шарика о стенку считайте абсолютно упругим.

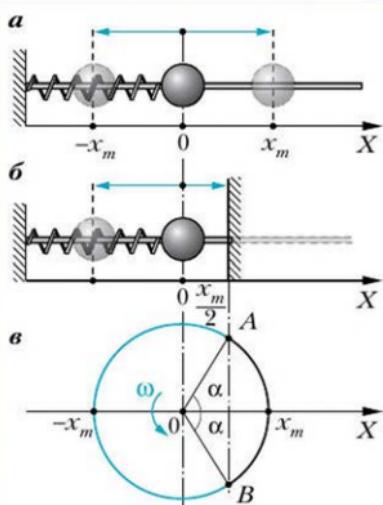


Рис. 123

*Решение.*

Рассмотрим равномерное движение точки по окружности (рис. 123, в) радиусом  $x_m$  с угловой скоростью. Движение проекции точки на ось  $X$  идентично движению шарика при отсутствии стенки.

После появления стенки характер движения шарика изменяется. Как вы знаете, в результате абсолютно упругого удара о стенку направление скорости шарика изменяется на противоположное. При этом модуль скорости остаётся неизменным. Поэтому после удара движение шарика происходит так же, как оно происходило бы и при отсутствии стенки, но уже после того, как шарик прошёл бы точку с координатой  $0,5x_m$  в обратном направлении.

Таким образом, после появления стенки движение шарика в течение време-

мени между ударами идентично движению точки по синей дуге  $AB$  окружности, а удар о жёсткую стенку можно рассматривать как мгновенный «перескок» из точки  $B$  в точку  $A$ . Время движения точки по синей дуге  $AB$  равно:  $\tau = \frac{2\pi - 2\alpha}{\omega}$ . Из условия задачи следует, что  $\cos \alpha = 0,5$ . Поэтому  $\alpha = \frac{\pi}{3}$ , а искомый период равен:

$$\tau = \frac{2\pi - 2\alpha}{\omega} = \frac{2}{3} T.$$



### Вопросы

- 1 Какие колебания называют гармоническими?
- 2 Запишите закон гармонических колебаний.
- 3 Что называют: а) амплитудой гармонических колебаний; б) фазой колебаний; в) начальной фазой колебаний?
- 4 Какую величину называют циклической (круговой) частотой гармонических колебаний?
- 5 Как связан период гармонических колебаний с их циклической частотой?

- 6 Как соотносятся фазы колебаний: а) проекции скорости и координаты; б) проекции скорости и проекции ускорения?
- \*7 Каким точкам графиков на рис. 121 соответствуют моменты: а) максимального отклонения; б) прохождения положения равновесия? Чему равны в эти моменты времени проекции скорости и ускорения?

### Упражнения

1 Точечное тело совершает гармонические колебания вдоль оси  $X$  с периодом  $T$ . Амплитуда колебаний проекции скорости на эту ось равна  $v_m$ . Определите амплитуды колебаний координаты и проекции ускорения на ось  $X$ .

2 Точечное тело совершает гармонические колебания вдоль оси  $X$  около начала отсчёта. Известно, что закон изменения проекции ускорения этого тела на ось  $X$  имеет вид:  $a_x(t) = a_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$ . Определите закон движения этой точки и зависимость проекции её скорости от времени.



#### Для углублённого уровня

3 В колебательной системе, описанной в задаче 3 этого параграфа, жёсткую стенку устанавливают на расстоянии  $0,5 \cdot \sqrt{2}x_m$  от положения равновесия. Каким станет период колебаний?

4 Исследуйте, как изменяются с течением времени проекции на координатную ось  $X$  скорости и центростремительного ускорения точки, которая равномерно движется по окружности с угловой скоростью  $\omega$  (см. рис. 118). Докажите, что полученные зависимости соответствуют уравнениям (9) и (10).

### § 33

### Динамика колебательного движения

Рассмотрим, как можно получить закон движения колебательной системы. Из курса механики вы знаете, что для определения зависимости координат движущегося тела от времени существуют два способа. В первом — *динамическом* — используют законы динамики. Во втором — *энергетическом* — применяют законы изменения или сохранения механической энергии. В этом параграфе мы воспользуемся динамическим способом.

В качестве примера колебательной системы рассмотрим уже знакомый вам пружинный маятник, состоящий из насаженного на гладкий горизонтальный стержень маленького шарика массой  $m$ , который прикреплён к лёгкой пружине жёсткостью  $k$  (рис. 124,  $a$ ). При передаче такой колебательной системе начального запаса энергии (например, при смещении шарика из положения равновесия или приданной ему начальной скорости) в системе начнутся колебания шарика под действием силы упругости пружины. Для получения закона движения шарика воспользуемся стандартной схемой решения задач по динамике.

**Шаг 0. Выбор модели.** Будем считать шарик материальной точкой, а действующие на него силы трения пренебрежимо малыми. В этом случае единственной силой, вызывающей ускорение шарика, является сила упругости пружины.

**Шаг 1. Выбор инерциальной системы отсчёта.** В качестве тела отсчёта выберем стержень, вдоль которого движется шарик. Начало отсчёта поместим в точку, совпадающую с положением равновесия шарика. Координатную ось  $X$  направим параллельно возможным перемещениям колеблющегося тела (вдоль стержня). Отметим, что подобный выбор начала отсчёта и направления координатной оси упрощает решение задач о колебаниях. В частности, при таком выборе системы отсчёта смещение тела в любой момент времени равно его координате.

**Шаги 2–3. Изображение сил на рисунке. Определение проекции на координатную ось возвращающей силы.** В этом шаге колеблющееся тело изображают на рисунке смещённым из положения равновесия. После этого на рисунке изображают действующие на тело силы и определяют сумму этих сил. Затем выясняют, может ли эта сумма выполнять роль возвращающей силы.

Итак, пусть в некоторый произвольный момент времени смещение движущегося шарика равно  $x$  (рис. 124,  $b$ ). Вдоль координатной оси  $X$  на него действует только сила упругости пружины. Поскольку деформация пружины равна смещению  $x$  шарика, то, согласно закону Гука, проекция на ось  $X$  силы упругости пружины равна:

$$F_{\text{упр}} = -k \cdot x. \quad (1)$$

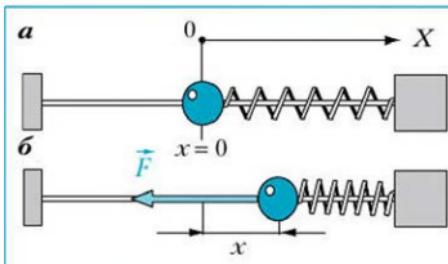


Рис. 124

В результате мы приходим к двум важным выводам:

**!** в пружинном маятнике проекция  $F$  действующей на шарик силы упругости в любой момент времени, во-первых, имеет знак, противоположный смещению, а во-вторых, прямо пропорциональна смещению.

Из первого вывода следует, что сила упругости в любой момент времени направлена противоположно смещению. Значит, сила упругости стремится вернуть тело в положение равновесия, т. е. она является *возвращающей*.

В случае же, если возвращающая сила прямо пропорциональна смещению, то колебания тела будут гармоническими. Докажем это.

**Шаг 4. Запись уравнения движения.** Вдоль оси  $X$  на шарик действует только сила упругости пружины. Поэтому в проекции на эту ось второй закон Ньютона имеет вид:

$$F_{\text{упр}} = m \cdot a. \quad (2)$$

С учётом формулы (1) и того, что  $a = \ddot{x}$ , поделив уравнение (2) на  $m$ , получаем:

$$\ddot{x} = -\frac{k}{m} \cdot x. \quad (3)$$

Решение уравнения движения (3) и будет искомым законом движения  $x(t)$ . Из курса математического анализа вы знаете, что вторая производная косинуса (или синуса) по его аргументу прямо пропорциональна самой функции, взятой с обратным знаком. Там же доказывается, что других функций, обладающих этим свойством, нет. Следовательно, искомый закон движения  $x(t)$  имеет вид, аналогичный соотношению (6) из § 32:

$$x(t) = x_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_0). \quad (4)$$

Таким образом, мы доказали, что шарик пружинного маятника совершает гармонические колебания.

Определим значение циклической частоты  $\omega$ . Подставив выражение (4) в (3), получаем:

$$-x_m \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_0) = -\frac{k}{m} \cdot x_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_0). \quad (5)$$

Полученное соотношение должно выполняться при любых  $t$ . Следовательно, в рассматриваемом случае циклическая частота равна:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (6)$$

Соответственно, период этих колебаний равен:

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (7)$$

Подставив выражение (6) в (4), получаем закон движения пружинного маятника:

$$x(t) = x_m \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t + \phi_0\right). \quad (8)$$

Согласно формуле (11) из § 32, закон изменения проекции скорости в этом случае имеет вид:

$$v_x(t) = x_m \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t + \phi_0 + \frac{\pi}{2}\right). \quad (9)$$



Отметим, что амплитуду колебаний  $x_m$  и начальную фазу  $\phi_0$  можно определить, зная начальные (при  $t_0 = 0$ ) координату и скорость колеблющегося тела.

Пусть, например, при  $t_0 = 0$  координата точки, совершающей колебания по закону (8), равна  $x_0$ , а проекция её скорости равна  $v_0$ . Тогда амплитуду колебаний и начальную фазу определяют из системы двух уравнений, полученных из уравнений (8) и (9) при  $t_0 = 0$ :

$$\begin{cases} x_0 = x_m \cdot \cos \phi_0, \\ v_0 = x_m \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot \cos\left(\phi_0 + \frac{\pi}{2}\right). \end{cases} \quad (10)$$

В заключение рассмотрим пример решения динамическим способом ещё одной задачи о механических колебаниях.

### Задача

К оси невесомого блока подвешен груз массой  $m$ . Через блок перекинута нить, один конец которой прикреплён непосредственно к потолку, а другой — к лёгкой пружине жёсткостью  $k$  (рис. 125, *a*). Груз немного оттягивают вниз и отпускают, после чего он начинает гармонически колебаться. Определите период  $T$  этих колебаний.

#### Решение.

**Шаг 0. Выбор модели.** Будем считать все нити невесомыми и нерастяжимыми, а груз — материальной точкой. Трением в системе пренебрежём.

**Шаг 1. Инерциальную систему отсчёта связем с потолком, направив координатную ось  $X$  вертикально вниз. Начало отсчёта на оси  $X$  выберем так, чтобы оно совпадало с проекцией положения равновесия груза на эту ось.**

### Шаги 2–3. Определение проекции возвращающей силы.

Рассмотрим колебательную систему в положении равновесия, когда действующая на груз сила тяжести  $m \cdot \vec{g}$  уравновешивается суммой  $\vec{F}_1$  сил натяжения прикреплённых к грузу нитей (см. рис. 125, а). Поскольку эти нити невесомы, то сумма сил, с которыми они действуют на блок, равна  $-\vec{F}_1$ . Блок невесом. Поэтому сумма действующих на него сил в любой момент времени равна нулю. Следовательно, в проекции на ось  $X$  получаем:  $F_1 - 2F_2 = 0$ , где  $F_2$  – модуль силы натяжения нити, переброшенной через блок. Пружина в положении равновесия деформирована (растянута) силой натяжения прикреплённой к ней нити. Поэтому растяжение пружины  $\Delta l_0 = \frac{F_2}{k}$ . Из сказанного следует, что в положении равновесия выполняются равенства:

$$m \cdot g = F_1 = 2F_2 = 2k \cdot \Delta l_0. \quad (11)$$

Пусть теперь система совершает колебания. Рассмотрим момент времени, в который смещение груза равно  $x$  (рис. 125, б). В этот момент ось блока по сравнению с положением равновесия смещена также на  $x$ . Поэтому растяжение пружины увеличится на  $2x$  и будет равно:  $\Delta l = \Delta l_0 + 2x$ . Следовательно, сила упругости пружины равна  $k \cdot (\Delta l_0 + 2x)$ . Поэтому модуль  $\vec{F}'_2$  силы натяжения нити, соединённой с пружиной, равен:

$$F'_2 = k \cdot (\Delta l_0 + 2x) = F_2 + 2k \cdot x. \quad (12)$$

Из сказанного, а также из второго закона Ньютона для невесомого блока следует, что модуль  $\vec{F}'_1$  суммы сил натяжения нитей, соединяющих блок с грузом, равен:

$$F'_1 = 2F'_2 = 2(F_2 + 2k \cdot x) = 2F_2 + 4k \cdot x. \quad (13)$$

Таким образом, проекция на ось  $X$  возвращающей силы – суммы всех сил, действующих на смещённый груз, с учётом формул (11) и (13) равна:

$$m \cdot g - F'_1 = m \cdot g - 2F_2 - 4k \cdot x = m \cdot g - F_1 - 4k \cdot x = -4k \cdot x. \quad (14)$$

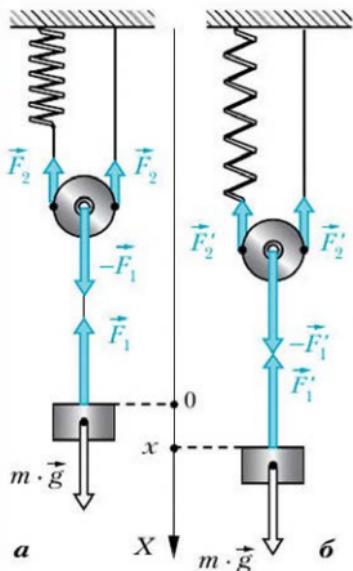


Рис. 125

**Шаг 4. Запись уравнения движения.** С учётом выражения (14) уравнение движения (проекция второго закона Ньютона на ось  $X$ ) для груза имеет вид:

$$-4k \cdot x = m \cdot \ddot{x}. \quad (15)$$

Решением этого уравнения является закон гармонических колебаний:

$$x(t) = x_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_0), \quad (16)$$

$$\text{где } \omega = \sqrt{\frac{4k}{m}} = 2\sqrt{\frac{k}{m}}.$$

*Ответ:* период колебаний равен:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (17)$$

Исследуем, при каком начальном смещении груза его колебания будут гармоническими.

Из условия следует, что если колебания будут гармоническими, то их амплитуда будет равна начальному смещению груза  $x_m$ , а начальная фаза будет равна нулю:  $\phi_0 = 0$ . Другими словами, закон движения груза имеет вид:

$$x(t) = x_m \cdot \cos(\omega \cdot t). \quad (18)$$

Следовательно, проекция ускорения груза на ось  $X$  в момент времени  $t$ :

$$a_x(t) = \ddot{x} = -x_m \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t). \quad (19)$$

Поэтому, согласно второму закону Ньютона, проекция  $F_x(t)$  на ось  $X$  суммы всех действующих на груз сил равна:

$$F_x(t) = m \cdot a_x(t) = -m \cdot x_m \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t). \quad (20)$$

Из формулы (20) следует, что проекция  $F_x(t)$  гармонически изменяется в пределах от  $-m \cdot x_m \cdot \omega^2$  до  $m \cdot x_m \cdot \omega^2$ . При этом максимальных значений модуль  $|F_x(t)|$  достигает в крайних (верхней и нижней) точках смещения. В любой момент времени проекция  $F_x(t)$  равна сумме проекций силы тяжести  $m \cdot \vec{g}$  и суммы  $\bar{F}_x(t)$  сил натяжения прикреплённых к грузу нитей:

$$F = m \cdot g - F_x(t). \quad (21)$$

Отметим, что проекция  $m \cdot g > 0$ , т. е. всегда положительна и не изменяется с течением времени. Напротив, проекция суммы сил натяжения всегда отрицательна (поскольку нить может только тянуть груз, но не толкать его) и изменяется с течением времени. Из сказанного следует, что

## ■ Колебания и волны

выражение (20) может принимать сколь угодно большие по модулю отрицательные значения, а положительные значения  $F_x(t)$  не могут превышать  $m \cdot g$ . Поэтому должно выполняться условие:

$$m \cdot x_m \cdot \omega^2 \leq m \cdot g. \quad (22)$$

Из неравенства (22) с учётом (17) получаем, что в рассматриваемой системе гармонические колебания возможны только в том случае, если амплитуда  $x_m$  удовлетворяет условию:

$$x_m \leq \frac{g}{\omega^2} = \frac{m \cdot g}{4k}. \quad (23)$$



### Вопросы

- 1 Как выбирают начало отсчёта и куда направляют координатную ось при решении задач о гармонических колебаниях?
- 2 Каким свойствам должна удовлетворять проекция суммы сил, действующих на тело, чтобы его колебания были гармоническими?
- 3 Как зависит период колебаний пружинного маятника от массы груза и жёсткости пружины?

### Упражнения

- 1 Проанализируйте формулы (6) и (7), ответив на вопрос, как изменяются  $\omega$  и  $T$  при изменении  $m$  и  $k$ .
- 2 Период колебаний пружинного маятника  $T = 0,5$  с, а масса его груза  $m = 0,2$  кг. Определите жёсткость пружины этого маятника.
- 3 Амплитуда колебаний пружинного маятника из упражнения 2 равна  $x_m = 10$  см. Определите максимальные значения, которые принимают кинетическая и потенциальная энергии колебательной системы. Считайте, что в положении равновесия потенциальная энергия колебательной системы равна нулю.

### Для углублённого уровня

- ✓ 4 К невесомой пружине жёсткостью  $k$  подвешена за конец однородная тонкая верёвка массой  $M$ . Длина верёвки равна  $L$ . После быстрого отрезания нижней части верёвки длиной  $n \cdot L$  ( $n < 1$ ) оставшаяся её часть начинает совершать колебания. При каком максимальном значении  $n$  эти колебания будут гармоническими для всех частей оставшейся на пружине верёвки?

§ 34

## Преобразование энергии при механических колебаниях. Математический маятник

Свободные колебания происходят благодаря начальному запасу механической энергии колебательной системы. Рассмотрим колебательное движение с точки зрения преобразования кинетической и потенциальной энергий с течением времени. Это позволит более полно понять природу колебательных процессов.

Вернёмся к рассмотренному в предыдущем параграфе пружинному маятнику. Будем считать, что сумма работ сил трения и внешних сил равна нулю. Тогда, как следует из закона сохранения механической энергии, механическая энергия  $E$  колебательной системы с течением времени не изменяется:

$$E = \text{const}. \quad (1)$$

Включим часы в момент времени, когда смещение груза от положения равновесия максимально и равно  $x_m$ . В этот момент скорость груза равна нулю. Поэтому кинетическая энергия системы равна нулю. Следовательно, механическая энергия системы равна потенциальной энергии максимально деформированной пружины:

$$E = \Pi_0 = \frac{k \cdot x_m^2}{2}.$$

Теперь рассмотрим произвольный момент времени  $t$ , когда смещение груза равно  $x$ , а модуль его скорости равен  $v$ . Механическая энергия  $E$  колебательной системы в этот момент может быть записана в виде суммы потенциальной энергии  $\Pi$  деформированной пружины и кинетической энергии  $K$  движения груза:

$$E = \Pi + K = \frac{k \cdot x^2}{2} + \frac{m \cdot v^2}{2}. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) следует, что если уменьшается потенциальная энергия, то кинетическая энергия увеличивается, и наоборот. Например, при движении груза из крайнего положения к положению равновесия потенциальная энергия системы уменьшается (так как уменьшается смещение, равное деформации пружины). Следовательно, согласно уравнению (2), при этом будет увеличиваться кинетическая энергия груза. Другими словами, модуль скорости груза будет возрастать.

В момент прохождения грузом положения равновесия (когда  $x = 0$ ) пружина не деформирована, т. е. потенциальная энергия системы минимальна

(равна нулю). При этом кинетическая энергия максимальна и равна механической энергии системы:

$$E = H + K = 0 + \frac{m \cdot v_m^2}{2} = \frac{m \cdot v_m^2}{2}, \quad (3)$$

где  $v_m$  — модуль максимальной скорости груза (т. е. модуль скорости при прохождении грузом положения равновесия).

Подведём итог.

**!** Механическая энергия совершающего гармонические колебания пружинного маятника не изменяется с течением времени и может быть рассчитана по формулам:

$$E = \frac{k \cdot x^2}{2} + \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{k \cdot x_m^2}{2} = \frac{m \cdot v_m^2}{2}. \quad (4)$$

Как уже отмечалось, закон движения любой механической системы может быть получен из закона сохранения (или изменения) механической энергии. Такой способ определения зависимости координат от времени называют **энергетическим**. Применим этот способ к маятнику.

**Физическим маятником** называют подвешенное на нити или закреплённое на оси тело, которое может совершать колебания под действием силы тяжести.

Пример физического маятника приведён на рис. 126.

Если масса нити много меньше массы подвешенного на ней тела, размеры этого тела много меньше длины нити, а изменения этой длины в процессе движения пренебрежимо малы, то такой маятник можно считать **математическим маятником**.

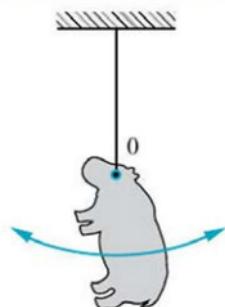


Рис. 126

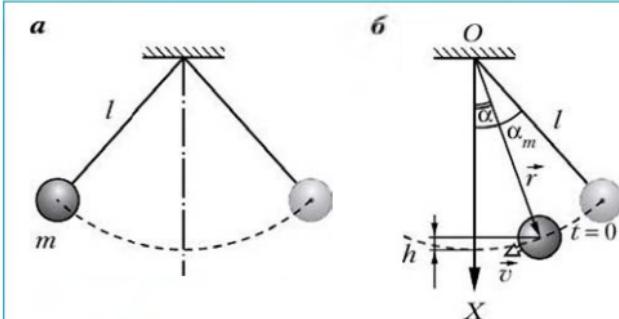


Рис. 127

**Математическим маятником называют материальную точку, совершающую колебания на невесомой нерастяжимой нити, другой конец которой закреплён.**

Пусть длина нити маятника равна  $l$ , а масса подвешенного на ней маленького шарика равна  $m$ . Отклоним шарик от положения равновесия на угол  $\alpha_m$  и отпустим его (рис. 127, *a*). В результате начнутся колебания. Будем считать рассматриваемую колебательную систему математическим маятником.

Шарик в процессе колебаний всё время движется по дуге окружности. Радиус этой окружности равен длине нити  $l$ , а центр окружности совпадает с точкой  $O$ , в которой нить закреплена. Положение шарика в пространстве будем описывать с помощью измеряемого в радианах угла  $\alpha$  между радиусом-вектором  $\vec{r}$ , направленным от точки  $O$  к шарику, и осью  $X$ , направленной от точки  $O$  вертикально вниз (рис. 127, *b*). В этом случае искомый закон движения шарика представляет собой зависимость  $\alpha(t)$ .

Отметим, что в положении равновесия  $\alpha = 0$ .

Будем считать, что в положении равновесия потенциальная энергия колебательной системы — потенциальная энергия взаимодействия шарика с Землёй — равна нулю. Рассмотрим произвольный момент времени  $t$ , когда шарик отклонён от положения равновесия на угол  $\alpha$ , а его скорость равна  $\vec{v}$ . Потенциальная энергия системы в этот момент времени будет равна:

$$\Pi = m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot (l - l \cdot \cos \alpha) = m \cdot g \cdot l \cdot (1 - \cos \alpha). \quad (5)$$

Угловая скорость движения шарика по дуге окружности равна производной угла  $\alpha$  по времени —  $\dot{\alpha}$ . Поэтому модуль  $v$  скорости шарика равен произведению радиуса  $l$  окружности на модуль этой производной в рассматриваемый момент времени:  $v = l \cdot |\dot{\alpha}|$ . Следовательно, кинетическая энергия движения шарика  $K = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{m \cdot l^2 \cdot \dot{\alpha}^2}{2}$ . Если сумма работ сил трения и внешних сил равна нулю, то механическая энергия колебательной системы не изменяется с течением времени. Следовательно,

$$E = \Pi + K = m \cdot g \cdot l \cdot (1 - \cos \alpha) + \frac{m \cdot l^2 \cdot \dot{\alpha}^2}{2} = \text{const}. \quad (6)$$

Вычислим производные по времени от левой и правой частей выражения (6). Поскольку производная от постоянной равна нулю, а угол  $\alpha$  изменяется с течением времени, т. е. представляет собой искомую функцию  $\alpha(t)$ , то

$$m \cdot g \cdot l \cdot (\sin \alpha) \cdot \dot{\alpha} + \frac{m \cdot l^2}{2} \cdot 2\dot{\alpha} \cdot \ddot{\alpha} = 0. \quad (7)$$

Разделив уравнение (7) на  $m$ ,  $l$  и  $\ddot{\alpha}$ , получаем:

$$\ddot{\alpha} + \frac{g}{l} \cdot \sin \alpha = 0. \quad (8)$$

Если амплитуда колебаний математического маятника достаточно мала ( $\alpha_m \leq 0,1$ ), то  $\sin \alpha$  можно считать приблизительно равным  $\alpha$ . В этом случае уравнение (8) принимает вид:

$$\ddot{\alpha} + \frac{g}{l} \cdot \alpha = 0. \quad (9)$$

Полученное уравнение представляет собой уравнение гармонических колебаний. Решение этого уравнения позволяет записать закон движения математического маятника.

**!** Закон движения математического маятника имеет вид:

$$\alpha(t) = \alpha_m \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{g}{l}} \cdot t + \varphi_0\right) = \alpha_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0), \quad (10)$$

где  $\alpha_m$  — амплитуда колебаний ( $\alpha_m \leq 0,1$ ),  $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$  — циклическая частота,  $\varphi_0$  — начальная фаза.

Из уравнения (10) следует, что период колебаний математического маятника равен:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (11)$$



Рассмотрим ещё один пример расчёта периода колебаний системы энергетическим способом.

### Задача

В вертикально расположенной закреплённой U-образной трубке с площадью поперечного сечения  $S$  налита жидкость массой  $M$  и плотностью  $\rho$  (рис. 128,  $a$ ). Пренебрегая трением, определите период малых колебаний этой жидкости после вывода её из положения равновесия.

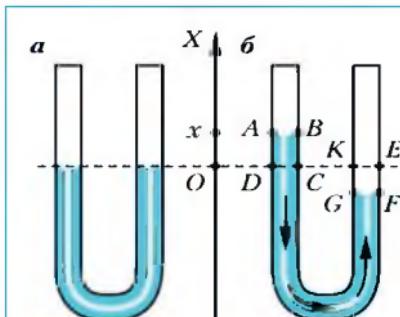


Рис. 128

*Решение.*

Будем считать жидкость несжимаемой. Свяжем систему отсчёта с трубкой. Координатную ось  $X$  направим вертикально вверх. Начало отсчёта  $O$  на этой оси поместим в точку, соответствующую уровню жидкости в положении равновесия.

Рассмотрим произвольный момент времени  $t$ , когда уровень жидкости в левом колене трубы смешён от положения равновесия на  $x$  (рис. 128, б), а модуль скорости движения уровня жидкости равен  $v$ . Будем считать, что потенциальная энергия взаимодействия жидкости с Землёй в положении равновесия равна нулю. Определим, чему равна эта энергия в рассматриваемый момент  $t$ . Для этого сравним положения жидкости в трубке. С точки зрения изменения потенциальной энергии системы можно считать, что жидкость в объёме  $CDFG$  не изменила своего положения при смещении уровня на  $x$ , а объём  $KEFG$  при этом «переместился» в объём  $ABCD$ . Таким образом, потенциальная энергия системы в момент  $t$  равна изменению потенциальной энергии при перемещении объёма  $KEFG$  в равный ему объём  $ABCD$ , т. е. при подъёме объёма жидкости  $V = S \cdot x$  на высоту  $x$ . Поэтому потенциальная энергия системы в рассматриваемый момент  $t$  равна:

$$H = m \cdot g \cdot h = \rho \cdot V \cdot g \cdot x = \rho \cdot S \cdot g \cdot x^2.$$

При сделанных допущениях модули скоростей всех частей жидкости в любой момент времени равны друг другу и равны модулю скорости движения уровня жидкости, т. е.  $v = |\dot{x}|$ . Следовательно, в рассматриваемый момент времени кинетическая энергия жидкости, равная сумме кинетических энергий всех её частей, может быть рассчитана по формуле  $K = \frac{M \cdot v^2}{2} = \frac{M \cdot \dot{x}^2}{2}$ .

Согласно закону сохранения механической энергии, имеем:

$$E = H + K = \rho \cdot S \cdot g \cdot x^2 + \frac{M \cdot \dot{x}^2}{2} = \text{const.} \quad (12)$$

Вычисляя производные по времени от левой и правой частей уравнения (12), получаем:

$$\rho \cdot S \cdot g \cdot 2x \cdot \dot{x} + \frac{M}{2} \cdot 2\dot{x} \cdot \ddot{x} = 0.$$

После сокращения получаем:

$$\ddot{x} + \frac{2\rho \cdot S \cdot g}{M} \cdot x = 0. \quad (13)$$

Из уравнения (13) следует, что координата  $x$  уровня жидкости в левом колене трубы изменяется по гармоническому закону:

## ■ Колебания и волны

$$x(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0),$$

где циклическая частота колебаний  $\omega = \sqrt{\frac{2\rho \cdot S \cdot g}{M}}$ .

Следовательно, искомый период колебаний равен:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{M}{2\rho \cdot S \cdot g}}.$$



### Вопросы

- 1 Изменяется ли механическая энергия колебательной системы при свободных гармонических колебаниях?
- 2 Опишите, как изменяются с течением времени потенциальная и кинетическая энергии при гармонических колебаниях: а) пружинного маятника; б) математического маятника.
- 3 Как зависит период колебаний математического маятника от длины нити, массы груза, ускорения свободного падения?

### Упражнения

- 1 Проанализируйте формулы (10) и (11).
- 2 Период колебаний математического маятника  $T = 0,25$  с. Определите длину его нити. Модуль ускорения свободного падения считайте равным  $10 \text{ м/с}^2$ .
- 3 Определите число колебаний математического маятника с длиной нити  $l = 1$  м за время  $t = 10$  мин.
- 4 Постройте графики зависимости от времени потенциальной, кинетической и полной механической энергий пружинного маятника, совершающего гармонические колебания.



### Для углублённого уровня

- 5 К вершине прямого кругового конуса, ось которого вертикальна, на лёгкой нерастяжимой нити длиной  $l = 5$  м изнутри подвесили маленький шарик. Затем резким ударом шарику сообщили скорость в горизонтальном направлении. Модуль этой скорости  $v_m = \frac{\sqrt{2}\pi}{9}$  м/с. При отклонении нити от вертикали на угол  $\beta = \frac{\pi}{90}$  происходит упругий удар шарика о конус. Пренебрегая трением, оцените период  $T$  колебаний шарика.

## § 35 Затухающие и вынужденные колебания. Резонанс

В предыдущих параграфах рассматривались колебания, при которых сумма работ сил трения и внешних сил в системах равняется нулю. В реальных экспериментах, как правило, суммарная работа сил трения и внешних сил отлична от нуля. Это приводит к тому, что с течением времени механическая энергия  $E$  колебательной системы изменяется по закону:

$$E(t) = E_0 + A_{\text{тр}} + A_{\text{вн}}, \quad (1)$$

где  $E_0$  – начальный запас энергии в колебательной системе,  $A_{\text{тр}}$  и  $A_{\text{вн}}$  – работа соответственно сил трения и внешних сил за промежуток времени от начала колебаний до момента  $t$ .

Если суммарная работа сил трения и внешних сил отрицательна ( $A_{\text{тр}} + A_{\text{вн}} < 0$ ), то механическая энергия колебательной системы с течением времени будет уменьшаться. В результате будет уменьшаться модуль максимального смещения при каждом последующем колебании. Такие колебания называют *затухающими*. Понятно, что при затухающих колебаниях с течением времени будет уменьшаться и модуль скорости, с которой колеблющееся тело проходит положение равновесия. Чем больше по модулю силы трения и внешние силы, препятствующие движению, тем быстрее будут происходить эти уменьшения. Примерами таких колебаний являются движения грузов пружинных маятников в воздухе (рис. 129, а) и в воде (рис. 129, б). Графики зависимости смещения  $x$  этих грузов от времени  $t$  приведены на рис. 130, а и б.

Суммарная работа сил трения и внешних сил может быть и положительной ( $A_{\text{тр}} + A_{\text{вн}} > 0$ ). В этом случае механическая энергия колебательной системы с течением времени будет увеличиваться. В результате при каждом последующем колебании будут увеличиваться модуль максимального смещения и модуль максимальной скорости колеблющегося тела. Для реализации такой ситуации необходимо, чтобы внешние силы совершали положительную работу, т. е. воздействовали на колебательную систему в соответствующие моменты в нужных направлениях.

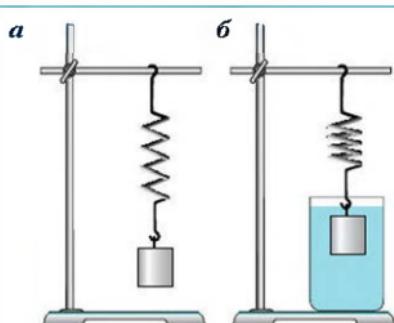


Рис. 129

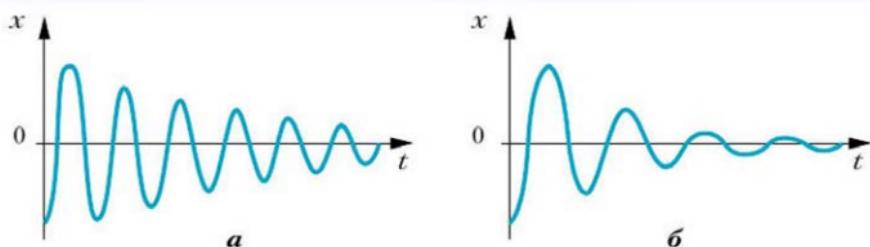


Рис. 130

Пример такого воздействия знаком каждому. Раскачивая качели, вы в определённые моменты времени толкаете их в направлении движения, т. е. совершаеите положительную работу. Если эта работа за период колебаний больше модуля отрицательной работы сил трения, то амплитуда колебаний будет возрастать.

**Колебания, которые происходят под действием изменяющейся со временем внешней силы, называют вынужденными.**

Если суммарная работа сил трения и внешних сил за каждый период равна нулю ( $A_{\text{тр}} + A_{\text{вн}} = 0$ ), то механическая энергия колебательной системы за период не изменяется. В этом случае работа внешних сил компенсирует потери энергии колебательной системы, обусловленные трением. В результате амплитуда колебаний остаётся постоянной. Такие колебания называют *установившимися вынужденными колебаниями*.

Чтобы такие колебания были возможны, на колеблющееся тело должна действовать периодически изменяющаяся внешняя сила, совершающая положительную работу против сил трения. Эту силу обычно называют *вынуждающей силой*. Именно установившиеся вынужденные колебания представляют особый интерес.

Рассмотрим пример реализации таких колебаний в конкретной системе. Обратимся к пружинному маятнику, груз которого погружен в воду (рис. 131). При отсутствии вынуждающей силы колебания в такой системе затухают из-за вязкого трения, тормозящего движение груза (так, как это происходит в системе, изображённой на рис. 129). Ситуация изменится, если груз изготовить из ферромагнитного материала, а под сосудом поместить электромагнит, который будет действовать на груз с периодически изменяющейся вынуждающей силой. Пусть проекция этой силы на координатную ось  $X$  изменяется по гармоническому закону:

$$F_x(t) = F_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0). \quad (2)$$

После включения электромагнита первоначально покоявшийся груз начнёт раскачиваться. Пока сумма работ вынуждающей силы и сил трения над грузом за каждое колебание будет положительной ( $A_{\text{тр}} + A_{\text{ex}} > 0$ ), энергия системы будет увеличиваться. Соответственно, при каждом колебании будет увеличиваться и амплитуда колебаний груза, и модуль амплитуды скорости. В результате с течением времени будет увеличиваться модуль отрицательной работы сил трения за каждое колебание. Наступит момент, когда сумма работ вынуждающей силы и сил трения за период станет равной нулю ( $A_{\text{тр}} + A_{\text{ex}} = 0$ ). После этого амплитуда колебаний перестанет изменяться: в системе установятся вынужденные колебания.

Обратим внимание на важные свойства установившихся вынужденных колебаний (подтверждённые экспериментально).



Рис. 131

Получение установившихся вынужденных колебаний в колебательной системе с вязким трением

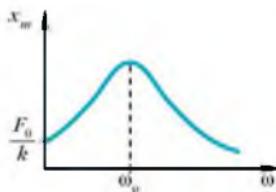


Во-первых, частота установившихся вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы. Во-вторых, амплитуда  $x_m$  установившихся вынужденных колебаний зависит от циклической частоты  $\omega$  вынуждающей силы.

Зависимость  $x_m(\omega)$  называют *амплитудно-частотной характеристикой* (АЧХ) данной колебательной системы.

На рис. 132 приведён экспериментально полученный график зависимости  $x_m(\omega)$  для рассмотренного выше пружинного маятника, груз которого колеблется в воде.

Проведём анализ этого графика. При малых циклических частотах  $\omega$  (в случаях, когда вынуждающая сила изменяется по закону (2) очень медленно) амплитуда колебаний стремится к конкретному значению — отношению



**Рис. 132** Амплитудно-частотная характеристика колебательной системы (пружинного маятника) с вязким трением

При увеличении циклической частоты  $\omega$  вынуждающей силы амплитуда  $x_m$  установившихся вынужденных колебаний увеличивается и достигает максимума при некоторой частоте  $\omega_p$ . При дальнейшем увеличении  $\omega$  амплитуда  $x_m$  уменьшается и стремится к нулю при стремлении  $\omega$  к большим значениям.

Последний результат легко объяснить с динамической точки зрения. Действительно, при большой частоте вынуждающей силы груз из-за своей инертности не успевает существенно смеяться за тот очень малый промежуток времени, в течение которого вынуждающая сила действует на него только в одном направлении. После этого промежутка времени сила тянет груз уже в противоположную сторону. В результате груз как бы «дрожит на месте» и амплитуда его колебаний весьма незначительна.



Особый интерес (в том числе практический) представляет наибольшее значение амплитуды на графике АЧХ.

**Явление достижения амплитудой установившихся вынужденных колебаний максимального значения при приближении циклической частоты вынуждающей силы к некоторому значению называют резонансом.**



Отметим, что в некоторых колебательных системах при резонансе может наблюдаться не максимум, а минимум амплитуды исследуемой величины. Максимальные или минимальные значения величины называют **экстремальными** значениями.



Частоту, при которой наблюдается экстремум АЧХ, называют **резонансной частотой** и обозначают через  $\omega_p$ .

Отметим, что вид АЧХ колебательной системы зависит от трения в этой системе (рис. 133). Чем меньше трение в системе, тем сильнее проявляется возрастание амплитуды установившихся вынужденных колебаний при приближении циклической частоты вынуждающей силы к  $\omega_p$ . Говорят, что при малом трении резонанс «острый», а при большом — «тупой».

Отметим также, что при уменьшении вязкого трения в колебательной системе резонансная частота  $\omega_p$  увеличивается и стремится к значению циклической частоты, которую колебательная система имела бы при отсутствии внешних сил и сил трения. Например, в случае пружинного маятника при стремлении вязкого трения к нулю циклическая частота  $\omega_p$  стремится к значению  $\sqrt{\frac{k}{m}}$ , где  $k$  — жесткость пружины, а  $m$  — масса груза.

Обратим особое внимание на то, что при малом трении в колебательной системе, даже при небольшой амплитуде  $F_0$  вынуждающей силы, амплитуда  $x_m(\omega)$  установившихся колебаний может быть очень большой. Для этого необходимо, чтобы после начала действия вынуждающей силы сумма её работы и работы сил трения была хотя бы немного больше нуля ( $A_{tp} + A_{ex} > 0$ ). Тогда энергия системы за каждое колебание будет возрастать на малую положительную величину. В результате увеличения энергии будет увеличиваться и амплитуда колебаний. Это будет происходить до тех пор, пока увеличивающаяся по модулю с ростом амплитуды отрицательная работа сил трения не начнёт компенсировать положительную работу вынуждающей силы за каждый период. Если трение в системе мало, то к моменту установления колебаний их амплитуда может возрасти до очень больших значений. Правда, для этого потребуется значительный промежуток времени. Теоретически в случае, когда трение в системе стремится к нулю, система под действием вынуждающей силы может «раскачаться»

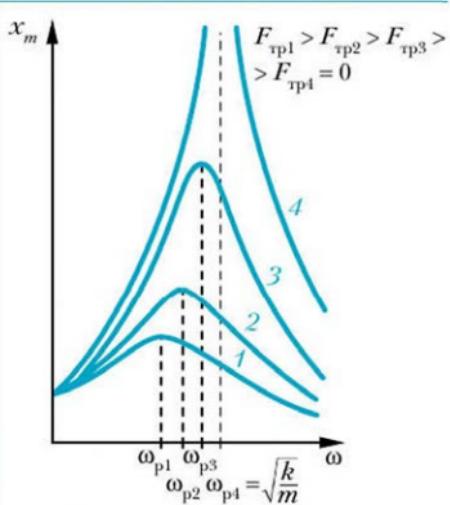


Рис. 133

до бесконечно большой амплитуды (кривая 4 на рис. 133). Однако в реальности при больших амплитудах силы упругости, обусловленные большими деформациями, уже не описываются законом Гука, а отклонения грузов маятников нельзя считать малыми. Поэтому такие колебания перестают быть гармоническими. Кроме того, большие деформации могут привести к разрушению колебательной системы.

В заключение отметим, что резонанс можно объяснить с энергетической точки зрения. Поскольку  $\omega_p$  близка к собственной частоте системы, то при резонансе направление вынуждающей силы в течение большей части периода совпадает с направлением скорости тела. В результате вынуждающая сила в течение большей части периода совершает положительную работу. Если же собственная частота колебательной системы и частота вынуждающей силы существенно различаются, то вынуждающая сила совершает положительную работу лишь в течение части периода, в другой ее части она совершает отрицательную работу (вместе с силой трения препятствует движению колеблющегося тела). Именно по этой причине энергия колебательной системы, а следовательно, и амплитуда установившихся вынужденных колебаний будут тем меньше, чем больше циклическая частота  $\omega$  вынуждающей силы будет отличаться от резонансной частоты  $\omega_p$ .

### Вопросы

- 1 Какие колебания называют: а) затухающими; б) вынужденными; в) установившимися вынужденными колебаниями?
- 2 Какую силу называют вынуждающей силой?
- 3 Какие свойства установившихся вынужденных колебаний вы знаете?
- 4 Как называют зависимость амплитуды установившихся вынужденных колебаний от циклической частоты вынуждающей силы?



### Для углублённого уровня

- 5 Какое явление называют резонансом?
- 6 Чему равна амплитуда установившихся колебаний, когда вынуждающая сила изменяется: а) очень медленно; б) очень быстро?
- 7 Что называют резонансной частотой?
- 8 Как изменяется резонансная частота колебательной системы с уменьшением вязкого трения?
- 9 Как объяснить явление резонанса с энергетической точки зрения?
- 10 Почему войсковым частям, например колонне солдат, запрещают переходить мосты, маршируя в ногу?



Для углублённого уровня



§ 36

## Метод векторных диаграмм

Обратим внимание на то, что при рассмотрении вынужденных колебаний различают *резонанс смещения* и *резонанс скорости*. Это обусловлено тем, что максимальные значения амплитуды смещения и амплитуды скорости в общем случае достигаются при различных частотах вынуждающей силы.

**Начиём с резонанса смещения.** Рассмотрим динамику установившихся вынужденных колебаний груза пружинного маятника под действием гармонически изменяющейся вынуждающей силы со стороны электромагнита (см. рис. 131). Пусть  $\Delta l_0$  — деформация пружины в положении равновесия, а  $x$  — смещение груза от положения равновесия в рассматриваемый момент времени. Тогда сумма действующих на груз маятника силы тяжести  $m \cdot \bar{g}$ , силы Архимеда  $\bar{F}_A$  и силы упругости  $\bar{F}_{\text{упр}}$  пружины будет выполнять роль *возвращающей силы*. Проекция этой силы на ось  $X$  в рассматриваемый момент времени равна:

$$m \cdot g - F_A - k \cdot (\Delta l_0 + x) = -k \cdot x. \quad (1)$$

На движущийся в жидкости груз действует также сила вязкого трения  $\bar{F}_{\text{тр}}$ . Эта сила направлена противоположно скорости груза. Будем считать, что амплитуда скорости груза невелика. В этом случае модуль силы трения можно считать прямо пропорциональным модулю скорости. Поэтому проекция этой силы на ось  $X$  в любой момент времени равна:

$$-\beta \cdot v_x = -\beta \cdot \dot{x}, \quad (2)$$

где  $\beta$  — постоянная положительная величина, которую называют *коэффициентом вязкого трения*.

Пусть проекция на ось  $X$  вынуждающей силы изменяется с течением времени по закону:  $F_x(t) = F_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi)$ . Тогда второй закон Ньютона для груза массой  $m$  в проекции на ось  $X$  примет вид:

$$m \cdot \ddot{x} = -k \cdot x - \beta \cdot \dot{x} + F_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi). \quad (3)$$

Из предыдущего параграфа вы знаете, что циклическая частота установившихся вынужденных колебаний равна циклической частоте вынуждающей силы. Поэтому решение уравнения (3) может быть записано в виде:

$$x(t) = x_m \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (4)$$

Определим амплитуду  $x_m$  в уравнении (4) и начальную фазу  $\varphi$  вынуждающей силы. Для этого перепишем уравнение (3) в виде:

$$k \cdot x + \beta \cdot \dot{x} + m \cdot \ddot{x} = F_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi). \quad (5)$$

Воспользуемся уравнением (4), чтобы определить, как изменяются с течением времени проекции скорости  $\dot{x}$  и ускорения  $\ddot{x}$  на ось  $X$ . Это позволит записать слагаемые левой части уравнения (5) в виде:

$$k \cdot x = k \cdot x_m \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (6)$$

$$\beta \cdot \dot{x} = \beta \cdot x_m \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (7)$$

$$m \cdot \ddot{x} = -m \cdot x_m \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (8)$$

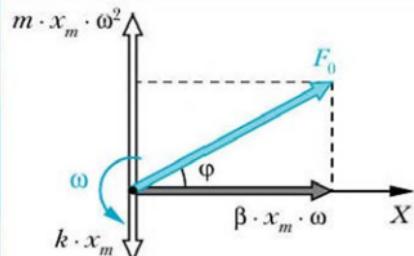


Рис. 134 Метод векторных диаграмм

ответствующего колебания. Обратим внимание на то, что в начальный момент времени ( $t_0 = 0$ ) вращающиеся радиусы-векторы занимают положение, показанное на рис. 134. Такое расположение векторов обусловлено тем, что колебания (6)–(8) описываются соответствующими тригонометрическими функциями ( $\sin$ ,  $\cos$  и  $-\sin$ ). Другими словами, эти колебания имеют разные начальные фазы. Видно, что проекция скорости опережает по фазе смещение на  $\pi/2$ . В свою очередь, проекция ускорения опережает по фазе проекцию скорости также на  $\pi/2$ .

В любой момент времени сумма проекций этих трёх радиусов-векторов, равная сумме левой части уравнения (5), равна проекции суммы этих векторов. Следовательно, согласно уравнению (5), в любой момент времени (включая начальный) сумма этих векторов по модулю равна  $F_0$  и составляет угол  $\phi$  с радиусом-вектором  $\beta \cdot x_m \cdot \omega$  на рис. 134. Применяя теорему Пифагора для прямоугольного треугольника, образованного гипотенузой  $F_0$  и катетом  $\beta \cdot x_m \cdot \omega$ , получаем:

$$F_0^2 = (m \cdot x_m \cdot \omega^2 - k \cdot x_m)^2 + (\beta \cdot x_m \cdot \omega)^2. \quad (9)$$

Выражая  $x_m$  из уравнения (9), получаем зависимость амплитуды установившихся вынужденных колебаний от частоты  $\omega$  вынуждающей силы — амплитудно-частотную характеристику (АЧХ):

$$x_m = \frac{F_0}{\sqrt{(m \cdot \omega^2 - k)^2 + \beta^2 \cdot \omega^2}}. \quad (10)$$

Легко убедиться, что полученная зависимость соответствует графику на рис. 132. Действительно, при стремлении  $\omega$  к нулю значение  $x_m$  стремится к  $\frac{F_0}{k}$ . При стремлении же  $\omega$  к большим значениям знаменатель в выражении (10) стремится к бесконечности. Поэтому амплитуда  $x_m$  при этом стремится к нулю.

Исследование на минимум подкоренного выражения дроби в правой части уравнения (10) позволяет убедиться, что при малом трении ( $\beta < 2k \cdot m$ ) АЧХ маятника имеет максимум при резонансной частоте:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{\beta^2}{2m^2}}. \quad (11)$$

Из уравнения (11) следует, что значение резонансной частоты увеличивается при уменьшении трения. При этом, соответственно, увеличивается и значение резонансной амплитуды. При стремлении трения к нулю ( $\beta \rightarrow 0$ ) значение  $\omega_p$  стремится к  $\sqrt{\frac{k}{m}}$ , т. е. к значению циклической частоты свободных колебаний пружинного маятника при отсутствии трения. В этом случае  $x_m$ , согласно (10), стремится к бесконечно большим значениям.

Теперь рассмотрим *резонанс скорости*. При колебаниях, описываемых зависимостью (4), амплитуда  $v_m$  скорости численно в  $\omega$  раз больше амплитуды  $x_m$  смещения и в  $\omega$  раз меньше амплитуды ускорения. Следовательно, гармонические колебания (6)–(8) могут быть переписаны в виде:

$$k \cdot x = \frac{k \cdot v_m}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (12)$$

$$\beta \cdot \dot{x} = \beta \cdot v_m \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (13)$$

$$m \cdot \ddot{x} = -m \cdot v_m \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (14)$$

Представим гармонические колебания (12)–(14) как изменяющиеся со временем проекции на ось  $X$  трёх соответствующих радиусов-векторов, вращающихся вокруг начала координат с угловой скоростью  $\omega$ . Модули этих векторов равны соответственно  $\frac{k \cdot v_m}{\omega}$ ,  $\beta \cdot v_m$  и  $m \cdot v_m \cdot \omega$ . Положение проекций векторов в момент времени  $t_0 = 0$  показано на рис. 135.

Согласно уравнению (5) и теореме Пифагора, с учётом рис. 135 получаем:

$$F_0 = v_m \sqrt{\left(m \cdot \omega - \frac{k}{\omega}\right)^2 + \beta^2}.$$

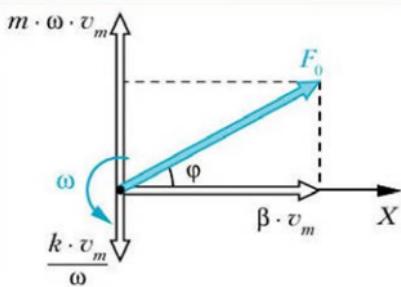


Рис. 135

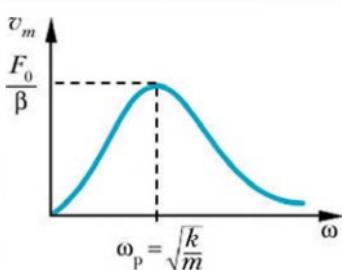


Рис. 136

Следовательно, зависимость амплитуды проекции скорости установившихся вынужденных колебаний от циклической частоты  $\omega$  вынуждающей силы имеет вид:

$$v_m = \frac{F_0}{\sqrt{\left(m \cdot \omega - \frac{k}{\omega}\right)^2 + \beta^2}}. \quad (15)$$

График, соответствующий зависимости (15), приведён на рис. 136.

Проведём анализ данной зависимости и соответствующего ей графика. При стремлении  $\omega$  к нулю знаменатель дроби в правой части уравнения (15) стремится к бесконечно большим значениям. Следовательно, амплитуда  $v_m$  скорости стремится к нулю.

При стремлении  $\omega$  к большим значениям знаменатель дроби в уравнении (15) также стремится к большим значениям, поэтому  $v_m$  стремится к нулю.

При стремлении же  $\omega$  к значению  $\sqrt{\frac{k}{m}}$ , равному значению циклической частоты свободных колебаний маятника без трения, скобка в подкоренном выражении в уравнении (15) обращается в нуль, а амплитуда  $v_m$  скорости достигает максимума, равного  $v_{m \max} = \frac{F_0}{\beta}$ .

Обратим внимание на то, что, в отличие от резонанса смещения, в случае резонанса скорости резонансная частота не зависит от коэффициента вязкого трения и всегда равна  $\sqrt{\frac{k}{m}}$ .

Из рис. 135 становится ясен смысл начальной фазы  $\phi$  вынуждающей силы. Фаза  $\phi$  соответствует углу, на который в процессе вращения радиус-век-

тор вынуждающей силы опережает радиус-вектор скорости. Видно, что тангенс этого угла равен:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{m \cdot \omega - \frac{k}{\omega}}{\beta}. \quad (16)$$

Подчеркнём, что, когда циклическая частота вынуждающей силы равна  $\sqrt{\frac{k}{m}}$  (амплитуда скорости достигает максимума),  $\operatorname{tg} \varphi = 0$ . Другими словами, в этом случае вынуждающая сила в любой момент времени совпадает по направлению с вектором скорости. Следовательно, вынуждающая сила направлена противоположно силе вязкого трения. Легко показать, что в этом случае вынуждающая сила полностью компенсирует силу вязкого трения. В результате в колебательной системе происходят как бы свободные колебания без трения.

### Вопросы

- Почему различают резонансы смещения и скорости?
- Как соотносятся фазы колебаний проекций скорости, смещения и ускорения при установившихся вынужденных колебаниях?
- Как изменяются величины  $\omega_p$  и  $x_m(\omega_p)$  при резонансе смещения с уменьшением коэффициента вязкого трения?
- Как соотносятся фазы вынуждающей силы и силы вязкого трения, когда циклическая частота вынуждающей силы равна  $\sqrt{\frac{k}{m}}$ ?

### Упражнения

- Проведите анализ: а) амплитудно-частотной характеристики (10); б) формулы (11); в) зависимости (15); г) формулы (16).
- Пружинный маятник, показанный на рис. 131, совершает установившиеся вынужденные колебания. Масса груза маятника  $m = 0,1$  кг, коэффициент жёсткости пружины  $k = 1,6$  Н/м, коэффициент вязкого трения  $\beta = \sqrt{0,14}$  кг/с. Определите резонансные циклические частоты для резонанса смещения и резонанса скорости.
- При резонансе смещения амплитуда установившихся колебаний пружинного маятника из упражнения 2 равна:  $x_m(\omega_p) = 1$  см. Определите амплитуду вынуждающей силы и разность фаз колебаний вынуждающей силы и проекции скорости груза.



В любой реальной колебательной системе имеют место силы трения. Поэтому при отсутствии внешних воздействий колебания неизбежно будут затухать. В рассмотренных выше установившихся вынужденных колебаниях постоянство амплитуды обеспечивается работой периодически изменяющейся внешней силы, которая компенсирует потери энергии на трение. Другим примером незатухающих колебаний являются автоколебания.

Если колебательная система сконструирована таким образом (имеет такие свойства), что сама управляет поступлением от источника энергии, компенсирующим её потери (в том числе на трение), то такую систему называют *автоколебательной*, а происходящие в ней колебания — *автоколебаниями*.

Примером автоколебательной системы являются механические маятниковые часы. Незатухающие колебания маятника (или балансира — колёсика с пружиной) часов поддерживаются за счёт энергии внешнего источника, например заведённой пружины или поднятой гири. Колеблющийся маятник, проходя определённое положение, запускает храповой механизм. В результате маятник получает толчок (импульс), увеличивающий его кинетическую энергию. Тем самым часть потенциальной энергии источника (например, гири или пружины) передаётся маятнику отдельными порциями и компенсирует потери энергии на трение за период.

Если подводимая к маятнику энергия превышает потери на трение, то амплитуда его колебаний будет увеличиваться. Это, в свою очередь, приводит к увеличению потерь энергии, обусловленных трением. Если же подводимая энергия меньше потерь на трение, то амплитуда колебаний уменьшается, что приводит к уменьшению потерь на трение. Таким образом, по истечении некоторого времени в автоколебательной системе *автоматически* устанавливается равновесная амплитуда колебаний, при которой потери энергии на трение за период компенсируются энергией, поступающей за период от внешнего источника. Отметим, что равновесие между периодическим поступлением энергии в систему от внешнего источника и её потерями определяется свойствами самой системы. Эта особенность является первым характерным признаком автоколебаний, отличающим их от собственных колебаний, которые происходят за счёт *начального* запаса энергии. Вторым характерным признаком автоколебаний является то, что их частота определяется внутренними свойствами самой системы. Этим автоколебания отличаются от знакомых вам вынужденных колебаний, частота которых равна частоте изменения внешней вынуждающей силы (см. § 35).

Другим примером автоколебаний является возбуждение колебаний в струнах смычковых инструментов. Как вы знаете, обычно значение максимальной силы трения покоя превышает значение силы трения скольжения. В свою очередь, модуль силы трения скольжения зависит от относительной скорости скольжения тела по поверхности. При движении смычка по струне последняя отклоняется от положения равновесия под действием силы трения покоя со стороны движущегося смычка. Затем происходит смена силы трения покоя на меньшую силу трения скольжения — струна стремится вернуться в исходное положение и начинает совершать колебания. Различия в значениях силы трения скольжения при движении струны в направлениях противоположном и совпадающем с направлением движения смычка обеспечивает приток энергии от смычка струне. В результате струна совершает незатухающие автоколебания, частота которых близка к частоте собственных колебаний.

Схожие явления будут происходить со струной, если на неё будет действовать ветер постоянной силы. Такой эксперимент по наблюдению автоколебаний в ветреный день может провести каждый из вас.

### Вопросы

- 1** Какие системы называют автоколебательными?
- 2** Что называют автоколебаниями?
- 3** Какие характерные признаки автоколебаний вам известны?
- 4** Чем автоколебания отличаются от установившихся вынужденных и собственных колебаний?
- 5** Приведите примеры автоколебаний.

### Упражнения

- 1** Используя материалы параграфа и интернет-ресурсов, опишите принцип действия электромагнитного звонка. Являются ли колебания молоточка звонка автоколебаниями? Ответ обоснуйте.
- ✓2** Подготовьте реферат на тему «Автоколебания в природе и технике», используя материалы интернет-ресурса <http://gotourl.ru/7123>.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Движения, обладающие той или иной степенью повторяемости во времени, называют **колебаниями**. Движения, все характеристики которых повторяются через равные промежутки времени, называют **периодическими колебаниями**

Колебания в системе тел, обусловленные только внутренними силами, называют **свободными**. Такие колебания возможны, если:

- 1) система имеет положение устойчивого равновесия;
- 2) силы трения в системе достаточно малы.

Системы тел, в которых возможны свободные колебания, называют **колебательными системами**

Колебания, которые происходят под действием периодически изменяющейся со временем внешней силы, называют **вынужденными**. Частота установившихся вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы

Явление достижения амплитудой установившихся вынужденных колебаний максимального (экстремального) значения при приближении частоты вынуждающей силы к некоторому значению — резонансной частоте — называют **резонансом**

## Решение задач о гармонических механических колебаниях

### Динамический способ

При колебаниях тела массой  $m$  вдоль оси  $X$  ИСО, начало которой совмещено с положением равновесия, при отсутствии сил трения проекция возвращающей силы  $\vec{F}$  противоположна по знаку и пропорциональна его смещению  $x$ :

$$F = -k \cdot x.$$

Второй закон Ньютона в проекции на ось  $X$ :

$$-k \cdot x = m \cdot a_x = m \cdot \ddot{x}$$

### Энергетический способ

Потенциальная энергия системы равна взятой с обратным знаком работе возвращающей силы:  $\Pi = \frac{k \cdot x^2}{2}$ .

Кинетическая энергия системы:

$$K = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{m \cdot \dot{x}^2}{2}.$$

Механическая энергия системы постоянна:

$$\Pi + K = \frac{k \cdot x^2}{2} + \frac{m \cdot \dot{x}^2}{2} = \text{const.}$$

После взятия производной получаем:  $k \cdot x + m \cdot \ddot{x} = 0$

Уравнение гармонических колебаний:  $\ddot{x} + \frac{k}{m} \cdot x = 0$  или  $\ddot{x} + \omega^2 \cdot x = 0$ , где  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$  – циклическая частота

Решение уравнения гармонических колебаний:  $x(t) = x_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$ , где  $x_m$  – амплитуда,  $(\omega \cdot t + \varphi)$  – фаза,  $\varphi_0$  – начальная фаза колебаний

Зависимости от времени  $t$  проекций на ось  $X$  скорости, ускорения, потенциальной, кинетической и механической энергий при гармонических колебаниях:

$$v_x(t) = -x_m \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) = -v_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi),$$

$$a_x(t) = -x_m \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) = -a_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi),$$

$$\Pi(t) = \frac{k \cdot x^2(t)}{2} = \frac{k \cdot x_m^2}{2} \cdot \cos^2(\omega \cdot t + \varphi), \quad K(t) = \frac{m \cdot v_x^2(t)}{2} = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot x_m^2}{2} \cdot \sin^2(\omega \cdot t + \varphi),$$

$$E(t) = \Pi(t) + K(t) = \frac{k \cdot x_m^2}{2} \cdot [\cos^2(\omega \cdot t + \varphi) + \sin^2(\omega \cdot t + \varphi)] = \frac{k \cdot x_m^2}{2} = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot x_m^2}{2} = \text{const}$$

## Электромагнитные колебания

Колебания могут происходить не только в механических системах, но и в электромагнитных (например, в электрических цепях). Колебания, при которых энергия электрического поля преобразуется в энергию магнитного поля и обратно, называют **электромагнитными колебаниями**.

Обратим внимание на то, что все рассматриваемые в этой главе электрические цепи мы будем считать удовлетворяющими условию **квазистационарности**. Это означает, что изменения силы тока во всех поперечных сечениях любого неразветвленного участка цепи происходят одновременно и на одинаковую величину. Другими словами, в любой конкретный момент времени силу тока через каждое такое сечение можно считать одинаковой. Условие квазистационарности можно считать выполненным, если длина  $l$  рассматриваемой электрической цепи много меньше  $c \cdot \tau$ , где  $c$  — модуль скорости света в вакууме, а  $\tau$  — промежуток времени, в течение которого происходит существенное изменение силы тока. Например, при частоте  $v = 50$  Гц длина  $l$  должна быть существенно меньше  $6 \cdot 10^3$  км. В этом случае можно считать, что изменяющееся с течением времени электрическое поле, которое порождает ток, распространяется по всей цепи практически мгновенно, т. е. существенно быстрее изменений этого поля.

### § 38

### Свободные электромагнитные колебания

Изучение электромагнитных колебаний, как и механических колебаний, начнём со свободных колебаний, т. е. колебаний, происходящих в электромагнитной системе только за счёт начального запаса энергии.

Рассмотрим пример простейшей электромагнитной колебательной системы — *колебательный контур*. Он состоит из соединённых в замкнутую цепь конденсатора и катушки индуктивности. Для экспериментального наблюдения свободных колебаний в таком контуре соберём схему, показанную на рис. 137. В эту схему, кроме образующих колебательный контур конденсатора 2 и катушка индуктивности 3, включены: источник тока 1, от которого заряжают конденсатор, для передачи системе начального запаса энергии; ключ 5, позволяющий соединять конденсатор как с источником тока, так и с катушкой; осциллограф 4, на экране которого наблюдают изменение напряжения между выводами катушки с течением времени.

Переведём ключ 5 в положение 6, как показано на рис. 137, и дождёмся, когда подключённый к источнику тока конденсатор зарядится. После этого переведём ключ 5 в положение 7 и соединим заряженный конденсатор с катушкой. В результате образуется колебательный контур с начальным запасом энергии, равным энергии заряженного конденсатора.

Осциллограф 4 показывает, что после замыкания ключа в колебательном контуре возникают колебания. При этом зависимость напряжения от времени соответствует зависимости, характерной для затухающих колебаний.

Затухание колебаний объясняется уменьшением энергии контура с течением времени. Это уменьшение обусловлено в основном двумя причинами. Во-первых, при протекании по проводам тока в них, согласно закону Джоуля — Ленца, выделяется определённое количество теплоты. Во-вторых, создаваемые элементами контура электрическое и магнитное поля изменяются с течением времени, что, в свою очередь, приводит к излучению электромагнитных волн, которое уносит энергию.

Однако можно создать условия, при которых потери энергии в колебательном контуре будут пренебрежимо малы. Тогда свободные электромагнитные колебания в контуре будут гармоническими. Докажем это, используя энергетический подход.

Пусть начальный заряд конденсатора равен  $q_0$ . Тогда начальный запас энергии  $W_0$  колебательной системы равен начальной энергии конденсатора:

$$W_0 = \frac{q_0^2}{2C} \quad (1)$$

где  $C$  — ёмкость конденсатора.

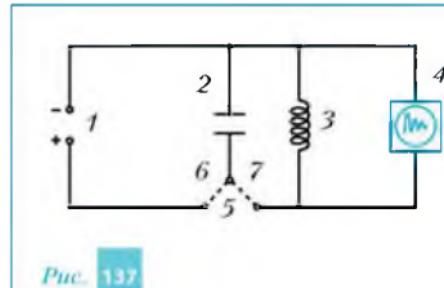


Рис. 137

Заряженный конденсатор после его подключения к катушке индуктивности начинает разряжаться через образовавшуюся замкнутую цепь. Поэтому заряд конденсатора, а следовательно, и его энергия будут уменьшаться с течением времени. С другой стороны, при разряде конденсатора в цепи течёт электрический ток. Этот ток создаёт магнитное поле. Следовательно, энергия магнитного поля станет отличной от нуля.

Пусть заряд конденсатора изменяется и к некоторому моменту времени  $t$  становится равным  $q$ , а сила тока становится равной  $I$ . Тогда энергия магнитного поля, созданного током, будет равна:

$$W_{\text{магн}} = \frac{L \cdot I^2}{2}, \quad (2)$$

где  $L$  – индуктивность катушки контура.

Таким образом, энергия всей системы, складывающаяся из энергий электрического и магнитного полей, в произвольный момент времени  $t$  равна:

$$W = W_{\text{эл}} + W_{\text{магн}} = \frac{q^2}{2C} + \frac{L \cdot I^2}{2}. \quad (3)$$

Если потери энергии колебательной системы пренебрежимо малы, то её энергия с течением времени остаётся неизменной, т. е.  $W = W_0 = \text{const}$ . Следовательно:

$$\frac{q^2}{2C} + \frac{L \cdot I^2}{2} = W_0. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что по мере уменьшения энергии электрического поля (первого слагаемого в левой части) энергия магнитного поля (второе слагаемое) будет увеличиваться, и наоборот.

По мере уменьшения заряда  $q$  конденсатора (при его разряде) сила тока  $I$  в цепи будет нарастать. Наоборот, при уменьшении силы тока  $I$  заряд  $q$  будет увеличиваться.

Уравнение (4) позволяет определить зависимости от времени  $q(t)$  и  $I(t)$  в явном виде. Однако для этого следует выяснить, как связаны между собой заряд  $q$  конденсатора и сила тока  $I$  в контуре.

Пусть в некоторый момент времени направление тока  $I$  совпадает с показанным на рис. 138. Обозначим заряд пластины конденсатора,

Эта формула применима, если считать, что индуктивность  $L$  катушки много больше индуктивности остальной части контура. Как правило, в используемых колебательных контурах это условие выполнено.

к которой течёт ток, через  $q$ . Тогда заряд противоположной пластины равен  $-q$ . Рассмотрим достаточно малый промежуток времени  $\Delta t$ , в течение которого силу тока  $I$  в контуре можно считать постоянной. За этот промежуток времени  $\Delta t$  заряд одной из пластин конденсатора увеличивается на  $\Delta q = I \cdot \Delta t$ . Соответственно, на такую же по модулю величину уменьшается заряд другой пластины. Иначе говоря, изменение заряда  $\Delta q$  конденсатора за достаточно малое время  $\Delta t$  и сила тока  $I$  в контуре связаны соотношением:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (5)$$

Поскольку промежуток времени  $\Delta t$  достаточно мал, т. е. стремится к нулю, соотношение (5) может быть записано в виде:

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \dot{q}. \quad (6)$$

Полученный результат означает, что *в любой момент времени сила тока в колебательном контуре равна производной по времени заряда пластины конденсатора*.

Возьмём производные по времени от левой и правой частей уравнения (4). С учётом того, что  $q(t)$  и  $I(t)$  изменяются с течением времени, получаем:

$$\frac{1}{2C} \cdot 2q \cdot \dot{q} + \frac{L}{2} \cdot 2I \cdot \dot{I} = 0. \quad (7)$$

Учитывая, что  $I = \dot{q}$ , а  $\dot{I} = \ddot{q}$ , преобразуем уравнение (7) к виду:



$$\ddot{q} + \frac{1}{L \cdot C} \cdot q = 0. \quad (8)$$

Уравнение (8) представляет собой уже знакомое вам с точностью до обозначений уравнение гармонических колебаний.

Циклическая частота этих колебаний  $\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ .

Период этих колебаний равен:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}. \quad (9)$$

Формулу (9) называют *формулой Томсона* в честь британского физика Уильяма Томсона.

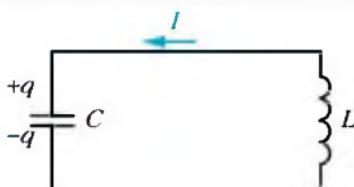


Рис. 138

Решение уравнения (8) может быть записано в виде:

$$q(t) = q_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_0) = q_m \cdot \cos\left(\frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \cdot t + \phi_0\right). \quad (10)$$

Из уравнений (10) и (6) следует, что зависимость силы тока в контуре от времени имеет вид:

$$\begin{aligned} I(t) &= \dot{q} = -q_m \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_0) = -\frac{q_m}{\sqrt{L \cdot C}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_0) = \\ &= -I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_0), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $I_m$  – амплитуда силы тока.

Отметим, что если в начальный момент времени  $t = 0$  заряд конденсатора был равен  $q_0$ , а сила тока была равна нулю, то амплитуда колебаний заряда будет равна начальному заряду конденсатора  $q_m = q_0$ , а начальная фаза  $\phi_0$  в формулах (10) и (11) будет равна нулю.

### Вопросы

1. Какие колебания называют электромагнитными?
2. Из каких элементов состоит колебательный контур?
3. Чем обусловлено уменьшение электромагнитной энергии колебательного контура с течением времени?
4. Из каких частей состоит энергия колебательной электромагнитной системы?
5. Как связаны сила тока в колебательном контуре и заряд пластины конденсатора?
6. По какой формуле рассчитывают период гармонических колебаний в колебательном контуре?
7. Как связаны амплитуды колебаний заряда и силы тока при гармонических колебаниях в контуре?

### Упражнения

1. Как изменится период свободных гармонических колебаний в контуре при увеличении ёмкости конденсатора в 4 раза?
2. Как изменится период свободных гармонических колебаний в контуре при уменьшении индуктивности катушки в 9 раз?
3. В начальный момент времени  $t = 0$  заряд конденсатора колебательного контура был равен  $q_0$ , а сила тока в контуре была равна нулю. Определите: а) значения заряда пластины, которая

при  $t = 0$  была заряжена положительно, в моменты времени  $\frac{T}{6}$ ,  $\frac{T}{4}$ ,  $\frac{T}{3}$  и  $\frac{T}{2}$ , где  $T$  – период колебаний; б) значения силы тока в эти же моменты времени.

### § 39 Процессы при гармонических колебаниях в контуре

Рассмотрим физические процессы, протекающие в колебательном контуре. Для этого построим графики зависимостей  $q(t)$  и  $I(t)$ , соответствующих функциям (10) и (11) из предыдущего параграфа. Будем считать, что в начальный момент времени ( $t = 0$ ) заряд конденсатора максимален и равен  $q_m$ , а сила тока в цепи равна нулю. Тогда начальная фаза  $\phi_0 = 0$ , а графики будут иметь вид, показанный на рис. 139. Здесь же построим графики зависимости электрической и магнитной энергий контура от времени. Отметим на оси времени характерные точки  $\frac{T}{4}$ ,  $\frac{T}{2}$ ,  $\frac{3}{4}T$  и  $T$ .

При  $t = 0$  энергия электрического поля максимальна, а энергия магнитного поля равна нулю. Поэтому энергия всей системы равна:

$$W = W_{\text{эл}} + W_{\text{магн}} = \frac{q_m^2}{2C} + 0 = \frac{q_m^2}{2C}. \quad (1)$$

В промежутке времени от  $t = 0$  до  $\frac{T}{4}$  заряд  $q$  конденсатора уменьшается от  $q_m$  до нуля. Напротив, модуль силы тока за это время нарастает от 0 до  $I_m$ . Обратим внимание на то, что сила тока в течение этого промежутка времени отрицательна. Такой ток уменьшает заряд  $q$  пластины конденсатора. При этом энергия электрического поля уменьшается, а энергия магнитного поля тока увеличивается.

В момент  $\frac{T}{4}$  заряд конденсатора становится равным нулю, а модуль

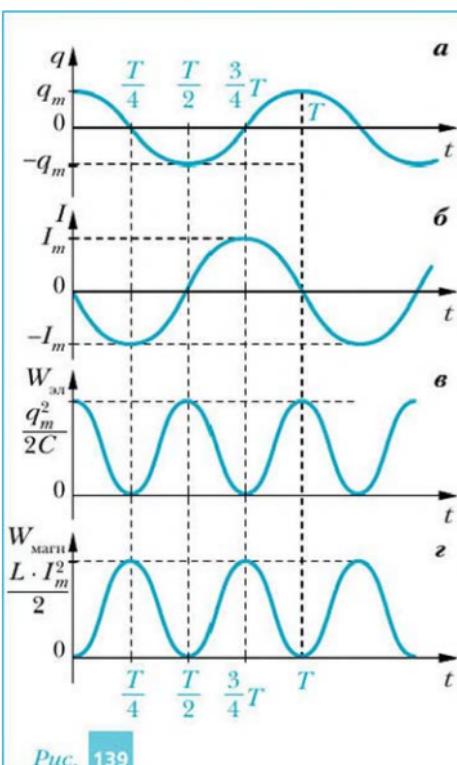


Рис. 139

силы тока достигает максимального значения. Следовательно, в этот момент времени энергия электрического поля минимальна и равна нулю. В результате энергия  $W$  всей колебательной системы в рассматриваемый момент равна достигшей максимума энергии магнитного поля:

$$W = W_{\text{эл}} + W_{\text{магн}} = 0 + \frac{L \cdot I_m^2}{2} = \frac{L \cdot I_m^2}{2}. \quad (2)$$

После момента времени, соответствующего полному разряду конденсатора, ток в цепи не прекращается. Это объясняется явлением самоиндукции в катушке индуктивности. Действительно, после достижения модулем силы тока максимального значения он не может мгновенно обратиться в нуль. Его уменьшение вызывает ЭДС самоиндукции в катушке, которая поддерживает этот ток. В результате после момента  $\frac{T}{4}$  на пластине конденсатора, которая изначально имела положительный заряд, начинает накапливаться отрицательный заряд. Напротив, на пластине, заряженной изначально отрицательно, начинает накапливаться положительный заряд. В течение промежутка времени от  $\frac{T}{4}$  до  $\frac{T}{2}$  модуль силы тока в цепи уменьшается, а заряд конденсатора увеличивается. При этом знаки зарядов пластин противоположны первоначальным.

С энергетической точки зрения это означает, что в течение времени от  $\frac{T}{4}$  до  $\frac{T}{2}$  электрическая энергия контура возрастает, а магнитная уменьшается. Этот процесс заканчивается в момент  $\frac{T}{2}$ , когда магнитная энергия контура и, соответственно, сила тока  $I$  обращаются в нуль. К этому моменту электрическая энергия системы и, соответственно, заряд конденсатора достигают максимума. Следовательно, в момент  $\frac{T}{2}$  энергия  $W$  всей колебательной системы равна:

$$W = W_{\text{эл}} + W_{\text{магн}} = \frac{q_m^2}{2C} + 0 = \frac{q_m^2}{2C}. \quad (3)$$

Обратим внимание на то, что уравнение (3) аналогично (1). Поэтому с энергетической точки зрения процессы, которые будут происходить в колебательном контуре после момента времени  $\frac{T}{2}$  вплоть до момента  $T$ , аналогичны процессам, произошедшим в течение времени от  $t = 0$  до  $\frac{T}{2}$ . Однако направления тока на этих двух промежутках времени противоположны. Соответственно, за промежуток времени от  $\frac{T}{2}$  до  $T$  происходит перезарядка пластины конденсатора от  $-q_m$  (в момент  $\frac{T}{2}$ ) до  $q_m$  (в момент  $T$ ).

После момента времени  $T$  все процессы в рассматриваемой колебательной системе будут повторяться с периодом  $T$ .



Уравнение гармонических колебаний в колебательном контуре было получено нами в § 38 энергетическим способом. Покажем, как получить это уравнение, используя понятие разности потенциалов.

Обратимся к рис. 138. Пусть в рассматриваемый момент времени направление тока в контуре совпадает с показанным на рисунке. В этом случае заряд  $q$  верхней пластины конденсатора увеличивается, следовательно, сила тока уменьшается. Поэтому в катушке действует ЭДС самоиндукции, поддерживающая ток. Таким образом, электрическую схему колебательного контура в данный момент времени можно представить в виде, показанном на рис. 140. ЭДС в таком контуре — ЭДС самоиндукции — равна  $\mathcal{E} = -L \cdot \dot{I}$  (см. § 29).

Поскольку  $\dot{I} < 0$ ,  $\mathcal{E} = -L \cdot \dot{I} > 0$ . Отметим на нашей схеме точки  $A$  и  $B$ . Сопротивление проводов равно нулю. Поэтому разность потенциалов между этими точками, с одной стороны, равна разности потенциалов между пластинами конденсатора  $\left(\frac{q}{C}\right)$ , а с другой — равна ЭДС источника (катушки индуктивности). Получаем:

$$\Phi_A - \Phi_B = \frac{q}{C} = -L \cdot \dot{I}. \quad (4)$$

Поскольку  $\dot{I} = \ddot{q}$ , из выражения (4) получаем уравнение гармонических колебаний в колебательном контуре:

$$\ddot{q} = -\frac{1}{L \cdot C} \cdot q.$$

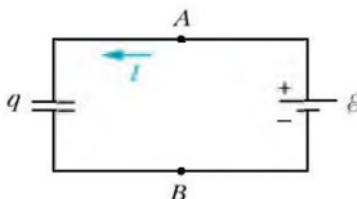


Рис. 140

### Упражнения



Используя графики на рис. 139, опишите, как изменяются заряд конденсатора, сила тока в контуре, энергия электрического поля, энергия магнитного поля и общая электромагнитная энергия в промежутках: а) от 0 до  $\frac{T}{4}$ ; б) от  $\frac{T}{4}$  до  $\frac{T}{2}$ ; в) от  $\frac{T}{2}$  до  $T$ .

- 2 В колебательном контуре происходят гармонические колебания. Ёмкость конденсатора этого контура равна  $C$ , а индуктивность катушки —  $L$ . В некоторый момент времени заряд конденсатора равен  $q$ , а сила тока равна  $I$ . Определите амплитудные значения заряда и силы тока в этом контуре.



*Для углублённого уровня*

- 3 В колебательном контуре происходят гармонические колебания с периодом  $T$ . Определите амплитуду силы тока в этом контуре, если ёмкость конденсатора контура равна  $C$ , а амплитуда разности потенциалов между пластинами конденсатора равна  $\Delta\phi$ .

## § 40

### Переменный ток. Источник переменного тока

В настоящее время на производстве и в быту, как правило, используют электрический ток, сила которого изменяется с течением времени по гармоническому закону. Такой ток называют *переменным*.

**Электрический ток, сила которого с течением времени изменяется по гармоническому закону, называют переменным.**

Для получения в электрической цепи переменного тока в эту цепь включают источник тока, ЭДС которого изменяется с течением времени по гармоническому закону. Такой источник называют *источником (или генератором) переменного тока*.



Чтобы понять, на чём основан принцип действия источника переменного тока, рассмотрим прямоугольную проволочную рамку, помещённую в однородное магнитное поле (рис. 141). Пусть вектор индукции магнитного поля равен  $\vec{B}$ , площадь поверхности, ограниченной рамкой, равна  $S$ , а угол между вектором  $\vec{B}$  и перпендикуляром  $\vec{n}$  к плоскости рамки равен  $\phi$ . Тогда поток магнитной индукции  $\Phi$ , пронизывающий площадь  $S$  рамки, равен:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \phi. \quad (1)$$



Строго говоря, любой ток, сила которого изменяется с течением времени, можно называть переменным. Однако наиболее распространённым из переменных токов является ток, сила которого изменяется по гармоническому закону. Поэтому часто во многих учебниках переменным называют именно такой ток. Мы также будем придерживаться этой терминологии.

Будем равномерно вращать рамку вокруг оси  $O O'$  с угловой скоростью  $\omega$ . Тогда угол  $\phi$  будет изменяться по закону:

$$\phi = \phi_0 + \omega \cdot t, \quad (2)$$

где  $\phi_0$  – значение угла при  $t = 0$ .

В этом случае поток магнитной индукции  $\Phi$  также будет изменяться, а уравнение (1) с учётом (2) примет вид:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_0). \quad (3)$$

Изменение с течением времени магнитного потока  $\Phi$ , согласно закону электромагнитной индукции, приводит к возникновению в рамке ЭДС, равной:

$$\mathcal{E} = -\dot{\Phi}. \quad (4)$$

Подставив уравнение (3) в (4), получим:

$$\mathcal{E} = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_0) = \mathcal{E}_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_0), \quad (5)$$

где  $\mathcal{E}_m = B \cdot S \cdot \omega$  – амплитуда ЭДС.

**!** Таким образом, в проволочной рамке, которая равномерно вращается вокруг оси, перпендикулярной индукции однородного магнитного поля, возникает ЭДС, изменяющаяся с течением времени по гармоническому закону. Следовательно, такую рамку можно использовать в качестве источника переменного тока.

Разомкнём образующий рамку провод и подсоединим его концы через кольца и щётки к электрической лампочке (рис. 142). В результате действия изменяющейся по гармоническому закону ЭДС индукции в образованной цепи установятся *вынужденные электромагнитные колебания*. В частности, в цепи установится переменный ток. Продвигая аналогию с механическими колеба-

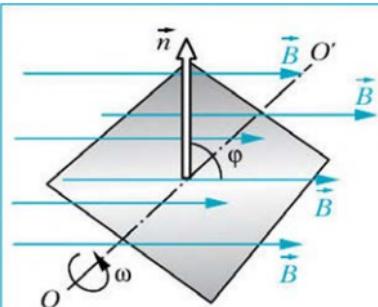


Рис. 141

При равномерном вращении рамки в однородном магнитном поле в ней возникает ЭДС, изменяющаяся по гармоническому закону

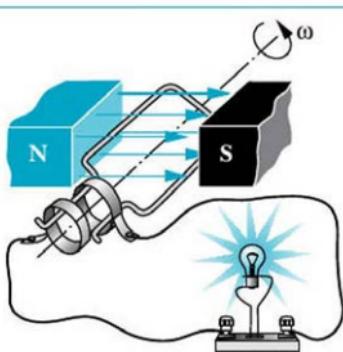


Рис. 142

Получение переменного тока

ниями, можно сказать, что действие переменной ЭДС на электрическую цепь сходно с действием гармонической вынуждающей силы на механическую колебательную систему.

В заключение отметим, что для увеличения амплитуды ЭДС индукции, помимо увеличения площади  $S$  рамки и модуля  $B$  индукции магнитного поля, можно использовать рамку из нескольких витков провода. В этом случае уравнение (3) принимает вид:

$$\Phi = n \cdot B \cdot S \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_0), \quad (6)$$

где  $n$  — число витков провода.

Соответственно, из закона (4) следует, что амплитуда ЭДС пропорциональна числу витков  $n$  и равна:

$$\mathcal{E}_m = n \cdot B \cdot S \cdot \omega. \quad (7)$$

### Вопросы

- 1 Какой электрический ток называют переменным?
- 2 Что называют источником (или генератором) переменного тока?
- 3 На чём основан принцип действия источника переменного тока?
- 4 При каких условиях в проволочной рамке возникает ЭДС индукции, изменяющаяся по гармоническому закону?
- 5 Какими способами можно увеличить амплитуду ЭДС индукции?

### Упражнения

- 1 Одновитковая проволочная рамка площадью  $S = 10 \text{ см}^2$  равномерно вращается с периодом  $T = 0,1 \text{ с}$  вокруг своей оси, которая перпендикулярна вектору индукции однородного магнитного поля. Модуль индукции  $B = 2 \text{ Тл}$ . Сопротивление провода рамки достаточно велико. Определите амплитуду колебаний ЭДС индукции в рамке.
- 2 Проволочная рамка площадью  $S = 5 \text{ см}^2$ , состоящая из  $n = 100$  витков, равномерно вращается вокруг своей оси, перпендикулярной вектору индукции однородного магнитного поля. Модуль индукции  $B = 1 \text{ Тл}$ . Сопротивление провода рамки достаточно велико. Определите частоту вращения рамки, если амплитуда колебаний ЭДС индукции в ней  $\mathcal{E}_m = 1 \text{ В}$ .

Для углублённого уровня



§ 41

## Активное сопротивление в цепи переменного тока

Исследование процессов, происходящих в цепи переменного тока, начнём с самого простого случая, когда цепь состоит из источника переменного тока и подключённого к нему резистора (рис. 143). Пусть сопротивление резистора равно  $R$ , а напряжение между его выводами изменяется по гармоническому закону:

$$U = U_m \cdot \cos(\omega \cdot t). \quad (1)$$

В результате в цепи устанавливаются вынужденные колебания — переменный ток. Определим, как будет изменяться с течением времени мгновенное значение силы тока  $I$ . Рассмотрим настолько малый промежуток времени от  $t$  до  $t + \Delta t$ , что в течение этого промежутка напряжение  $U$  можно считать неизменным и равным мгновенному значению напряжения в момент  $t$ . Тогда в течение рассматриваемого промежутка времени, согласно закону Ома для участка цепи, средняя сила тока  $I$  может быть рассчитана по формуле:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (2)$$

Поскольку  $\Delta t$  мало, то полученное значение силы тока можно считать значением силы тока  $I$  в момент времени  $t$ . Соотношение (2) выполняется для любого момента времени. Поэтому, подставив выражение (1) в (2), получим значение мгновенной силы тока для любого момента времени  $t$ :

$$I = \frac{U_m}{R} \cdot \cos(\omega \cdot t) = I_m \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (3)$$

где  $I_m = \frac{U_m}{R}$  — амплитуда силы тока.

Графики зависимостей  $I(t)$  и  $U(t)$  приведены на рис. 144. Из графиков видно, что сила тока и напряжение одновременно достигают максимальных значений и одновременно обращаются в нуль. Другими словами, в рассматриваемом случае колебания  $I$  и  $U$  происходят синфазно, т. е. совпадают по фазе. Итак,

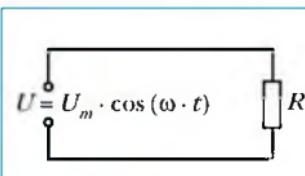


Рис. 143

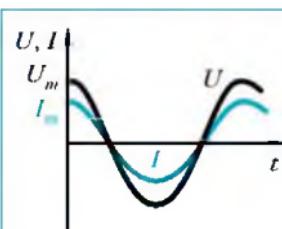


Рис. 144

в цепи переменного тока колебания силы тока  $I$  в резисторе  $R$  по фазе совпадают с колебаниями напряжения  $U$  между его выводами. При этом амплитуды силы тока и напряжения связаны соотношением:

$$I_m = \frac{U_m}{R}. \quad (4)$$

Из уравнений (1) и (3) следует, что мгновенная мощность, выделяемая на резисторе, равна:

$$P = I \cdot U = I_m \cdot U_m \cdot \cos^2(\omega \cdot t). \quad (5)$$

Таким образом, мгновенная мощность с течением времени непрерывно изменяется. Определим среднюю мощность за период. Для этого рассчитаем среднее значение функции  $\cos^2(\omega \cdot t)$  за период. График этой функции показан на рис. 145. Видно, что значение функции  $\cos^2(\omega \cdot t)$  совершает гармонические колебания около значения  $\frac{1}{2}$ . Из этого следует, что среднее значение функции  $\cos^2(\omega \cdot t)$  за период равно  $\frac{1}{2}$ . Поэтому средняя мощность  $\bar{P}$  за период (а следовательно, и за любое целое число периодов) может быть рассчитана по формуле:

$$\bar{P} = \frac{I_m \cdot U_m}{2}. \quad (6)$$

С учётом (4) формула (6) может быть представлена в виде:

$$\bar{P} = \frac{I_m^2}{2} \cdot R \text{ или } \bar{P} = \frac{U_m^2}{2R}. \quad (7, 8)$$

Отметим, что использование формул (6)–(8) оправданно не только в случаях, когда рассматриваемый промежуток времени составляет целое число периодов, но и в случаях, когда он во много раз превышает период колебаний. Например, период колебаний переменного тока промышленной частоты ( $v = 50$  Гц) равен  $T = 0,02$  с. При решении же практических задач, как правило, представляет интерес работа тока за существенно большие промежутки времени (часы, сутки, месяцы).

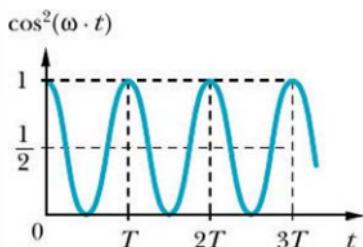


Рис. 145

и т. д.). Понятно, что в этих случаях при расчётах средней мощности переменного тока можно использовать формулы (6)–(8).

Формулы (7) и (8) позволяют ввести физические величины, характеризующие переменный ток с точки зрения его мощности: *действующее значение силы тока* и *действующее значение напряжения* (иногда вместо термина «действующее» используют термин «эффективное»).

**Действующим (эффективным) значением силы переменного тока называют силу такого постоянного тока, при котором мощность, выделяющаяся в резисторе в цепи постоянного тока, равна средней за период мощности, выделяющейся в том же резисторе в цепи переменного тока.**

Сопоставление формулы (7) и формулы для расчёта мощности постоянного тока  $P = I^2 \cdot R$  (см. § 5) приводит к выводу о том, что если сила тока изменяется по гармоническому закону (3), то действующее значение силы переменного тока в  $\sqrt{2}$  раз меньше его амплитуды:

$$I_{\text{д}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (9)$$

**Действующим (эффективным) значением переменного напряжения называют такое постоянное напряжение, при котором мощность, выделяющаяся в резисторе в цепи постоянного тока, равна средней за период мощности, выделяющейся в том же резисторе в цепи переменного тока.**

Сопоставление формулы (8) и формулы для расчёта мощности постоянного тока  $P = \frac{U^2}{R}$  из § 5 приводит к выводу, что если напряжение изменяется по гармоническому закону (1), то действующее значение напряжения в  $\sqrt{2}$  раз меньше его амплитуды:

$$U_{\text{д}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (10)$$

Подставив выражения (9) и (10) в (6)–(8), получим:

$$\bar{P} = I_{\text{д}} \cdot U_{\text{д}} = I_{\text{д}}^2 \cdot R = \frac{U_{\text{д}}^2}{R}. \quad (11)$$

Таким образом, при использовании действующих значений силы тока и напряжения формулы (11) для расчёта средней мощности переменного тока имеют вид, аналогичный формулам для расчёта мощности постоянного тока.

Отдельно отметим, что амперметры и вольтметры, предназначенные для измерения силы тока и напряжения в цепях переменного тока, обычно показывают именно действующие (а не амплитудные) значения.

Поскольку в резисторе, включённом в цепь переменного тока, выделяется мощность, отличная от нуля, то его сопротивление  $R$  часто называют **активным сопротивлением**.

В общем случае *активным сопротивлением R участка цепи переменного тока называют отношение средней за период мощности  $\bar{P}$ , выделяемой на этом участке, к квадрату действующего значения силы этого тока I.*

### Вопросы

- 1 Как соотносятся фазы колебаний силы тока  $I$  в резисторе  $R$  и напряжения  $U$  между его выводами в цепи переменного тока?
- 2 Как при этом связаны амплитуды силы тока и напряжения?
- 3 Как изменяется с течением времени мгновенная мощность, выделяемая на резисторе в цепи переменного тока?
- 4 По какой формуле рассчитывают среднюю за период мощность, выделяемую в резисторе в цепи переменного тока?
- 5 Что называют действующим (эффективным) значением: а) силы переменного тока; б) переменного напряжения?
- 6 Как связаны действующие и амплитудные значения силы тока и напряжения в цепи переменного тока?
- 7 Что показывают амперметры и вольтметры, предназначенные для измерения силы тока и напряжения в цепях переменного тока?
- 8 Что называют активным сопротивлением?

### Упражнения

- 1 Амплитуда силы тока в цепи переменного тока, содержащей резистор с сопротивлением  $R = 10 \text{ Ом}$ , равна  $I_m = 2 \text{ А}$ . Определите: а) действующее значение силы тока; б) амплитудное и действующее напряжения между выводами резистора; в) среднюю за период мощность, выделяющуюся в резисторе.
- 2 Определите активное сопротивление нити лампы накаливания, рассчитанной на работу в цепи переменного тока с действующим напряжением  $U_d = 220 \text{ В}$ , если потребляемая ею средняя мощность  $\bar{P} = 40 \text{ Вт}$ .

Для углублённого уровня

§ 42 Конденсатор в цепи переменного тока

Подключим конденсатор к источнику переменного тока через амперметр (рис. 146). Амперметр будет показывать наличие электрического тока в цепи. Это объясняется тем, что, в отличие от источника постоянного тока, источник переменного тока создаёт гармонически изменяющееся напряжение. В результате происходит периодическая зарядка и разрядка конденсатора. Другими словами, в цепи устанавливаются вынужденные электрические колебания, т. е. протекает переменный ток.

В рассматриваемом случае напряжение на конденсаторе, равное разности потенциалов  $U_C$  между его пластинами, в любой момент времени равно ЭДС источника:

$$U_C = \mathcal{E}(t) = U_m \cdot \cos(\omega \cdot t). \quad (1)$$

В свою очередь, напряжение  $U_C$  в любой момент времени равно отношению заряда  $q$  пластины конденсатора в этот же момент времени к его электрической ёмкости  $C$ :

$$U_C = \frac{q}{C}. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) следует, что заряд  $q$  после установления колебаний изменяется с течением времени по гармоническому закону:

$$q = C \cdot U_C = C \cdot U_m \cdot \cos(\omega \cdot t). \quad (3)$$

Сила тока  $I$  в цепи равна производной по времени от заряда  $q$ :

$$I = \dot{q} = -\omega \cdot C \cdot U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) = -I_m \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (4)$$

где  $I_m$  — амплитуда колебаний силы переменного тока, которая связана с амплитудой  $U_m$  колебаний напряжения между пластинами конденсатора соотношением:

$$U_m = I_m \cdot \frac{1}{\omega \cdot C}. \quad (5)$$

Графики зависимостей от времени напряжения  $U_C$  и силы тока  $I$  в цепи приведены на рис. 147.

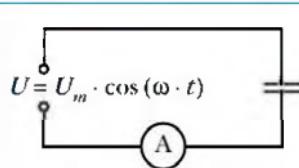


Рис. 146

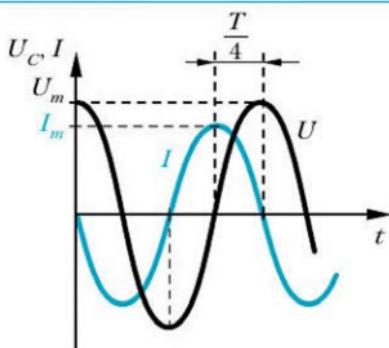


Рис. 147

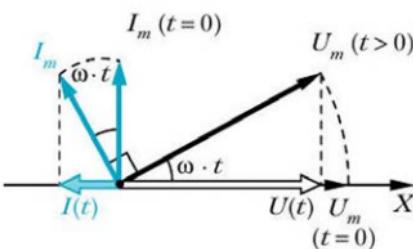


Рис. 148

Из графиков видно, что колебания напряжения и силы тока сдвинуты по фазе. Например, сила тока достигает максимального положительного значения на четверть периода раньше, чем напряжение  $U_C$ . Поэтому говорят, что *колебания силы тока опережают по фазе колебания напряжения на конденсаторе на  $\frac{\pi}{2}$* . Обратим внимание на то, что при таком соотношении фаз в моменты времени, когда сила тока равна нулю, модуль напряжения становится максимальным.

Этот же результат можно получить, если, используя формулы преобразования тригонометрических функций, переписать уравнение (4) в виде:

$$I(t) = -I_m \cdot \sin(\omega \cdot t) = I_m \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (6)$$

Сравнение выражений (6) и (1) подтверждает, что фаза колебаний силы тока в любой момент времени на  $\frac{\pi}{2}$  больше, чем фаза колебаний напряжения  $U_C$  на конденсаторе.

Введём обозначение  $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ . Тогда уравнение (5) принимает вид:

$$U_m = I_m \cdot X_C. \quad (7)$$



Векторные диаграммы, описывающие изменения силы тока и напряжения на конденсаторе, для двух моментов времени ( $t = 0$  и  $t > 0$ ) приведены на рис. 148. Видно, что при равномерном вращении с угловой скоростью  $\omega$  в любой момент времени вектор, изображающий амплитуду силы тока, опережает вектор, изображающий амплитуду напряжения, на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

Соотношение (7) внешне напоминает закон Ома для участка цепи с резистором. По этой причине величину  $X_C$ , обратную произведению циклической частоты  $\omega$  на электрическую ёмкость  $C$  конденсатора, называют *ёмкостным сопротивлением* этого конденсатора.

Отметим особо, что, согласно соотношению (7), ёмкостное сопротивление  $X_C$  равно отношению амплитуд колебаний напряжения и силы тока, а не их мгновенных значений в некоторый момент времени. Это становится очевидным, если учесть, что значения напряжения и силы тока обращаются в нуль в разные моменты времени.

То, что  $X_C$  обратно пропорционально ёмкости конденсатора  $C$ , легко понять, если вспомнить, что протекание переменного тока в цепи с конденсатором обусловлено процессами его перезарядки. Действительно, чем больше ёмкость конденсатора, тем больший заряд требуется для увеличения напряжения на заданную величину. Следовательно, тем больше будет сила тока перезарядки и, соответственно, меньше ёмкостное сопротивление.

В заключение отметим, что различие на  $\frac{\pi}{2}$  между фазами тока и напряжения на конденсаторе приводит к тому, что мгновенная мощность переменного тока в течение периода изменяет знак. В результате *среднее значение мощности, потребляемой конденсатором за период, равно нулю*. Это легко объяснить. Действительно, при зарядке конденсатора его электрическая энергия увеличивается. Это происходит за счёт положительной работы источника, т. е. в течение этого промежутка времени энергия передаётся от источника конденсатору. Напротив, при разрядке конденсатора его электрическая энергия уменьшается. При этом работа источника тока отрицательна, т. е. энергия возвращается обратно источнику.

### Вопросы

- 1 Как соотносятся фазы колебаний напряжения между пластинами конденсатора и силы тока в цепи переменного тока?
- 2 Как при этом связаны амплитуды силы тока и напряжения?
- 3 Что называют ёмкостным сопротивлением?
- 4 Почему ёмкостное сопротивление обратно пропорционально ёмкости конденсатора?
- 5 Как изменяется с течением времени мгновенная мощность, потребляемая конденсатором в цепи переменного тока?
- 6 Чему равна средняя за период мощность, потребляемая конденсатором в цепи переменного тока?

- 7** Чему равна работа подключённого к конденсатору источника переменного тока за период?

### Упражнения

- 1 Опишите, используя графики на рис. 147, как изменяется с течением времени: а) напряжение на конденсаторе; б) сила тока; в) заряд пластины конденсатора; г) энергия электрического поля конденсатора.
- 2 Определите ёмкостное сопротивление конденсатора ёмкостью  $C = 100 \text{ нФ}$  в цепи переменного тока с частотой  $v = 100 \text{ кГц}$ .
- 3 Амплитуда напряжения между пластинами конденсатора ёмкостью  $C = 5 \text{ мкФ}$  в цепи переменного тока с частотой  $v = 50 \text{ Гц}$  равна  $U_m = 380 \text{ В}$ . Определите амплитуду силы тока в цепи.
- 4 К источнику переменного тока с частотой  $v = 50 \text{ Гц}$  подключили конденсатор ёмкостью  $C = 10 \text{ мкФ}$ . Амплитуда силы тока в цепи  $I_m = 2 \text{ А}$ . Определите работу источника тока за промежуток времени, равный: а) четверти периода колебаний; б) половине периода колебаний (промежуток начинается в момент, когда напряжение на конденсаторе увеличивается от нуля).

### Для углублённого уровня



**§ 43**

### Катушка индуктивности в цепи переменного тока

Напомним, что изменение силы тока в любом проводнике приводит к изменению создаваемого этим током магнитного поля. Изменение магнитного поля, в свою очередь, приводит к появлению вихревого электрического поля. Оно препятствует увеличению силы тока, если сила тока возрастает, и, напротив, препятствует уменьшению силы тока, если сила тока убывает. Другими словами, при изменении силы тока в проводнике в нём возникает ЭДС самоиндукции, которая препятствует этому изменению.

Рассмотрим катушку индуктивности, сила тока в которой изменяется с течением времени по гармоническому закону:

$$I = I_m \cdot \cos(\omega \cdot t). \quad (1)$$

Пусть индуктивность катушки равна  $L$ . Тогда возникающая в ней ЭДС самоиндукции, согласно формуле (3) из § 29, будет изменяться по закону:

$$\mathcal{E} = -L \cdot \dot{I} = \omega \cdot L \cdot I_m \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (2)$$

Пусть активное сопротивление катушки пренебрежимо мало. Такую катушку индуктивности называют *идеальной*.

Если активное сопротивление катушки равно нулю, то напряжение  $U$  на катушке, равное разности потенциалов между её выводами, уравновешивается ЭДС самоиндукции, возникающей в катушке. Другими словами, в идеальной катушке напряжённость вихревого электрического поля в каждой точке её провода должна быть равна по модулю и противоположна по направлению напряжённости электрического поля, обусловленного разностью потенциалов между выводами катушки. Поэтому в любой момент времени выполняется равенство:

$$U = -\dot{\phi}. \quad (3)$$

Подставляя выражение (2) в (3), получаем, что напряжение между выводами катушки с течением времени изменяется по закону:

$$U = -\omega \cdot L \cdot I_m \cdot \sin(\omega \cdot t) = -U_m \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (4)$$

где  $U_m$  — амплитуда колебаний напряжения, которая связана с амплитудой  $I_m$  колебаний силы тока в цепи соотношением:

$$U_m = I_m \cdot \omega \cdot L. \quad (5)$$

Графики зависимостей от времени напряжения  $U$  и силы тока  $I$  в цепи приведены на рис. 149.

Из графиков видно, что колебания напряжения и силы тока сдвинуты по фазе. Например, напряжение достигает максимального положительного значения на четверть периода раньше, чем сила тока. Поэтому говорят, что *колебания напряжения на катушке опережают по фазе колебания силы тока в ней на  $\frac{\pi}{2}$* . Обратим внимание на то, что при таком соотношении фаз в моменты времени, когда модуль напряжения становится максимальным, сила тока равна нулю.

Этот же результат можно получить, если, используя формулы преобразования тригонометрических функций, переписать формулу (4) в виде:

$$U = \omega \cdot L \cdot I_m \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (6)$$

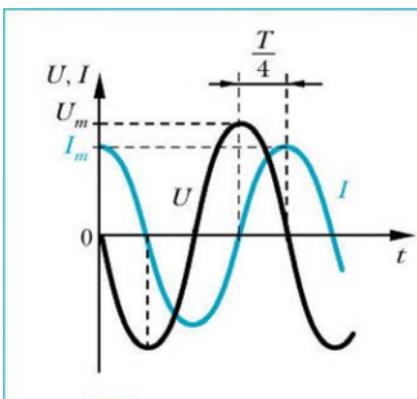


Рис. 149

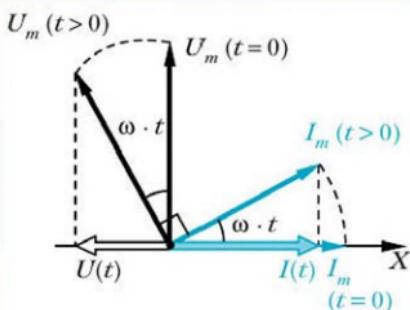


Рис. 150

равную произведению циклической частоты  $\omega$  на индуктивность  $L$  катушки, называют *индуктивным сопротивлением* этой катушки.

Отметим особо, что, согласно выражению (7), индуктивное сопротивление  $X_L$  равно отношению амплитуд колебаний напряжения и силы тока, а не их мгновенных значений в некоторый момент времени.

То, что  $X_L$  прямо пропорционально  $L$ , легко понять, поскольку ЭДС самоиндукции, возникающая в катушке, тем больше, чем больше индуктивность этой катушки. Кроме того, ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна скорости изменения силы тока. Поэтому индуктивное сопротивление прямо пропорционально и циклической частоте.

В заключение отметим, что различие между фазами тока и напряжения на идеальной катушке на  $\frac{\pi}{2}$  приводит к тому, что мгновенная мощность переменного тока в течение периода изменяет знак. В результате *среднее значение мощности, потребляемой идеальной катушкой за период, равно нулю*. Это легко объяснить. Действительно, при увеличении силы тока в катушке энергия её магнитного поля увеличивается. Это происходит за счёт положительной работы источника, т. е. в течение этого промежутка времени энергия передаётся от источника катушке. Напротив, при уменьшении силы тока в катушке энергия её магнитного поля уменьшается. При этом работа источника тока отрицательна, т. е. энергия возвращается обратно источнику.



Векторные диаграммы, описывающие изменения силы тока и напряжения на катушке, для двух моментов времени ( $t = 0$  и  $t > 0$ ) приведены на рис. 150. Видно, что при равномерном вращении с угловой скоростью  $\omega$  в любой момент времени вектор, изображающий амплитуду напряжения, опережает вектор, изображающий амплитуду силы тока, на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

Сравнение соотношений (6) и (1) подтверждает, что фаза колебаний напряжения на катушке в любой момент времени на  $\frac{\pi}{2}$  больше, чем фаза колебаний силы тока в цепи. **К**

Если обозначить  $X_L = \omega \cdot L$ , то формула (5) принимает вид:

$$U_m = I_m \cdot X_L. \quad (7)$$

Соотношение (7) внешне напоминает закон Ома для участка цепи с резистором. По этой причине величину  $X_L$ ,

**Вопросы**

- 1 Как соотносятся фазы колебаний напряжения между выводами катушки и силы тока в ней?
- 2 Как при этом связаны амплитуды силы тока и напряжения?
- 3 Что называют индуктивным сопротивлением?
- 4 Почему индуктивное сопротивление прямо пропорционально индуктивности катушки и циклической частоте?
- 5 Как изменяется с течением времени мгновенная мощность, потребляемая катушкой в цепи переменного тока?
- 6 Чему равна средняя за период мощность, потребляемая катушкой в цепи переменного тока?

**Упражнения**

-  1 Опишите, используя графики на рис. 149, как изменяется с течением времени: а) напряжение на катушке; б) сила тока в ней; в) энергия магнитного поля катушки.
- 2 Определите индуктивное сопротивление катушки с индуктивностью  $L = 0,1 \text{ Гн}$  в цепи переменного тока с частотой  $v = 50 \text{ Гц}$ .
- 3 Амплитуда напряжения между выводами катушки с индуктивностью  $L = 20 \text{ мГн}$  в цепи переменного тока с частотой  $v = 50 \text{ Гц}$  равна  $U_m = 380 \text{ В}$ . Определите амплитуду силы тока в цепи.
-  4 К источнику переменного тока с частотой  $v = 50 \text{ Гц}$  подключили катушку с индуктивностью  $L = 40 \text{ мГн}$ . Амплитуда силы тока в цепи  $I_m = 2 \text{ А}$ . Определите работу источника за промежуток времени, равный: а) четверти периода колебаний; б) половине периода колебаний (промежуток начинается в момент, когда напряжение на катушке увеличивается от нуля).

**Для углублённого уровня****§ 44****Вынужденные электромагнитные колебания. Резонанс**

Ранее (см. § 38) рассматривались свободные электромагнитные колебания в контуре и предполагалось, что потери электромагнитной энергии при этом равны нулю. В реальности активное сопротивление  $R$  контура отлично от нуля. Поэтому протекание тока в контуре сопровождается выделением определённого количества теплоты и излучением. Это приводит к тому, что электромагнитная энергия  $W$  колебательного контура уменьшается с течением времени, а колебания затухают.

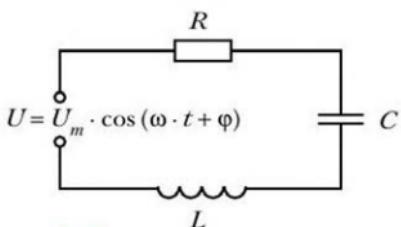


Рис. 151

работа источника компенсирует потери энергии в цепи, амплитуда  $I_m$  колебаний силы тока перестанет изменяться.

Установившиеся вынужденные электромагнитные колебания (подобно установившимся вынужденным механическим колебаниям) удовлетворяют двум важным свойствам, подтверждённым экспериментально.

! Во-первых, частота установившихся вынужденных колебаний силы тока равна частоте изменения напряжения источника. Во-вторых, амплитуда установившихся вынужденных колебаний зависит от циклической частоты  $\omega$  колебаний напряжения источника.

Зависимость амплитуды установившихся колебаний от частоты называют амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) данной колебательной системы.

На рис. 152 приведён экспериментально полученный график зависимости  $I_m(\omega)$  для рассматриваемой цепи переменного тока. Проведём анализ этого графика.

При малых циклических частотах  $\omega$  (в случаях, когда напряжение между выводами источника изменяется очень медленно) амплитуда колебаний силы тока стремится к нулю.

Этот результат легко понять, если вспомнить, что ёмкостное сопротивление конденсатора обратно пропорционально циклической частоте. Следовательно, при стремлении циклической частоты к нулю ёмкостное сопротивление стремится к бесконечности. Поэтому сила тока в цепи стремится к нулю.

При увеличении циклической частоты  $\omega$  амплитуда  $I_m$  увеличива-

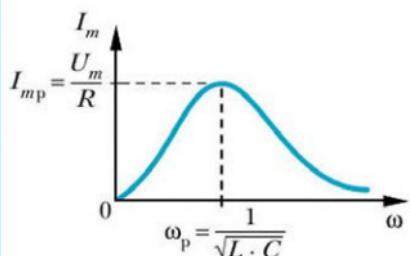


Рис. 152

ется и достигает максимума при частоте  $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ , равной частоте свободных колебаний в контуре при  $R = 0$ .

При дальнейшем увеличении  $\omega$  амплитуда  $I_m$  уменьшается и стремится к нулю при стремлении  $\omega$  к большим значениям. Это объясняется тем, что индуктивное сопротивление катушки прямо пропорционально циклической частоте. Поэтому при стремлении циклической частоты к бесконечности индуктивное сопротивление также стремится к бесконечности. В результате сила тока в цепи стремится к нулю.

Особый интерес (в том числе практический) представляет экстремум АЧХ.

Напомним, что явление достижения амплитудой установившихся вынужденных колебаний максимального значения при приближении циклической частоты к некоторому значению называют резонансом.

**!** Частоту  $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ , при которой амплитуда силы тока достигает максимального значения, называют *резонансной частотой*.

Отметим, что вид АЧХ колебательного контура зависит от активного сопротивления этого контура (рис. 153). Чем меньше активное сопротивление, тем «острее» резонанс и, соответственно, больше максимальная амплитуда установившихся вынужденных колебаний, равная  $I_{m_p} = \frac{U_m}{R}$ .

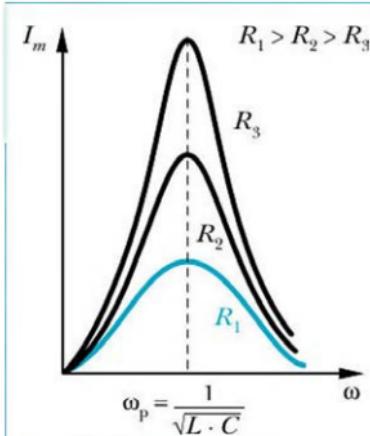


Рис. 153

### Вопросы

- 1 Как получить незатухающие электромагнитные колебания в реальном контуре?
- 2 Как называют такие колебания?
- 3 Какие свойства установившихся вынужденных электромагнитных колебаний вы знаете?
- 4 Как называют зависимость амплитуды установившихся вынужденных колебаний силы тока от циклической частоты напряжения между выводами источника?
- 5 Какое явление называют резонансом?

- 6 Чему равна амплитуда установившихся колебаний силы тока, когда напряжение между выводами источника изменяется:  
а) очень медленно; б) очень быстро?
- 7 Что называют резонансной частотой?
- 8 Как изменяется резонансная амплитуда колебаний силы тока с уменьшением активного сопротивления контура? Изменяется ли при этом резонансная частота?

### Упражнения

К источнику переменного тока с частотой  $v = 50$  Гц последовательно подключены резистор с сопротивлением  $R = 0,2$  кОм, конденсатор ёмкостью  $C = 50$  мкФ и катушка с индуктивностью  $L = 1$  Гн. Амплитуда установившихся колебаний силы тока в цепи равна  $I_m = 0,1$  А. Выполните задания.

- 1 Определите амплитудные значения напряжений на этих элементах.
- 2 Определите разности фаз между колебаниями силы тока в цепи и напряжения: а) на резисторе; б) конденсаторе; в) катушке индуктивности.
- 3 Определите разности фаз между колебаниями напряжения на конденсаторе и напряжения: а) на резисторе; б) катушке индуктивности.

### Для углублённого уровня



§ 45

### Закон Ома для электрической цепи переменного тока

Пусть к источнику переменного напряжения с амплитудой  $U_m$  и циклической частотой  $\omega$  последовательно подключены резистор с сопротивлением  $R$ , конденсатор ёмкостью  $C$  и катушка с индуктивностью  $L$  (см. рис. 151). Будем считать, что цепь удовлетворяет условию квазистационарности, т. е. в любой момент времени сила тока через все последовательно включённые элементы цепи одинакова. Тогда после установления в цепи вынужденных колебаний сила тока будет изменяться с циклической частотой  $\omega$  по гармоническому закону. Пусть этот закон имеет вид:

$$I = I_m \cdot \cos (\omega \cdot t). \quad (1)$$

Колебания напряжения на резисторе синфазны с колебаниями силы тока. В свою очередь, колебания напряжения на конденсаторе отстают по фазе

зс от колебаний силы тока на  $\frac{\pi}{2}$ , а на катушке индуктивности, напротив, колебания напряжения опережают колебания силы тока на такую же величину. Поэтому законы изменения напряжений на резисторе, конденсаторе и катушке индуктивности будут иметь вид:

$$U_R = I_m \cdot R \cdot \cos(\omega \cdot t) = U_{Rm} \cdot \cos(\omega \cdot t); \quad (2)$$

$$U_C = I_m \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) = U_{Cm} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right); \quad (3)$$

$$U_L = I_m \cdot \omega \cdot L \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right) = U_{Lm} \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (4)$$

Сумма напряжений на последовательно соединённых резисторе, конденсаторе и катушке в любой момент времени равна напряжению между выводами источника:

$$U = U_R + U_C + U_L. \quad (5)$$

При этом поскольку фазы напряжений на разных элементах цепи различны, то фаза суммарного напряжения в общем случае отличается от фазы колебаний силы тока. Будем считать, что фаза колебаний  $U$  опережает фазу колебаний  $I$  на  $\phi$ . Тогда закон изменения напряжения между выводами источника будет иметь вид:

$$U = U_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi). \quad (6)$$

Для определения амплитуды силы тока  $I_m$  и разности фаз  $\phi$  воспользуемся методом векторных диаграмм. Представим каждое из гармонических колебаний (1)–(4) в виде изменения с течением времени проекции на ось  $X$  соответствующего радиуса-вектора, вращающегося вокруг начала координат с одинаковой угловой скоростью  $\omega$ . Модуль каждого из этих трёх векторов равен амплитуде соответствующего колебания. Обратим внимание на то, что в начальный момент времени (при  $t = 0$ ) вращающиеся радиусы-векторы занимают положение, показанное на рис. 154. Такое расположение векторов обусловлено разностями фаз между колебаниями рассматриваемых величин.

В качестве примера для определения мгновенных значений силы тока и напряжений на элементах цепи в заданный момент времени на рис. 155 приведена векторная диаграмма для момента времени  $t = \frac{T}{12}$ , где  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ .

В любой момент времени сумма проекций трёх радиусов-векторов  $U_{Rm}$ ,  $U_{Cm}$  и  $U_{Lm}$  равна сумме правой части уравнения (5) и равна проекции суммы этих векторов. Следовательно, согласно уравнению (5), в любой момент времени (включая момент  $t = 0$ ) сумма этих векторов по модулю равна  $U_m$  и составляет угол  $\phi$  с радиусом-вектором  $I_m$  (см. рис. 154 и 155). Применяя

$$U_{Lm} = I_m \cdot \omega \cdot L$$

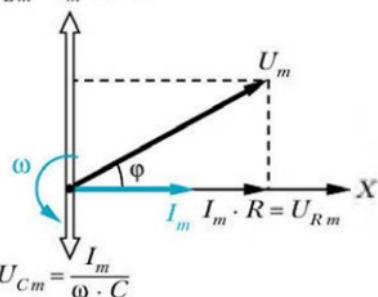


Рис. 154

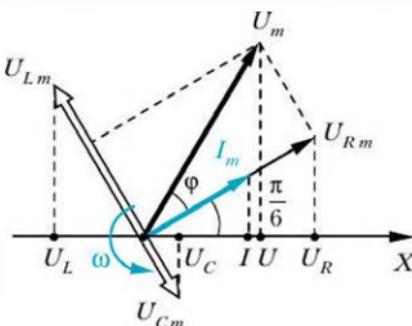


Рис. 155

теорему Пифагора для прямоугольного треугольника, образованного гипотенузой  $U_m$  и катетом  $U_{Rm}$ , получаем:

$$U_m^2 = (U_{Lm} - U_{Cm})^2 + U_{Rm}^2. \quad (7)$$

Подставляя в выражение (7) значения амплитуд напряжений на резисторе, конденсаторе и катушке индуктивности, получим выражение, позволяющее рассчитать амплитуду колебаний силы тока в цепи:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{\left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2 + R^2}}. \quad (8)$$

Полученная зависимость соответствует графику на рис. 152. Действительно, при стремлении  $\omega$  к нулю или к бесконечности значения  $I_m$  стремятся к нулю. Кроме того, подкоренное выражение становится минимальным при  $\omega = \omega_{p1} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ . Следовательно, максимальная амплитуда силы тока, достигаемая при резонансе тока в цепи, равна  $I_{mp} = \frac{U_m}{R}$ .

**!** Физическую величину  $Z$ , равную отношению амплитуды колебаний напряжения  $U_m$  к амплитуде колебаний силы тока  $I_m$ , называют полным электрическим сопротивлением переменному току:

$$Z = \frac{U_m}{I_m}. \quad (9)$$

Поэтому соотношение  $U_m = I_m \cdot Z$  часто называют законом Ома для цепи переменного тока.

Из выражения (9) следует, что в случае последовательного соединения резистора, конденсатора и катушки индуктивности полнос электрическое сопротивление такой цепи равно:

$$Z = \sqrt{\left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2 + R^2}. \quad (10)$$

Для определения разности фаз  $\phi$  между напряжением  $U$  и силой тока  $I$  обратимся к рис. 154 и 155. Видно, что искомая разность фаз соответствует углу, на который в процессе вращения радиус-вектор  $U_m$  опережает радиус-вектор  $I_m$ . Из рисунков следует, что тангенс этого угла равен:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}}{R}, \quad (11)$$

Отметим, что при *резонансе тока* (при циклической частоте источника, равной  $\frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ ), т. е. при достижении амплитудой силы тока максимума,  $\operatorname{tg} \phi = 0$ . Другими словами, в этом случае в любой момент времени напряжение  $U_L$  на катушке индуктивности равно по модулю и противоположно по знаку напряжению  $U_C$  на конденсаторе. Поэтому напряжение  $U$  между выводами источника также в любой момент времени по фазе совпадает с силой тока  $I$  и равно напряжению на активном сопротивлении  $R$ . В результате мгновенная мощность источника в любой момент времени положительна и полностью компенсирует потери энергии на активном сопротивлении. При этом энергия магнитного поля катушки индуктивности преобразуется в энергию электрического поля конденсатора и обратно — так, что общая электромагнитная энергия контура с течением времени не изменяется. Поэтому можно считать, что при *резонансе тока в колебательном контуре происходят как бы свободные электромагнитные колебания без потерь энергии*.

Теперь исследуем, при каких условиях амплитуда установившихся колебаний напряжения  $U_{Cm}$  на конденсаторе достигает максимального значения.

Поскольку  $U_{Cm} = \frac{I_m}{\omega \cdot C}$ , из уравнения (8) получаем:

$$U_{Cm} = \frac{U_m}{\left(\omega \cdot C\right) \cdot \sqrt{\left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2 + R^2}} = \frac{U_m}{\sqrt{\left(\omega^2 \cdot L \cdot C - 1\right)^2 + \left(\omega \cdot C \cdot R\right)^2}}. \quad (12)$$

Экспериментально полученные графики зависимости  $U_{Cm}$  от циклической частоты  $\omega$  изменения напряжения источника при различных зна-

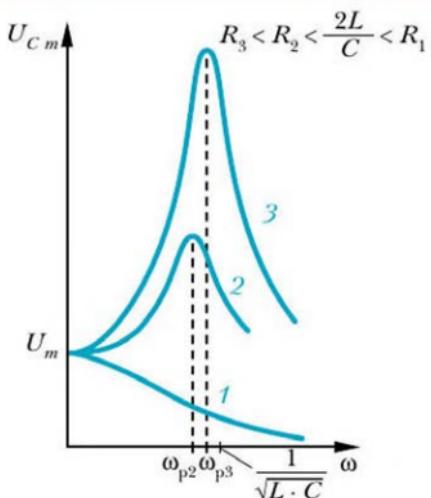


Рис. 156

очень быстром изменении напряжения источника сила тока в цепи также изменяется очень быстро. Поэтому практически всё напряжение источника компенсируется ЭДС самоиндукции катушки.

Исследование на минимум подкоренного выражения дроби в правой части выражения (12) позволяет убедиться, что при малом активном сопротивлении ( $R < \frac{2L}{C}$ ) функция  $U_{Cm}(\omega)$  имеет максимум. Это явление называют *резонансом напряжения* на конденсаторе в последовательной цепи переменного тока. Циклическая частота этого резонанса равна:

$$\omega_{p_{U_C}} = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{R^2}{2L^2}}. \quad (13)$$

Из выражения (13) следует, что значение резонансной частоты увеличивается при уменьшении  $R$ . При этом, соответственно, увеличивается и значение резонансной амплитуды напряжения на конденсаторе. При стремлении  $R$  к нулю значение  $\omega_{p_{U_C}}$  стремится к значению циклической частоты свободных колебаний в контуре без затухания, равной  $\frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ . В этом случае  $U_{Cm}$ , согласно выражению (12), стремится к бесконечно большим значениям.

Таким образом, результаты соответствуют графикам на рис. 156.

Частотах активного сопротивления  $R$  показаны на рис. 156. Проанализируем выражение (12) и сопоставим результаты анализа с приведёнными графиками.

Из выражения (12) следует, что при стремлении  $\omega$  к нулю значение  $U_{Cm}$  стремится к  $U_m$ . Это объясняется тем, что при очень медленном изменении напряжения источника сила тока в цепи практически равна нулю. Поэтому напряжения на активном сопротивлении и катушке индуктивности также практически равны нулю.

При стремлении  $\omega$  к большим значениям из выражения (12) следует, что амплитуда  $U_{Cm}$  стремится к нулю. Это объясняется тем, что при

**Вопросы**

- 1 Как соотносятся фазы колебаний силы тока и напряжений на активном сопротивлении, конденсаторе и катушке индуктивности при их последовательном соединении в цепи переменного тока?
- 2 Что называют: а) полным электрическим сопротивлением переменному току; б) законом Ома для цепи переменного тока?
- 3 Чему равно полное электрическое сопротивление в случае последовательного соединения резистора, конденсатора и катушки индуктивности?
- 4 Чему равна разность фаз между напряжением  $U$  источника и силой тока  $I$  в последовательной цепи переменного тока?
- 5 Чему равна циклическая частота резонанса тока в последовательной цепи переменного тока?
- 6 Как изменяются  $\omega_p u_C$  и  $U_{Cm}(\omega_p u_C)$  при резонансе напряжения на конденсаторе, если активное сопротивление последовательной цепи уменьшается?

**Упражнения**

- 1 Проведите анализ формул (8) и (12) из параграфа.
- ✓ 2 К источнику переменного тока с амплитудой напряжения  $U_m = 10$  В последовательно подключены резистор с сопротивлением  $R = 20$  Ом, конденсатор ёмкостью  $C = 50$  мкФ и катушка с индуктивностью  $L = 20$  мГн. Выполните задания.
  - А) Определите полное электрическое сопротивление цепи и амплитуду силы тока в ней, если циклическая частота изменения напряжения источника  $\omega_1 = 500$  с<sup>-1</sup>.
  - Б) Определите циклическую частоту  $\omega_{pr}$ , соответствующую резонансу тока в цепи. Рассчитайте соответствующие этой частоте амплитудные значения напряжений на элементах цепи и сдвиг фаз между колебаниями силы тока в цепи и напряжения источника. Постройте векторную диаграмму.
  - В) Определите циклическую частоту  $\omega_{pr} u_C'$ , соответствующую резонансу напряжения на конденсаторе. Рассчитайте соответствующие этой частоте амплитудные значения напряжений на элементах цепи и сдвиг фаз между колебаниями силы тока в цепи и напряжения источника. Постройте векторную диаграмму.

## § 46 Мощность в цепи переменного тока

Рассмотрим цепь переменного тока. Пусть закон изменения напряжения между выводами источника имеет вид:

$$U = U_m \cdot \cos(\omega \cdot t). \quad (1)$$

В общем случае колебания напряжения между выводами источника по фазе могут не совпадать с колебаниями силы тока. Поэтому закон изменения силы тока в этой цепи может быть записан в виде:

$$I = I_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi). \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) следует, что мгновенная мощность, потребляемая цепью, равна:

$$P = I \cdot U = I_m \cdot U_m \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi). \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что мгновенная мощность с течением времени непрерывно изменяется. Определим среднюю мощность за период колебаний. Для этого, используя известную из тригонометрии формулу для произведения косинусов, преобразуем формулу (3) к виду:

$$P = \frac{I_m \cdot U_m}{2} \cdot [\cos(2\omega \cdot t + \phi) + \cos \phi]. \quad (4)$$

Поскольку среднее значение функции  $\cos(2\omega \cdot t + \phi)$  за период равно нулю, то средняя за период мощность  $\bar{P}$ , потребляемая цепью, может быть рассчитана по формуле:

$$\bar{P} = \frac{I_m \cdot U_m}{2} \cdot \cos \phi. \quad (5)$$

**!** Среднюю за период мощность  $\bar{P}$  можно вычислить и через действующие значения силы тока и напряжения:

$$\bar{P} = I_d \cdot U_d \cdot \cos \phi. \quad (6)$$

Входящую в формулы (5) и (6) величину  $\cos \phi$  называют *коэффициентом мощности*.

Отметим, что, как правило, рассматриваемые при решении практических задач промежутки времени существенно превышают период колебаний в цепи переменного тока. Поэтому обычно среднюю за такие промежутки времени мощность считают равной средней за период мощности. При этом используют термин «средняя мощность переменного тока».

Из формул (5) и (6) следует, что средняя мощность переменного тока зависит от разности фаз колебаний напряжения и силы тока. В промышленных сетях сдвиг фаз, как правило, обусловлен включением в них устройств, имеющих большие индуктивные сопротивления. К таким устройствам относятся, например, электродвигатели и трансформаторы, работающие с неполной нагрузкой. Для уменьшения сдвига фаз, а следовательно, увеличения полезной мощности к таким устройствам часто подключают конденсаторы. В заключение отметим, что для промышленных предприятий наименьший допустимый коэффициент мощности равен 0,85.

### Вопросы

- 1 Как рассчитывают среднюю мощность переменного тока?
- 2 Что называют коэффициентом мощности?
- 3 Как можно увеличить коэффициент мощности?

### Упражнения

- 1 В результате включения в цепь переменного тока конденсатора и резистора сдвиг фаз между колебаниями напряжения и силы тока уменьшился от  $\pi/3$  до  $\pi/6$ . При этом действующие значения силы тока и напряжения не изменились. Определите: а) во сколько раз изменился коэффициент мощности; б) на сколько процентов изменилась средняя потребляемая цепью мощность.
-  2 В городскую сеть переменного тока с частотой 50 Гц и с амплитудным напряжением 311 В включены последовательно резистор с сопротивлением 157 Ом и катушка с индуктивностью 0,5 Гн. Определите среднюю мощность, потребляемую этой цепью.

### § 47

### Производство, передача и потребление электрической энергии. Трансформатор

В настоящее время для получения переменного тока используют индукционные генераторы. Принцип действия подобных генераторов был рассмотрен в § 40 (см. рис. 142).

Современный индукционный генератор переменного тока, используемый на тепловых электростанциях, показан на рис. 157. В этом генераторе источ-

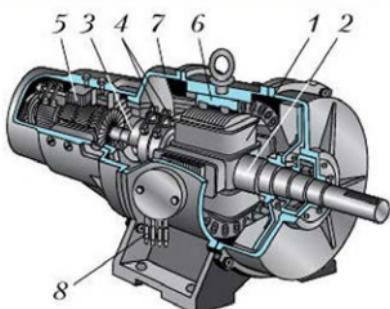


Рис. 157

ту вырабатываемого электрического тока. Например, если электромагнит ротора имеет одну пару полюсов, то для получения переменного напряжения с частотой 50 Гц, принятой в качестве стандартной во многих странах, в том числе в России, ротор должен делать 50 оборотов в секунду. Отметим, что на гидроэлектростанциях используют роторы, вращающиеся с существенно меньшей частотой. Поэтому индукторы таких генераторов являются многополюсными.

Современные электрические генераторы являются сложными техническими устройствами. На крупных электростанциях России используют генераторы, имеющие мощности от 300 до 1200 МВт. Сила тока в обмотках индуктора генератора мощностью 1200 МВт близка к 8 кА. Масса подобного генератора вместе с приводящей его в действие турбиной может превышать 600 т. Понятно, что производство и эксплуатация подобных агрегатов требуют привлечения самых современных технологий и высококвалифицированных кадров.

Напряжение, вырабатываемое генераторами электростанций, по техническим причинам обычно не превышает 25 кВ. Передача электрической энергии при таком напряжении на большие расстояния приводит к существенным потерям энергии, связанным с выделением теплоты в проводах линий электропередачи (ЛЭП). Чтобы уменьшить эти потери, необходимо, согласно закону Джоуля – Ленца, уменьшить силу тока в ЛЭП. При этом, чтобы сохранить передаваемую мощность, необходимо увеличивать напряжение. Поэтому перед передачей электроэнергии на большие расстояния напряжение увеличивают до сотен киловольт (рис. 158). В свою очередь, перед передачей электроэнергии потребителю напряжение уменьшают, так как использование высокого напряжения связано с

ником магнитного поля — электромагнит 1 (индуктор) — вращается на валу 2. На этом же валу закреплены кольца 3, к которым через щётки 4 от возбудителя 5 подводят постоянный ток для питания обмоток индуктора. При вращении индуктора в обмотках 6, расположенных на статоре 7, возникает ЭДС индукции. Выходное напряжение снимают с клемм 8 обмоток статора.

Скорость вращения ротора и число пар магнитных полюсов его электромагнита определяют частоту

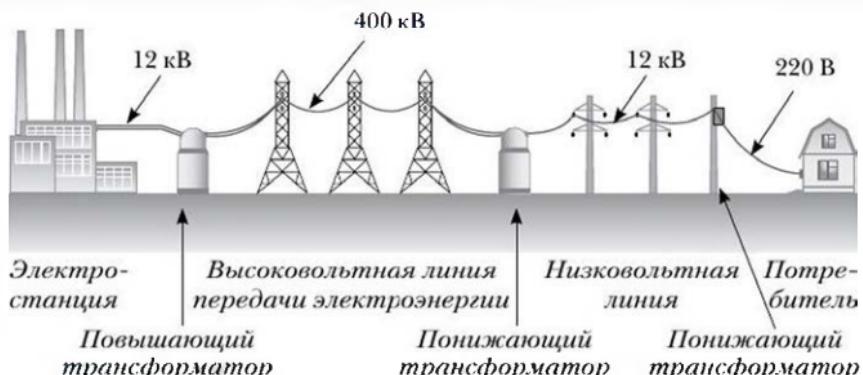


Рис. 158 Схема передачи электроэнергии на большие расстояния

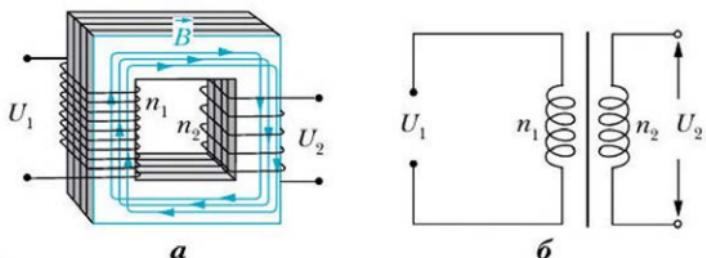
большими техническими сложностями и не позволяет обеспечить достаточную электробезопасность.

Осуществить такого рода преобразования постоянного напряжения очень трудно, между тем как *переменное напряжение можно преобразовывать (повышать или понижать) весьма просто и почти без потерь энергии*. В этом заключается одна из основных причин того, что в технике в подавляющем большинстве случаев используют переменное, а не постоянное напряжение.

Для увеличения (или уменьшения) амплитуды переменного напряжения используют специальные устройства — *трансформаторы*. Первые трансформаторы были созданы российским учёным Павлом Николаевичем Яблочковым (1847–1894) в 1877 г. и сотрудником Московского университета Иваном Филипповичем Усагиным (1855–1919) в 1882 г.

Устройство простейшего трансформатора показано на рис. 159. Трансформатор состоит из сердечника, представляющего собой набор плотно прижатых и изолированных друг от друга пластин из магнитно-мягкого железа. На этот сердечник намотаны две обмотки из изолированных проводов. Обмотку, которую подключают к источнику переменного напряжения, называют *первичной*, а обмотку, к которой подключают нагрузку, — *вторичной*.

Если к выводам первичной обмотки подключить источник переменного напряжения с амплитудой  $U_{m1}$ , то в ней возникнет переменный ток. Этот ток создаст в сердечнике переменное магнитное поле. Линии этого поля пересекают площади витков вторичной обмотки. Изменение магнитного потока через витки вторичной обмотки приводит к тому, что между её выводами возникает переменное напряжение с амплитудой  $U_{m2}$ .



*Рис.* 159 Устройство (*а*) и электрическая схема (*б*) простейшего трансформатора

Рассмотрим идеальный случай, когда можно пренебречь омическим сопротивлением обмоток, рассеянием магнитного потока и потерями энергии в сердечнике. Пусть созданный магнитный поток через поперечное сечение сердечника изменяется по закону:

$$\Phi = \Phi_m \cdot \cos(\omega \cdot t). \quad (1)$$

В этом случае в первичной обмотке возникает ЭДС индукции:

$$\mathcal{E}_1 = -n_1 \cdot \dot{\Phi} = n_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (2)$$

В свою очередь, ЭДС индукции, возникающая во вторичной обмотке, равна:

$$\mathcal{E}_2 = -n_2 \cdot \dot{\Phi} = n_2 \cdot \omega \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (3)$$

Если активное сопротивление обмоток пренебрежимо мало, то в любой момент времени

$$U_1 = -\mathcal{E}_1, \quad (4)$$

$$U_2 = -\mathcal{E}_2. \quad (5)$$

Из формул (2)–(5) следует, что отношение амплитуд напряжений между выводами вторичной и первичной обмоток трансформатора в идеальном случае равно:

$$\frac{U_{m2}}{U_{m1}} = \frac{\mathcal{E}_{m2}}{\mathcal{E}_{m1}} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (6)$$

Если  $\frac{n_2}{n_1} > 1$ , то трансформатор называют *повышающим*, если это отношение меньше единицы – *понижающим*.

В режиме холостого хода, т. е. при разомкнутой вторичной обмотке, ток через неё не течёт. При этом в первичной обмотке ЭДС индукции, согласно правилу Ленца, действует противоположно напряжению  $U_1$  источника. Трансформатор рассчитывают таким образом, чтобы различие между  $U_1$  и  $\mathcal{E}_1$  в режиме холостого хода было мало. В результате в таком режиме сила тока в первичной обмотке очень мала и составляет лишь несколько процентов от силы тока в ней при полной нагрузке трансформатора, когда к вторичной обмотке подключена активная нагрузка. При подключении такой нагрузки ток во вторичной обмотке создаёт магнитное поле, которое уменьшает суммарный магнитный поток в сердечнике. В результате сила тока в первичной обмотке возрастает. Возрастает и средняя мощность, потребляемая трансформатором от источника. Большая часть этой мощности передаётся активной нагрузке, подключённой ко вторичной обмотке.

В правильно сконструированном трансформаторе потери энергии, обусловленные нагреванием проводов обмоток и перемагничиванием сердечника, не превышают нескольких процентов от средней мощности, передаваемой нагрузке. Поэтому с высокой степенью точности можно считать, что амплитуды сил токов и напряжений в первичной и вторичной обмотках трансформатора удовлетворяют соотношению:

$$I_{m1} \cdot U_{m1} = I_{m2} \cdot U_{m2}. \quad (7)$$

Подчеркнём, что трансформатор в режиме холостого хода представляется собой практически индуктивное сопротивление. Поэтому потребляемая им средняя мощность близка к нулю. Однако, поскольку сила тока в нём отлична от нуля, в идущих к трансформаторной подстанции проводах ЛЭП и генераторах электростанций происходят потери мощности. Именно поэтому в то время суток, когда потребление электроэнергии снижается, часть трансформаторов на подстанциях отключают.

### Вопросы

1. На каком явлении основана работа электрогенератора?
2. Перечислите основные элементы современного индукционного генератора переменного тока.
3. Почему частота вращения ротора генератора на тепловых электростанциях в России обычно равна 3000 об/мин?
4. Как устроен простейший трансформатор?

- 5\_ Зачем нужны трансформаторные подстанции при передаче электроэнергии на большие расстояния?
- 6\_ Почему уменьшают амплитуду напряжения перед передачей электроэнергии потребителю?
- 7\_ Какую обмотку трансформатора называют: а) первичной; б) вторичной?
- 8\_ Какой трансформатор называют: а) повышающим; б) понижающим?

### Упражнения

- 1\_ Индуктор генератора гидроэлектростанции имеет 50 пар полюсов. Определите, с какой частотой должна вращаться гидротурбина, жёстко скреплённая с ротором генератора, чтобы частота генерируемого тока равнялась стандартной.
- 2\_ Определите отношение числа витков в обмотках идеального трансформатора, если он преобразует переменное напряжение с действующим значением 12 кВ в напряжение с действующим значением 220 В.
- 3\_ Определите амплитуду силы тока в первичной обмотке трансформатора из упражнения 2, если средняя мощность, потребляемая нагрузкой, подключённой к вторичной обмотке, равна 2,2 кВт. Потерями энергии пренебречь.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Колебания, при которых энергия электрического поля преобразуется в энергию магнитного поля и обратно, называют **электромагнитными колебаниями**

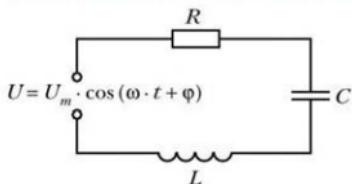
### Свободные электромагнитные колебания



Простейшая электромагнитная колебательная система — **колебательный контур** — состоит из соединённых между собой конденсатора с ёмкостью  $C$  и катушки с индуктивностью  $L$ .

Период колебаний (формула Томсона):  
 $T = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$

### Вынужденные электромагнитные колебания



При вынужденных установившихся колебаниях в колебательном контуре амплитуда силы тока достигает максимального значения при циклической частоте генератора напряжения

$$(\text{резонансной частоте}) \quad \omega_p = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

## Решение задач о свободных гармонических электромагнитных колебаниях двумя способами

Пусть заряд пластины конденсатора равен  $q$ , сила тока в контуре равна  $I$  и потери энергии в контуре пренебрежимо малы.

Тогда

напряжение между пластинами конденсатора равно ЭДС самоиндукции катушки:

$$\frac{q}{C} = -L \cdot \dot{I}.$$

Так как  $\dot{I} = \ddot{q}$ , то  $\frac{q}{C} = -L \cdot \ddot{q}$

энергия электрического поля конденсатора  $W_{\text{эл}} = \frac{q^2}{2C}$ , энергия

магнитного поля катушки  $W_m = \frac{L \cdot I^2}{2} = \frac{L \cdot \dot{q}^2}{2}$ , электромагнитная

энергия контура  $W = W_m + W_{\text{эл}} = \frac{q^2}{2C} + \frac{L \cdot \dot{q}^2}{2} = \text{const}$ .

После взятия производной по времени от этого выражения получаем:  $L \cdot \ddot{q} + \frac{q}{C} = 0$

Уравнение гармонических электромагнитных колебаний:  $\ddot{q} + \frac{q}{L \cdot C} = 0$  или  $\ddot{q} + \omega^2 \cdot q = 0$ ,

где  $\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$  — циклическая частота

Решение уравнения гармонических электромагнитных колебаний (зависимость заряда пластины конденсатора от времени):  $q(t) = q_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi)$ , где  $q_m$  — амплитуда заряда

Зависимости от времени силы тока, электрической, магнитной и электромагнитной энергий при гармонических электромагнитных колебаниях:  $I(t) = -q_m \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi) = -I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)$ ,

$$W_{\text{эл}} = \frac{q^2(t)}{2C} = \frac{q_m^2}{2C} \cdot \cos^2(\omega \cdot t + \phi), \quad W_m = \frac{L \cdot I^2(t)}{2} = \frac{L \cdot I_m^2}{2} \cdot \sin^2(\omega \cdot t + \phi),$$

$$W = W_{\text{эл}} + W_m = \frac{q_m^2}{2C} \cdot [\cos^2(\omega \cdot t + \phi) + \sin^2(\omega \cdot t + \phi)] = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{L \cdot I_m^2}{2} = \text{const}$$

# Механические и электромагнитные волны

Волновые явления широко распространены и окружают нас повсеместно. Каждый много раз видел волны на поверхности воды, читал или слышал о радиоволнах, с помощью которых осуществляется передача информации на большие расстояния.

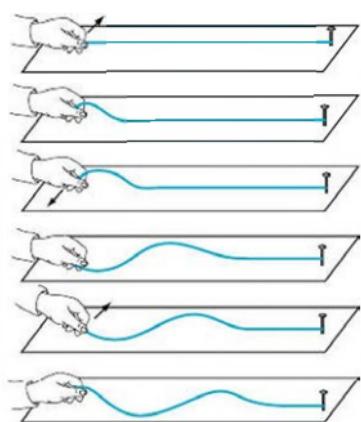
Причины, вызывающие образование волн и их распространение, разнообразны. Однако, как и колебания, все виды волн количественно описываются одинаковыми законами. Сходны и многие свойства волн разной природы. По этой причине и механические, и электромагнитные волны мы рассмотрим в одной главе.

## § 48

### Механические волны

Вы знаете, что механическая колебательная система, в которой происходят колебания, обладает механической энергией. Следовательно, такая система может совершать работу над окружающими её телами. *Если колеблющееся тело взаимодействует с окружающей средой, то оно может передавать энергию этой среде.* В результате характер движения и взаимодействия частиц среды изменится.

Рассмотрим, как происходит этот процесс, если в результате взаимодействия с колеблющимся телом среда деформируется и в ней возникают силы упругости. Периодическое изменение положения колеблющегося тела вызывает колебания граничащих с этим телом участков среды. Колебания этих участков, в свою очередь, в результате упругого взаимодействия между участками среды передаются последовательно другим, более удалённым участкам.

*a*

$$\begin{aligned}t = 0 \\ t = \frac{T}{4} \\ t = \frac{T}{2} \\ t = \frac{3T}{4} \\ t = T \\ t = \frac{5T}{4}\end{aligned}$$

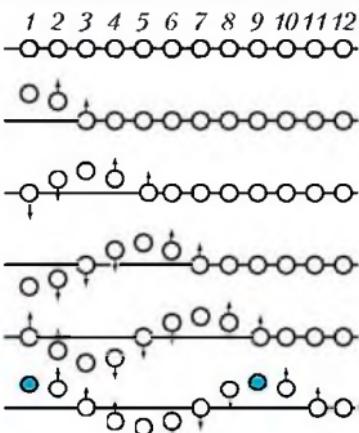
*b*

Рис. 160

Распространение волн в упругом шнуре: *a* – колебания различных частей шнура на гладкой поверхности; *б* – модель колебаний частей шнура при прохождении волны

Поясним сказанное на примере. Положим на гладкую горизонтальную поверхность стола длинный резиновый шнур (рис. 160, *a*). Заставим движением руки конец этого шнура совершать гармонические колебания с периодом  $T$ . Мысленно разобьём шнур на одинаковые участки, пронумеруем их, как показано на рис. 160, *б*, и будем следить в процессе колебаний за изменением положения этих частей относительно стола.

Смещение конца шнура приводит к возникновению силы упругости, действующей на соседнюю часть шнура. Эта сила заставляет её сдвигаться вслед за колеблющимся концом. Видно, что смещение этой части запаздывает во времени по сравнению со смещением конца. В результате действия сил упругости смещение каждой части шнура будет вызывать смещение следующей его части. При этом чем дальше расположена часть шнура от источника колебаний, тем позже она будет смещаться от положения равновесия, реагируя на изменение положения колеблющегося конца шнура.

Подобное явление характерно для любой системы, части которой взаимодействуют друг с другом. При этом выведенные части системы из положения равновесия называют *возмущением*. В результате взаимодействия с возмущённой частью соседние с ней части системы также испытывают возмущение, но с некоторой задержкой во времени. Они, в свою очередь, возмущают следующие более удалённые части системы с ещё большей задержкой.

кой и т. п. Таким образом, можно сказать, что в рассмотренном примере вдоль шнура распространяется возмущение.

**Распространяющиеся в упругой среде возмущения называют бегущими упругими волнами.**

**Скорость распространения этих возмущений называют скоростью волны.**

Отметим, что в результате действия упругих сил каждая часть среды (шнура) передаёт следующей части среды механическую энергию. Таким образом, *в бегущей волне происходит перенос энергии в направлении распространения волны*. При этом все части среды (шнура) колеблются около своих положений равновесия, т. е. остаются в среднем на месте.

**!** Таким образом, в бегущей волне происходит перенос энергии без переноса вещества.

В рассмотренном примере распространение возмущения приводит к появлению в системе (шнуре) периодически изменяющихся с течением времени сил упругости и, как следствие, периодически изменяющихся ускорений, скоростей и смещений частей системы.

Рассмотрим момент времени  $t = T$  (рис. 160, б). В этот момент времени часть шнура под номером 9 только начинает первое колебание. Её состояние, характеризуемое смещением, скоростью и ускорением, аналогично состоянию части 1, которая начинает второе колебание. В дальнейшем, например в момент времени  $t = \frac{5}{4}T$ , части 1 и 9 будут двигаться одинаково, т. е. синфазно. Заметим, что расстояние между такими точками равно расстоянию, на которое распространяется волна за время периода колебаний  $T$ .

**Расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний, называют длиной волны.**

Длину волны обычно обозначают греческой буквой  $\lambda$ .

Из рисунка 160, б видно, что части 1 и 9 не единственная пара частей, которые движутся одинаково после того, как их достигла волна (возмущение). Так же одинаково после этого в любой момент времени будут двигаться части 2 и 10. Расстояние между ними также равно длине волны  $\lambda$ . То же самое можно сказать про части 3 и 11 и т. д.

Из определения длины волны следует, что она связана со скоростью распространения бегущей волны и с периодом колебаний соотношением:

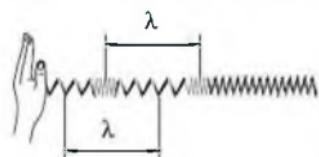
$$\lambda = v \cdot T. \quad (1)$$

Отметим особо, что скорость волны нельзя путать со скоростью движения колеблющихся частиц среды. Тем более что направления этих скоростей могут не совпадать. Например, в рассмотренном нами случае распространения упругой волны в шнуре направление скорости распространения волны перпендикулярно направлению скоростей колеблющихся частей шнура.

**Волны, в которых колебания частиц происходят перпендикулярно направлению распространения самой волны, называют поперечными.**

**Волны, в которых колебания частиц происходят вдоль направления распространения самой волны, называют продольными.**

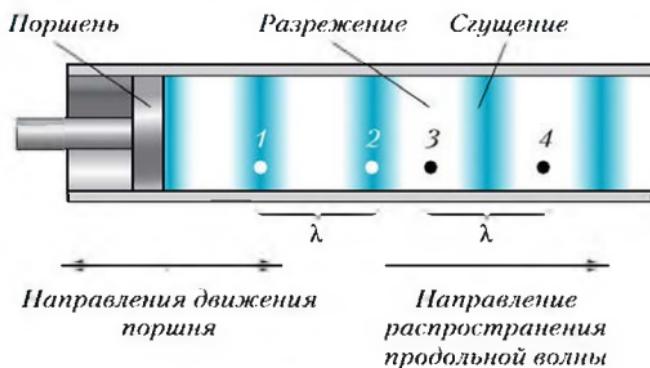
Примеры продольных волн приведены на рис. 161 и 162. Длина продольной волны определяется так же, как и поперечной: она равна расстоянию, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний.



**Рис. 161** Распространение продольных волн в упругой пружине

В рассмотренных примерах длина волны равна расстоянию между ближайшими максимальными сжатиями (сгущениями) или растяжениями (разрежениями) среды.

В жидкостях и газах *упругие* волны могут быть только продольными. Они образуются благодаря действию упругих сил (сил давления) со стороны сжатого или разреженного слоя жидкости или газа на соседние слои. Силами же взаимодействия между



**Рис. 162** Проживание продольной волны в воздухе (показаны зоны сгущений и разрежений)

слоями жидкости или газа при сдвиге одного слоя относительно другого при их малой вязкости можно пренебречь. Поэтому в таких средах поперечные волны не распространяются. 

Иначе обстоит дело с твёрдыми телами. В твёрдых телах силы упругости возникают при любом смещении одной части тела относительно других. Поэтому в твёрдых телах могут распространяться как продольные, так и поперечные упругие волны.

В заключение отметим, что модуль скорости упругих продольных и поперечных волн зависит от упругих свойств среды и её плотности. Чем более упругой является среда, тем быстрее передаётся в ней возмущение. При этом чем меньше плотность среды, тем меньшей инерционностью обладает каждая её часть. Поэтому чем более упругой является среда и чем меньше её плотность, тем больше скорость распространения упругой волны.



Можно показать, что модуль скорости распространения продольной упругой волны в однородном твёрдом теле  $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ , где  $E$  – модуль Юнга материала тела, а  $\rho$  – его плотность.

В заключение выведем закон движения частей рассмотренного выше шнуря, по которому распространяется волна. Для этого выберем систему отсчёта, начало которой совпадает с положением равновесия приводимого в движение конца шнуря. Координатную ось  $X$  направим вдоль распространения волны, а ось  $Y$  – в направлении смещений частей шнуря от положений равновесия. Тогда закон движения части шнуря, которая в положении равновесия имела координаты  $(x, 0)$ , будет представлять собой функцию двух переменных:  $y(x, t)$ .

Будем считать, что энергия в среде (шнуре) переносится без потерь. Тогда амплитуда колебаний каждой части шнуря будет одинаковой. Пусть зависимость смещения  $y$  от времени  $t$  для конца шнуря, приводимого в движение рукой, имеет вид:

$$y(0, t) = y_m \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (2)$$

За время  $\tau$  возмущение достигнет точки шнуря с координатой  $x = v \cdot \tau$ , где  $v$  – модуль скорости волны. Поэтому в точке с такой координатой коле-



Отметим, что знакомые каждому из вас волны, которые возникают на поверхности воды, не являются ни продольными, ни поперечными. Траектории движения частиц в таких поверхностных волнах представляют собой замкнутые кривые, близкие к эллипсам.

бания запаздывают по времени по сравнению с колебаниями части шнура с координатой  $x = 0$ . Следовательно, закон движения части шнура с координатой  $x$  имеет вид:

$$y(x, t) = y_m \cdot \sin(\omega \cdot (t - \tau)) = y_m \cdot \sin\left(\omega \cdot \left(t - \frac{x}{v}\right)\right). \quad (3)$$

Это уравнение называют *уравнением гармонической бегущей волны*, распространяющейся в положительном направлении оси  $X$ . С учётом введенных понятий – периода колебаний  $T$  и длины волны  $\lambda$  – уравнение (3) может быть представлено в таком виде:

$$y(x, t) = y_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi \cdot x}{v \cdot T}\right) = y_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi \cdot x}{\lambda}\right) = y_m \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x),$$

где число  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  называют *волновым числом*.



### Вопросы

1. Что называют: а) возмущением; б) бегущими упругими волнами; в) скоростью волн?
2. Почему говорят, что в волне происходит перенос энергии без переноса вещества?
3. Что называют длиной волны? Как связаны длина волны и её скорость?
4. Какие волны называют: а) поперечными; б) продольными?
5. Какими физическими свойствами среды определяется скорость распространения упругих волн?
6. Почему в жидкостях и газах упругие волны могут быть только продольными?
7. Могут ли в твёрдых телах распространяться поперечные упругие волны? Почему?



### Для углублённого уровня

8. Какое уравнение называют уравнением бегущей волны?
9. Что изменится в уравнении (3), если волна будет распространяться в отрицательном направлении оси  $X$ ?

### Упражнения

1. Скорость распространения упругой волны в воздухе при нормальных условиях равна 330 м/с. Определите период колебаний источника этой волны, если длина волны равна 16,5 м.





## Для углублённого уровня

2

Длина упругой волны, распространяющейся в тонком длинном стальном стержне, равна 2 м. Определите разность фаз колебаний между двумя точками стержня, находящимися на расстоянии: а) 1 м; б) 0,5 м; в) 0,25 м; г) 1/3 м.

§ 49

## Звук

Среди всех видов упругих волн особое место занимают звуковые волны. Ухо человека воспринимает в виде звуковых ощущений (звука) колебания, частоты которых лежат в диапазоне примерно от 16 Гц до 20 кГц. Поэтому механические колебания с такими частотами принято называть звуковыми.



Звуковыми волнами называют упругие волны с частотами от 16 Гц до 20 кГц. Упругие волны с частотами менее 16 Гц называют инфразвуковыми, а волны с частотами более 20 кГц — ультразвуковыми.

Приведённые границы звукового диапазона условны, так как зависят от индивидуальных особенностей слухового аппарата каждого человека. Среди животных собаки, летучие мыши и дельфины слышат ультразвуковые колебания с частотами более 30 кГц.

Звуковые колебания распространяются в газообразных, жидких и твёрдых средах. Звуковые волны в газах и жидкостях представляют собой продольные упругие волны. В твёрдых телах возможно распространение и поперечных, и продольных звуковых волн.

Скорость распространения звука, как и всех упругих волн, зависит от упругих свойств среды и её плотности. Например, модуль скорости распространения продольной волны в воздухе может быть рассчитан по формуле:

$$v = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p}{\rho}}, \text{ где } \gamma \approx 1,4 \text{ — коэффициент пропорциональности, } p \text{ — среднее давление воздуха, } \rho \text{ — средняя плотность воздуха.}$$

Скорости распространения звуковых волн в некоторых средах приведены в табл. 1.

Источником звука может быть любое тело, совершающее колебания с частотами звукового диапазона (рис. 163). Если между этим телом и ухом находится упругая среда, то звуковые колебания источника возбуждают в этой среде звуковую волну, которая достигает уха, и человек слышит звук.

Таблица 1

Среда	Скорость, м/с (при $t = 20^{\circ}\text{C}$ )
Воздух	340
Пробка	500
Резина	1040
Вода	1483
Эбонит	2405
Медь	4700
Сталь	5000–6100
Дерево	5000
Стекло	5500

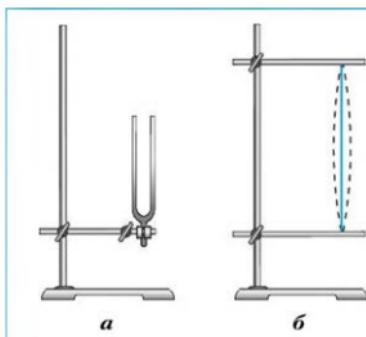


Рис. 163

Источники звуковых волн:  
а – камертон;  
б – струна

! Для передачи звука необходимо наличие упругой среды между источником звука и его приёмником.

Если вокруг источника звука нет упругой среды, то звук распространяться не будет. Например, если поместить электрический звонок под стеклянный колпак и начать откачивать из-под колпака воздух, то звук от звонка будет слышен всё хуже.

Звуки, которые мы слышим, различаются. Человеческий голос может быть громким и еле слылим, низким (басистым) и высоким (писклявым), звонким и хриплым. Для характеристики звука вводят специальные величины: *громкость*, *высота тона* и *темпер*.

Чтобы исследовать характеристики различных звуков, можно использовать установку, изображённую на рис. 164. В этой установке микрофон преобразует звуковые колебания в колебания электрического напряжения. Усиленные с помощью специального усилителя, они подаются на вход осциллографа – прибора, который преобразует колебания электрического напряжения в видимое изображение. В результате на экране осциллографа будут отображаться колебания напряжения, соответствующие изучаемым звуковым колебаниям.

Расположим перед микрофоном *камертон* – специальный прибор, используемый в качестве источника звука определённой частоты. Если ударить по ветви камертона, то мы услышим звук, возбуждаемый её колебаниями.



При этом на экране осциллографа мы увидим зависимость напряжения от времени в виде синусоиды. Следовательно, звуковые колебания камертонов происходят по синусоидальному (гармоническому) закону.

Если ударить по камертону сильнее, то громкость звучания увеличится. Соответственно, увеличится и амплитуда колебаний на экране осциллографа. Это означает, что громкость звука зависит от амплитуды колебаний, а следовательно, от энергии звуковой волны.

Отметим, что громкость звука, воспринимаемая человеком, не прямо пропорциональна энергии, приносимой звуковой волной. Так, если поступающую в ухо энергию увеличить в 10 раз, то для человека громкость звука возрастёт в 2 раза. При увеличении поступающей энергии в 100 раз громкость возрастёт в 4 раза и т. д. Такая зависимость воспринимаемой человеком громкости от поступающей энергии звуковой волны связана с особенностью нашего слуха. Это позволяет нам слышать и шелест листьев, и рёв урагана.

Если частота звука приближается к границам слышимости (к 16 Гц или к 20 кГц), то воспринимаемая человеком громкость звука уменьшается.

**!** Таким образом, громкость звука зависит не только от энергии, приносимой звуковой волной, но и от её частоты.

Воздействие звуковой волны на барабанную перепонку уха зависит от амплитуды колебаний давления воздуха в звуковой волне. Человеческое ухо является совершенным созданием природы, способным воспринимать звуки в огромном диапазоне амплитуд колебаний: от слабого писка комара до грохота стартующей ракеты. При амплитудах колебаний меньше *порога слышимости* человек перестаёт слышать звук. При частотах около 3,5 кГц порогу слышимости соответствуют колебания с амплитудой давления меньше 10 Па. При таком слабом звуке молекулы воздуха колеблются в звуковой волне с амплитудой всего лишь  $\sim 10^{-10}$  см! *Болевой порог*, при котором возникают болевые ощущения, соответствует амплитудам колебаний давления в звуковой волне, превышающим  $10^8$  Па. Таким образом, человеческое ухо способно воспринимать волны, в которых звуковое давление изменяется в миллионы раз. Так как энергия, приносимая звуковой волной, пропорциональна квадрату амплитуды колебаний давления, то отношение максималь-

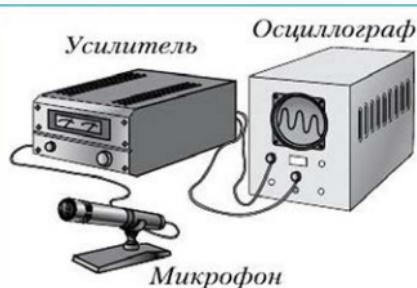


Рис. 164

ной мощности звука, воспринимаемого ухом человека, к минимальной составляет  $\sim 10^{14}$ !

Звуки, издаваемые гармонически колеблющимися телами, называют *чистыми музыкальными*. Примером такого звука является звук камертонна. Звуки различных камертонов отличаются друг от друга частотами колебаний. Про такие звуки говорят, что они различаются по *высоте тона*.

 Чем больше частота чистого музыкального звука, тем выше его тон.

Звук человеческого голоса может быть низкого тона – бас (частоты от 70 до 300 Гц), а может быть и высокого тона – колоратурное сопрано (частоты от 330 до 1400 Гц). Струны музыкальных инструментов, например гитары, совершают колебания с разными частотами. Поэтому они издают звуки разного тона.

Наконец, рассмотрим особую характеристику звука, отличающую, например, разные музыкальные инструменты, – *темпер звука*. Если застать

вить звучать одну и ту же мелодию на разных музыкальных инструментах перед подключённым к осциллографу микрофоном, то на экране осциллографа будет изображаться не синусоида, а более сложная периодически изменяющаяся кривая. Такую кривую можно представить в виде суммы синусоид с кратными частотами разных амплитуд (рис. 165). Колебание с наименьшей частотой называют *основным тоном*, а остальные колебания – с большими частотами – *обертонами* или *гармониками*.

Наличие или отсутствие в звуке тех или иных обертонов (гармоник) и определяет тембр звука. Тембр звука связан со строением его источника. Устройство разных музыкальных инструментов различается, поэтому они обладают разным тембром.

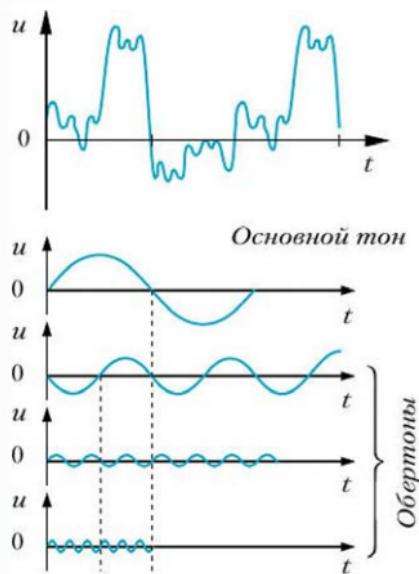


Рис. 165 Звук музыкального инструмента представляет собой совокупность чистых музыкальных звуков

Строение голосового аппарата каждого человека также имеет свои особенности. В результате голоса людей различаются по тембру. Это и позволяет нам узнавать знакомые голоса.

В отличие от музыкальных звуков, есть звуки, которым не соответствует определенная частота или упорядоченный набор кратных частот. Такие звуки называют *шумом*. Шум представляет собой беспорядочную суперпозицию звуков самых разных частот.

В заключение отметим, что наличие у человека двух ушей (приёмников звука) позволяет ему определять направление в пространстве на источник звука с точностью до 5 градусов. Это связано с тем, что человек способен различать моменты прихода звуковой волны в одно и другое ухо с точностью до  $3 \cdot 10^{-5}$  с.

### Вопросы

- 1 Какие волны называют звуковыми?
- 2 Что может быть источником звука?
- 3 Почему для передачи звука необходимо наличие среды между источником звука и его приёмником?
- 4 Какие характеристики звука вы знаете?
- 5 Что называют порогом слышимости и болевым порогом?
- 6 От чего зависит: а) громкость звука; б) высота тона?
- 7 Что называют шумом?
- 8 Чем определяется тембр звука?

### Упражнения

- 1 Определите длины звуковых волн с частотой 1 кГц: а) в воздухе; б) в стекле; в) в эbonите.
- 2 Ученик 11 класса Сергей, наблюдая за грозой, хочет определить расстояние до места вспышки молнии. Раскаты грома он услышал через 10 с после вспышки молнии. Помогите Сергею определить, на каком расстоянии он находится от грозы.
- 3 Оцените разности фаз между звуковыми колебаниями в двух точках, находящихся в воде на расстояниях 2 м и 2,5 м от точечного источника звука. Частота колебаний источника равна 1,5 кГц.
- 4 Звуковая волна переходит из воды в воздух. Определите, как при этом изменяются частота колебаний и длина волны.



## § 50 Электромагнитные волны

Эксперимент показывает, что если на некотором расстоянии от колебательного контура, в котором происходят электромагнитные колебания, расположить второй такой же контур, то через определённый промежуток времени во втором контуре возникнут электромагнитные колебания. Это доказывает, что электромагнитные возмущения могут распространяться в пространстве.

Объясняющая этот эксперимент теория электромагнитного поля была создана в 1860–1865 гг. одним из величайших физиков Джеймсом Клерком Максвеллом (1831–1879). Заметим, что это произошло задолго до того, как электромагнитные волны были обнаружены экспериментально.

Рассмотрим основные положения и выводы теории Максвелла.

Из открытого Фарадеем явления электромагнитной индукции следует, что *изменяющееся с течением времени магнитное поле порождает вихревое электрическое поле*. Максвелл выдвинул смелую гипотезу, что, в свою очередь, и *изменяющееся с течением времени электрическое поле порождает магнитное поле*. Он показал, что электрическое и магнитное поля являются лишь разными проявлениями единого объекта — *электромагнитного поля*. В общем случае, когда поля неравномерно изменяются с течением времени, в каждой точке пространства одновременно имеют место и электрическая, и магнитная составляющие единого электромагнитного поля.

Основным результатом этой теории стало предсказание Максвеллом существования электромагнитных волн. Он смог даже вычислить скорость распространения этих волн. Рассчитанное значение оказалось равным известной из экспериментов скорости света. Напомним, что, согласно современным данным, модуль скорости света в вакууме  $c = 2,99792458 \cdot 10^8$  м/с ( $\sim 300\,000$  км/с).

Рассмотрим механизм возникновения и распространения электромагнитной волны. Пусть в колебательном контуре 1 установились вынужденные электромагнитные колебания с частотой  $\omega$  (рис. 166). Периоди-



Электромагнитные волны были зарегистрированы через 9 лет после смерти Максвелла немецким физиком Генрихом Герцем (1857–1894). Ему удалось получить электромагнитные колебания большой частоты, добиться излучения электромагнитных волн и зарегистрировать их приём. Герц исследовал свойства электромагнитных волн и определил скорость их распространения. Его данные подтвердили расчёты Максвелла.

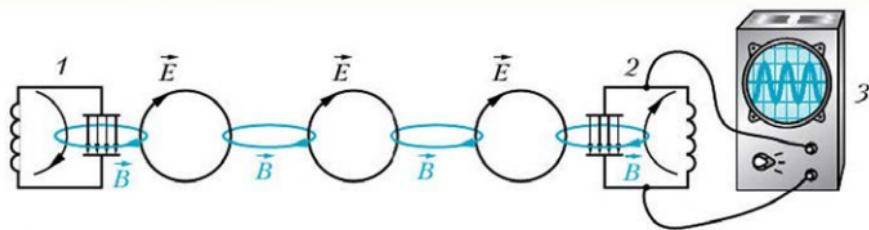


Рис. 166

ически изменяющееся электрическое поле между пластинами конденсатора этого контура порождает периодически изменяющееся с той же частотой магнитное поле. Это изменяющееся магнитное поле, в свою очередь, порождает периодически изменяющееся с той же частотой вихревое электрическое поле. Оно порождается не только между пластинами конденсатора, но и вне его. Это поле порождает новое магнитное поле и т. д. Такие последовательные порождения друг другом периодически изменяющихся с одинаковой частотой электрических и магнитных полей приводят к тому, что с течением времени в пространстве распространяются периодические возмущения электромагнитного поля — **электромагнитная волна**.

Достигая контура 2, электромагнитная волна возбуждает в нём электромагнитные колебания, которые можно наблюдать на экране осциллографа 3. Амплитуда колебаний в контуре 2 будет максимальной, если собственная частота этого контура совпадает с частотой  $\omega$  вынужденных колебаний в контуре 1.

Понятно, что периодически изменяющееся с течением времени магнитное поле в катушке индуктивности контура 1 порождает вблизи неё изменяющееся с такой же частотой вихревое электрическое поле. Оно, в свою очередь, порождает новое магнитное поле вне катушки, которое порождает новое электрическое поле, и т. д. Таким образом, все элементы колебательного контура, в котором происходят электромагнитные колебания, являются источниками электромагнитных волн.

Отметим, что, согласно теории Максвелла, источником электромагнитных волн должен быть и любой *движущийся с ускорением* электрический заряд. Действительно, такой заряд создаёт в пространстве неравномерно изменяющиеся с течением времени электрическое и магнитное поля. Эти поля, в свою очередь, порождают в пространстве новые изменяющиеся поля. В результате в пространстве распространяется электромагнитная волна.

**!** Электромагнитная волна представляет собой систему порождающих друг друга и распространяющихся в пространстве переменных электрического и магнитного полей.

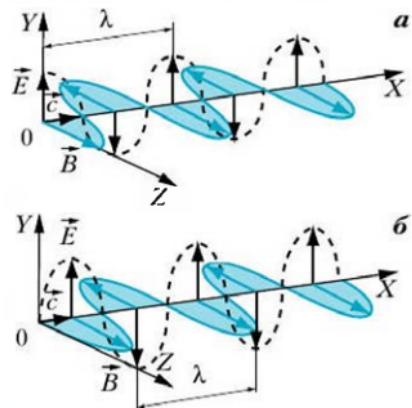


Рис. 167

Обратимся к рис. 167, на котором показано, как направлены силовые линии электрического и магнитного полей в электромагнитной волне. Эти линии не только взаимно перпендикулярны (расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях), но и перпендикулярны направлению распространения волны. Таким образом, **электромагнитная волна является поперечной**.

На рис. 167, а изображена электромагнитная волна, распространяющаяся в положительном направлении оси  $X$  в момент времени  $t$ . Показанный на рисунке вектор  $\vec{c}$  — вектор скорости распространения

волны. Здесь же показаны векторы напряжённости  $\vec{E}$  электрического поля и индукции  $\vec{B}$  магнитного поля волны в разных точках оси  $X$  в некоторый момент времени. Видно, что колебания векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  происходят синхронно, т. е. их модули достигают максимальных значений одновременно в одних и тех же точках пространства.

За время, равное периоду колебаний, электромагнитная волна распространяется на расстояние, которое называют длиной волны  $\lambda$ . Поэтому

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{v},$$

где  $T$  — период колебаний, а  $v$  — частота колебаний в электромагнитной волне.

Процесс распространения электромагнитной волны можно понять, если сравнить рис. 167, а и б, на которых показана одна и та же электромагнитная волна в два последующих момента времени. Промежуток времени, разделяющий эти моменты, равен  $\frac{T}{4}$  — одной четверти периода колебаний в волне. На этих же рисунках показаны расстояния, соответствующие длине волны  $\lambda$ .



Если, как и на рис. 167, амплитуды колебаний проекций  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  на оси  $Y$  и  $Z$  соответственно не изменяются в процессе распространения волны, то уравнения, описывающие изменения этих проекций (*уравнения электромагнитной волны*), могут быть представлены в виде:

$$E_y(x, t) = E_m \cdot \sin\left(\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c}\right)\right); \quad B_z(x, t) = B_m \cdot \sin\left(\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c}\right)\right).$$

С учётом понятий периода колебаний  $T$  и длины волны  $\lambda$  эти уравнения могут быть представлены в виде:

$$E_y(x, t) = E_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi \cdot x}{c \cdot T}\right) = E_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi \cdot x}{\lambda}\right) = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x);$$

$$B_z(x, t) = B_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi \cdot x}{c \cdot T}\right) = B_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi \cdot x}{\lambda}\right) = B_m \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x),$$

где число  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  называют *волновым числом*.



Подчеркнём, что между процессами распространения электромагнитных и упругих волн есть принципиальное различие. Для распространения механических волн необходимо наличие упругой среды. Напротив, *электромагнитная волна может распространяться* даже в тех областях пространства, где отсутствует вещество, т. е. в *вакууме*. Это связано с тем, что в электромагнитной волне колебания совершают не частицы вещества, а напряжённость электрического поля и индукция магнитного поля.

В настоящее время все электромагнитные волны в зависимости от длины волны (или частоты) принято разделять на восемь диапазонов (см. цветную вклейку, рис. I). Границы этих диапазонов условны, поэтому они могут частично перекрываться.

Обратим особое внимание на диапазон длин волн от 380 до 760 нм. Он соответствует видимому излучению (свету), которое глаз человека способен воспринимать без каких-либо вспомогательных устройств.

Электромагнитные волны разных частот отличаются друг от друга скоростью распространения в разных веществах, проникающей способностью и другими свойствами.

При увеличении частоты электромагнитного излучения оно всё в меньшей степени проявляет свойства, присущие волне, и всё в большей степени проявляет *корпускулярные* свойства, присущие потоку частиц.

Эти частицы электромагнитного излучения называют *фотонами*.

## Колебания и волны

Наиболее ярко выраженными корпускулярными свойствами обладает гамма-излучение. Фотоны гамма-излучения часто называют гамма-квантами. О них вы узнаете в следующих главах.

К настоящему времени установлено, что энергия фотона прямо пропорциональна частоте  $v$  электромагнитного излучения. Коэффициент пропорциональности  $h$  – универсальная физическая постоянная. В честь великого немецкого физика Макса Планка (1858–1947) её называют *постоянной Планка*. Согласно современным данным,  $h \approx 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж · с.



Таким образом, энергия фотона равна  $h \cdot v$ .

### Вопросы

- Что порождает изменяющееся с течением времени: а) магнитное поле; б) электрическое поле?
- Что называют электромагнитной волной?
- Что может быть источником электромагнитной волны?
- Как направлены векторы напряжённости электрического поля  $\vec{E}$  и индукции  $\vec{B}$  магнитного поля в электромагнитной волне по отношению друг к другу и направлению распространения волны?
- Могут ли электромагнитные волны распространяться в вакууме? Почему?
- Что называют длиной электромагнитной волны?
- Какой диапазон электромагнитных волн соответствует видимому излучению (свету)?
- Как изменяются свойства электромагнитного излучения по мере увеличения его частоты?
- Чему равна энергия фотона?

### Упражнения

- Определите расстояние, соответствующее световому году, т. е. расстояние, на которое распространяется в вакууме электромагнитная волна за один год (365 суток).
- Радиостанция работает на частотах 100 МГц и 500 кГц. Определите соответствующие этим частотам длины волн.
- Определите энергию фотона, которому соответствует волна длиной 500 нм.

- 4** Напряжённость электрического поля электромагнитной волны в данной точке пространства изменяется от максимального значения до нуля за 1 мкс. Определите длину этой волны.
- 5** Оцените разности фаз между электромагнитными колебаниями в двух точках, находящихся на расстояниях 10 и 10,1 км от радиопередатчика, работающего на частоте 1 МГц.
- 6** Подготовьте реферат на тему «Электромагнитные волны» о применении электромагнитных волн различных диапазонов в технике и быту. Для сообщения используйте материалы интернет-ресурса <http://gotourl.ru/7124>, а также интерактивный плакат <http://gotourl.ru/7125>.

**§ 51****Принципы радиосвязи и телевидения**

Рассмотренный в предыдущем параграфе процесс распространения электромагнитной волны в пространстве от одного колебательного контура к другому позволяет понять, на чём основан принцип беспроводной передачи информации на большие расстояния.

Первый прибор, регистрирующий электромагнитные волны от удалённого источника (грозы), был продемонстрирован русским физиком Александром Степановичем Поповым (1859–1906) на заседании Русского физико-химического общества в Петербурге 7 мая 1895 г. С тех пор 7 мая считают днём рождения радио.

Эффективность излучения электромагнитных волн тем больше, чем больше их частота. Поэтому для радиосвязи используют волны достаточно большой частоты (обычно более 100 кГц). 

Отметим, что частоту колебаний в волне, передающей информацию, называют *несущей частотой*.

Для передачи информации с помощью волны параметры этой волны изменяют с течением времени по закону, соответствующему этой информации. Такой процесс называют *модуляцией* волны. После приёма модулированной волны с помощью специального устройства (детектора) информацию, приносимую волной, выделяют и преобразуют в удобный для использования вид (звук, изображение и т. п.).

Простейшим видом модуляции является *амплитудная модуляция*, при которой по заданному закону изменяют амплитуду высокочастотных колеба-



Максвелл в своих работах показал, что интенсивность излучения электромагнитной волны прямо пропорциональна четвёртой степени её частоты.

ний. Более совершенной, но и более сложной является *частотная модуляция*, при которой по заданному закону изменяют несущую частоту волны. По сравнению с амплитудной, частотная модуляция обеспечивает большую помехозащищённость передаваемой информации. Это обусловлено тем, что при распространении радиоволн окружающая среда оказывает значительно большее влияние на их амплитуды, вызывая их изменение, чем на частоты радиоволн. Отметим, что существуют и другие виды модуляции.

Рассмотрим пример использования амплитудной модуляции для передачи звукового сигнала, частота  $v_{\text{звук}}$  которого много меньше несущей частоты  $v$  электромагнитных колебаний.

На рис. 168 приведены упрощённые блок-схемы передатчика и приёмника. Передатчик состоит из микрофона 1, генератора 2 высокочастотных колебаний, модулятора 3 и передающей антенны 4. Микрофон 1 преобразует звуковые колебания частотой  $v_{\text{звук}}$  в электрические колебания такой же частоты. Эти колебания поступают в модулятор 3, куда также поступают высокочастотные электрические колебания с несущей частотой  $v$  от генератора 2. В результате модуляции на передающую антенну приходит сигнал, представляющий собой высокочастотные электрические колебания частотой  $v$ , амплитуда которых изменяется со звуковой частотой  $v_{\text{звук}}$ . Эти колебания и порождают излучаемую антенной электромагнитную волну.

Отметим, что передающая и приёмная антенны были изобретены А. С. Поповым. В своих экспериментах по передаче информации он установил, что после подсоединения к колебательным контурам передатчика и приёмника длинных проводов эффективность передачи и приёма радиосигналов существенно увеличивается. Разработка и производство современных антенн представляют собой весьма сложные научно-технические задачи.

В приёмной антенне 5 под действием волн от многих радиостанций возникает множество электромагнитных колебаний. Для выделения нужного сигнала из множества других подключённый к антенне приёмный колеба-

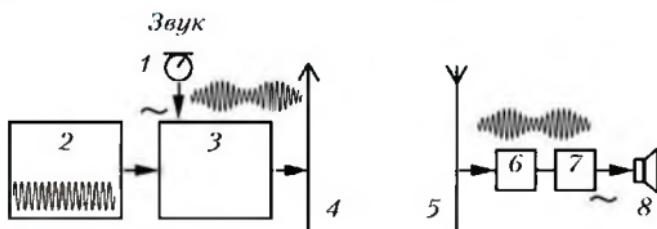


Рис. 168

тельный контур 6 настраивают на несущую частоту этого сигнала. Эту задачу решают, изменяя индуктивность и электрическую ёмкость контура. В результате в приёмном контуре «раскачиваются» высокочастотные колебания, соответствующие нужному радиосигналу (см. § 35). С колебательного контура сигнал подаётся на детектор 7. Детектор из модулированных высокочастотных колебаний выделяет колебания амплитуды сигнала, соответствующие звуковой частоте  $v_z$ . После усиления электрические колебания звуковой частоты в динамике 8 преобразуются в звук.

Передачу радиосигналов можно осуществлять на большие расстояния, значительно превышающие зону прямой видимости. Это обусловлено тем, что электромагнитные волны отражаются *ионосферой* — слоем атмосферы, содержащим большое количество заряженных частиц: свободных электронов и ионов. Этот слой, расположенный на высоте 50–100 км, особенно хорошо отражает так называемые *короткие радиоволны* ( $10 \text{ м} \leq \lambda \leq 100 \text{ м}$ ). Именно в таком диапазоне длин волн работают радиостанции, вещающие на большие расстояния.

Для передачи изображения, например фотографии, это изображение преобразуют в серию электрических сигналов. С этой целью изображение разбивают на отдельные ячейки. Амплитуда электрического сигнала, соответствующего каждой ячейке, пропорциональна её освещённости. Для передачи цветного изображения каждой ячейке обычно сопоставляют три сигнала, соответствующие трём основным цветам (красному, зелёному и синему). Этими сигналами модулируют высокочастотные электрические колебания, которые подаются на антенну, излучающую соответствующие электромагнитные волны.

В телевизионном приёмнике эти волны после преобразования в электрические колебания детектируются в соответствующие видеосигналы. Они преобразуются в видимое изображение на экране монитора или телевизора.

Для передачи изменяющихся изображений, как и в кино, используют *покадровый способ*, при котором каждый кадр представляет собой изображение, полученное через  $1/25$  секунды после предыдущего. При такой частоте повторения кадров человек воспринимает изменение изображения как непрерывное. Это обусловлено физиологическими особенностями нашего зрения.

Обратим внимание на то, что период колебаний модулирующего сигнала должен быть значительно больше периода колебаний излучаемой антенной электромагнитной волны. В противном случае воспроизведение модулирующего сигнала при детектировании с необходимой точностью будет невозможным. Объём информации, передаваемой за единицу времени, при телевизионной трансляции во много раз превышает объём информации при радиопередаче. Поэтому несущие частоты телевизионных сигналов ле-

жат в диапазоне ультракоротких волн (частоты более 50 МГц). Такие волны распространяются лишь в пределах прямой видимости передающей антенны. По этой причине для охвата телевещанием больших территорий приходится использовать большое число ретрансляционных станций или осуществлять вещание с помощью геостационарных спутников. Часто через эти же спутники осуществляют мобильную телефонную связь и передачу информации во Всемирной компьютерной сети Интернет.

### Вопросы

- 1** Кто и когда впервые продемонстрировал, что электромагнитные волны можно использовать для передачи информации?
- 2** Перечислите основные элементы радиопередатчика и радиоприёмника.
- 3** Что называют модуляцией?
- 4** Какие виды модуляции вы знаете?
- 5** Кто изобрёл антенны?
- 6** Каким образом выделяют нужный сигнал из множества других, приходящих на антенну?
- 7** Какую функцию выполняет детектор в приёмнике?
- 8** Почему частота модулирующего сигнала должна быть существенно меньше несущей частоты?
- 9** Почему при телевещании используют волны ультракороткого диапазона?

### Упражнения

- 1** В связи с выходом из строя в колебательном контуре радиоприёмника катушку индуктивности заменили другой, индуктивность которой оказалась в 4 раза большей. Как следует изменить ёмкость конденсатора этого контура, чтобы можно было принимать сигналы той же радиостанции, что и до повреждения контура?
- ✓2** Изучите принципы работы и организации мобильной телефонной связи. Подготовьте реферат на эту тему, используя материалы интернет-ресурса <http://gotourl.ru/7126>.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

<b>Природа волн</b>	<b>Механические волны</b> Распространяющиеся в упругой среде возмущения называют бегущими упругими волнами		<b>Электромагнитные волны</b> Электромагнитные волны – система порождающих друг друга и распространяющихся в пространстве переменных электрического и магнитного полей
<b>Условия распространения</b>	Источник возмущений. Обязательно наличие упругой среды		Источник возмущений – изменение электрического/магнитного поля в некоторой области пространства. Упругой среды <i>не требуется</i>
<b>Вид волны</b>	<b>Продольные упругие волны</b> Колебания частиц происходят <b>вдоль направления распространения волны</b>	<b>Поперечные упругие волны</b> Колебания частиц происходят <b>перпендикулярно направлению распространения волны</b>	<b>Поперечные волны</b> Колебания векторов напряжённости и магнитной индукции происходят перпендикулярно друг другу и перпендикулярно направлению распространения волны
<b>Среда распространения</b>	Твёрдые тела, газы, жидкости	Только твёрдые тела	Вакуум, газы, жидкости, твёрдые тела
<b>Физические величины</b>	Скорость волны ( $v$ ) – скорость распространения возмущений. Длина волны ( $\lambda$ ) – расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний: $\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}$		
<b>Скорость распространения</b>	Скорость распространения упругой волны тем больше, чем более упругой является среда и чем меньше её плотность	В различных веществах скорость распространения электромагнитных волн различна для разных частот	<b>При волновом процессе происходит перенос энергии без переноса вещества</b>

## Геометрическая оптика

Прежде чем переходить к изучению свойств волн, повторим известные вам из курса физики основной школы законы геометрической оптики и вытекающие из этих законов правила построения хода световых лучей в различных оптических системах. Эти знания понадобятся в дальнейшем при изучении свойств волн.

Отметим, что все рассматриваемые в этой главе законы и правила были установлены опытным путём. Они могут быть объяснены как с точки зрения волновой теории (см. главу 8), так и с точки зрения корпускулярной. Однако здесь мы не будем рассматривать вопросы, связанные с природой света.

Напомним основные положения геометрической (лучевой) оптики.

Если размеры источника света много меньше расстояний до освещаемых тел, то такой источник считают *точечным*.

**Точечным источником света называют точечное тело, испускающее свет.**

Точечный источник света является удобной для геометрической оптики моделью. Наглядное представление о таком источнике даёт, например, удалённая от Земли звезда. Обычно считают, что *точечный источник света излучает свет во всех направлениях*.

**В прозрачной однородной среде свет от источника распространяется по прямым линиям.**

Это утверждение называют **законом прямолинейного распространения света**. Впервые его сформулировал ещё Евклид за 300 лет до нашей эры в своей работе «Оптика».

**Прямую линию, вдоль которой в однородной среде распространяется свет (передаётся энергия от источника света), называют лучом света.**



В начале XVIII в. экспериментально был установлен закон независимости световых пучков.

**При пересечении световых пучков характер их распространения не изменяется.**

## § 52

### Законы отражения света.

#### Построение изображения в зеркалах

Рассмотрим луч 1, падающий на плоское зеркало З в точке  $O$  (рис. 169). Плоскость, которую образуют падающий на зеркало луч и перпендикуляр к поверхности зеркала в точке падения луча, называют *плоскостью падения*. В рассматриваемом случае эта плоскость совпадает с плоскостью рисунка. Угол  $\alpha$  между падающим лучом и перпендикуляром, проведённым к плоскости зеркала в точке падения, называют *углом падения*. Угол  $\beta$  между отражённым лучом 2 и перпендикуляром к плоскости зеркала в точке падения луча называют *углом отражения*. Введённые понятия позволяют сформулировать **закон отражения от зеркальных поверхностей**.

**Отражённый от зеркальной поверхности луч лежит в плоскости падения, причём угол падения луча равен углу отражения.**

Обратим внимание на то, что этот закон содержит два утверждения. Во-первых, отражённый луч, падающий луч и перпендикуляр к плоскости зеркала в точке падения луча лежат в одной плоскости (эта плоскость совпадает с плоскостью рисунка); во-вторых, углы  $\alpha$  и  $\beta$  равны:  $\alpha = \beta$ .

Из закона отражения следует, что если выходящий из точки  $A$  луч 1 после отражения в точке  $O$  проходит через точку  $B$  (рис. 170), то луч 2, выходящий из точки  $B$ , после отражения в точке  $O$  пройдёт через точку  $A$ . Это утверждение называют *принципом обратимости световых лучей при отражении от зеркальных поверхностей*.

Отметим, что в реальности при отражении даже от очень хорошего зеркала некоторая часть света отражается и в других направлениях. Такое отражение света называют *диффузным (рассеянным) отражением*. Обычно диффузным отражением пренебрегают, так как его энергия составляет малую долю от энергии падающего на хорошее зеркало света.

Напомним, как используют закон отражения для построения изображений в зеркалах. На рис. 171 показан точечный источник света  $S$ , расположенный на расстоянии  $h$  перед плоским зеркалом З.



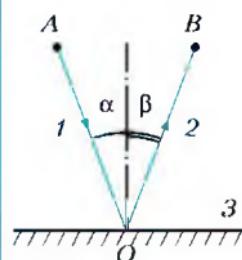


Рис. 169

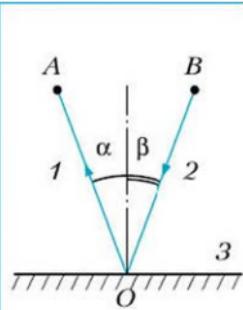


Рис. 170

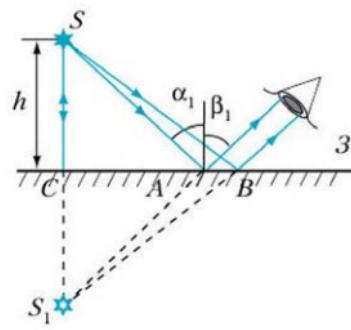


Рис. 171

Докажем, что продолжения *всех* отражённых от плоского зеркала лучей, испускаемых точечным источником  $S$ , пересекаются в одной точке  $S_1$ , симметричной источнику относительно плоскости зеркала.

Для этого рассмотрим луч  $SC$ , падающий на зеркало перпендикулярно его плоскости, и луч  $SA$ , падающий на плоскость зеркала под произвольным углом  $\alpha_1$ . Согласно закону отражения, угол отражения  $\beta_1$  луча  $SA$  равен углу его падения  $\alpha_1$ . Прямая  $AS_1$  является прямолинейным продолжением отражённого луча, поэтому  $\angle SAC = \angle CAS_1$ . Прямоугольные треугольники  $CSA$  и  $CAS_1$  равны (по катету и прилежащему углу). Следовательно,  $SC = CS_1$ . Аналогично доказывается, что и любой другой луч от источника  $S$  отразится от зеркала  $Z$  так, что продолжение отражённого луча будет проходить через точку  $S_1$ . Следовательно, *продолжения всех отражённых от плоского зеркала лучей пересекаются в одной точке  $S_1$ , симметричной источнику относительно плоскости зеркала*.

Пучок отражённых от зеркала лучей, попадающих в зрачок глаза, является пучком лучей, продолжения которых пересекаются за зеркалом в точке  $S_1$ . Поэтому мы воспринимаем точку  $S_1$  как источник света. На самом деле в точке  $S_1$  находится изображение источника света.

**Точку пересечения продолжений световых лучей от точечного источника называют *мнимым изображением* этого источника.**

Таким образом, точка  $S_1$  на рис. 171 представляет собой *мнимое изображение* источника  $S$ .

Напомним, что пересекаться могут не только продолжения лучей, вышедших из точечного источника, но и сами эти лучи после прохождения

через некоторые оптические системы. В результате будет получено *действительное изображение* источника.

**Точку пересечения световых лучей от точечного источника называют действительным изображением этого источника.**

Для построения мнимого изображения точечного источника в плоском зеркале нужно построить точку, симметричную источнику относительно плоскости зеркала. При этом, поскольку продолжения всех отражённых от плоского зеркала лучей пересекаются в одной точке, для построения изображения можно найти точку пересечения продолжений *любых двух* отражённых лучей.

Из приведённого выше доказательства следует, что для протяжённого источника света и его изображения выполняются два условия. Во-первых, *каждой точке источника света соответствует одна точка его изображения*. Во-вторых, *каждой точке изображения соответствует одна точка источника*. Изображения, удовлетворяющие этим условиям, называют *стигматичными* (или *точечными*).

Отметим, что положение мнимого изображения любого предмета в плоском зеркале не зависит от размеров и положения плоского зеркала в данной плоскости. Оно определяется только положением плоскости зеркала в пространстве. Это легко понять, например, из содержания рис. 171. Видно, что в глаз человека попадают лучи, отражённые от зеркала только в точках, расположенных на участке  $AB$ . Следовательно, если вместо большого зеркала использовать только его участок  $AB$ , то видимое глазом изображение источника  $S$  никак не изменится.

### Вопросы

- Что называют: а) плоскостью падения света; б) углом падения; в) углом отражения?
- Сформулируйте закон отражения от зеркальных поверхностей.
- В чём состоит принцип обратимости световых лучей при отражении?
- Почему часто пренебрегают диффузным отражением?
- Какое изображение называют: а) мнимым; б) действительным; в) стигматичным (точечным)?
- Можно ли сфотографировать изображение предмета, полученное с помощью плоского зеркала?

- 7 Можно ли увидеть изображение светящейся точки, если перпендикуляр, опущенный из этой точки на плоскость, в которой находится зеркало, не пересекает зеркала?
- 8 На каком расстоянии от себя вы увидите своё отражение в плоском зеркале, если находитесь от зеркала на расстоянии 1 м?

### Упражнения

- 1 Угол падения луча на плоское зеркало равен  $30^\circ$ . Определите угол: а) между падающим и отражённым лучами; б) между отражённым лучом и плоскостью зеркала.
- 2 На сколько увеличится угол между отражённым и падающим лучами, если плоское зеркало повернуть на угол  $\phi = 20^\circ$  по часовой стрелке вокруг оси, проходящей через точку падения перпендикулярно плоскости падения?



### Для углублённого уровня

- ✓ 3 Постройте изображение светящейся стрелки  $AB$  в плоском зеркале  $Z$ , расположенном так, как показано на рис. 172. Докажите, что длина изображения стрелки равна длине самой стрелки. Определите область пространства, из которой можно увидеть изображение всей стрелки  $AB$  в зеркале  $Z$ .
- 4 Определите минимальный вертикальный размер расположенного вертикально зеркала, стоя перед которым человек ростом 1,8 м может полностью увидеть в нём своё изображение.

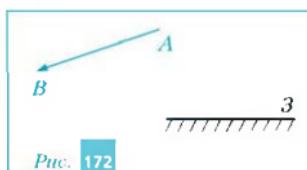


Рис. 172

### § 53

### Закон преломления света на границе раздела двух изотропных однородных прозрачных сред. Явление полного внутреннего отражения

Направим узкий пучок света (например, от лазерной указки) на поверхность налитой в стакан воды (рис. 173). Мы увидим, что свет частично отражается, а частично проходит в воду, изменив при этом направление своего распространения.

**!** Изменение направления распространения света при пересечении границы раздела двух прозрачных сред называют *преломлением света*. Угол  $\gamma$  между перпендикуляром к границе раздела сред и преломлённым лучом называют *углом преломления*.

Для определения направления распространения преломлённого луча используют **закон преломления света** на плоской границе раздела двух изотропных однородных прозрачных сред.

**Луч падающий, луч преломлённый и перпендикуляр к границе раздела в точке падения лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для данной пары сред не зависит от угла падения и равно:**

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}, \quad (1)$$

где  $n_{21}$  — относительный показатель преломления второй среды по отношению к первой.

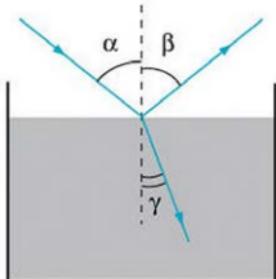
Если свет переходит в среду из вакуума, то отношение синуса угла падения к синусу угла преломления называют *абсолютным показателем преломления* *п этой среды*. Часто для краткости абсолютный показатель преломления среды называют показателем преломления среды, опуская слово «абсолютный».

**!** Среду, имеющую больший абсолютный показатель преломления, называют *оптически более плотной*.

Если известны абсолютные показатели первой ( $n_1$ ) и второй ( $n_2$ ) сред, то относительный показатель преломления второй среды по отношению к первой  $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ . Следовательно,

**!** произведение абсолютного показателя преломления среды, из которой падает свет, на синус угла падения равно произведению абсолютного показателя преломления второй среды на синус угла преломления:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \gamma. \quad (2)$$



**Рис. 173** Преломление света на границе раздела воздуха и воды

Таблица 2

Вещество	$n$	Вещество	$n$
Алмаз	2,417	Рубин	1,76
Анилин	1,586	Серная кислота	1,43
Ацетон	1,359	Соляная кислота	1,254
Бензин	1,395	Спирт метиловый	1,329
Вода	1,333	Спирт этиловый	1,361
Кварц	1,544	Стекло оконное	1,48–1,53
Лёд	1,310	Стекло оптическое	1,45–2,04
Льняное масло	1,47	Стекло органическое	1,48–1,50

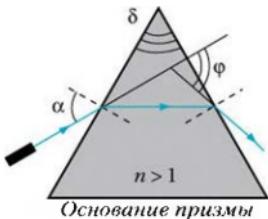
К настоящему времени установлено, что показатели преломления почти всех газов и паров при нормальных условиях не отличаются от единицы с точностью до одной тысячной. Поэтому если свет падает из воздуха на жидкое или твёрдые прозрачные вещества, то относительные показатели этих веществ по отношению к окружающей среде можно считать совпадающими с их показателями преломления.

В табл. 2 приведены значения показателей преломления ряда твёрдых и жидких веществ для света жёлтого цвета при нормальных условиях.

Из закона преломления следует, что *падающий и преломлённый лучи обратимы*.

Рассмотрим ход тонкого пучка (луча) синего света, испускаемого лазерной указкой, через треугольную стеклянную призму (рис. 174). В результате двукратного преломления на боковых гранях призмы луч *отклоняется от первоначального направления* на угол  $\phi$ . Можно показать, что угол  $\phi$  зависит от угла падения  $\alpha$ , угла  $\delta$  при вершине призмы (*преломляющего угла призмы*) и относительного показателя преломления  $n$  материала призмы по отно-

Рис. 174



шению к окружающей среде. При этом если  $n > 1$ , то луч отклоняется в сторону основания призмы (см. рис. 174).

Исследованием особенностей прохождения через стеклянные призмы узкого пучка солнечного света, выходящего из небольшого отверстия в ставне, занимался Ньютон. Он установил, что, преломляясь на границе «воздух – стекло», пучок распадается на набор лучей различных цветов (см. цветную вклейку, рис. II). При этом на экране, установленном за призмой, наблюдается цветная полоска. Этую полоску Ньютон назвал *спектром*.

Ньютоном было установлено, что наиболее сильно от первоначального направления отклоняются фиолетовые лучи, а красные лучи испытывают наименьшее отклонение. Если в экране, на котором наблюдается спектр, сделать узкую прорезь, параллельную основанию призмы, то из прорези будет выходить световой пучок (луч) только одного цвета. Если выделенный таким образом луч одного цвета пропустить через вторую призму, то он уже не будет распадаться на набор лучей различных цветов. Такой луч отклонится от первоначального направления на угол, величина которого определяется его цветом. На основании этих опытов Ньютон сделал вывод, что показатель преломления вещества зависит от цвета светового луча. Это явление он назвал *дисперсией* (от лат. *dispergo* – «разбрасываю») показателя преломления света.

Вы уже знаете, что цвет светового луча определяется его частотой. Поэтому в настоящее время дисперсию называют *зависимость показателя преломления и вещества от частоты у света*.

Ньютон установил, что при сведении цветных пучков спектра в одну область получается пучок белого света. На основании этих опытов Ньютон пришёл к выводу:

белый свет представляет собой совокупность простых цветов, т. е. всех цветов, наблюдаемых в спектре.

Ньютон также обнаружил, что *получить белый свет можно, если налагать друг на друга лишь два луча определённого цвета*. Цвета двух пучков света, которые при наложении дают белый свет, называют *дополнительными*. Примеры пар дополнительных цветов приведены на цветной вклейке, рис. III.

Если проанализировать закон преломления, то можно объяснить явление *полного внутреннего отражения*. Пусть луч света падает из оптически более плотной среды с показателем преломления  $n_1$  на границу разде-

Можно показать, что при малом преломляющем угле  $\delta$  призмы угол отклонения луча  $\phi = (n - 1) \cdot \delta$ , где  $n$  – относительный показатель преломления призмы.

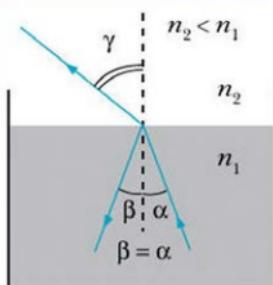


Рис. 175

ла с оптически менее плотной средой, имеющей показатель преломления  $n_2$  (рис. 175). Тогда угол преломления  $\gamma$  будет больше угла падения  $\alpha$ . С увеличением угла падения наступает такой момент, когда угол преломления становится равным  $90^\circ$ . В этом случае преломлённый луч начинает скользить по поверхности раздела сред.

При дальнейшем увеличении угла падения луч уже не выходит из первой среды во вторую, а испытывает полное отражение от границы этих сред, возвращаясь *без потерь* в первую, оптически более плотную среду (рис. 176). Это явление называют *полным (внутренним) отражением*.

**Угол падения  $\alpha_m$ , которому соответствует угол преломления  $\gamma = 90^\circ$ , называют предельным углом полного (внутреннего) отражения.**

Из закона преломления следует, что предельный угол полного отражения можно определить из уравнения

$$\sin \gamma = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \alpha_m. \quad (3)$$

Если  $\gamma = 90^\circ$ , то  $\sin \gamma = \sin 90^\circ = 1$ . Поэтому из формулы (1) получаем:

$$\sin \alpha_m = \frac{n_2}{n_1}, \quad (4)$$

где  $n_1$  — показатель преломления первой (оптически более плотной) среды, а  $n_2$  — показатель преломления второй (оптически менее плотной) среды.

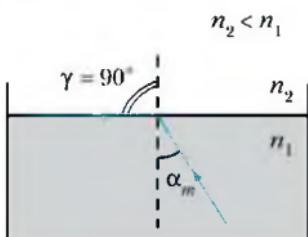


Рис. 176

Опыт показывает, что при полном внутреннем отражении весь свет, падающий на границу раздела, отражается без потери энергии. На этом свойстве основана новая очень важная отрасль техники — волоконная оптика. Она начала бурно развиваться с середины прошлого века. Основной элемент волоконной оптики — *световод* изготавливают из прозрачных волокон диаметром

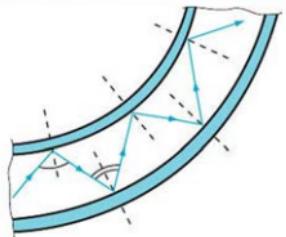


Рис. 177

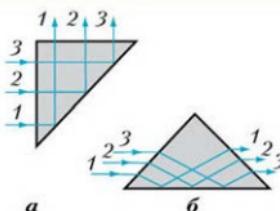


Рис.

178. Ход лучей в поворотных (а) и обратных (б) призмах

до 0,05 мм. На рис. 177 показано сечение одного такого волокна и ход луча в нём. Поверхность волокна покрыта тонкой пленкой из оптически менее плотного материала. Световод может содержать до нескольких тысяч таких волокон, плотно прижатых друг к другу. Торцы световода делают плоскими и тщательно шлифуют. Световод можно как угодно изгибать и даже завязывать в узел. Световоды применяются в современной медицине для осмотра внутренних органов; они нашли широкое применение в системах передачи, шифровки и дешифровки информации, а также в системах широкополосного Интернета. Световоды не подвержены коррозии и много легче металлических проводников. Кроме того, на них не действуют электрические и магнитные поля, которые могут создавать значительные помехи в линиях передачи информации, изготовленных из других материалов.

Явлением полного отражения объясняется блестящий вид пузырьков воздуха в воде, яркий блеск изделий из алмазов. На этом же явлении основано действие поворотных (рис. 178, а) и обратных (рис. 178, б) равнобедренных прямоугольных призм, используемых в целом ряде оптических приборов, в том числе в перископах.



### Вопросы

1. Что называют: а) преломлением света; б) углом падения; в) углом преломления?
2. Сформулируйте закон преломления света.
3. Что называют дисперсией света?
4. Какова последовательность цветов в спектре?
5. Какие цвета называют дополнительными? Приведите примеры таких цветов.

**Для углублённого уровня**

- 6** Какое явление называют явлением полного (внутреннего) отражения?
- 7** Как рассчитать предельный угол полного отражения?
- 8** Как устроен световод? Для каких целей используют световоды?
- 9** На каком явлении основано действие обратных и поворотных призм?
- \*10** Почему использование поворотных призм предпочтительнее использования плоских зеркал?

**Упражнения**

- 1** Луч жёлтого света из воздуха падает на поверхность воды под углом  $\alpha = 30^\circ$ . Определите синусы углов преломления и отражения этого луча.
- 2** На плоскопараллельную пластинку толщиной  $D$ , изготовленную из стекла с показателем преломления  $n$ , из воздуха падает луч света (рис. 179). Угол падения луча равен  $\alpha$ . Докажите, что луч света, выходящий из этой пластиинки, параллелен падающему лучу. Определите смещение  $h$  луча, выходящего из пластиинки после двух преломлений.
- ✓3** Используя закон преломления, докажите принцип обратимости световых лучей при преломлении.

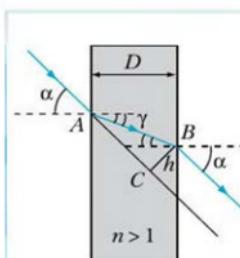


Рис. 179

**Для углублённого уровня**

- 4** Определите предельный угол полного отражения для границы раздела двух сред: а) «алмаз — воздух»; б) «вода — воздух». Используйте данные из табл. 2 в параграфе.
- 5** На дне озера глубиной  $h$  ведутся сварочные работы. Оцените минимальный диаметр  $D$  круглого плота, который надо расположить над местом проведения работ, чтобы свет от сварочного аппарата нельзя было увидеть, глядя на поверхность воды сверху.



## § 54

## Линзы

Основным элементом многих оптических приборов и систем являются линзы (от лат. *lens* – «чесвица»).

**Линзой называют прозрачное тело, у которого хотя бы одна из поверхностей не является плоской.**

Обычно линзы изготавливают из различных сортов оптического стекла, хотя в ряде случаев их делают из кварца, каменной соли, прозрачных пластмасс и других материалов. Чаще всего противоположные поверхности линзы имеют сферическую форму или же одна из поверхностей является сферической, а вторая – плоской. Поверхности линз могут иметь и другую форму, например цилиндрическую, параболическую и т. д. Однако мы ограничимся здесь рассмотрением только сферических линз.

Прямую, проходящую через центры обеих сферических поверхностей линзы, называют *главной оптической осью*. Если же одна из ограничивающих линзу поверхностей является плоской, то главная оптическая ось линзы проходит через центр сферической поверхности перпендикулярно её плоской поверхности.

На рис. 180 показаны сечения сферических линз плоскостью, содержащей главную оптическую ось (пунктирные линии). Точками  $C_1$  и  $C_2$  обозначены центры сферических поверхностей линз, радиусы которых равны  $R_1$  и  $R_2$ .

Если сферическая поверхность линзы и центр этой поверхности находятся по разные стороны от середины линзы, то радиус такой поверхности считают положительным, в противном случае – отрицательным. Например, оба радиуса линзы на рис. 180, *a–в* положительны. У линзы, показанной на рис. 180, *г–е*, оба радиуса, напротив, отрицательны.

Если толщина середины линзы больше толщины её края (рис. 180, *а–в*), то такую линзу называют *выпуклой*, если меньше (рис. 180, *г–е*) – *вогнутой*. У двух линз на рис. 180 одна из поверхностей

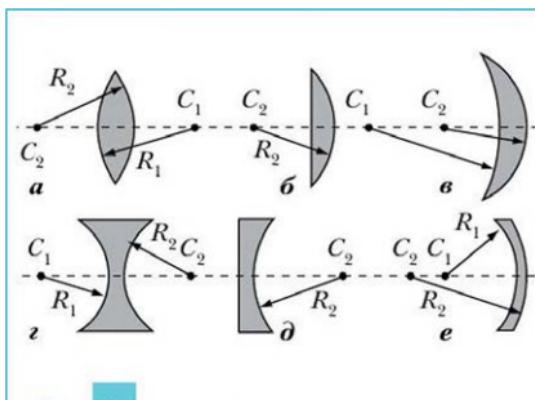


Рис. 180

Сферические выпуклые (*а–в*) и вогнутые (*г–е*) линзы

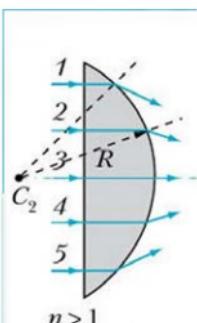


Рис. 181

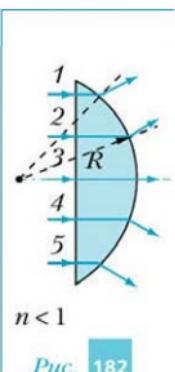


Рис. 182

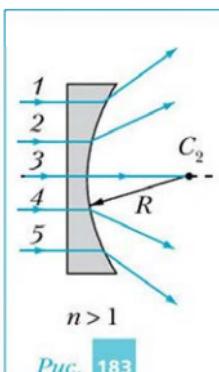


Рис. 183

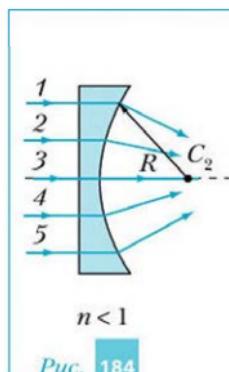


Рис. 184

является плоской. Поэтому подобные линзы часто называют *плосковыпуклыми* (рис. 180, б) или *плосковогнутыми* (рис. 180, д).

Направим на плосковыпуклую стеклянную линзу пучок лучей, параллельных её главной оптической оси (рис. 181). Из закона преломления следует, что такой пучок лучей после прохождения через линзу становится сходящимся. При этом чем дальше от главной оптической оси линзы проходит луч, тем на больший угол он отклоняется.

**Линзы, которые преобразуют падающий на них параллельный пучок света в сходящийся, называют собирающими.**

Используя закон преломления, можно доказать, что параллельный пучок лучей, падающий на плосковыпуклую линзу, показатель преломления материала которой меньше показателя преломления окружающей среды, выходит из линзы расходящимся (рис. 182).

**Линзы, которые преобразуют падающий на них параллельный пучок света в расходящийся, называют рассеивающими.**

Теперь сравним ход лучей, угол падения которых на передние плоские поверхности двух плосковогнутых линз равен нулю (рис. 183 и 184). Первая линза изготовлена из материала, показатель преломления которого *больше* показателя преломления окружающей среды. Из закона преломления следует, что выходящий из неё пучок лучей будет расходящимся. Следовательно, такая линза является рассеивающей. Вторая линза изготовлена из материала, показатель преломления которого *меньше* показателя преломления окружающей среды. Выходящий из неё пучок света является сходящимся. Следовательно, такая линза является собирающей.

Из рассмотренных примеров можно сделать вывод:

**!** действие линзы на проходящий через неё пучок света определяется как геометрией линзы, так и отношением показателя преломления её материала к показателю преломления окружающей среды  $n_{\text{отн}}$ . При этом если  $n_{\text{отн}} > 1$ , то выпуклые линзы будут собирающими, а вогнутые — рассеивающими. Если же  $n_{\text{отн}} < 1$ , то выпуклые линзы будут рассеивающими, а вогнутые — собирающими.

В дальнейшем мы будем рассматривать только *тонкие* линзы.

**Линзу называют тонкой, если модули радиусов  $R_1$  и  $R_2$  ограничивающих её поверхностей много больше толщины линзы.**

Если линза является тонкой, то расстоянием между двумя точками пересечения главной оптической оси с ограничивающими линзу поверхностями можно пренебречь. Поэтому можно считать, что эти две точки совпадают. Эту точку называют *оптическим центром линзы*. При этом считают, что ограничивающие линзу поверхности лежат в одной плоскости, перпендикулярной главной оптической оси линзы и проходящей через её оптический центр. Эту плоскость называют *главной плоскостью линзы*.

Главную плоскость собирающей линзы на чертежах изображают так, как показано на рис. 185, а. Изображение рассеивающей линзы показано на рис. 185, б. На этих рисунках точка  $O$  — оптический центр, а штрихпунктирная линия — главная оптическая ось линзы.

Прямую, проходящую через оптический центр линзы и не совпадающую с главной оптической осью, называют *побочной оптической осью*.

**!** Луч, проходящий через тонкую линзу вдоль любой (главной или побочной) оптической оси, не изменяет своего направления.

Действительно, для таких лучей центральную часть тонкой линзы (часть линзы вблизи её оптического центра) можно считать тонкой плоскопараллельной пластинкой. Вы уже знаете, что любой луч, проходящий через такую пластинку, не изменяет направления своего распространения.

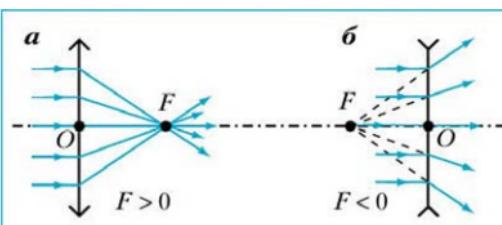
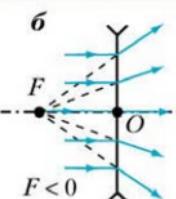


Рис. 185



Параллельным же смещением луча можно пренебречь, поскольку толщина пластинки в данном случае пренебрежимо мала.

Опыты и расчёты показывают, что все лучи, падающие на тонкую собирающую линзу параллельно её главной оптической оси, после преломления в линзе пересекаются в одной точке  $F$ , лежащей на этой оси (см. рис. 185, а). Эту точку называют *главным фокусом собирающей линзы*.

**Расстояние от главного фокуса собирающей линзы до её оптического центра называют фокусным расстоянием этой линзы.**

Это расстояние, так же как и сам фокус, обозначают буквой  $F$ . Фокусное расстояние собирающей линзы *положительно*.

Если параллельный пучок лучей падает на рассеивающую линзу, то в одной точке будут пересекаться продолжения выходящих из линзы лучей (на рис. 185, б эти продолжения показаны пунктирными линиями). Эту точку называют *главным фокусом рассеивающей линзы*.

**Фокусным расстоянием рассеивающей линзы называют расстояние от её главного фокуса до оптического центра, взятое со знаком «-».**

Фокусное расстояние рассеивающей линзы *отрицательно*.

В связи с правилом выбора знаков для фокусных расстояний собирающие линзы часто называют *положительными*, а рассеивающие – *отрицательными*.

Отметим, что любая линза имеет два главных фокуса, расположенных по разные стороны от её главной плоскости.

Используя закон преломления, можно доказать, что если линза находится в однородной среде, то фокусные расстояния будут одинаковыми и могут быть рассчитаны по формуле:

$$\frac{1}{F} = (n - 1) \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (1)$$

где  $n$  – относительный показатель преломления материала линзы по отношению к окружающей среде,  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы сферических поверхностей, ограничивающих линзу, взятые с соответствующим знаком.

Обратим внимание на то, что если одна из поверхностей линзы является плоской, то её радиус считают бесконечно большим. Соответствен-

но, входящую в выражение (1) величину, обратную этому радиусу, считают равной нулю. **К**

Рассмотрим пучок лучей, падающий на тонкую линзу параллельно её побочной оптической оси. Эксперимент показывает, что, как и в случае с пучком, параллельным главной оптической оси, все лучи после прохождения через собирающую линзу пересекаются в одной точке (рис. 186, а). Если же линза является рассеивающей, то в одной точке пересекаются продолжения вышедших из линзы лучей (рис. 186, б). Такую точку пересечения лучей (либо их продолжений) называют *побочным фокусом*.

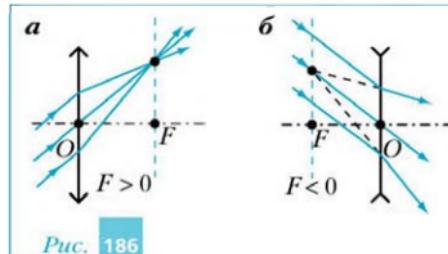


Рис. 186

**!** Все побочные фокусы тонкой линзы лежат в одной плоскости, которая перпендикулярна главной оптической оси и проходит через главный фокус. Эту плоскость называют *фокальной*.

Фокальные плоскости показаны на рис. 186 цветными пунктирами.

Свойства тонкой линзы обусловлены преломлением лучей на ограничивающих её поверхностях. Поэтому для *тонких линз справедлив принцип обратимости хода световых лучей*. Следовательно, если в главный (или побочный) фокус собирающей линзы поместить точечный источник света, то все выходящие из линзы лучи будут параллельны её главной (или побочной, проходящей через источник) оптической оси. Соответственно, если на рассеивающую линзу направить сходящийся пучок лучей, продолжения которых пересекаются в её главном (или побочном) фокусе, то все выходящие из линзы лучи будут параллельны её главной (или побочной, проходящей через этот побочный фокус) оптической оси. Сформулированные утверждения легко понять, если обратить ход лучей на рис. 186, а и б.

В заключение напомним определение ещё одной величины, характеризующей линзу.

**К** Из выражения (1) следует, что фокусное расстояние выпуклой линзы будет положительным, если относительный показатель преломления  $n_{\text{отн}}$  материала линзы по отношению к окружающей среде больше единицы. Если же  $n_{\text{отн}} < 1$ , то её фокусное расстояние будет отрицательным. В первом случае линза будет собирающей (положительной), а во втором — рассеивающей (отрицательной).

**Величину, обратную фокусному расстоянию линзы, называют оптической силой линзы.**

Оптическую силу линзы обозначают буквой  $D$ . В СИ единица оптической силы — диоптрия (дптр).

! 1 дптр — оптическая сила собирающей линзы, фокусное расстояние которой равно 1 м.

Поскольку фокусное расстояние рассеивающей линзы отрицательно, то и **оптическая сила рассеивающей линзы отрицательна**.



Рассмотрим некоторые недостатки реальных линз.

Применение закона преломления для параллельных лучей, падающих на ограниченную сферическими поверхностями собирающую линзу на разных расстояниях от главной оптической оси (рис. 187), показывает, что эти лучи после прохождения линзы пересекают её главную оптическую ось *не в одной точке, а в разных*. Чем дальше от главной оптической оси расположен падающий луч, тем ближе к линзе будет находиться эта точка. Это явление называют *сферической aberrацией*. Понятно, что сферическая aberrация наблюдается и в рассеивающих линзах (рис. 188). При этом смещения, обусловленные сферическими aberrациями собирающей и рассеивающей линз, противоположны. Это позволяет подбирать такие системы линз, в которых aberrации компенсируются с заданной точностью. Другим способом борьбы со сферической aberrацией является уменьшение диаметра поперечного сечения падающего на линзу пучка лучей. Для этого используют ограничивающие этот диаметр диафрагмы. Однако это приводит к уменьшению суммарной энергии, переносимой световым пучком.

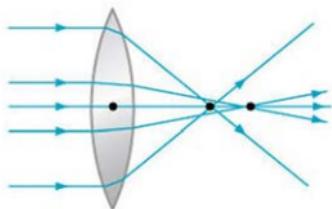


Рис. 187

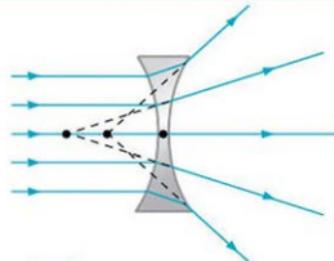


Рис. 188

Приближение, при котором считается, что все параллельно падающие на линзу лучи после её прохождения пересекаются в одной точке, называют *параксиальным* приближением. Это приближение оправданно, если диаметр поперечного сечения рассматриваемого пучка лучей достаточно мал.

Существуют и другие виды аберраций. Например, из формулы (1) явления дисперсии следует, что фокусные расстояния линзы для лучей разного цвета различны. Это явление называют *хроматической аберрацией*. Для устранения хроматической аберрации используют специально подобранные системы линз, изготовленных из материалов с разной дисперсией.

В дальнейшем мы будем пренебрегать всеми видами аберраций (если иное специально не оговорено). Другими словами, мы будем считать, что создаваемое оптической системой изображение является стигматичным. Поэтому для построения изображения любой точки предмета достаточно найти точку пересечения каких-либо двух лучей (или их продолжений), вышедших из этой точки.



### Вопросы

- 1 Что называют: а) линзой; б) главной оптической осью линзы?
- 2 Какие линзы называют тонкими?
- 3 Что называют: а) оптическим центром; б) главной плоскостью; в) побочной оптической осью тонкой линзы?
- 4 Какие линзы называют: а) собирающими; б) рассеивающими?
- 5 При каких условиях выпуклая линза будет: а) собирающей; б) рассеивающей?
- 6 При каких условиях вогнутая линза будет: а) собирающей; б) рассеивающей?
- 7 Какие точки называют главными фокусами: а) собирающей линзы; б) рассеивающей линзы?
- 8 Какие точки называют побочными фокусами: а) собирающей линзы; б) рассеивающей линзы?
- 9 Какие поверхности называют фокальными? Какую форму имеют фокальные поверхности тонких линз, как они расположены?



В параксиальном приближении угол  $\alpha$  расхождения (сходжения) лучей в пучке достаточно мал. Поэтому при расчётах можно считать, что  $\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$ , где  $\alpha$  — угол, измеренный в радианах.

- 10** Что называют фокусным расстоянием: а) собирающей линзы; б) рассеивающей линзы?
- 11** Что называют оптической силой линзы? В каких единицах её измеряют в СИ?



**Для углублённого уровня**

- 12** Увеличится или уменьшится по модулю оптическая сила выпуклой стеклянной линзы после её погружения в воду?
- 13** Увеличится или уменьшится по модулю оптическая сила вогнутой стеклянной линзы после её погружения в воду?
- 14** Какое явление называют: а) сферической aberrацией; б) хроматической aberrацией?

### Упражнения

- 1** Определите оптическую силу линзы, фокусное расстояние которой равно: а) 50 см; б) -20 см.
- 2** На тонкую линзу падает параллельный её главной оптической оси пучок лучей. Нарисуйте ход этих лучей в случаях, когда эта линза: а) собирающая; б) рассеивающая.
- 3** Точечный источник света поместили в один из главных фокусов тонкой линзы. Нарисуйте ход проходящих через линзу лучей от этого источника в случаях, когда эта линза: а) собирающая; б) рассеивающая.
- 4** На собирающую и рассеивающую линзы падает луч света так, как показано на рис. 189. Скопируйте рисунок и постройте выходящие из этих линз лучи.
- ✓5** Проведя анализ формулы (1), определите, в каком случае вогнутая линза будет: а) собирающей; б) рассеивающей.
- \*6** На рис. 190 показан ход луча 1 через линзу. Перерисуйте рисунок в тетрадь и постройте дальнейший ход луча 2.

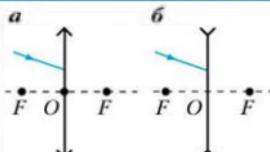


Рис. 189

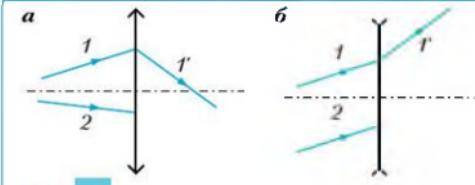


Рис. 190

§ 55

## Построение изображений, создаваемых тонкими линзами

Будем считать, что создаваемое линзой изображение является стигматическим. Другими словами, все исходящие из точечного источника лучи после прохождения линзы либо пересекаются в одной точке, либо идут так, что в одной точке пересекаются их продолжения. Поэтому для построения изображения любой точки предмета достаточно найти точку пересечения каких-либо двух лучей, вышедших из этой точки, или точку продолжений этих лучей.

### Изображения, создаваемые тонкими собирающими линзами

Начнём построение изображений со случая, когда точечный источник  $S$  находится от главной плоскости тонкой собирающей линзы на расстоянии  $a = OA$ , большем её фокусного расстояния  $F$ , и на расстоянии  $h = SA$  от её главной оптической оси (рис. 191, а). Рассмотрим два луча от этого источника, ход которых через линзу вам уже известен.

Луч 1, параллельный главной оптической оси, после преломления в линзе проходит через её главный фокус  $F_2$ . Совпадающий с побочной оптической осью луч 2 проходит через линзу, не изменяя своего направления. Эти лучи пересекаются в точке  $S_1$ . Расстояние  $OB_1$  обозначим  $b$ , а расстояние  $B_1S_1$  обозначим  $H_1$ . Из подобия треугольников  $OAS$  и  $OB_1S_1$  следует, что  $\frac{h}{H_1} = \frac{a}{b}$ . Длина отрезка  $OF_2$  равна фокусному расстоянию линзы  $F$ . Поскольку  $CO = h$ , то из подобия треугольников  $F_2OC$  и  $F_2B_1S_1$  следует, что

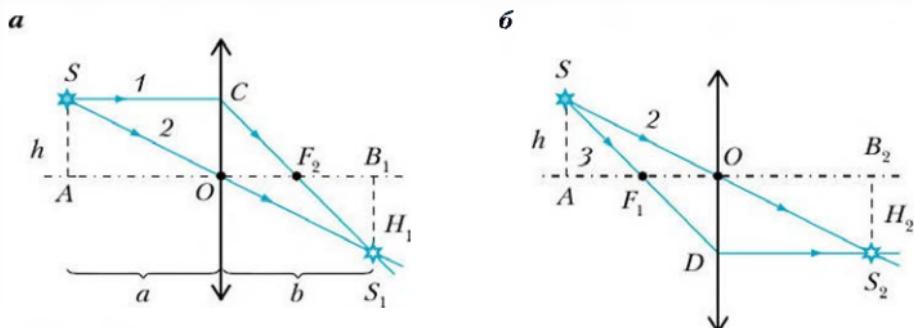


Рис. 191

$\frac{h}{H_1} = \frac{F}{b - F}$ . Следовательно,  $\frac{a}{b} = \frac{F}{b - F}$  или  $a \cdot b - a \cdot F = b \cdot F$ . Разделив полученно обе части этого соотношения на произведение  $a \cdot b \cdot F$ , получим:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}. \quad (1)$$

Этот же результат можно получить, рассмотрев луч 2, идущий вдоль побочной оптической оси, и луч 3, проходящий через главный фокус  $F_1$  (рис. 191, б).

Поскольку в точке  $S_1$  пересекаются все выходящие из линзы лучи от точечного источника  $S$ , а не их продолжения, то эта точка будет действительным изображением источника  $S$ .

Обратимся к рис. 192. Как и в рассмотренном выше случае, действительное изображение точки, находящейся на расстоянии  $h$  от главной оптической оси собирающей линзы, располагается по другую сторону от этой оси на расстоянии  $H$ , которое можно вычислить по формулам:

$$H = h \cdot \frac{b}{a} = h \cdot \frac{F}{a - F} = h \cdot \frac{b - F}{F}. \quad (2)$$

Поскольку расстояние  $b$  не зависит от  $h$ , то изображения светящихся точек, находящихся на одинаковом удалении от главной плоскости линзы, будут находиться также на одинаковом удалении от этой плоскости. Следовательно, действительное изображение стрелки, перпендикулярной главной оптической оси линзы, будет также перпендикулярно указанной оси, но расположено по другую сторону от неё (см. рис. 192). Такое изображение называют *перевёрнутым (обратным)*. Если длину стрелки обозначить  $h$ , то, согласно формуле (2), длина её изображения  $H$  будет во столько раз больше  $h$ , во сколько раз  $b$  больше  $a$ .

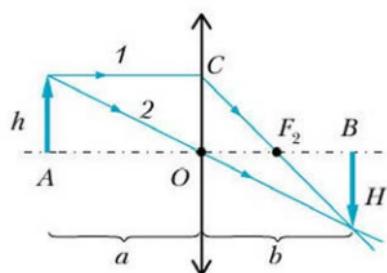


Рис. 192 Получение перевёрнутого изображения в тонкой собирающей линзе

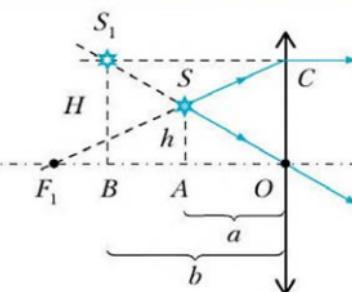


Рис. 193 Получение мнимого изображения в тонкой собирающей линзе

Отношение  $\frac{H}{h}$  называют коэффициентом поперечного увеличения и обозначают символом  $k_{\perp}$ .

В соответствии с этим определением и формулой (2) в рассмотренном случае:

$$k_{\perp} = \frac{b}{a} = \frac{F}{a - F} = \frac{b - F}{F}, \quad (3)$$

Теперь построим изображение точечного источника  $S$ , который находится от главной плоскости тонкой собирающей линзы на расстоянии  $a$ , меньшем её фокусного расстояния  $F$ , и на расстоянии  $h$  от её главной оптической оси (рис. 193). Луч  $SO$  идёт вдоль побочной оптической оси. Луч  $SC$  идёт так, что его продолжение, показанное на рисунке пунктирной линией, проходит через главный фокус  $F_1$ . Поэтому этот луч после преломления в линзе идёт параллельно главной оптической оси.

Видно, что рассматриваемые лучи после преломления в линзе нигде не пересекаются. Однако в точке  $S_1$  пересекаются *продолжения* этих лучей. Поэтому точка  $S_1$  является *мнимым изображением* точки  $S$ . Наблюдатель по другую сторону линзы будет воспринимать лучи, выходящие из линзы, как лучи от источника, расположенного в точке  $S_1$ .

Отметим, что в рассмотренном случае источник и его мнимое изображение расположены по одну сторону от главной плоскости и главной оптической оси собирающей линзы.

Определим положение изображения  $S_1$ . Обозначим длины отрезков  $AO$  и  $BO$  соответственно  $a$  и  $b$ . Треугольники  $OSA$  и  $OS_1B$  подобны. Поэтому  $\frac{h}{H} = \frac{a}{b}$ . Так как отрезок  $S_1C$  параллелен главной оптической оси линзы, то длина отрезка  $OC$  равна  $H$ . Поскольку треугольники  $F_1SA$  и  $F_1CO$  подобны, то  $\frac{h}{H} = \frac{F - a}{F}$ .

Следовательно,  $\frac{a}{b} = \frac{F - a}{F}$  или  $F \cdot a = F \cdot b - a \cdot b$ . Разделив почленно обе части последнего равенства на произведение  $a \cdot b \cdot F$ , получим:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{a} - \frac{1}{b}. \quad (4)$$

Формулы (1) и (4) можно переписать в виде одной формулы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{a} + \frac{1}{h}. \quad (5)$$

При этом, когда изображение источника является *действительным*, величина  $b$  *положительна*, а когда изображение точки *мнимое*, величина  $b$  *отрицательна*.

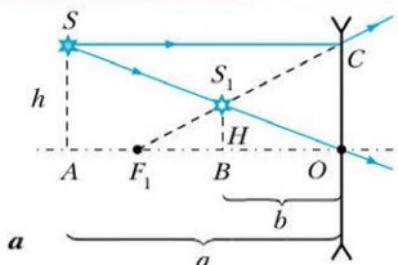
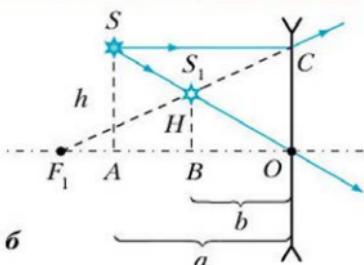


Рис. 194

Получение мнимых изображений в тонких рассеивающих линзах



### Изображения, создаваемые тонкими рассеивающими линзами

Теперь рассмотрим, как строят изображения, получаемые с помощью тонкой рассеивающей линзы.

На рис. 194, а показано, что точечный источник  $S$  находится перед главным фокусом  $F_1$ . Для построения изображения в этом случае использованы два луча:  $SC$  и  $SO$ . Луч  $SC$  идет от источника  $S$  параллельно главной оптической оси рассеивающей линзы. Поэтому он выходит из линзы так, что его продолжение проходит через главный фокус  $F_1$  линзы, расположенный по ту же сторону от линзы, что и источник  $S$ . Луч  $SO$  падает на линзу вдоль её побочной оптической оси, поэтому он не изменяет своего направления. Видно, что выходящие из линзы лучи не пересекаются. Однако пересекаются их продолжения в точке  $S_1$ . Таким образом, точка  $S_1$  является мнимым изображением источника  $S$ .

С помощью аналогичных лучей можно построить изображение точечного источника, расположенного между фокальной и главной плоскостями рассеивающей линзы (рис. 194, б). Видно, что и в этом случае изображение источника является мнимым.

**!** Таким образом, изображение  $S_1$  точечного источника  $S$ , расположенного перед рассеивающей линзой, всегда получается мнимым. Это изображение расположено по ту же сторону от главной оптической оси, что и сам источник.

Определим положение изображения относительно линзы. Как и ранее, будем считать, что длина отрезка  $AO$  равна  $a$ , длина отрезка  $BO$  равна  $b$  (см. рис. 194, а). Расстояние от источника до главной оптической оси линзы ( $AS$ ) обозначим через  $h$ , а расстояние от его изображения до главной оптической оси ( $BS_1$ ) — через  $H$ . Расстояние  $OF_1$  обозначим через  $F$ . Поскольку треугольник  $OAS$  подобен треугольнику  $OBS_1$ , а треугольник  $F_1OC$  подобен треугольнику  $F_1BS_1$ , то  $\frac{h}{H} = \frac{a}{b} = \frac{F}{F-b}$ .

Следовательно,

$$-\frac{1}{F} = \frac{1}{a} - \frac{1}{b}, \quad (6)$$

$$H = h \cdot \frac{b}{a} = h \cdot \frac{F}{a+F} = h \cdot \frac{F-b}{F}. \quad (7)$$

Сопоставление формул (5) и (6) с учётом правила выбора знаков для фокусных расстояний собирающей и рассеивающей линз приводит к выводу, что они могут быть записаны в виде одной *формулы тонкой линзы*.

 Формула тонкой линзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}, \quad (8)$$

где  $F$  — фокусное расстояние линзы: положительное (со знаком «+») для собирающей линзы, отрицательное (со знаком «-») — для рассеивающей линзы,  $a$  — расстояние от источника до главной плоскости линзы,  $b$  — расстояние от главной плоскости линзы до изображения, взятое со знаком «+», если изображение действительное, и со знаком «-», если изображение мнимое.

В заключение напомним, что для тонких линз справедлив принцип обратимости хода световых лучей. Использование этого принципа позволяет решать задачи, в которых требуется определить положение источника, когда известно положение его изображения.

### Вопросы

1. Как связаны между собой фокусное расстояние линзы и расстояния от её главной плоскости до точечного источника и его изображения, получаемого с помощью этой линзы? Сформулируйте правила знаков для величин, входящих в эту формулу.

- 2\_ Что называют коэффициентом поперечного увеличения?
- 3\_ В каком случае изображение, получаемое с помощью собирающей линзы, будет: а) действительным; б) мнимым?
- 4\_ Как построить изображение точечного источника: а) в собирающей линзе; б) рассеивающей линзе?
- 5\_ Может ли изображение светящейся точки в рассеивающей линзе быть действительным?
- 6\_ Где должен находиться предмет перед собирающей линзой, чтобы коэффициент его поперечного увеличения был: а) больше единицы; б) меньше единицы?
- 7\_ Как изменится ответ на предыдущий вопрос, если линза будет рассеивающей?



### Упражнения

- 1\_ Постройте изображение светящейся точки, расположенной перед собирающей линзой с фокусным расстоянием  $F = 2$  см на расстоянии  $a = 3$  см от её главной плоскости и на расстоянии  $h = 2$  см от её главной оптической оси.
- 2\_ С помощью собирающей линзы с фокусным расстоянием  $F = 0,5$  м на экране получают действительное изображение предмета, находящегося от линзы на расстоянии  $a = 1,5$  м. На каком расстоянии  $h$  от линзы должен располагаться экран? Определите коэффициент поперечного увеличения в этом случае.
- ✓ 3\_ Светящаяся точка находится перед собирающей линзой на расстоянии, меньшем её фокусного расстояния, над главной оптической осью. Постройте изображение этой точки с помощью луча, идущего вдоль побочной оптической оси, и луча: а) падающего на линзу параллельно главной оптической оси; б) продолжение которого проходит через главный фокус, находящийся за линзой. Докажите, что продолжения этих трёх лучей пересекаются в одной точке.
- 💡 4\_ Постройте изображение светящейся точки, расположенной перед рассеивающей линзой с фокусным расстоянием  $F = -8$  см на расстоянии  $a = 4$  см от её главной плоскости и на расстоянии  $h = 2$  см от её главной оптической оси. Проверьте выполненное построение, используя формулу (8).
- 5\_ С помощью рассеивающей линзы с фокусным расстоянием  $F = -0,5$  м наблюдают изображение предмета, находящегося от главной плоскости линзы на расстоянии  $a = 1,5$  м. На каком рас-

- стоянии  $b$  от главной плоскости линзы находится это изображение? Определите коэффициент поперечного увеличения в этом случае.
- \*6 С помощью линзы с оптической силой  $D = -5$  дптр наблюдают изображение, находящееся от линзы на расстоянии 10 см. На каком расстоянии от линзы расположен предмет?

## § 56 Глаз и зрение. Оptические приборы

Глаз взрослого человека имеет форму, близкую к шару диаметром около 2,5 см (рис. 195). Снаружи глаз окружён твёрдой оболочкой, называемой *склерой*. Переднюю часть 1 этой оболочки называют *роговицей*. Она прозрачна для света. Остальные части склеры имеют белый цвет и неопрзрачны. Эти части называют *белком*.

За роговицей расположена прозрачная водянистая масса 3, а за ней — *радужная оболочка* 2. Её цвет определяет цвет глаз. Радужная оболочка в середине имеет отверстие — *зрачок*. В зависимости от количества света, попадающего в глаз, диаметр зрачка может изменяться. При слабом освещении он может увеличиваться до 8 мм, а при сильном — уменьшаться примерно до 2 мм.

За зрачком расположено прозрачное упругое тело, имеющее вид двояковыпуклой линзы, — *хрусталик* 4. Хрусталик под действием *мышц* 5, прикрепляющих его к склере, может деформироваться. За хрусталиком расположено *стекловидное тело* 6, представляющее собой бесцветную прозрачную студенистую массу. Задняя часть склеры — *глазное дно* — покрыто сетчатой оболочкой 7 (*сетчаткой*). Сетчатая оболочка состоит из тончайших волокон, являющихся разветвлениями зрительного нерва. Каждое из этих волокон оканчивается светочувствительным рецептором в виде палочки или колбочки. Всего в глазу насчитывается примерно  $10^8$  палочек и  $7 \cdot 10^6$  колбочек. Палочки и колбочки, реагируя на свет, посыпают сигналы в головной мозг. В отличие от палочек, колбочки вырабатывают сигналы, которые зависят от цвета поступающего в глаз света.

Под действием сигналов, поступающих в мозг, возникает зрительное ощущение: человек видит предметы.

Роговица, камера, заполненная водянистой жидкостью, хрусталик и стекловидное тело

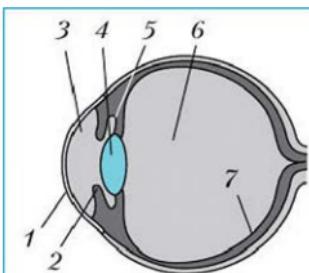
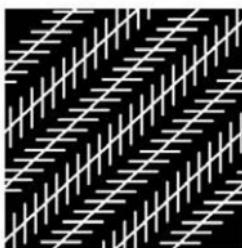
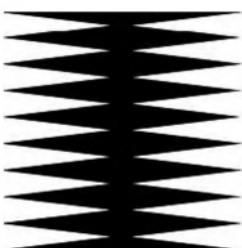


Рис. 195 Строение глаза человека



*Длинные косые линии на этом рисунке в действительности параллельны*



*Высота этой фигуры в действительности равна её ширине*

*Рис. 196*

Примеры зрительных иллюзий

ло образуют *оптическую систему глаза*. Эта система представляет собой собирающую линзу. Она формирует на сетчатке действительное, уменьшенное и перевёрнутое изображение рассматриваемых предметов. Мы же видим предметы такими, какие они есть. Это обусловлено тем, что мозг человека в первые месяцы жизни обучается корректировать информацию от светочувствительных элементов глаза.

Однако мозг не всегда верно выполняет анализ изображения, получающегося на сетчатке. Тогда возникают *иллюзии зрения*: наблюдаемый предмет нам кажется отличным от того, что он представляет собой реально (рис. 196).

Расстояние между роговицей и сетчаткой (т. е. изображением предмета) практически неизменно. В то же время человек отчётливо видит предметы, находящиеся на разных расстояниях от глаза. Это оказывается возможным потому, что оптическая сила хрусталика за счёт его деформации мышцами изменяется.

**Изменение формы хрусталика, а значит, и оптической силы всего глаза называют аккомодацией.**

Желая более детально рассмотреть предмет, человек приближает его к глазам. При этом размеры изображения на сетчатке увеличиваются, так как увеличивается *угол зрения*, под которым виден предмет. Следовательно, увеличивается и число светочувствительных рецепторов, которые посылают в мозг информацию о предмете.



Особенностью нашего зрения является задержка изображения (зрительного ощущения) при восприятии объектов окружающего мира. Она возникает из-за того, что для обработки информации, поступающей от зрительных рецепторов в мозг, необходимо какое-то время. Поэтому после пропадания на сетчатке изображения человек ещё примерно 0,14 с продолжает его воспринимать. Таким образом, когда мы смотрим кинофильм или телепередачу, мы не замечаем смены кадров, происходящей с частотой не менее 20 Гц. Нам кажется, что мы видим непрерывно движущийся объект.

У человека с нормальным зрением изображение очень удалённого предмета получается на сетчатке, когда мышцы, прикреплённые к хрусталику, полностью расслаблены. При этом оптическая сила глаза равна примерно 58 дптр. При приближении предмета для получения его чёткого изображения на сетчатке оптическая сила глаза должна увеличиваться. Это происходит за счёт аккомодации — сжатия хрусталика мышцами. Предел аккомодации, т. е. возможности сфокусировать изображение предмета на сетчатке, у человека с нормальным зрением наступает, когда расстояние до предмета уменьшается до 12 см. При этом мышцы сжимают хрусталик наиболее сильно. В результате оптическая сила глаза увеличивается примерно до 74 дптр. Долго рассматривать так близко расположенные предметы человек не может — мышцы глаза устают.

Наиболее комфортное для человека с нормальным зрением расстояние для рассматривания мелких деталей  $d_{\text{н}} = 25$  см. Это расстояние называют *расстоянием наилучшего зрения*. Предмет, находящийся от глаза на таком расстоянии, человек может длительно рассматривать без напряжения. Именно такое расстояние является оптимальным при чтении и письме для человека с нормальным зрением.

Понятно, что если изображение предмета занимает лишь один светочувствительный элемент сетчатки, то различить детали на этом предмете будет невозможно. Опыт показывает, что при хорошем освещении человек воспринимает предмет как точку, если угол зрения не превышает 1 минуты. При слабом освещении минимальный угол зрения может увеличиваться до  $1^\circ$ .

Наиболее часто встречаются два дефекта зрения: *близорукость* и *дальнозоркость*.

У человека с нормальным зрением попадающий в глаз параллельный пучок света собирается в точке  $F$ , находящейся на сетчатке (рис. 197, а), у *близорукого* — *перед* сетчаткой (рис. 197, б), а у *дальнозоркого* — *за* ней (рис. 197, в). Поэтому у близорукого человека расстояние наилучшего зрения меньше 25 см, а у дальнозоркого — больше 25 см.

Для исправления этих дефектов зрения применяют линзы — очки. При *близорукости*, когда в неизменённом состоянии хрустали-

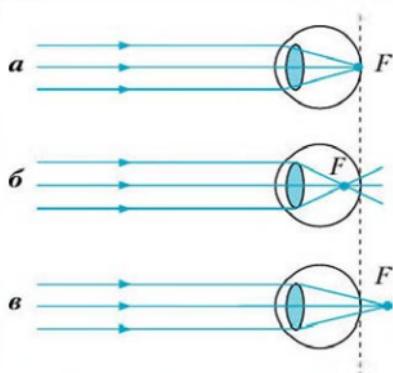
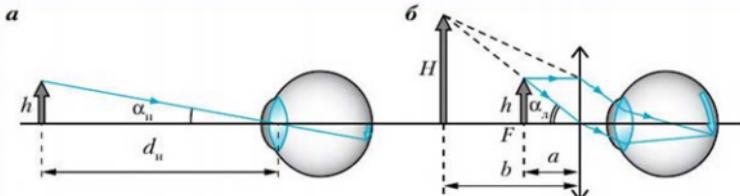


Рис. 197



*Рис. 198* Получение изображения предмета без увеличения (а) и увеличенного с помощью лупы (б)

ка оптическая сила глаза больше 58 дптр, используют очки с *рассеивающими* линзами. При *далекозоркости* применяют очки с *собирающими* линзами. Очко помогают получить изображение предмета точно на сетчатке.

Теперь рассмотрим некоторые *оптические устройства*, в которых используют линзы или системы линз.

Чтобы рассмотреть мелкие детали предмета, необходимо увеличить угол зрения, под которым виден этот предмет. В простейшем случае для этого используют *лупу — короткофокусную собирающую линзу*.

Лупу располагают близко к глазу, а предмет — между линзой и её фокусом, но возможности ближе к нему (рис. 198). При этом с помощью лупы получают увеличенное прямое минимое изображение предмета. Оно находится практически на бесконечном удалении от глаза. Это позволяет рассматривать предмет при минимальном напряжении мышц глаза.

Использование лупы позволяет увеличить угол зрения и, следовательно, различить мелкие детали предмета. Как это происходит, можно понять, сопоставив рисунки 198, а и б. Видно, что при рассмотрении достаточно мелких деталей (при  $h \ll d_u$  — расстояния наилучшего зрения) угол зрения  $\alpha_d$  будет примерно равен:

$$\alpha_d = \frac{h}{F_d}, \quad (1)$$

где  $F_d = D_d^{-1}$  — фокусное расстояние лупы, а  $D_d$  — её оптическая сила. Поэтому *угловое увеличение* — отношение угла зрения  $\alpha_d$ , получаемого с помощью лупы, к углу зрения  $\alpha_u$  без неё на расстоянии наилучшего зрения — равно:

$$\Gamma_d = \frac{\alpha_d}{\alpha_u} = \frac{d_u}{F_d} = d_u \cdot D_d. \quad (2)$$



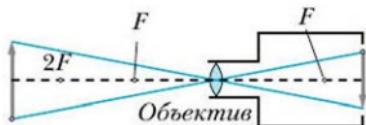


Рис. 199

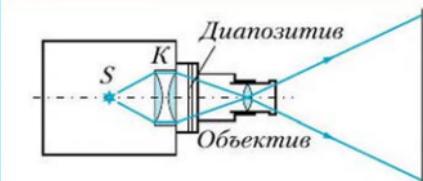


Рис. 200

На рис. 199 показано устройство *фотоаппарата*. Для получения действительного уменьшенного изображения фотографируемого предмета в фотоаппарате используют объектив. Он представляет собой систему линз или (в простейшем случае) одну собирающую линзу. При необходимости положение объектива и его оптическую силу изменяют так, чтобы изображение было чётким. Чтобы зафиксировать изображение, у задней стенки фотокамеры помещают светочувствительную пленку или полупроводниковую матрицу. Время освещения светочувствительного элемента (время экспозиции), необходимое для получения фотографии, регулируют специальным затвором.

На рис. 200 показано устройство *проекционного аппарата*. Он предназначен для получения увеличенного изображения диапозитива на большом экране. Свет от источника  $S$  попадает на конденсор  $K$ , который создаёт равномерное освещение диапозитива. Объектив расположен так, чтобы на экране получалось чёткое изображение.



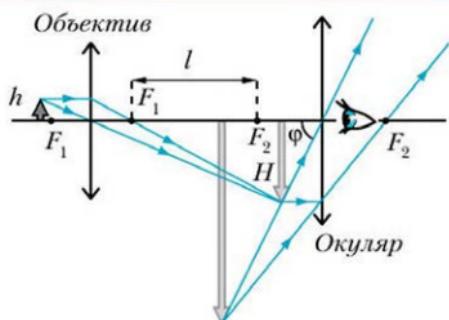
Большое увеличение не может быть достигнуто с помощью одной линзы. Это обусловлено тем, что изображения, получаемые с помощью линз большой оптической силы, имеют серьёзные искажения. Поэтому на практике используют лупы, увеличение которых не превышает 10.

Для получения большого увеличения используют оптические системы, состоящие из нескольких линз. Рассмотрим примеры таких систем.

*Микроскоп* состоит из двух короткофокусных линз – объектива и окуляра (рис. 201). Предмет располагают перед фокусом  $F_1$  объектива, вблизи не-



В фотокамерах мобильных телефонов из-за малого расстояния между объективом и светочувствительной матрицей в качестве объектива используют короткофокусную линзу. При этом для получения достаточно чёткого изображения диаметр линзы должен быть достаточно мал. В этом случае проходящие через объектив пучки света от точек, находящихся на разных расстояниях, получаются достаточно узкими. Поэтому не требуется регулировка объектива.



*Рис.* 201 Получение изображения с помощью микроскопа

Из рисунка следует, что коэффициент поперечного увеличения объектива равен:

$$k_1 = \frac{H}{h} \approx \frac{l + F_1}{F_1} \approx \frac{l}{F_1}, \quad (3)$$

где  $l$  – расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра, которое обычно значительно больше фокусного расстояния  $F_1$  объектива.

Коэффициент поперечного увеличения окуляра равен:

$$k_2 = \frac{d_u}{F_2}, \quad (4)$$

где  $d_u = 25$  см – расстояние наилучшего зрения, а  $F_2$  – фокусное расстояние окуляра.

Из формул (3) и (4) следует, что общее увеличение микроскопа равно:

$$k = k_1 \cdot k_2 = \frac{l \cdot d_u}{F_1 \cdot F_2}. \quad (5)$$

Современные микроскопы позволяют получать качественное изображение при увеличении до 1500.

Для наблюдения удалённых объектов используют зрительные трубы – телескопы. Как и микроскоп, линзовый телескоп состоит из двух линз – объектива и окуляра. Для получения максимального углового увеличения телескоп конструируют так, чтобы изображение удалённого предмета, создаваемое объективом, располагалось в фокальной плоскости окуляра (рис. 202).

Поэтому объектив даёт увеличенное действительное изображение предмета. Расстояние между объективом и окуляром подбирают таким образом, чтобы изображение от объектива ( $H$ ) получалось между окуляром и его фокусом  $F_2$ . В результате окуляр работает подобно лупе и даёт сильно увеличенное мнимое изображение предмета. При надлежащей настройке микроскопа это изображение расположено на расстоянии наилучшего зрения от глаза наблюдателя.

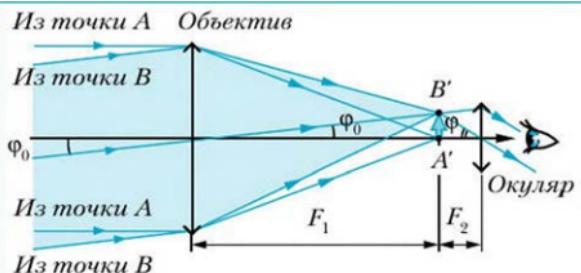


Рис. 202

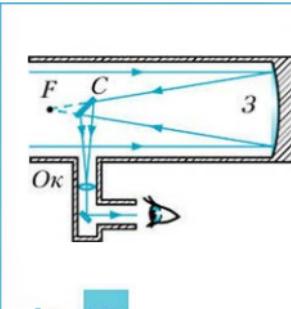


Рис. 203

Если две точки объекта наблюдаются непосредственно глазом под углом  $\Phi_0$ , то через телескоп они будут наблюдаться под углом  $\Phi$ .

Отношение тангенсов  $\Phi$  и  $\Phi_0$  называют *угловым увеличением γ телескопа*:

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \Phi}{\operatorname{tg} \Phi_0} = \frac{F_1}{F_2}, \quad (6)$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – фокусные расстояния объектива и окуляра.

Чтобы избавиться от хроматической aberrации в линзах (при которой в результате дисперсии лучи разного цвета фокусируются линзой на разных расстояниях), применяют телескопы-рефлекторы, в которых вместо линзы в качестве объектива используют зеркало сферической формы (рис. 203). Первый такой телескоп был построен Ньютоном в 1672 г.

### Вопросы

- 1 Как устроен глаз человека?
- 2 Что называют: а) аккомодацией; б) расстоянием наилучшего зрения?
- 3 Какие дефекты зрения вам известны? В чём заключаются такие дефекты, как дальнозоркость и близорукость?
- 4 Очки с какими линзами (собирающими или рассеивающими) нужны: а) при близорукости; б) при дальнозоркости?
- 5 Какую линзу (собирающую или рассеивающую) используют: а) для лупы; б) в объективе фотоаппарата; в) в объективе проектора?
- \*6 Что называют угловым увеличением лупы? От чего зависит угловое увеличение лупы?



### Для углублённого уровня

7. Объясните назначение объектива и окуляра: а) в микроскопе; б) телескопе.
8. Объясните ход лучей: а) в микроскопе; б) зрительной трубе; в) телескопе-рефлекторе.

### Упражнения

1. Определите оптическую силу лупы, которая даёт пятикратное увеличение.
2. Расстояние от объектива проектора до экрана равно 20 м, а расстояние от объектива до диапозитива — 3 см. Определите увеличение изображения и фокусное расстояние этого объектива.
- ✓ 3. Определите экспериментально фокусное расстояние увеличительного стекла (лупы), выполнив все необходимые измерения. Получите с помощью этой лупы изображение какого-либо источника света на экране. Проверьте справедливость формулы линзы.



### Для углублённого уровня

4. Фокусное расстояние объектива микроскопа равно 2 см, а фокусное расстояние окуляра микроскопа — 4 см. Расстояние между объективом и окуляром равно 18 см. Определите увеличение микроскопа.
5. Фокусное расстояние окуляра зрительной трубы равно 2 см. Труба даёт 24-кратное увеличение. Определите оптическую силу объектива этой трубы и оцените её длину.
- ✓ 6. Изучите историю появления микроскопа и телескопа, используя интернет-ресурсы <http://gotourl.ru/7127>, <http://gotourl.ru/7128>. Подготовьте реферат об этих оптических системах.
- ✓ 7. Изучите оптические схемы телескопов Кеплера и Галилея по материалам интернет-ресурса <http://gotourl.ru/7129>. Подготовьте реферат на эту тему.
- ✓ 8. Сделайте с использованием оборудования школьного кабинета физики макеты телескопов Галилея и Кеплера. Исследуйте, как зависит чёткость изображения в этих приборах от расстояния между объективом и окуляром.

# ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Точечным источником света называют точечное тело, испускающее свет.

Прямую линию, вдоль которой в однородной среде передаётся энергия от источника света, называют лучом света.

Все законы геометрической оптики были установлены опытным путём и могут быть объяснены как с волновой, так и с корпускулярной точки зрения

## Закон прямолинейного распространения света

В прозрачной однородной среде свет распространяется прямолинейно

## Закон отражения от зеркальных поверхностей

Отражённый от зеркальной поверхности луч лежит в плоскости падения, причём угол падения луча равен углу отражения

## Закон преломления света на границе раздела двух изотропных однородных сред

Луч падающий, луч преломлённый и перпендикуляр к границе раздела в точке падения лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения  $\alpha$  к синусу угла преломления  $\gamma$

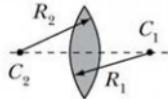
для данной пары сред не зависит от угла падения:  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}$ , где  $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$  — относительный показатель преломления второй среды по отношению к первой

Дисперсия света — зависимость показателя преломления от цвета (частоты) света

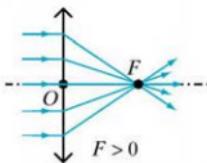
Предельный угол полного (внутреннего) отражения — угол падения  $\alpha_m$  из оптически более плотной (имеющей больший показатель преломления) среды, которому соответствует угол преломления  $\gamma = 90^\circ$ :

$$\sin \alpha_m = n_{21}$$

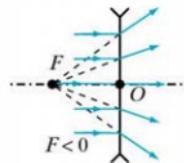
Линза — прозрачное тело, хотя бы одна из поверхностей которого не является плоской



Линзу, которая преобразует падающий на неё параллельный пучок света в сходящийся, называют собирающей



Линзу, которая преобразует падающий на неё параллельный пучок света в расходящийся, называют рассеивающей



Оптическая сила **D** тонкой линзы, её фокусное расстояние **F**, относительный показатель **n** преломления материала линзы по отношению к окружающей среде, радиусы **R<sub>1</sub>** и **R<sub>2</sub>** сферических поверхностей, ограничивающих линзу, взятые с соответствующими знаками, удовлетворяют соотношению:

$$D = \frac{1}{F} = (n - 1) \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Формула тонкой линзы:  $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F} = D$ , где **a** и **b** — расстояния от источника и от изображения до главной плоскости линзы, взятые с учётом правила знаков.

Правило знаков:  $F > 0$ , если линза собирающая;  $F < 0$ , если линза рассеивающая;  
 $b > 0$ , если изображение действительное;  
 $b < 0$ , если изображение мнимое

Вы уже знаете, что все виды волн описывают одинаковыми (с точностью до обозначений) уравнениями. Так же сходны и многие свойства волн, имеющих разную природу. Поэтому в этой главе мы воспользуемся единым подходом к описанию волновых процессов и будем изучать явления, присущие всем волнам. При рассмотрении же примеров волновых явлений мы для наглядности будем конкретизировать природу волны.

## § 57

## Волновой фронт. Принцип Гюйгенса

Рассмотрим точечный источник колебаний, который в момент времени  $t_0 = 0$  начинает создавать возмущения в окружающей его однородной среде (рис. 204). Пусть это будет, например, расположенный в воде маленький шарик, центр которого неподвижен, а радиус начинает изменяться (пульсировать) с течением времени по гармоническому закону.

Если окружающая источник среда однородна и изотропна, то возмущения будут распространяться от шарика во все стороны с одинаковой по модулю скоростью  $v$ . К моменту времени  $t$  возмущения достигнут всех точек сферы, радиус которой равен  $R = v \cdot t$ . Совокупность всех этих точек называют *передним волновым фронтом* (или передней волновой поверхностью). Сечение переднего волнового фронта плоскостью рисунка в момент времени  $t$  показано синей окружностью.

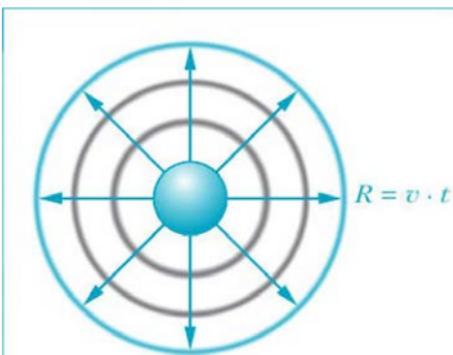


Рис. 204

Понятно, что все точки, которых волна достигает одновременно, в дальнейшем будут колебаться одинаково, т. е. синфазно. Поэтому в рассматриваемом случае синфазно друг с другом будут колебаться все точки любой сферы, которая расположена внутри переднего волнового фронта и концентрична ему. Любую из таких сфер называют волновой поверхностью или волновым фронтом. На рис. 204 сечения двух таких волновых поверхностей показаны чёрным цветом. Ясно также, что колебания, происходящие в точках разных волновых поверхностей, в общем случае имеют разные фазы.

Изображённые на рисунке волновые поверхности имеют вид сфер. Поэтому такие волны называют *сферическими*. Известны волны с волновыми поверхностями и другой формы: плоские, цилиндрические и др.

Радиальные прямые, исходящие из точечного источника, в нашем случае совпадают с направлениями, в которых распространяются возмущения, т. е. переносится энергия от источника. Следовательно, эти прямые являются лучами, понятие о которых было дано в предыдущей главе. Видно, что в рассмотренном случае лучи волны перпендикулярны её волновой поверхности и совпадают с направлением движения волнового фронта.

Если источник возмущения не является точечным, то фронт создаваемой им волны может отличаться от сферы. Более того, в некоторых случаях форма фронта может изменяться в процессе распространения волны. Как же в таких случаях определять положение и вид волнового фронта? Например, как определить вид фронта в момент времени  $t + \Delta t$ , если известен волновой фронт в предшествующий момент времени  $t$ ? Для решения этой задачи нидерландский физик Христиан Гюйгенс (1629–1695) в 1690 г. предложил способ, получивший в дальнейшем название *принцип Гюйгенса*.

Рассмотрим последовательно, в чём заключается этот принцип и как его использовать.

- ! Во-первых, считают, что каждая точка, которой достигает волна к моменту времени  $t$ , становится источником вторичной волны.
- Во-вторых, строят (за пределами переднего волнового фронта первичной волны) передние волновые фронты вторичных волн, которые получаются к моменту времени  $t + \Delta t$ .
- В-третьих, строят огибающую вторичных волн. Эта огибающая и будет искомым волновым фронтом в момент времени  $t + \Delta t$ .

Примеры таких построений для сферической и плоской волны, распространяющихся в однородной изотропной среде, показаны на рис. 205.

Принцип Гюйгенса позволяет объяснить законы отражения и преломления волн разной природы на границе раздела двух однородных изотропных сред.

Начнём с закона отражения. Пусть волна с плоским волновым фронтом  $A'B'$  падает на отражающую поверхность  $\mathcal{Z}$  под углом  $\alpha$  (рис. 206). Будем считать, что эта поверхность является зеркальной, т. е. её неровности достаточно малы по сравнению с длиной  $\lambda$  падающей волны.

Рассмотрим момент времени  $t$ , в который возмущение вдоль луча  $AA'$  достигает поверхности  $\mathcal{Z}$ . Начиная с этого момента точка  $A$  становится источником вторичной волны. Возмущение в точке  $B$ , принадлежащей тому же волновому фронту падающей волны, что и точка  $A$ , достигнет поверхности  $\mathcal{Z}$  в точке  $D$  через время  $\Delta t = \frac{BD}{v}$ , где  $v$  — модуль скорости падающей волны. За это время вторичная волна из точки  $A$  распространится от поверхности  $\mathcal{Z}$  во все стороны на расстояние, равное  $AC = v \cdot \Delta t$ . Следовательно,  $BD = AC$ .

Огибающая  $CD$  всех вторичных волн, порождённых точками участка  $AD$  поверхности  $\mathcal{Z}$ , является фронтом отражённой волны в момент времени  $t + \Delta t$ . Периендикуляр к этому фронту — луч  $AC$  образует с перпендикуляром к поверхности  $\mathcal{Z}$  угол  $\beta$ . Следовательно,  $\beta$  — угол отражения. Поскольку  $\sin \alpha = \frac{BD}{AD}$ ,  $\sin \beta = \frac{AC}{AD}$ , то  $\alpha = \beta$ . Таким образом, применение принципа Гюйгенса позволяет сформулировать закон отражения для волн любой природы.

**Отражённый от зеркальной поверхности луч волны лежит в плоскости падения, причём угол падения равен углу отражения.**

Отражение волн лежит в основе многих природных явлений (эхо, миражи, отражение радиоволны от ионосферы и др.), используется во многих технических устройствах и системах (уголковые отражатели, волноводы,

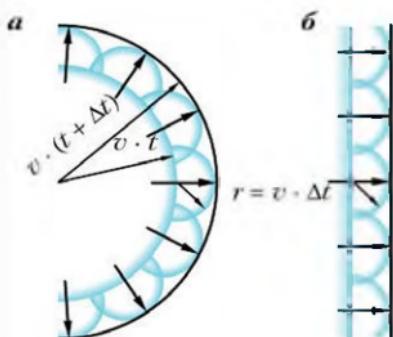


Рис. 205

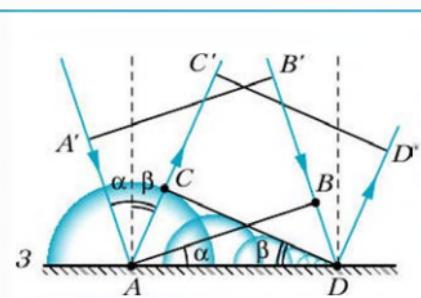


Рис. 206

гидролокаторы и радиолокаторы). В ряде случаев отражение волн приводит к вредным последствиям: повышению уровня шумов, многократным двоениям телевизионных изображений и т. п. Простейший способ борьбы с подобными вредными явлениями — нанесение на отражающие поверхности поглощающих покрытий. Этот же способ используют в военной технике для того, чтобы затруднить обнаружение противником своих самолётов, ракет и подводных лодок.

Теперь применим принцип Гюйгенса для объяснения преломления волн на границе  $\Gamma$  раздела двух однородных изотропных сред 1 и 2, в которых рассматриваемые волны распространяются без поглощения энергии.

Пусть волна с плоским волновым фронтом  $A'B'$  падает под углом  $\alpha$  на плоскую границу  $\Gamma$  между указанными выше средами (рис. 207). Будем считать, что неровности этой поверхности достаточно малы по сравнению с длиной  $\lambda$  падающей волны.

Рассмотрим момент времени  $t$ , в который возмущение, распространяющееся вдоль луча  $A'A$ , достигает границы  $\Gamma$ . Начиная с этого момента точка  $A$  становится источником вторичной волны. Возмущение в точке  $B$ , принадлежащей тому же волновому фронту, что и точка  $A$ , достигнет границы  $\Gamma$  в точке  $D$  через время  $\Delta t = \frac{BD}{v_1}$ , где  $v_1$  — модуль скорости падающей волны, т. е. модуль скорости волны в среде 1. За это время вторичная волна из

точки  $A$  распространится во все стороны в первой среде на расстояние  $v_1 \cdot \Delta t$ , а во второй среде — на расстояние  $AC = v_2 \cdot \Delta t$ , где  $v_2$  — модуль скорости вторичной волны в среде 2. ■

Огибающая  $CD$  всех вторичных волн в среде 2, порождённых точками участка  $AD$  границы  $\Gamma$ , является фронтом преломлённой волны в момент времени  $t + \Delta t$ . Периодически к этому фронту — луч  $AC$  образует с перпендикуляром к границе  $\Gamma$  угол  $\gamma$ . Следовательно,  $\gamma$  — угол преломления. Поскольку  $\sin \alpha = \frac{BD}{AD}$ ,  $\sin \gamma = \frac{AC}{AD}$ , то

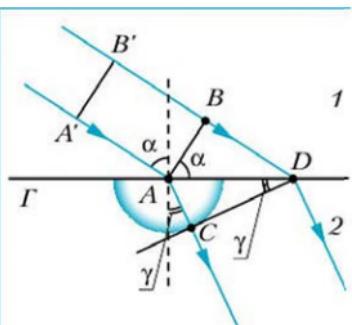


Рис. 207



Распространение вторичных волн в среде 1 объясняет появление отражённой от границы  $\Gamma$  волны. Поскольку явление отражения было рассмотрено выше, на рис. 207 фронты этих вторичных волн в среде 1 не показаны.

$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}$ . Таким образом, применение принципа Гюйгенса позволяет сформулировать закон преломления для волны любой природы при прохождении ими плоской границы раздела двух однородных прозрачных непоглощающих сред.

**Луч падающей волны, луч преломлённой волны и перпендикуляр в точке падения к границе раздела двух однородных изотропных сред лежат в одной плоскости.**

Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для данной пары сред не зависит от угла падения и равно отношению скоростей волн в первой и второй средах:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (1)$$

Сопоставляя (1) с формулами (1) и (2) из § 53, получаем:

**! относительный показатель преломления второй среды относительно первой среды равен отношению скорости распространения волны в первой среде к скорости распространения этой волны во второй среде:**

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (2)$$

Из формулы (2) следует важный вывод. Вам известно, что скорость электромагнитной волны в вакууме является фундаментальной константой и равна  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с. Поэтому, согласно формуле (2),

**! скорость электромагнитной волны в среде с абсолютным показателем преломления  $n$  равна:**

$$v = \frac{c}{n}. \quad (3)$$

Соотношение (3) позволяет утверждать, что явление дисперсии (см. § 53) электромагнитных волн можно объяснить зависимостью показателя преломления среды от частоты колебаний в этих волнах.

На эффекте преломления волн основаны принципы действия большинства оптических приборов (микроскопов, телескопов, спектрографов), работа световодов, сверхдальняя радиосвязь и др. Преломлением волн (иначе рефракцией) объясняются многие явления природы (миражи, звуковые каналы в океане и атмосфере и т. п.).

### Вопросы

- 1 Что называют передним волновым фронтом?
- 2 Перемещается ли передний волновой фронт с течением времени, и если да, то с какой скоростью?
- \*3 Чем определяется вид фронта волны?
- 4 Как располагаются лучи относительно поверхности волнового фронта волны, распространяющейся в однородной изотропной среде?
- 5 В чём состоит принцип Гюйгенса?
- 6 Какие волны называют вторичными? Какую форму имеет волновой фронт вторичной волны в однородной изотропной среде?
- \*7 Будет ли фронт вторичной волны в анизотропной среде сферическим? Ответ поясните.
- 8 Какие природные явления обусловлены: а) отражением волн; б) преломлением волн?
- 9 Как связан относительный показатель преломления двух сред со скоростями волны в этих средах?
- 10 Чем можно объяснить явление дисперсии?

### Упражнения

- 1 Из экспериментов были определены для света жёлтого цвета (длина волны в вакууме  $\lambda = 590 \text{ нм}$ ) показатели преломления: а) кварца  $n_{\text{к}} = 1,54$ ; б) воды  $n_{\text{в}} = 1,33$ ; в) алмаза  $n_{\text{а}} = 2,42$ . Определите скорости распространения света жёлтого цвета и длины волн этого света в данных веществах.
- 2 Используя принцип Гюйгенса, докажите обратимость хода лучей волн: а) при отражении; б) при преломлении.

### § 58

### Поляризация волн

Напомним, что различают продольные и поперечные волны (см. § 48).

Если колебания в поперечной волне происходят в одной плоскости, содержащей луч волны (рис. 208), то такую поперечную волну называют *линейно поляризованной* (или *плоско поляризованной*). При этом плоскость, в которой происходят колебания, называют *плоскостью поляриза-*

ции. Если же колебания в поперечной волне происходят в различных, хаотически изменяющихся направлениях, то такую поперечную волну называют *естественной* (естественно поляризованной или неполяризованной).

Поместим на пути естественной упругой волны, распространяющейся по шнуру (рис. 209, а), пару параллельных близко расположенных пластин. Через щель между ними пройдут лишь те колебания, в которых направления смещений параллельны этой щели. Другими словами, волна станет линейно поляризованной. Если теперь на её пути поместить вторую пару пластин, параллельных первой паре, то волна свободно пройдёт через неё. Если же вторая пара пластин будет перпендикулярна первой паре, то эта вторая пара погасит волну (рис. 209, б).

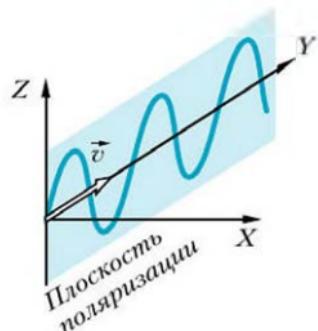


Рис. 208

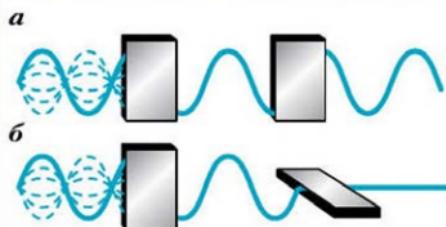


Рис. 209

**Устройство, выделяющее из естественной волны линейно поляризованную, называют поляризатором.**

**Устройство, позволяющее определять плоскость поляризации волны, называют анализатором.**

Понятно, что в экспериментах, показанных на рис. 209, первая пара пластин является поляризатором, а вторая — анализатором.



Рис. 210

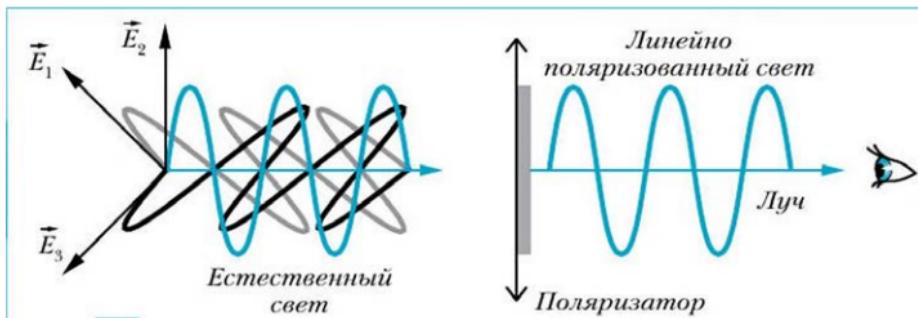


Рис. 211

Аналогичные эксперименты можно провести и с электромагнитными волнами (рис. 210). Поместим между передатчиком 1 и приёмником 2 две решётки, каждая из которых состоит из параллельных друг другу металлических стержней. Выход приёмника подключим через усилитель к гальванометру. Если стержни в обеих решётках ориентировать параллельно друг другу, то, поворачивая одновременно обе решётки, можно найти такое их положение, при котором отклонение стрелки гальванометра будет максимальным. Если после этого одну из решёток повернуть на  $90^\circ$ , то электромагнитная волна проходит не будет. Этот эксперимент доказывает, что электромагнитные волны являются поперечными. Чтобы объяснить эксперимент, нужно учесть, что при ориентации стержней параллельно вектору  $\vec{E}$  электромагнитной волны в стержнях возбуждаются интенсивные вынужденные колебания электронов и волна от такой решётки отражается практически так же, как от сплошного металлического листа. Если же вектор  $\vec{E}$  перпендикулярен оси стержней, то отражение волны почти не происходит.

**В настоящее время плоскостью поляризации линейно поляризованной электромагнитной волны называют плоскость, содержащую направление распространения волны и вектор  $\vec{E}$  этой волны.**

Исследование поляризации света от разных источников можно провести и в школьной лаборатории. В качестве поляризатора и анализатора могут быть взяты *поляроидные пленки*, достаточно широко используемые в фотографии. Если на такую пленку направить естественный свет (рис. 211), например от Солнца или лампы накаливания, то после прохождения через пленку свет станет линейно поляризованным. Возможность прохождения такого света через анализатор будет зависеть от взаимной ориентации поляризатора и анализатора (рис. 212).

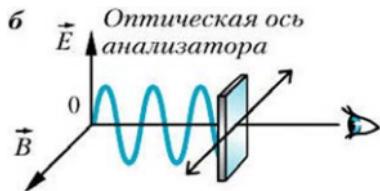
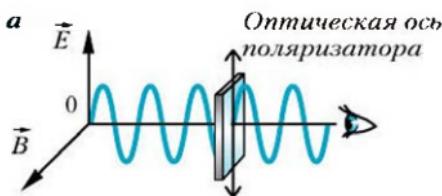


Рис. 212

**Вопросы**

1. Какую волну называют: а) продольной; б) поперечной; в) линейно поляризованной?
2. Что называют плоскостью поляризации: а) упругой волны; б) электромагнитной волны?
3. Какое устройство называют: а) поляризатором; б) анализатором?
4. При каком условии линейно поляризованная электромагнитная волна будет: а) проходить через решётку, состоящую из параллельных металлических стержней; б) отражаться от этой решётки?
5. Для каких целей используют поляроидные пленки?

**Упражнение**

Используя поляроидную пленку, исследуйте поляризацию:  
а) солнечного света; б) света от лампы накаливания; в) света от лазерной указки. Опишите цель, гипотезу, условия каждого эксперимента, его ход и результаты исследования.

**§ 59****Интерференция волн**

Исследуем, что будет происходить, если в пространстве распространяются волны одной природы от нескольких источников. Подвесим над поверхностью воды на пружине деревянный стержень с двумя вбитыми в него гвоздями (рис. 213). При вертикальных колебаниях стержня с периодом  $T$  гвозди, одновременно касаясь воды в точках  $O_1$  и  $O_2$ , вызывают в них периодические смещения частиц воды. В результате по поверхности воды распространяются волны от двух источников.

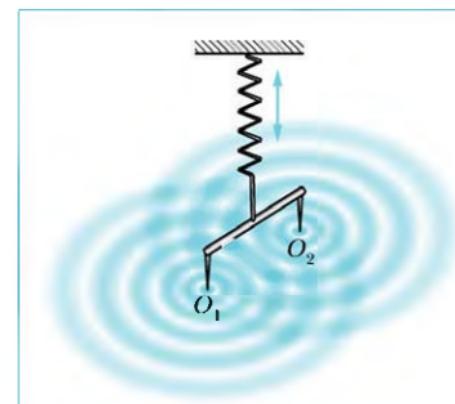


Рис. 213

Видно, что при наложении этих волн через некоторое время на поверхности воды образуется устойчивая картина колебаний. Некоторые точки поверхности всё время остаются неподвижными (волны гасят друг друга). Напротив, есть точки поверхности, амплитуда колебаний в которых всё время существенно больше амплитуды колебаний от каждого из источников в отдельности (волны усиливают друг друга). Полученную картину называют интерференционной, а наблюдаемое явление — *интерференцией*.

**Интерференцией** называют такое сложение в пространстве двух (или нескольких) волн, при котором в разных точках пространства получается усиление или ослабление амплитуды колебаний результирующей волны.

Исследуем механизм образования интерференционной картины в рассмотренном случае. В произвольной точке  $A$  на поверхности воды колебания, вызванные волнами от двух источников, складываются (рис. 214). Результат этого сложения зависит от амплитуд  $x_{m1}$  и  $x_{m2}$  колебаний каждой из волн в этой точке и разности фаз  $\Delta\phi$  между ними.

Пусть в рассматриваемой точке  $\Delta\phi = 0$  (или  $\Delta\phi = 2\pi \cdot k$ , где  $k$  — целое число). Тогда смещения, создаваемые каждой из волн, в любой момент вре-

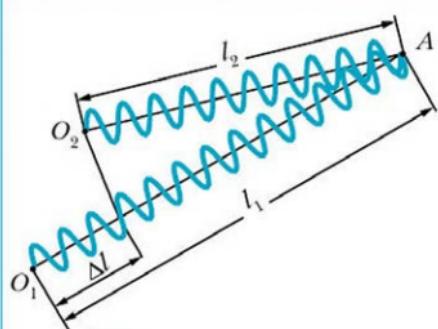


Рис. 214

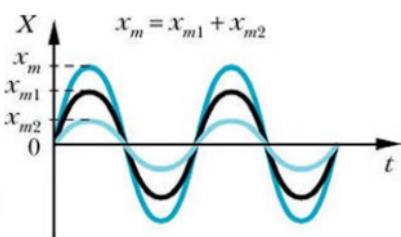


Рис. 215

мени будут направлены одинаково (рис. 215). Поэтому амплитуда  $x_m$  результирующего колебания будет максимальной ( $x_m = x_{m1} + x_{m2}$ ). Точки интерференционной картины, в которых амплитуда результирующих колебаний максимальна, называют *интерференционными максимумами*.

В рассмотренном примере источники волн синфазны. Модули скоростей распространения волн во всех направлениях одинаковы. При выполнении этих условий правило определения положения интерференционных максимумов может быть записано с использованием понятия *разности хода*  $\Delta l = l_1 - l_2$ , т. е. разности расстояний  $l_1$  и  $l_2$  от рассматриваемой точки до источников  $O_1$  и  $O_2$  (см. рис. 214). За время, равное периоду колебаний  $T$ , волна распространяется на расстояние, равное длине волны  $\lambda$ , и фаза колебаний увеличивается на  $2\pi$ . Поэтому если разность хода у волн с одинаковыми периодами колебаний равна целому числу  $k$  длин волн, то разность фаз колебаний, создаваемых этими волнами в данной точке, будет равна  $2k \cdot \pi$ . Это позволяет сформулировать *условие интерференционных максимумов*.

**!** Амплитуда колебаний в некоторой точке интерференционной картины максимальна, если разность фаз колебаний, создаваемых приходящими в эту точку волнами, равна:

$$\Delta\phi = 2k \cdot \pi, \quad (1)$$

где  $k$  — целое число.

В случае, когда источники волн синфазны, а модули скоростей распространения волн во всех направлениях одинаковы, условие интерференционных максимумов может быть записано в виде:

$$\Delta l = k \cdot \lambda, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — длина волны от каждого из источников.

Отметим, что число  $k$  называют *порядком интерференции*.

Амплитуда результирующих колебаний будет минимальной в тех точках, где смещения, создаваемые каждой из волн, в любой момент времени будут направлены в противоположные стороны (рис. 216). Это означает, что разность фаз суммируемых колебаний равна  $(2k+1) \cdot \pi$ . Точки интерференционной карти-

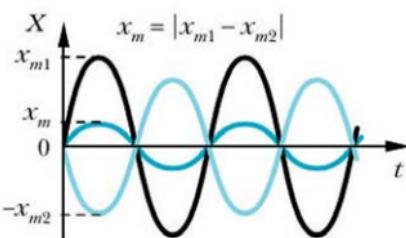


Рис. 216

ны, в которых амплитуда результирующих колебаний минимальна, называют *интерференционными минимумами*. Из рис. 216 видно, что амплитуда  $x_m$  результирующего колебания в этих минимумах будет равна:  $x_m = |x_{m1} - x_{m2}|$ .

Если источники волн синфазны, а модули скоростей распространения волн во всех направлениях одинаковы, то интерференционные минимумы будут наблюдаться в тех точках, где разность хода равна нечетному числу полуволн.

Полученные результаты позволяют сформулировать *условие интерференционных минимумов*.

**!** Амплитуда колебаний в некоторой точке интерференционной картины минимальна, если разность фаз колебаний, создаваемых приходящими в эту точку волнами, равна:

$$\Delta\phi = (2k + 1) \cdot \pi, \quad (3)$$

где  $k$  — целое число.

В случае, когда источники волн синфазны, а модули скоростей распространения волн во всех направлениях одинаковы, условие интерференционных минимумов может быть записано в виде:

$$\Delta l = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  — длина волны от каждого из источников.

Понятно, что в других точках интерференционной картины, расположенных между соседними максимумами и минимумами, амплитуды колебаний имеют промежуточные значения.

В рассмотренном примере *источники волн имели одинаковую частоту, при этом разность фаз колебаний, создаваемых каждой из приходящих в точку наблюдения волн, была постоянной*.

Источники, удовлетворяющие этим условиям, называют *когерентными*. (Слово «когерентный» происходит от лат. соhaerens — «взаимосвязанный».)

При волновом процессе происходит перенос энергии из одних точек пространства в другие. Вы знаете, что средняя энергия колебательной системы прямо пропорциональна квадрату амплитуды колебаний. Следовательно, в *интерференционных минимумах средняя энергия результирующих колебаний меньше суммы средних энергий, приносимых волнами*, так как  $(x_{m1} - x_{m2})^2 < x_{m1}^2 + x_{m2}^2$ . Куда же «исчезает» энергия, приносимая волнами в интерференционные минимумы? Чтобы ответить на этот вопрос, следует вспомнить, что в интерференционных максимумах результирующая амплитуда колебаний равна сумме амплитуд колебаний,

возбуждаемых волнами. Следовательно, *энергия результирующих колебаний в интерференционных максимумах превышает сумму средних энергий, приносимых волнами*, так как  $(x_{m1} + x_{m2})^2 > x_{m1}^2 + x_{m2}^2$ .

Таким образом, *при интерференции энергия колебаний перераспределяется в пространстве*. Можно доказать, что если энергия волн не поглощается средой, то суммарная энергия всех результирующих колебаний равна сумме энергий интерферирующих волн, т. е. сумме энергий, излучённых источниками.

### Вопросы

1. Как получить интерференционную картину?
2. Что называют интерференцией?
3. Что называют интерференционными максимумами и минимумами?
4. Сформулируйте условия интерференционных максимумов и минимумов, используя понятие: а) разность фаз; б) разность хода.
- \*5. Всегда ли условия интерференционных максимумов и минимумов можно сформулировать, используя понятие: а) разность фаз; б) разность хода?
6. Что называют порядком интерференции?
7. При выполнении каких условий источники называют когерентными?
8. Как соотносятся средняя энергия результирующих колебаний и сумма средних энергий, приносимых каждой из волн по отдельности, в интерференционных максимумах и минимумах? Куда «исчезает» энергия, приносимая волнами в интерференционные минимумы?

### Упражнения

1. На поверхности воды наблюдается интерференционная картина от двух когерентных источников 1 и 2. Определите отношение амплитуд результирующих колебаний в интерференционных минимуме и максимуме, если амплитуды колебаний, возбуждаемых каждой из волн: а) равны; б) связаны соотношением  $x_{m1} = 2x_{m2}$ .
2. Используя данные из упражнения 1, определите: а) отношение средних энергий результирующих колебаний в интерференционных минимуме и максимуме; б) отношение средней энергии

результатирующих колебаний в интерференционном максимуме к средней энергии колебаний от первого источника.



### Для углублённого уровня

3

В однородной изотропной среде наблюдается объёмная интерференционная картина от двух когерентных точечных источников. Координаты источников в системе отсчёта, относительно которой среда неподвижна, равны ( $1\text{ м}, 1\text{ м}, 1\text{ м}$ ) и ( $1\text{ м}, 1\text{ м}, 1,1\text{ м}$ ). Изобразите геометрическое место интерференционных максимумов в плоскостях  $XY$  и  $XZ$ , если длина волн, излучаемых этими источниками, меньше  $10\text{ см}$ .

§ 60

## Интерференция света

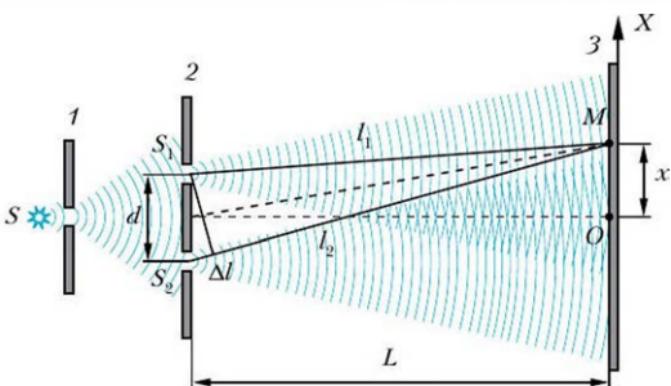
Создание нескольких когерентных источников механических волн или электромагнитных волн радиодиапазона (с длиной волны  $\lambda > 1\text{ мм}$ ) не представляет особого труда. Иначе обстоит дело с источниками электромагнитных волн видимого (светового) диапазона. Действительно, если над столом включить две лампы, то интерференционная картина наблюдаться не будет. Такие же трудности возникают и при попытках получить интерференционные картины от источников волн ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-диапазонов.

Чтобы понять причину этого затруднения, напомним, что излучения в указанных диапазонах происходят порциями — квантами. Согласно Бору, каждая такая порция излучается отдельным атомом (или молекулой) в результате перехода электрона с орбиты, которая характеризуется большей энергией, на орбиту, которая характеризуется меньшей энергией. При этом излучение квантов отдельными атомами обычно происходит несогласованно — в произвольные моменты времени. Поэтому при наложении волн, излучённых разными атомами (если не созданы специальные условия), невозможно обеспечить постоянство разности фаз этих волн в точках наблюдения. Другими словами, наложение таких волн не приводит к появлению устойчивой интерференционной картины.

Первым, кто догадался, как получить интерференционную картину от обычного источника света, был английский учёный Томас Юнг (1773–1829).



Эту задачу удалось решить лишь во второй половине XX столетия, когда были созданы так называемые одномодовые квантовые генераторы — лазеры, генерирующие свет одной частоты.



*Рис.* 217 Получение интерференционной картины в опыте Юнга

Он использовал *один точечный* источник  $S$  – ярко освещённое маленькое отверстие в непрозрачном экране 1 (рис. 217). За этим экраном Юнг поместил экран 2, в котором сделал два маленьких отверстия  $S_1$  и  $S_2$  на одинаковых расстояниях от  $S$ . Волна от источника  $S$  одновременно достигала отверстий во втором экране. Согласно принципу Гюйгенса, эти отверстия становились источниками вторичных волн. Эти волны согласованы, поскольку были порождены одной волной. Налагаясь друг на друга, они образовывали на экране 3 интерференционную картину.

Рассмотрим, как получается эта картина. Разность хода вторичных волн, приходящих в точку  $O$  экрана 3, равна нулю. Поэтому в этой точке наблюдается интерференционный максимум. По мере удаления точки наблюдения от точки  $O$  вдоль оси  $X$  разность хода увеличивается. Поэтому на экране 3 наблюдается чередование интерференционных минимумов и максимумов. Если отверстие в экране 1 освещают светом одного цвета, то на экране 3 наблюдается чередование светлых полос этого цвета и тёмных полос. Если же это отверстие освещают солнечным светом, содержащим все цвета, то в точке  $O$  наблюдается максимум белого цвета, а по мере удаления от  $O$  вдоль оси  $X$  наблюдаются цветные полосы, соответствующие интерференционным максимумам волн разной длины (см. цветную вклейку, рис. IV).



Выведем формулу, позволяющую определять положения интерференционных максимумов в схеме Юнга (см. рис. 217). Отверстия  $S_1$  и  $S_2$  в экране 2 находятся на одинаковых расстояниях от источника  $S$ . Поэтому точечные

источники  $S_1$  и  $S_2$  синфазны. Следовательно, результат интерференции волн от этих источников в точке наблюдения определяется разностью хода от них:  $\Delta l = l_2 - l_1$ . Определим  $\Delta l$  для точки с координатой  $x$ . По теореме Пифагора:  $l_1 = \sqrt{L^2 + (x - 0,5d)^2}$ , а  $l_2 = \sqrt{L^2 + (x + 0,5d)^2}$ . Эксперименты показывают, что интерференционная картина наблюдается, если  $\frac{x + 0,5d}{L} \ll 1$ . Обозначим величину  $\frac{(x \pm 0,5d)^2}{L^2}$  через  $a$ . Если  $a \ll 1$ , то  $\sqrt{1+a} \approx \sqrt{1+a+\frac{a^2}{4}} = 1+\frac{a}{2}$ .

Поэтому имеем:

$$l_1 = \sqrt{L^2 + (x - 0,5d)^2} = L \cdot \sqrt{\frac{L^2 + (x - 0,5d)^2}{L^2}} = L \cdot \left(1 + \frac{(x - 0,5d)^2}{2L^2}\right);$$

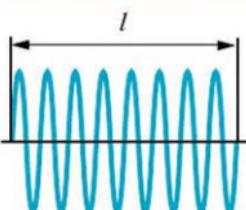
$$l_2 = \sqrt{L^2 + (x + 0,5d)^2} = L \cdot \sqrt{\frac{L^2 + (x + 0,5d)^2}{L^2}} = L \cdot \left(1 + \frac{(x + 0,5d)^2}{2L^2}\right).$$

$$\Delta l \approx L \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{x + 0,5d}{L}\right)^2 - 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{x - 0,5d}{L}\right)^2\right] = \frac{x \cdot d}{L}. \quad (1)$$

Согласно формуле (2) из § 59, в точке с координатой  $x$  будет наблюдать-ся интерференционный максимум, если  $\Delta l = k \cdot \lambda$ , где  $k$  – целое число (по-рядок интерференции), а  $\lambda$  – длина волны. Следовательно, в опыте Юнга интерференционные максимумы наблюдаются в точках с координатами:

$$x_k = k \cdot \frac{\lambda \cdot L}{d}. \quad (2)$$

Эксперименты показывают, что по мере удаления от точки  $O$  вдоль оси  $X$  на экране интерференционная картина становится всё менее контрастной и на некотором расстоянии от этой точки вообще исчезает.



Это объясняется тем, что устойчивая интерференционная картина получается при наложении согласованных (когерентных) волн, а атомы излучают свет порциями – квантами. *Излучение кванта света происходит в течение конечного промежутка времени*. Например, время излучения уединённого (не взаимодействующего с соседями) атома состав-

Рис. 218

ляет  $\tau \approx 10^{-8}$  с. Поэтому излучаемую атомом волну можно представить в виде **волнового цуга** — части синусоиды конечной длины (рис. 218). Длина такого цуга  $l = c \cdot \tau = 3$  м. В реальности из-за движения атома и его взаимодействия с окружением регулярность колебаний в излучаемой волне нарушается. Поэтому длина цуга, который можно представить в виде части одной синусоиды, оказывается меньше. Например, излучение атомов раскаленного предмета представляет собой набор цугов, длина каждого из которых не превышает нескольких миллиметров.

Рассмотрим прохождение одного цуга в опыте Юнга. Волновой цуг от точечного источника  $S$  достигает отверстий в экране 2 одновременно (рис. 219). Исходящие из  $S_1$  и  $S_2$  вторичные волны, порождённые этим цугом, представляют собой два согласованных цуга такой же длины. В точках экрана 3, для которых разность хода существенно меньше длины цуга (вблизи точки  $O$ ), эти цуги, перекрываясь друг с другом, образуют контрастную интерференционную картину. По мере увеличения разности хода (при удалении от точки  $O$ ) перекрытие согласованных цугов уменьшается. В результате уменьшается контрастность интерференционной картины, так как не перекрывающиеся части цугов создают равномерное освещение экрана.

Из проведённого анализа следует, что интерференционная картина в опыте Юнга была получена в результате наложения вторичных волн, порождённых **разными точками волнового фронта одного цуга первичной волны**.

Получить интерференционную картину можно и от двух вторичных волн, порождённых **одним участком волнового фронта первичной волны**.



Ситуация усложняется, если вместо точечного источника  $S$  и малого отверстия в экране 1 использовать источник света, имеющий определённые размеры (например, Солнце, раскаленную спираль электролампы, освещаемое отверстие конечного диаметра в экране 1 и т. п.). В этом случае излучения от различных участков такого источника дают на экране 3 интерференционные картины, смешённые друг относительно друга. Величины этих смещений определяются разностью хода волн от соответствующих участков протяжённого источника излучения. Чем больше разности хода волн, тем больше смещения, а следовательно, тем менее чёткой становится общая интерференционная картина. Если смещения таковы, что максимумы одних картин попадают на минимумы других, то общая интерференционная картина может не наблюдаться.

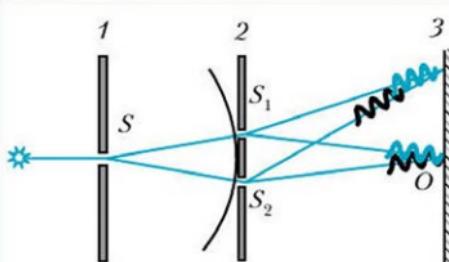


Рис. 219

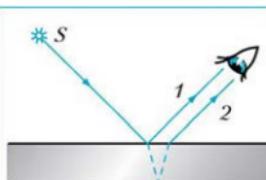


Рис. 220

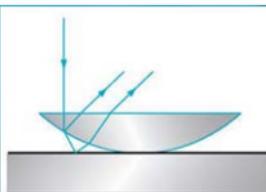


Рис. 221

и 2 зависит от угла падения, показателя преломления плёнки и её толщины. Результат же интерференции определяется соотношением разности хода и длины волны света. Поэтому участки плёнки разной толщины кажутся окрашенными по-разному. При этом цвета изменяются как при изменении толщины плёнки, так и при смене угла наблюдения. Аналогичные цветные картины наблюдаются в тонких нефтяных плёнках на поверхности воды (см. цветную вклейку, рис. V).

Подобное же явление разделения луча происходит на границах зазора между плоской стеклянной пластиной и плосковыпуклой линзой с большим радиусом кривизны (рис. 221). Этот зазор играет роль тонкой плёнки, толщина которой увеличивается по мере удаления от точки касания линзы и пластины. В результате разделения лучей можно наблюдать интерференционную картину — цветные кольца, которые названы *кольцами Ньютона* (см. цветную вклейку, рис. VI).



Такие кольца Ньютон наблюдал в 1675 г., взяв для своего опыта плоское стекло и линзу телескопа-рефрактора с радиусом кривизны выпуклой поверхности около 10 м.

Поискажениям интерференционной картины концентрических колец можно судить о качестве обработки поверхностей линз и находить отклонения (дефекты) с точностью до  $10^{-6}$  см.



Примером использования интерференции является применение линз с покрытиями в виде тонких плёнок. Известно, что доля отражённого света при его падении на границу раздела двух сред зависит не только от показателей преломления этих сред, но и от угла падения. Так, при нормальном падении света на границу «воздух – стекло» от этой границы отражается не менее 4 % падающей на неё энергии. В результате через объектив, содержащий более 10 линз, проходит менее половины поступающего в него света. Для борьбы с потерями световой энергии в оптических системах на поверхности линз наносят тонкую плёнку из материала с таким показателем преломления  $n_p$ , чтобы коэффициенты отражения на границах «воздух – плёнка» и «плёнка – стекло» были бы примерно одинаковы. В этом случае если разность хода лучей 1 и 2 (рис. 222) равна половине длины волны  $\lambda$  падающего света, то в результате интерференции эти лучи погасят друг друга. Таким образом, весь падающий на поверхность свет пройдёт в линзу.

Пусть толщина плёнки равна  $h$ . Поскольку скорость света в плёнке равна  $\frac{c}{n_p}$ , то условие гашения отражённого света при его нормальному падении имеет вид:

$$\lambda \cdot \left( \frac{1}{2} + k \right) = 2n_p \cdot h \quad (3)$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots$

Оптику с покрытиями, уменьшающими долю отражённого света, называют *просветлённой*.

Показатель преломления вещества зависит от длины волны падающего света. Поэтому обычно компенсируют отражение для средней части видимого диапазона (зелёный цвет с длиной волны  $\lambda_s = 0,55 \text{ мкм}$ ). При этом уменьшается отражение света и других участков спектра. Однако чем больше отличие длины волны падающего света от  $\lambda_s$ , тем больше будет доля отражённого света. Поэтому отражённый от поверхности просветлённой линзы свет имеет сиреневый оттенок.

В заключение отметим, что для создания зеркал с очень большим коэффициентом отражения (до 99,5 %) для света определённой длины волны

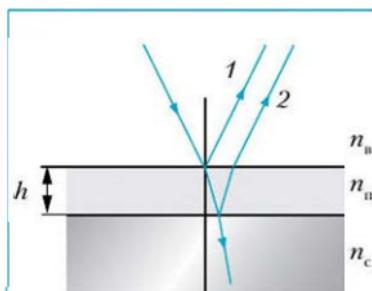


Рис. 222

используют плёнки, в которых в результате интерференции гасятся не отражённые, а проходящие волны. Подобные зеркала необходимы для создания оптических квантовых генераторов — лазеров.

### Вопросы

- 1 Как происходит излучение света атомом?
- 2 Что такое цуг световой волны?
- 3 В чём состоял опыт Юнга?
- 4 Где в опыте Юнга будет наблюдаваться белая полоса при использовании лампы накаливания в качестве источника света?
- 5 Почему по мере удаления от центра экрана происходит уменьшение контраста интерференционной картины?
- 6 Как получают когерентные световые волны?
- 7 Какие интерференционные схемы вы знаете?
- 8 Что такое кольца Ньютона?
- 9 Почему нефтяные плёнки при освещении их солнечным светом выглядят разноцветными?



### Для углублённого уровня

- 10 Какую оптику называют просветлённой?
- 11 На чём основан принцип получения зеркал с очень большим коэффициентом отражения?



### Упражнения

- 1 Какую толщину должна иметь плёнка, чтобы отражение при нормальном падении света с длиной волны  $\lambda = 500$  нм от стекла, на которое она нанесена, было минимальным? Показатель преломления плёнки  $n = 1,4$ .
- 2 Получите выражение для расчёта положения интерференционных минимумов в опыте Юнга.
- 3 Оцените расстояние от экрана 2 до экрана 3 в опыте Юнга (рис. 217), если расстояние между отверстиями в экране 2 равно 1 см. Источник  $S$  излучает свет зелёного цвета ( $\lambda = 0,5$  мкм). Расстояние между соседними интерференционными максимумами (ширина интерференционной полосы) вблизи точки  $O$  равно 0,1 мм.

## § 61 Дифракция света

Если, удаляясь от источника непрерывного звука, вы завернёте за угол здания, то не перестанете слышать этот звук. Следовательно, звуковые волны, распространяясь в пространстве, могут огибать препятствия. Можно убедиться, что таким же свойством обладают и другие волны. Например, морские волны свободно огибают выступающий из воды камень, если его размеры сравнимы с длиной волны или меньше её. Точно так же радиоволна без отражения от ионосферы может проникать за горизонт. И только если размеры препятствия достаточно велики в сравнении с длиной волны, то за ним образуется область тени.

Возникает вопрос: а могут ли световые волны проникать в область геометрической тени, которая, согласно закону геометрической оптики о прямолинейном распространении световых лучей, образуется за освещаемым непрозрачным предметом?

Чтобы ответить на этот вопрос, проведём эксперимент. Возьмём источник, излучающий свет с длиной волны  $\lambda$ . Такой источник называют монохроматическим, а излучающую им световую волну — монохроматической. Поместим такой точечный источник  $S$  в фокус собирающей линзы  $L$ . В результате за линзой мы получим плоскую световую волну — параллельный пучок света. Поставим на пути этого пуч-

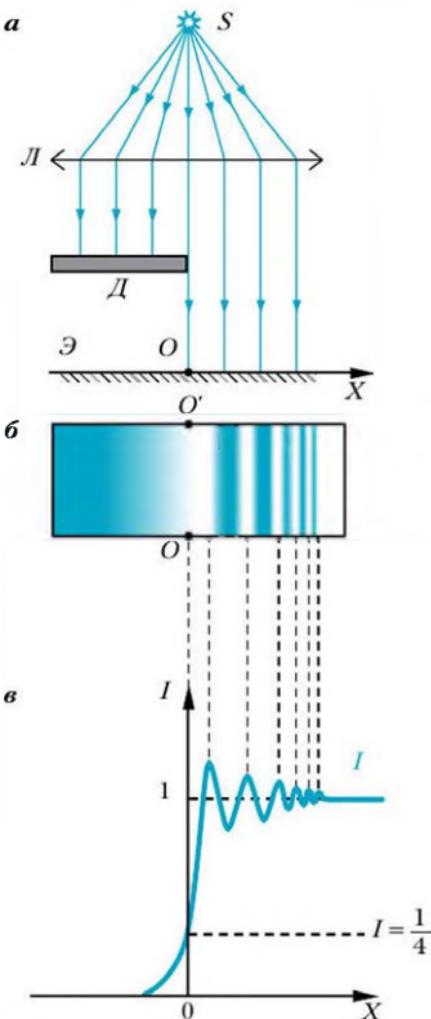


Рис. 223



Рис. 224

геометрической оптики закон прямолинейного распространения света.

Однако вид тени изменяется при увеличении расстояния  $L$ . Картина, получающаяся на экране при достаточно больших расстояниях  $L$ , показана на рис. 223, б. На рис. 223, в приведена зависимость интенсивности  $I$  света (средней световой энергии, приходящей в данную точку экрана за единицу времени в расчёте на единицу площади) от координаты  $x$ . Видно, что интенсивность в области геометрической тени спадает до нуля постепенно. В то же время перед границей тени (осью  $OO'$  на рис. 223, б) наблюдаются чередующиеся светлые и тёмные полосы, и лишь на некотором расстоянии от границы интенсивность становится такой же, как и при отсутствии экрана  $D$ .

Ещё более удивительными получаются тени на экране, когда параллельным пучком монохроматического света освещается, например, тарелка (рис. 224). По мере удаления экрана от тарелки границы тени становятся всё более размытыми, а в центре появляется светлое пятно. Это явление было теоретически предсказано французским математиком Симеоном Дени Пуассоном (1781–1840). С тех пор оно получило название *пятно Пуассона*.

**Явления, обусловленные волновой природой света и приводящие к нарушению закона прямолинейного распространения света, называют дифракцией света.**

Дифракция свойственна волнам любой природы.

Основные положения теории дифракции были сформулированы О. Френелем в 1816 г. Он дополнил известный принцип Гюйгенса идеей о *когерентности вторичных волн*, порождаемых в точках волнового фронта первичной волны. В результате был получен принцип, позволяющий рассчитывать интенсивность результирующей волны в любой точке пространства, — *принцип Гюйгенса — Френеля*.



Вывод о том, что в центре тени от круглого экрана может находиться светлое пятно, С. Пуассон сделал в 1818 г. после рассмотрения во Французской академии работы Огюстена Жана Френеля (1788–1827) о волновой теории света. Свой вывод Пуассон представил тогда в качестве аргумента, опровергающего эту теорию. Однако вскоре предсказанное пятно было обнаружено французским учёным Домиником Франсуа Араго (1786–1853) экспериментально.

**!** Каждая точка, которой достигает первичная волна, становится источником вторичной волны, причём все такие вторичные источники являются когерентными. Колебания в произвольной точке — результат интерференции вторичных волн.

Используя принципы Гюйгенса — Френеля, можно показать, что точка, в которой с помощью оптической системы получается изображение точечного монохроматического источника, соответствует интерференционному максимуму вторичных волн, порождённых первичной волной от этого источника. Другими словами, *времена распространения всех лучей от точечного источника до его действительного изображения, получаемого с помощью оптической системы, равны друг другу*. (Это свойство оптических систем называют *таутохронизмом*.) В частности, если этот источник расположен в фокусе собирающей линзы, то образующаяся за линзой плоская волна (пучок параллельных лучей) есть результат интерференции вторичных волн. Наоборот, если на собирающую линзу падает плоская волна, то точка, соответствующая интерференционному максимуму пропущенных через линзу вторичных волн, будет представлять собой соответствующий фокус этой линзы, т. е. будет расположена в фокальной плоскости.

На рис. 225 приведена дифракционная картина, получаемая при падении параллельного пучка света с длиной волны  $\lambda$  на щель в непрозрачном экране, который расположен перпендикулярно падающему пучку. Эта картина представляет собой систему полос на экране  $\mathcal{E}$ , который находится в фокальной плоскости линзы  $L_2$  с фокусным расстоянием  $F$  (плоскость  $XY$ ).

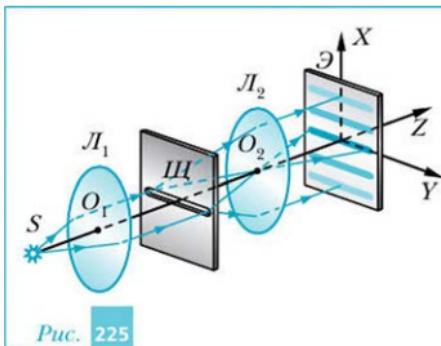
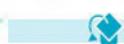


Рис. 225



Воспользуемся методом Френеля для объяснения данной картины. Для этого исследуем, как изменяется интенсивность света в дифракционной картине с увеличением координаты  $x$  точки экрана  $\mathcal{E}$ .

Фронт падающей на щель  $III$  (см. рис. 225) волны совпадает с плоскостью, в которой расположена щель. Поэтому вторичные волны, порождаемые всеми точками щели, синфазны и имеют равные амплитуды. Мысленно разделим щель шириной  $b$  (рис. 226) на вторичные источники — узкие полосы света, параллельные краям щели. На отрезке  $AB$  в плоскости ри-

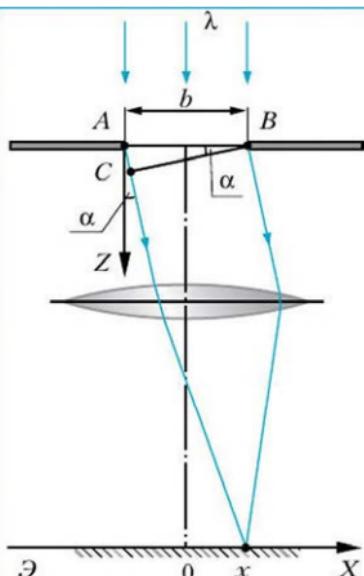


Рис. 226

По мере увеличения угла  $\alpha$  разность хода между лучами от двух вторичных источников увеличивается. Например, разность хода между двумя лучами, выходящими из крайних точек щели  $A$  и  $B$ , будет равна  $AC = b \cdot \sin \alpha$ . Если разность хода между такими параллельными лучами от каких-либо двух источников станет равной  $\frac{\lambda}{2}$ , то эти лучи будут приходить в одну точку экрана в противофазе. В результате они погасят друг друга.

Рассмотрим лучи, идущие под углом  $\alpha_1$  таким, что  $AC = b \cdot \sin \alpha_1 = \lambda$ . Все точечные источники на ширине  $b$  щели можно разбить на пары (начиная от края щели) с расстоянием между источниками  $\frac{b}{2}$ . Разность хода для каждой пары таких лучей будет равна  $\frac{\lambda}{2}$ . Следовательно, колебания, пришедшие от всех таких пар источников в соответствующую точку экрана, погасят друг друга. Эту точку называют *первым дифракционным минимумом*.

Понятно, что на экране симметрично этой точке — относительно нулевого максимума — будет расположен ещё один дифракционный минимум. Координаты точек дифракционных минимумов  $\pm 1$ -го порядка равны:

$$x_{\pm 1}^{\min} = F \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\pm 1}^{\min} = \pm F \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{b^2 - \lambda^2}}, \quad (1)$$

сунка им будут соответствовать равные между собой отрезки — практически точечные источники когерентных волн.

Определим результат интерференции вторичных волн, создаваемых этими источниками. Разность хода между двумя параллельными лучами от двух разных точечных источников определяется углом  $\alpha$  между их направлением и осью  $Z$ .

Оптическая длина пути для параллельных лучей, идущих от некоторой плоскости, перпендикулярной направлению распространения, до фокальной плоскости линзы, одинакова. Поэтому при равенстве нулю угла  $\alpha$  ( $\alpha = 0$ ) разность хода между всеми лучами равна нулю. Следовательно, в главном фокусе линзы, где собираются такие лучи вторичных волн, будет наблюдаться *центральный (нулевой) дифракционный максимум*. На экране ему будет соответствовать светлая полоса, параллельная оси щели.

разность хода между лучами от двух вторичных источников увеличивается. Например, разность хода между двумя лучами, выходящими из крайних точек щели  $A$  и  $B$ , будет равна  $AC = b \cdot \sin \alpha$ . Если разность хода между такими параллельными лучами от каких-либо двух источников станет равной  $\frac{\lambda}{2}$ , то эти лучи будут приходить в одну точку экрана в противофазе. В результате они погасят друг друга.

Рассмотрим лучи, идущие под углом  $\alpha_1$  таким, что  $AC = b \cdot \sin \alpha_1 = \lambda$ . Все точечные источники на ширине  $b$  щели можно разбить на пары (начиная от края щели) с расстоянием между источниками  $\frac{b}{2}$ . Разность хода для каждой пары таких лучей будет равна  $\frac{\lambda}{2}$ . Следовательно, колебания, пришедшие от всех таких пар источников в соответствующую точку экрана, погасят друг друга. Эту точку называют *первым дифракционным минимумом*.

Понятно, что на экране симметрично этой точке — относительно нулевого максимума — будет расположен ещё один дифракционный минимум.

Координаты точек дифракционных минимумов  $\pm 1$ -го порядка равны:

где  $F$  – фокусное расстояние линзы. На экране этим минимумам будут соответствовать две тёмные полосы, параллельные светлой полосе нулевого дифракционного максимума.

Рассуждая аналогично, можно показать, что дифракционные минимумы  $\pm k$ -го порядка будут наблюдаться, если  $b \cdot \sin \alpha_{\pm k}^{\min} = k \cdot \lambda$ .

Между дифракционными минимумами (так же симметрично относительно центрального максимума) располагаются *дифракционные максимумы*. Максимумы  $\pm 1$ -го порядка будут наблюдаться, если  $b \cdot \sin \alpha_{\pm 1}^{\max} = \frac{3}{2} \lambda$ .

При этом свет в эти максимумы будет поступать только от одной трети всех отрезков, на которые мы разделили щель, так как волны от оставшихся двух третей вторичных источников будут попарно взаимно гасить друг друга. Если также учесть, что волны от этой трети вторичных источников приходят в максимумы  $\pm 1$ -го порядков со сдвигом по фазе, то можно показать, что интенсивность света в каждом из этих максимумов будет составлять примерно 4 % от интенсивности в центральном максимуме.

Подведём итоги.



1) Дифракционный максимум нулевого порядка для всех длин волн наблюдается, если:

$$\alpha_0^{\max} = 0. \quad (2)$$

2) Максимумы  $\pm k$ -го порядка для света с длиной волны  $\lambda$  наблюдаются при условии:

$$b \cdot \sin \alpha_{\pm k}^{\max} = \frac{2k + 1}{2} \cdot \lambda, \quad (3)$$

где  $k$  – натуральное число.

При этом интенсивность света в этих максимумах примерно в  $\left(\frac{(2k+1) \cdot \pi}{2}\right)^2$  раз меньше, чем в центральном максимуме.

3) Дифракционные минимумы наблюдаются при условии:

$$b \cdot \sin \alpha_{\pm k}^{\min} = \pm k \cdot \lambda. \quad (4)$$

Дифракционная картина (зависимость интенсивности света от параметра  $b \cdot \sin \alpha$ ) от щели, освещаемой параллельным пучком монохроматического света с длиной волны  $\lambda$ , показана на рис. 227.

Отметим, что аналогичную дифракционную картину можно получить и без линзы. Для этого экран следует расположить на достаточно большом расстоянии  $L$  от щели. Тогда вторичные волны будут приходить к нему

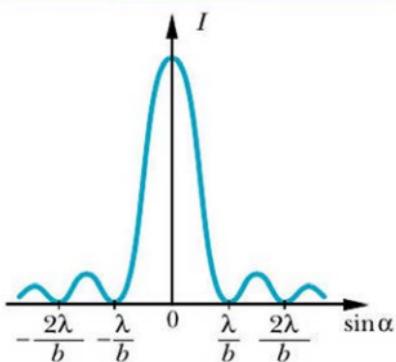


Рис. 227



Рис. 228

практически параллельно. В результате условия дифракционных максимумов и минимумов будут такими же, как и при наличии линзы.

Из анализа формулы (4) для дифракционного минимума первого порядка следует, что ширина нулевого дифракционного максимума будет практически равна ширине щели, если

$$L < \frac{b^2}{\lambda}. \quad (5)$$

Таким образом, при выполнении уравнения (5) можно считать, что выполняется закон прямолинейного распространения света. Другими словами, если длина волны света, размер объекта, на который падает свет, и расстояние до экрана удовлетворяют уравнению (5), то при определении тени можно использовать методы геометрической оптики. Если же щель является достаточно узкой, т. е.  $b \ll \sqrt{\lambda \cdot L}$ , то ширина нулевого дифракционного максимума будет во много раз превосходить ширину щели.

На рис. 228 приведена дифракционная картина, получаемая при нормальном (перпендикулярном) падении параллельного пучка света с длиной волны  $\lambda$  на непрозрачный экран с отверстием в нем радиусом  $R$ . Видно, что эта картина сходна с дифракционной картиной от щели: в центре наблюдается дифракционный максимум, а по мере удаления от центра расположены чередующиеся дифракционные минимумы и максимумы в виде концентрических колец. При этом интенсивность света резко спадает с ростом порядка дифракционного максимума.

Используя принцип Гюйгенса – Френеля, можно показать, что радиус  $r$  первого дифракционного минимума равен:

$$r \approx \frac{\lambda \cdot L}{R}, \quad (6)$$

где  $L$  – расстояние до экрана.

Аналогичные дифракционные картины наблюдаются и при получении изображения точечного источника с помощью линзы (или системы линз и зеркал). Другими словами, из-за дифракции изображение точечного источника представляет собой не точку, а светлое пятно, окружённое системой концентрических колец. Это приводит к тому, что изображения двух близко расположенных точечных источников могут слиться и стать неразличимыми. Например, если угловое расстояние  $\alpha$  между двумя звёздами, наблюдаемыми в телескопе, будет меньше некоторого значения, которое называют *пределом разрешения*, то их изображения не будут восприниматься раздельно.

Анализ выражения (6) и учёт особенностей зрения человека приводят к формуле, позволяющей оценивать предел разрешения (разрешающую способность) оптической системы:

$$\alpha \approx 1,22 \frac{\lambda}{D}, \quad (7)$$

где  $D$  – минимальный диаметр пучка света, проходящего через оптическую систему.

В качестве примера использования формулы (7) определим минимальное расстояние  $\Delta$  между двумя светящимися точками, которые могут быть разрешены (различимы) при наблюдении в микроскопе. Пусть расстояние от предмета до объектива равно  $d$ . Тогда

$$\Delta \approx \alpha \cdot d \approx \lambda \cdot \frac{d}{D}. \quad (8)$$

Поскольку объектив микроскопа должен давать действительное изображение, то  $d > F$ , где  $F$  – фокусное расстояние объектива. Поэтому в микроскопах используют короткофокусные объективы. Опыт и расчёты показывают, что предельное линейное разрешение микроскопа из-за дифракции не может превышать величину, сравнимую с длиной волны света, освещавшего исследуемый объект.

### Вопросы

- 1 – Что называют дифракцией света? При каких условиях наблюдается дифракция?

## Колебания и волны

- 2 Приведите примеры, свидетельствующие о том, что дифракция свойственна волнам любой природы.
- 3 Каким утверждением Френель дополнил принцип Гюйгенса? Сформулируйте принцип Гюйгенса — Френеля.
- 4 Что представляет собой с точки зрения волновой теории изображение светящейся точки, получаемое с помощью оптической системы?



### Для углублённого уровня

- 5 Какое свойство оптических систем называют таутодоронизмом?
- 6 Зависит ли от длины волны света положение нулевого дифракционного максимума?
- 7 Зависят ли от длины волны света положения дифракционных минимумов?
- 8 При каком условии для определения границ тени от предмета можно использовать законы геометрической оптики?
- 9 Как изменяется интенсивность света в дифракционных максимумах с увеличением их порядка?
- 10 Что называют пределом разрешения?
- 11 Увеличивается или уменьшается предел разрешения телескопа с увеличением диаметра его объектива?
- 12 Какое максимальное линейное разрешение может быть достигнуто в оптических микроскопах?



### Упражнения

- 1 Ученик 11 класса, наблюдая прохождение нормально падающего (перпендикулярно плоскости экрана) параллельного пучка света через щель в непрозрачном экране, обнаружил, что угол между лучами, идущими в максимумы первого и минус первого порядков, равен  $\Delta\phi_1 = 5^\circ$ . Во сколько раз следует изменить ширину щели, чтобы указанный угол стал равен  $\Delta\phi_2 = 90^\circ$ ?
- 2 На щель шириной  $b = 2$  мкм падает нормально параллельный пучок света зелёного цвета ( $\lambda = 0,5$  мкм). За щелью установлена собирающая линза с фокусным расстоянием  $F = 20$  см так, что её главная плоскость параллельна плоскости экрана с щелью. Определите: а) расстояние между дифракционными максимумами первого и второго порядков в фокальной плоскости линзы; б) отношение интенсивностей света в этих максимумах.



§ 62

## Для углублённого уровня Дифракционная решётка

На явлении дифракции основан принцип действия *дифракционной решётки* – прибора, широко применяемого для спектрального анализа света.

Простейшая дифракционная решётка представляет собой совокупность одинаковых параллельных друг другу щелей, разделённых равными непрозрачными промежутками. На рис. 229 показано сечение такой решётки  $P$  перпендикулярной ей плоскостью.

Пусть на решётку перпендикулярно её плоскости падает плоская монохроматическая волна – параллельный пучок света с длиной волны  $\lambda$ . Будем считать, что ширина каждой щели столь мала, что порождаемая ею вторичная волна является цилиндрической. Поэтому сечения волновых фронтов вторичных волн представляют собой полуокружности. Пусть расстояние между соседними щелями, которое называют *периодом решётки*, равно  $d$ .

Воспользуемся принципом Гюйгенса – Френеля для описания дифракционной картины на экране  $\mathcal{E}$ , который расположен в фокальной плоскости линзы  $L$ . Фронт падающей на решётку волны совпадает с плоскостью решётки. Поэтому вторичные волны, порождаемые всеми щелями, синфазны и имеют равные амплитуды. Рассмотрим ход параллельных лучей вторичных волн от разных щелей. Пусть эти лучи идут под углом  $\alpha$ , как показано на рисунке. Все такие лучи, собираясь в соответствующем побочном фокусе линзы  $L$  на экране  $\mathcal{E}$ , интерферируют друг с другом. Результат интерференции зависит от разности хода между лучами.

Из рис. 229 видно, что разность хода между лучами от двух соседних щелей равна:



В общем случае, когда ширина щели равна  $b$ , а ширина непрозрачного промежутка между соседними щелями равна  $a$ , периодом решётки называют величину  $d = a + b$ .

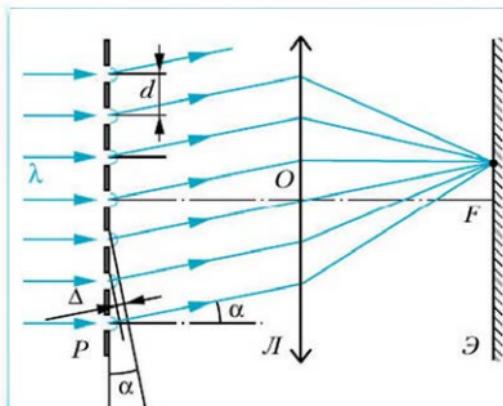


Рис. 229

$$\Delta = d \cdot \sin \alpha.$$

(1)

Если при некотором угле  $\alpha$  эта разность хода равна целому числу длин волн, то в соответствующем (главном или побочном) фокусе линзы *все* вторичные волны, складываясь, будут усиливать друг друга. Поэтому на экране будет наблюдаться интерференционный максимум — вертикальная полоса света, расположенная на некотором расстоянии от главной оптической оси линзы. С увеличением угла  $\alpha$  будет увеличиваться разность хода между лучами от соседних щелей. При увеличении разности хода на длину волны  $\lambda$  вторичные волны, складываясь и усиливая друг друга, будут образовывать на экране следующий интерференционный максимум. Такие максимумы называют *главными интерференционными максимумами*. Условие главного интерференционного максимума в картине, получаемой от дифракционной решётки, имеет вид:

$$d \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda,$$

где  $k$  — целое число, *порядок* главного интерференционного максимума ( $k = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$ ). С учётом симметрии картины главные интерференционные максимумы будут располагаться симметрично главной оптической оси линзы — в виде вертикальных полос света определённой длины волны (см. цветную вклейку, рис. VII, а и б).

Отметим, что при  $\alpha = 0$  разность хода между лучами от всех щелей равна нулю и не зависит от длины волны. Поэтому в главном фокусе линзы наблюдается центральный (нулевой) интерференционный максимум для света с любой длиной волны.

Иначе обстоит дело с главными максимумами других порядков. Действительно, из формулы (2) следует, что чем больше длина волны  $\lambda$ , тем дальше от нулевого максимума наблюдается главный максимум данного порядка, соответствующий этой длине волны (см. цветную вклейку, рис. VII).

 Свойство дифракционных решёток разделять в пространстве излучения разных длин волн позволяет использовать их при спектральном анализе.

Эффективность применения дифракционной решётки увеличивается при увеличении числа её щелей. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, с увеличением числа щелей ширина каждого главного интерференционного максимума уменьшается. Это позволяет увеличивать разрешающую способность решётки — способность различать излучения с близкими длинами волн. Во-вторых, в главном интерференционном максимуме *все* вторичные волны складываются в фазе. Поэтому амплитуда колебаний в главном максимуме пропорциональна числу  $N$  щелей в решётке. Соответ-



ственno, интенсивность  $I$  света, которая пропорциональна квадрату амплитуды, в этих максимумах пропорциональна квадрату числа щелей:  $I \sim N^2$ .

Простейшие дифракционные решётки изготавливают, нанося большое число параллельных штрихов на поверхность стеклянной или металлической пластины. С помощью решёток, изготовленных на металлических пластинах, дифракцию

наблюдают в отражённом свете. На стеклянных решётках дифракцию можно наблюдать в проходящем свете. В настоящее время используют решётки, имеющие до двух тысяч щелей на один миллиметр при общей длине решётки до 150 мм.

Почему же главные интерференционные максимумы сужаются при увеличении числа щелей в решётке? Это явление обусловлено образованием в интерференционной картине так называемых *побочных минимумов и максимумов*. Число расположенных между соседними главными максимумами побочных минимумов равно  $N - 1$ , а максимумов —  $N - 2$ , где  $N$  — число щелей в решётке. Пример интерференционной картины от решётки с  $N = 8$  приведён на рис. 230.

Рассмотрим образование ближайшего к главному максимуму побочного минимума. Пусть параллельный пучок лучей вторичных волн распространяется от щелей решётки под углом  $\alpha_k + \Delta\alpha$ , где  $\alpha_k$  — направление на главный интерференционный максимум  $k$ -го порядка, а  $\Delta\alpha$  — такой малый угол, что  $N \cdot d \cdot \sin(\Delta\alpha) = \lambda$ . В этом случае разность хода лучей от двух соседних щелей  $\Delta = \frac{\lambda}{N}$ . Следовательно, разность хода двух лучей от крайних щелей, расположенных на противоположных концах решётки, в точности равна  $\lambda$ . Поэтому совокупность всех щелей решётки может быть разбита на такие пары, что для каждой из них разность хода между лучами равна  $\frac{\lambda}{2}$ . Такие лучи гасят друг друга. В результате в рассматриваемом направлении наблюдается побочный минимум.

Отметим, что интенсивность света в побочных максимумах существенно меньше, чем в главных. В результате при достаточно большом числе щелей побочные максимумы становятся практически незаметными и не препятствуют проведению спектральных исследований.

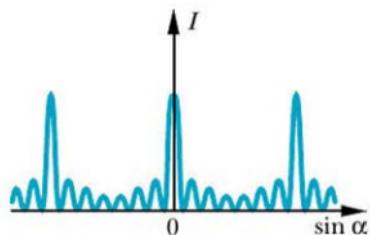


Рис. 230

В заключение отметим, что если размер каждой из щелей конечен и равен  $b$ , то некоторые из главных интерференционных максимумов могут не наблюдаться. Это происходит в случае, если направление на такой максимум, характеризуемое углом  $\alpha_k$ , совпадает с направлением на дифракционный минимум, получаемый от каждой из щелей в отдельности (см. формулу (4) из § 61):

$$b \cdot \sin \alpha_k = \lambda \cdot n, \quad (3)$$

где  $n$  – любое целое число.

### Вопросы

1. Что такое дифракционная решётка?
2. Для чего используют дифракционные решётки?
3. Что называют периодом решётки?
4. Сформулируйте условие, при котором будет наблюдаться главный максимум  $k$ -го порядка в спектре, получаемом с помощью дифракционной решётки.
5. Почему при увеличении числа щелей главные интерференционные максимумы сужаются?
6. Почему в спектре решётки могут не наблюдаться некоторые главные интерференционные максимумы?

### Упражнения

1. На дифракционную решётку с периодом  $d = 10$  мкм по нормали к ней падает параллельный монохроматический пучок зелёного света ( $\lambda = 0,5$  мкм). Оцените углы, под которыми будут наблюдаться главные интерференционные максимумы второго и третьего порядков.
2. За дифракционной решёткой из упражнения 1 параллельно установленна линза с оптической силой  $D = 2$  дптр. Определите расстояния между главными интерференционными максимумами второго и третьего порядков зелёного света, находящимися в фокальной плоскости линзы.
3. Определите угловую ширину главного интерференционного максимума первого порядка для монохроматического света красного цвета ( $\lambda = 0,7$  мкм), если период решётки  $d = 5$  мкм, а общее число штрихов  $N = 2000$ .
4. Выполните измерение длины световой волны с помощью различных дифракционных решёток.

# СВОЙСТВА ВОЛН



Геометрическое место точек, колебания в которых в данный момент времени происходят в одинаковой фазе, называют **фронтом волн**

### Принцип Гюйгенса

Каждая точка, которой достигает волна к моменту времени  $t$ , становится источником вторичной волны. Волновой фронт в момент времени  $t + \Delta t$  является огибающей волновых фронтов вторичных волн в указанный момент времени

### Принцип Гюйгенса – Френеля

Каждая точка, которой достигает первичная волна, становится источником вторичной волны, причём все такие вторичные источники являются когерентными. Колебания в произвольной точке – результат интерференции вторичных волн

Принцип Гюйгенса позволяет объяснить с волновой точки зрения законы отражения и преломления волн. При этом относительный показатель преломления второй среды относительно первой считают равным отношению модулей скоростей распространения волн в первой и второй средах:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

Принцип Гюйгенса – Френеля доказывает прямолинейное распространение света, позволяет рассчитать дифракционную картину

## Элементы теории относительности

Сформировавшаяся к концу XIX в. теория электромагнетизма оказалась в противоречии с законами классической физики, в частности с принципом относительности Галилея. Действительно, точечный заряд, покоящийся в некоторой ИСО, создаёт электрическое поле и не создаёт магнитного поля. В другой же ИСО, движущейся относительно первой, этот же заряд будет двигаться. Поэтому он будет создавать, помимо электрического, магнитное поле. Таким образом, напрашивается вывод, что две рассмотренные ИСО не равнозначны. Тщательный анализ показывает, что и в общем случае уравнения электромагнетизма при попытках использовать их в разных ИСО в рамках классической физики вступают в противоречие с принципом относительности Галилея.

Было предложено три варианта выхода из сложившейся ситуации. Х. Лоренц предложил считать, что принцип относительности Галилея не применим к законам электродинамики. Г. Герц, напротив, предложил исправить законы электродинамики Максвелла. Однако выводы, вытекающие из этих двух предложений, не нашли экспериментального подтверждения.

Самое неожиданное и оригинальное предложение сделал Альберт Эйнштейн (1879–1955). Обобщив работы Х. Лоренца, Г. Герца, А. Пуанкаре и других физиков, он пришёл к выводу, что казавшиеся незыблемыми со времён Ньютона *классические представления о пространстве и времени требуют пересмотра*. Другими словами, для разрешения сложившейся противоречивой ситуации необходимо пересмотреть не законы электродинамики Максвелла, а основы классической физики.

## § 63 Постулаты специальной теории относительности

В 1864 г. Максвелл опубликовал работу «Динамическая теория электромагнитного поля», в которой предсказал возникновение электромагнитных волн и рассчитал скорость их распространения в вакууме. После этого учёными была предпринята попытка провести аналогию между процессами распространения электромагнитных волн в вакууме и механических волн в среде.

Вы уже знаете, что механическая волна представляет собой процесс распространения возмущения в среде. Скорость такой волны определяется свойствами среды и имеет конкретное значение в системе отсчёта, относительно которой среда неподвижна. Пусть скорость механической волны в такой системе отсчёта равна  $\bar{v}_0$ . Тогда скорость этой волны в системе отсчёта, движущейся поступательно относительно среды со скоростью  $\bar{V}$  в направлении распространения волны, будет равна  $\bar{v}_0 - \bar{V}$ . Таким образом, *скорость механической волны зависит от выбранной системы отсчёта, относительно которой рассматривается процесс распространения возмущений*.

Логично было предположить, что и скорость электромагнитной волны, например световой волны, должна зависеть от выбранной системы отсчёта. Однако, в отличие от механических, электромагнитные волны могут распространяться и в вакууме, где нет никаких частиц среды. Поэтому была выдвинута гипотеза о существовании особой всепроникающей среды — «эфира». Было предложено считать, что электромагнитная волна представляет собой процесс распространения возмущений в «эфире». В этом случае система отсчёта, относительно которой «эфир» неподвижен, представляет собой особую «абсолютную систему отсчёта». Согласно выдвинутой гипотезе, именно относительно этой системы отсчёта и движется электромагнитная волна с вычисленной Максвеллом скоростью, и эта скорость не зависит от направления движения. Понятно, что в этом случае скорость света в разных инерциальных системах отсчёта будет различной и эти системы можно будет отличить друг от друга экспериментально. Кроме того, измерив скорость света в разных системах отсчёта, можно будет определить скорость движения каждой из таких систем относительно «эфира». По аналогии с движением в воздухе, при котором возникает ветер, предполагалось, что при движении относительно «эфира» возникает «эфирный ветер» и, следовательно, измеряя скорость света, можно определить скорость «эфирного ветра».

Эксперимент по определению скорости «эфирного ветра» у поверхности Земли, обусловленной её движением вокруг Солнца, был поставлен

американскими исследователями Альбертом Майкельсоном (1852–1931) и Эдвардом Морли (1838–1923) в 1881 г. Известно, что модуль скорости движения Земли вокруг Солнца равен ~30 км/с. В проведённом эксперименте сравнивались скорости света в направлении, совпадающем с направлением движения Земли, и в направлении, перпендикулярном ему. Эксперименты проводились с помощью высокочувствительной интерференционной установки и многократно повторялись в разные времена года. Однако многократно проверенные результаты не позволили обнаружить «эфирный ветер», т. е. движение Земли относительно «эфира».

Для объяснения отрицательного результата была выдвинута гипотеза, что движущиеся объекты увлекают «эфир», в котором распространяется свет. Однако последующие эксперименты опровергли эту гипотезу.

Таким образом, экспериментально было установлено:

**!** скорость света (электромагнитной волны) в вакууме *не зависит* от выбранной системы отсчёта. Другими словами, относительно любых инерциальных систем отсчёта скорость распространения электромагнитных волн постоянна.

Полученный результат озадачил учёных. Он противоречит классическому закону сложения скоростей. Поэтому его невозможно объяснить, не отказавшись от классических представлений о пространстве и времени.

В 1905 г. А. Эйнштейн опубликовал работу, в которой сформулировал основные положения разработанной им теории – *специальной теории относительности* (СТО). В этой теории коренным образом пересматривались существовавшие представления о пространстве и времени.

В основе СТО лежат два постулата. Часто их называют *постулатами Эйнштейна*.

1. **Все явления в природе протекают одинаково во всех ИСО при одинаковых начальных условиях.**
2. **Скорость света в вакууме одинакова во всех ИСО.**

Первый постулат означает, что все ИСО равнозначны, т. е. во всех ИСО законы физики имеют одинаковую форму. Другими словами, никакие эксперименты не позволяют выделить среди всех ИСО особую «абсолютную систему отсчёта». Следовательно, никакого покоящегося «эфира» не существует.

*Первый постулат СТО распространяется на все явления природы.* Поэтому первый закон Ньютона, постулирующий существование ИСО, имеет важнейшее значение не только для механики, но и для всех разделов

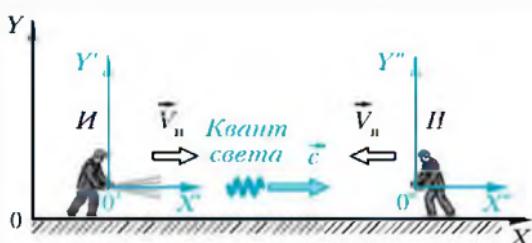


Рис. 231

ной с Землёй лабораторной ИСО, вылетает снаряд со скоростью  $\vec{v}_0$  относительно пушки. Тогда скорость спаряда относительно лабораторной ИСО будет равна  $\vec{v}_0 + \vec{V}$ . Это явление называют *баллистическим эффектом*.

Теперь рассмотрим движущийся со скоростью  $\vec{V}_{\parallel}$  относительно лабораторной ИСО источник света — фонарик (*I*) в руках идущего человека (рис. 231). Пусть луч света от фонарика направлен в сторону приёмника света — человека (*II*), который движется навстречу. Согласно второму постулату СТО, скорость света одинакова во всех ИСО — она равна  $c$  и в лабораторной ИСО  $XY$ , и в ИСО  $X'Y'$ , связанной с источником, и в ИСО  $X''Y''$ , связанной с приёмником. Таким образом, мы приходим к следующим выводам.

1. Скорость света относительно лабораторной ИСО не зависит от скорости движения источника света в этой ИСО. Следовательно, баллистический эффект для света не имеет места.

2. Скорость света относительно источника (приёмника) не зависит от скорости движения этого источника (приёмника) в лабораторной ИСО. █



Отметим, что не следует путать скорость распространения импульса света относительно тела (источника или приёмника) со скоростью сближения — изменением расстояния между этим импульсом и рассматриваемым телом за единицу времени, определяемым в лабораторной ИСО. Например, в случае, показанном на рис. 231, измеряемый в лабораторной ИСО модуль скорости сближения света и приёмника равен  $c + V_{\parallel}$ . При этом скорость света относительно приёмника равна  $c$ . Таким образом, в отличие от классической механики, модуль скорости сближения света и приёмника не равен модулю скорости, с которой свет движется относительно приёмника. Следовательно, в СТО классический закон сложения скоростей не выполняется.

Отметим также, что скорость сближения (как и скорость удаления) не является *скоростью движения материальных объектов*. Поэтому то, что она может превышать скорость света в вакууме, не противоречит постулатам СТО.

физики. Первый постулат СТО часто называют *принципом относительности Эйнштейна*.

Согласно второму постулату, скорость света занимает особое положение. Поясним это на примерах.

Пусть из массивной пушки, движущейся со скоростью  $\vec{V}$  относительно связанных с Землёй ИСО, вылетает снаряд со скоростью  $\vec{v}_0$  относительно пушки.

Одним из самых удивительных следствий постулатов СТО является то, что *скорость света в вакууме является максимально возможной скоростью передачи любых видов взаимодействий*.

Из этого, в свою очередь, следует, что *скорость света в вакууме является максимально возможной скоростью движения любого материального объекта*.

В заключение скажем, что СТО часто называют *релятивистской механикой* (от англ. relative — «относительный»).

### Вопросы

- 1 Приведите пример противоречия, показывающего несовместимость законов электромагнетизма и принципа относительности Галилея.
- 2 Удалось ли экспериментально обнаружить движение «эфира» относительно Земли?
- 3 Сформулируйте постулаты СТО.
- 4 В чём различие принципов относительности Галилея и Эйнштейна?
- 5 Что означает равнозначность всех ИСО?
- 6 Чему равна максимально возможная скорость: а) передачи взаимодействий; б) движения материальных объектов?
- 7 Известны ли скорости, большие скорости света в вакууме? Если да, то не противоречит ли это следствиям постулатов СТО?

### Упражнение



В схеме, показанной на рис. 231, направления движения источника *I* и приёмника *P* в лабораторной ИСО *XY* изменяются на противоположные, оставаясь неизменными по модулю. После этого источник посылает импульс света в направлении приёмника. Определите:

- а) скорости света в лабораторной ИСО *XY*, в ИСО *X'Y'*, связанной с источником, и в ИСО *X''Y''*, связанной с приёмником;
- б) скорость удаления импульса света от источника (скорость изменения расстояния между источником и импульсом света) в лабораторной ИСО *XY*;
- в) скорость сближения импульса света и приёмника (скорость изменения расстояния между импульсом света и приёмником) в лабораторной ИСО *XY*.



Одним из основных понятий СТО является понятие *события*. Событием в СТО называют физическое явление, происходящее в определённой точке пространства в некоторый момент времени в выбранной системе отсчёта. Очевидно, что реальные события происходят в конечной области пространства в течение конечного промежутка времени. Таким образом, *событие в СТО — это модель реального события*, происходящего в достаточно малой области пространства (которую можно считать точкой) в течение достаточно малого промежутка времени (который можно считать моментальным).

В классической механике после введения системы отсчёта, описывая событие, мы можем ответить на два вопроса: где (в какой точке пространства) происходит событие? Когда (в какой момент времени) происходит событие? При этом *пространственные соотношения между различными событиями зависят от того, в какой системе отсчёта они рассматриваются*. Например, две последовательные вспышки сигнальной лампы на крыле летящего самолёта в системе отсчёта, связанной с самолётом, происходят в одном и том же месте. Для наблюдателя, стоящего на Земле, они происходят в разных точках. Однако *временные соотношения между событиями в механике Ньютона считаются не зависящими от системы отсчёта*. Другими словами, промежуток времени между двумя событиями (например, вспышками лампы) считается одинаковым в обеих системах отсчёта. Так же события, одновременные в одной из систем отсчёта, являются одновременными во всех остальных системах отсчёта. Следовательно, в классической механике такие понятия, как «теперь», «раньше», «позднее», «одновременно», имеют одинаковое значение для всех наблюдателей во всех ИСО.

### Относительность одновременности событий

Иначе обстоит дело в СТО. Рассмотрим, опираясь на постулаты СТО, восприятие одних и тех же событий наблюдателями, находящимися в разных ИСО. Для этого проведём предложенный Эйнштейном мысленный эксперимент.

Пусть в центре вагона поезда, движущегося со скоростью  $\vec{v}$ , происходит вспышка света. Первый наблюдатель, сидящий внутри вагона, видит, что свет достигает противоположных (передней и задней) стен вагона од-

новременно, так как стены находятся на одинаковом расстоянии от источника. Второй наблюдатель, стоящий снаружи на Земле, видит, что задняя стена движется навстречу свету со скоростью  $v$  относительно Земли. Следовательно, модуль скорости сближения этой стены и света равен  $c + v$ . На-против, передняя стена стремится «убежать» от вспышки света со скоростью  $v$ . Поэтому модуль скорости сближения передней стены и света равен  $c - v$ . Следовательно, в такой системе отсчёта свет достигнет передней и задней стен вагона не одновременно: сначала он достигнет задней стены, а затем — передней.

Таким образом, *два события, одновременные в одной ИСО, не являются одновременными в другой ИСО*.

Мы пришли к важному выводу:



**одновременность событий в СТО относительна.**

Другими словами, разные наблюдатели могут иметь разные представления об одновременности. События  $A$  и  $B$ , одновременные, с точки зрения одного наблюдателя, разнесены во времени, с точки зрения другого наблюдателя, который движется относительно первого.

Возникает вопрос: возможна ли ситуация, при которой, с точки зрения одного наблюдателя, событие  $A$  происходит раньше, чем событие  $B$ , а с точки зрения другого наблюдателя, событие  $B$  происходит раньше события  $A$ ?

Из постулатов СТО следует, что описанная ситуация возможна, если расстояние  $l$  между событиями (вспышками света) и разделяющий их промежуток времени  $\Delta t$  в ИСО удовлетворяют условию:

$$l^2 > (c \cdot \Delta t)^2. \quad (1)$$

Если выполнено условие (1), то промежуток времени, за который свет, распространяющийся с максимальной из возможных скоростей, проходит расстояние  $l$ , больше, чем  $\Delta t$ . Следовательно, информация (например, в виде импульса света) о том, произошло ли первое событие, не может быть доставлена в точку, где происходит второе событие, раньше, чем произойдёт это второе событие. Про такие события говорят, что они не могут быть связаны причинно-следственной связью, т. е. одно из событий не может являться причиной другого, а это другое — быть следствием первого.



В классической механике рассматриваемые события — достижение вспышкой света передней и задней стенок вагона — являются одновременными, так как источник света имеет скорость  $v$  в направлении движения вагона. Поэтому к задней стенке вспышка света движется со скоростью  $c - v$ , а к передней — со скоростью  $c + v$ . Из-за этого свет достигает движущихся стенок одновременно.

**Относительность промежутков времени (течения времени)**

Полученный результат позволяет предположить, что длительность одного и того же процесса (*т. е. течение времени*), с точки зрения разных наблюдателей, может быть различной.

Исследуем, как соотносятся промежутки времени между двумя данными событиями для наблюдателей из разных ИСО. С этой целью проведём ещё один мысленный эксперимент.

Воспользуемся *световыми часами* – твёрдым стержнем  $AB$  длиной  $l$  с зеркалами на концах, между которыми «бегает» короткий световой импульс – фотон света (рис. 232, *a*). Единица времени в таких часах равна промежутку времени, за который фотон «пробегает» от одного зеркала до другого расстояние  $l$ .

Поместим световые часы на космический корабль, движущийся с постоянной скоростью  $\vec{v}$  относительно Земли. Систему отсчёта  $K$ , связанную с Землёй, будем считать инерциальной. Тогда система отсчёта  $K'$ , связанная с кораблём, также будет инерциальной. Будем считать, что одноимённые оси этих систем отсчёта направлены одинаково, а оси  $X$  и  $X'$  направлены вдоль вектора скорости  $\vec{v}$ .

В системе отсчёта  $K'$  часы неподвижны. Поэтому единица времени  $\Delta t'$  в этой системе отсчёта равна:

$$\Delta t' = \frac{l}{c}. \quad (2)$$

Пусть скорость  $\vec{v}$  движения корабля перпендикулярна стержню  $AB$  световых часов. Тогда наблюдателю из системы отсчёта  $K$  (с Земли) траек-

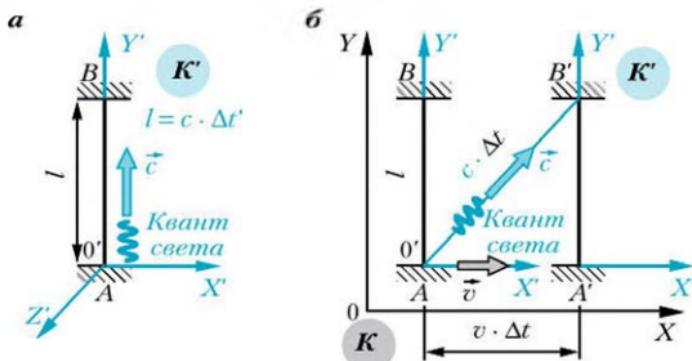


Рис. 232

тория движения фотона, достигшего поверхности зеркала на другом конце стержня, будет казаться гипотенузой  $AB'$  прямоугольного треугольника  $AB'B$  (рис. 232, б). Поскольку  $AB' > AB$ , то единица времени  $\Delta t$ , за которое фотон «пробегает» от одного зеркала до другого, с точки зрения наблюдателя из системы отсчёта  $K$ , будет больше, чем  $\Delta t'$ . По теореме Пифагора с учётом формулы (2) получаем:

$$(c \cdot \Delta t)^2 = (v \cdot \Delta t)^2 + l^2 = (v \cdot \Delta t)^2 + (c \cdot \Delta t')^2. \quad (3)$$

Из формулы (3) получаем:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что  $\Delta t \geq \Delta t'$ . Поэтому говорят, что *движущиеся часы идут медленнее, чем покоящиеся*. Это явление называют *замедлением времени*.

**!** Промежуток времени между событиями (текущее время) имеет относительный характер. Движущиеся относительно наблюдателя часы идут медленнее точно таких же собственных часов наблюдателя.

Отметим, что время, измеренное по часам, движущимся вместе с телом, в котором происходит рассматриваемый процесс, называют *собственным временем* для данного процесса.

Обратим внимание, что эффект замедления времени является взаимным. С точки зрения наблюдателя из системы отсчёта  $K$ , медленнее идут часы, неподвижные в системе отсчёта  $K'$ . И наоборот, с точки зрения наблюдателя из системы отсчёта  $K'$ , медленнее идут часы, неподвижные в системе отсчёта  $K$ . Может показаться, что такая взаимность замедления времени, соответствующая принципу относительности, приводит к парадоксальному выводу. В физике он получил название «*парадокс близнецов*». Действительно, если один из братьев-близнецов отправится в длительное космическое путешествие на сверхскоростном космическом корабле, а другой останется на Земле, то непонятно, кто из братьев больше состарится к моменту их встречи при возвращении на Землю. Выход из парадокса прост. Космический корабль в процессе полёта должен двигаться с ускорением (в частности, при взлёте, развороте и посадке). Поэтому связанную с ним систему отсчёта нельзя считать инерциальной. Учёт этого обстоятельства, выходящий за рамки СТО, показывает, что оставшийся на Земле брат состарится больше.

Подобный эксперимент, в котором сравнили ход двух одинаковых сверхточных часов, был проведён в 1971 г. Одни часы находились на Земле, а другие — на реактивном самолёте. Перед запуском самолёта часы были *синхронизованы*, т. е. на них было выставлено одинаковое время. После завершения полёта было установлено, что часы на борту самолёта показали время на 200 нс меньшее, чем часы, оставленные на Земле. Этот эксперимент подтвердил, что течение времени в разных системах отсчёта различно.

### Относительность пространственных промежутков

Относительность одновременности событий приводит к неестественному с точки зрения классической механики эффекту — *сокращению длины* объектов в направлении их движения. Действительно, поскольку за длину объекта принимают расстояние между *одновременно определёнными* положениями его крайних точек, то ясно, что в разных ИСО эти величины будут различными.

Проведём мысленный эксперимент. Рассмотрим стержень  $AB$ , движущийся относительно системы отсчёта  $K$  с постоянной скоростью  $\vec{v}$  (рис. 233). Пусть *собственная длина* стержня — это его длина в связанный с ним системе отсчёта  $K'$ . В этой системе отсчёта стержень расположен вдоль оси  $X'$ , а его длина равна  $l'$ . При этом вектор скорости  $\vec{v}$  направлен вдоль оси  $X'$  и одноимённые оси двух систем отсчёта направлены одинаково.

Отметим на оси  $X$  системы  $K$  точку  $M$ . Установим в этой точке часы, которые позволят измерить время  $\Delta t$  пролёта стержня мимо точки  $M$ . Это позволит определить длину  $l$  стержня в системе  $K$ :

$$l = v \cdot \Delta t. \quad (5)$$

Для наблюдателя из системы  $K'$  точка  $M$  и часы  $K$  движутся со скоростью  $-\vec{v}$ . Следовательно, для него определённый по этим часам промежуток времени  $\Delta t'$ , разделяющий два события — совпадения точки  $M$  с концами

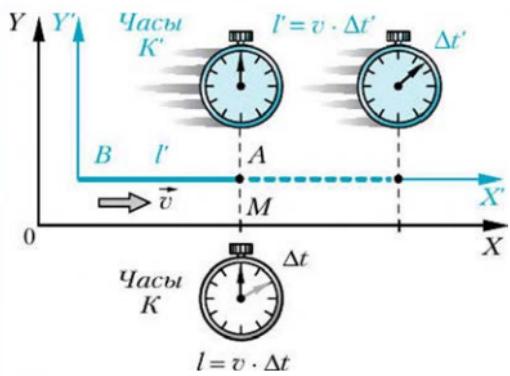


Рис. 233

*A* и *B* стержня, будет «чужим». Поэтому собственный промежуток времени  $\Delta t'$ , разделяющий эти же события, согласно формуле (4), будет равен:

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}. \quad (6)$$

Следовательно, с учётом формул (5) и (6) собственная длина *l'* стержня равна:

$$l' = v \cdot \Delta t' = \frac{v \cdot \Delta t}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{l}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}. \quad (7)$$

! Длина *l* стержня в системе отсчёта, относительно которой он движется, всегда меньше его собственной длины *l'*. Движущееся относительно наблюдателя тело сокращается в направлении своего движения по сравнению с точно таким же, но покоящимся для наблюдателя телом.

Отметим, что сокращение длины тела в направлении его движения в системе отсчёта, относительно которой происходит это движение, не имеет отношения к изменению его собственной длины (процессам деформации тела). Сокращение длины связано с относительным характером течения времени и расстояния между точками пространства в различных ИСО.

### Вопросы

1. Что называют событием?
2. Зависят ли в классической механике: а) пространственные; б) временные соотношения между различными событиями от того, в какой системе отсчёта они рассматриваются?
3. В чём состоит относительность одновременности двух событий в СТО?
4. При каких условиях порядок событий *A* и *B* может быть различным в разных ИСО?
5. Про какие события говорят, что они связаны причинно-следственной связью? Можно ли найти ИСО, в которой порядок следования этих событий будет иным?
6. Что такое световые часы?
7. Какие из двух часов будут идти медленнее — движущиеся или покоящиеся?

- 8 Какое явление называют замедлением времени?
- 9 В чём состоит «парадокс близнецов»?
- 10 Что называют собственной длиной объекта? Сокращается или увеличивается длина объекта в направлении его движения?

**Упражнения**

- 1 Космический корабль удаляется от Земли со скоростью, модуль которой  $v = \frac{c}{3}$ . Часы на корабле показывают, что промежуток времени от завтрака до обеда равен 5 ч. Определите промежуток времени между этими событиями для земного наблюдателя.
- 2 Собственная длина стержня, показанного на рис. 233, равна 1 м. Определите его длину в системе отсчёта  $K$ , относительно которой он движется со скоростью  $v = \frac{c}{2}$ .
-  3 Два события в космосе разделены промежутком времени  $\Delta t = 1$  мин. Определите, могут ли эти события быть связаны причинно-следственной связью, если расстояние  $l$  между ними равно: а)  $10^3$  км; б)  $10^6$  км; в)  $10^9$  км.
-  4 Образующиеся в верхних слоях атмосферы элементарные частицы мезоны имеют собственное время жизни, равное  $\sim 2 \cdot 10^{-6}$  с. За это время они не смогли бы достигнуть поверхности Земли. Исследуйте, почему некоторые мезоны достигают этой поверхности. Для этого определите время жизни и расстояние, которое может пройти мезон, в системе отсчёта, связанной с Землёй, если модуль его скорости в этой системе отсчёта равен  $-0,99c$ .

**Для углублённого уровня****§ 65****Закон сложения скоростей в СТО**

Из постоянства скорости света во всех ИСО следует, что классический закон сложения скоростей, который используют в механике Ньютона для определения скорости материальной точки при переходе из одной системы отсчёта в другую, неприменим в специальной теории относительности, так как скорость света в вакууме является максимально возможной для любых материальных объектов.

Рассмотрим инерциальную систему отсчёта  $K$ , относительно которой движется с постоянной скоростью  $V$  система отсчёта  $K'$ . Одноимённые оси этих систем отсчёта направлены одинаково.

Пусть относительно системы отсчёта  $K'$  движется с постоянной скоростью  $\vec{v}'$  материальная точка. При этом система  $K'$  движется вдоль оси  $X$  системы  $K$ , а материальная точка — вдоль оси  $X'$  системы  $K'$  (рис. 234).

Используя постулаты Эйнштейна, можно показать, что в этом случае материальная точка относительно системы  $K$  будет двигаться вдоль оси  $X$ , а проекция  $v_x$  её скорости на эту ось будет равна:

$$v_x = \frac{v'_x + V_x}{1 + \frac{v'_x \cdot V_x}{c^2}}, \quad (1)$$

где  $v'_x$  — проекция скорости материальной точки в системе  $K'$  на ось  $X'$  этой системы, а  $V_x$  — проекция скорости системы  $K'$  в системе  $K$  на ось  $X$ .

Отметим, что в случае движения системы  $K'$  в других направлениях относительно системы  $K$ , а также движения материальной точки в других направлениях системы  $K'$  формулы преобразования скоростей приобретают существенно более сложный вид, однако эти случаи не вносят нового физического содержания.

Проанализируем выражение (1). Пусть  $v'_x \ll c$  и  $V_x \ll c$ . Тогда выражение  $\frac{v'_x \cdot V_x}{c^2} \ll 1$ . Поэтому знаменатель в выражении (1) можно считать равным единице.

В этом случае закон сложения скоростей принимает вид:

$$v_x = v'_x + V_x. \quad (2)$$

Полученное выражение совпадает с законом сложения скоростей в механике Ньютона. Следовательно,

**!** классический закон сложения скоростей является частным случаем закона сложения скоростей в СТО. Этот частный случай реализуется, если значения скоростей тела и системы отсчёта во много раз меньше скорости света в вакууме.

Пусть теперь в системе  $K'$  вместо материальной точки движется фотон света, т. е.  $v' = c$ . В этом случае проекция на ось  $X$  скорости его движения в системе  $K$ , согласно выражению (1), равна:

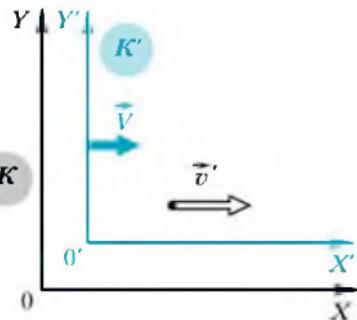


Рис. 234

$$v_x = \frac{c + V_x}{1 + \frac{c \cdot V_x}{c^2}} = c. \quad (3)$$

Полученный результат соответствует второму постулату Эйнштейна, т. е. модуль скорости света в вакууме во всех ИСО равен  $c$ .

Используя выражение (1), можно убедиться, что если  $v'_x < c$ , то, поскольку  $V_x < c$ , модуль  $v_x$  всегда будет меньше  $c$ . Следовательно, *если скорость объекта в некоторой ИСО меньше  $c$ , то скорость этого объекта в любой другой ИСО будет также меньше  $c$ .*

В заключение отметим, что использование ускорителей заряженных частиц позволяет разгонять эти частицы до огромных скоростей. Например, в Большом адронном коллайдере (от англ. Large Hadron Collider, LHC) в ЦЕРН (на территории Франции и Швейцарии) протоны удалось разогнать до скорости  $0,9999c$ . Сообщить протонам скорость, равную или превышающую  $c$ , не удается. Это подтверждает справедливость второго постулата СТО.

### Вопросы

1. Какому постулату СТО противоречит классический закон сложения скоростей?
2. При каком условии выражения релятивистского и классического законов сложения скоростей практически совпадают?

### Упражнения

1. Система отсчёта  $K'$  движется поступательно вдоль оси  $X$  системы отсчёта  $K$  с постоянной скоростью, модуль которой равен  $\frac{c}{3}$ . Проекция скорости частицы на ось  $X'$  системы  $K'$  равна  $\frac{c}{2}$ . Определите скорость этой частицы в системе  $K$ .
2. Используя выражение (1) в параграфе, получите выражение для расчёта скорости  $v'_x$  движения частицы вдоль оси  $X'$  системы  $K'$ , если известно, что эта частица движется со скоростью  $v_x$  вдоль оси  $X$  системы  $K$ , а система  $K'$  движется вдоль оси  $X$  системы  $K$  со скоростью  $V_x$ .



В качестве тел отсчёта в СТО запрещено использовать объекты, движущиеся со скоростью  $c$ . Поэтому модуль скорости движения одной ИСО относительно другой всегда меньше  $c$ .

-  3 Исследуйте, проведя мысленный эксперимент, может ли скорость удаления двух частиц быть больше  $c$ . Если да, то не противоречит ли это второму постулату СТО? Будет ли при этом скорость одной частицы относительно другой больше  $c$ ?
-  4 Докажите, что если скорость объекта в некоторой ИСО меньше  $c$ , то скорость этого объекта в любой другой ИСО будет также меньше  $c$ .

## § 66 Масса, импульс и энергия в СТО

Согласно законам классической механики, чтобы сообщить телу массой  $m$ , покоящемуся в ИСО, скорость, равную по модулю скорости света в вакууме, над телом надо совершить конечную работу. Например, чтобы сообщить протону, имеющему массу  $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27}$  кг, эту скорость, над ним следует совершить работу:

$$A = \frac{m_p \cdot c^2}{2} \approx \frac{1,7 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2}{2} = 7,65 \cdot 10^{-11} \text{ (Дж)} \approx 480 \text{ (МэВ)}.$$

Мощности современных ускорителей, разгоняющих частицы, позволяют совершить над частицами значительно большую работу. Однако в настоящее время протонам удалось сообщить с помощью ускорителей скорость  $v \approx 0,9999 \cdot c$  относительно Земли, совершив при этом над каждым из протонов работу 14 ТэВ, что примерно в 30 000 раз больше приведённого выше значения. Следовательно, классическое выражение для расчёта кинетической энергии частицы оказывается неверным при скоростях, значения которых приближаются к  $c$ .

В рамках СТО все частицы принято делить на *массовые* (иначе, имеющие массу, отличную от нуля) и *безмассовые* – частицы, масса которых равна нулю. К последним относятся фотоны.

Безмассовые частицы относительно любой ИСО движутся со скоростью  $c$ , и их скорость не может быть изменена, т. е. их невозможно ни замедлить, ни ускорить. Вместе с тем многочисленные эксперименты показывают, что такие частицы обладают энергией и импульсом, причём энергия  $E$  и импульс  $\vec{p}$  таких частиц при взаимодействии с другими частицами могут изменяться. Однако эти изменения всегда происходят так, что *энергия  $E$  и импульс  $\vec{p}$  одной безмассовой частицы изменяются одновременно*. При этом всегда выполняется соотношение:

$$E^2 - p^2 \cdot c^2 = 0. \quad (1)$$

Кроме того, для системы взаимодействующих частиц выполняются законы сохранения импульса и энергии.

Отметим, что, согласно соотношению (1), импульс и энергия безмассовой частицы могут одновременно обратиться в нуль. При этом говорят, что безмассовая частица была поглощена другой частицей.

В отличие от безмассовых частиц, движущихся всегда со скоростью  $c$ , модуль скорости массовых частиц относительно разных ИСО может изменяться: от нуля до значений, близких к скорости света  $c$ . В ИСО, относительно которой массовая частица покоятся, её импульс равен нулю. Однако энергия такой частицы в указанной ИСО отлична от нуля.

 Согласно Эйнштейну, в ИСО, где частица с массой  $m$  покоятся, она обладает энергией

$$E_0 = m \cdot c^2. \quad (2)$$

Эту энергию называют *собственной энергией массовой частицы* или *энергией покоя*. Соотношение (2) часто называют *формулой Эйнштейна*.

Подчеркнём, что входящая в соотношение (2) величина  $m$  является характеристикой данной частицы, и она не зависит от выбора ИСО, в которой рассматривается частица. Другими словами, *масса частицы — абсолютная (говоря иначе, инвариантная) величина*.

Справедливость высказанного утверждения подтверждена экспериментально при исследовании явлений ядерной физики и процессов взаимодействия элементарных частиц.

Для массовой частицы соотношение между её импульсом  $\vec{p}$  и энергией  $E$ , согласно Эйнштейну, имеет вид:

$$E^2 - p^2 \cdot c^2 = E_0^2. \quad (3)$$

Выражение (3) с учётом (2) можно переписать в виде:

$$E^2 - p^2 \cdot c^2 = m^2 \cdot c^4. \quad (4)$$

Отметим, что это соотношение фактически является определением массы частицы в СТО.

Из этого соотношения следует общее для массовых и безмассовых частиц выражение, связывающее релятивистские импульс и энергию частицы с её массой:

$$E = \sqrt{p^2 \cdot c^2 + m^2 \cdot c^4}. \quad (5)$$

Из данного выражения следует, что приращение модуля импульса частицы должно быть пропорционально приращению её энергии. Поскольку импульс массовой частицы должен быть пропорционален её скорости, следу-

ет предположить, что релятивистский импульс  $\vec{p}$  частицы и её скорость  $\vec{v}$  связаны между собой соотношением:

$$\vec{p} = \vec{v} \cdot \frac{E}{c^2}. \quad (6)$$

Справедливость этого выражения экспериментально подтверждается тем, что сумма именно таких векторных величин сохраняется в ИСО для системы массовых частиц, на которые не действуют внешние силы.

Из соотношения (6) следует, что

$$E^2 = \frac{(\vec{p} \cdot c^2)^2}{(\vec{v})^2}.$$

Подставив это выражение в формулу (4), получаем соотношения, связывающие релятивистский импульс массовой частицы и её релятивистскую энергию с массой этой частицы:

$$\vec{p} = \frac{m \cdot \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (7)$$

$$E = \frac{m \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (8)$$

Из формулы (7) следует, что при скоростях, много меньших  $c$ , выражение для импульса массовой частицы превращается в выражение классической механики:  $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ .

Из формулы (8) видно, что при стремлении  $v$  к  $c$  знаменатель в формуле (8) стремится к нулю. Следовательно, релятивистская энергия частицы стремится к бесконечности. Именно этим объясняется то, что для разгона массовой частицы до скоростей, значения которых приближаются к скорости света  $c$ , требуются огромные затраты энергии, а разогнать такую частицу до скорости света в вакууме невозможно.

Если  $v \ll c$ , то

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx \sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}} \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2}. \quad (9)$$

С учётом формулы (9) выражение (8) для расчёта энергии частицы, скорость движения которой много меньше  $c$ , может быть записано в виде:

$$E \approx m \cdot c^2 \cdot \left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right) = m \cdot c^2 + \frac{m \cdot v^2}{2}. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что при  $v \ll c$  с релятивистскую энергию частицы можно представить в виде суммы её энергии покоя и классической кинетической энергии.

### Вопросы

1. Какие частицы называют: а) массивными; б) безмассивными? Приведите примеры.
2. С какой скоростью могут двигаться: а) массивные; б) безмассивные частицы?
3. Как связаны энергия и импульс безмассивной частицы?
4. Что называют энергией покоя?
5. Как связаны масса, энергия и импульс массивной частицы?
6. Чему равен релятивистский импульс массивной частицы?
7. Чему равна релятивистская энергия массивной частицы?

### Упражнения

1. Определите энергию покоя: а) электрона; б) протона; в) нейтрона. Массы этих частиц равны соответственно  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг,  $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$  кг,  $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$  кг.
2. Определите модуль релятивистского импульса и релятивистскую энергию протона, движущегося со скоростью  $0,8 \cdot c$ . Сравните полученные результаты с теми, которые следовало бы ожидать с точки зрения классической механики.

# ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

## Постулаты СТО

- Все явления в природе протекают одинаково во всех ИСО при одинаковых начальных условиях (принцип относительности Эйнштейна).
- Скорость света в вакууме одинакова во всех ИСО

Скорость света в вакууме является максимально возможной скоростью передачи любых видов взаимодействий

**Относительность одновременности событий**  
В релятивистской механике два события, одновременные в одной ИСО, не являются одновременными в другой ИСО

**Относительность течения времени**  
Собственное время  $\Delta t'$  между двумя событиями в ИСО  $K'$ , движущейся со скоростью  $\vec{v}$  относительно ИСО  $K$ , и время  $\Delta t$  между этими же событиями в системе  $K$  связаны соотношением:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

(движущиеся часы идут медленнее покоящихся)

**Относительность пространственных промежутков**  
Длина  $l$  стержня в ИСО, относительно которой он движется, всегда меньше его собственной

$$\text{длины } l': l' = \frac{l}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

**Закон сложения скоростей в СТО**

Если  $v'_x$  — проекция скорости материальной точки в системе  $K'$  на ось  $X'$ , а  $V_x$  — проекция скорости системы  $K'$  на ось  $X$  системы  $K$ , то проекция  $v_x$  этой точки на ось  $X$

$$\text{равна: } v_x = \frac{v'_x + V_x}{1 + \frac{v'_x \cdot V_x}{c^2}}$$

Масса  $m$  частицы определяется в ИСО, в которой эта частица поконится. Собственная энергия массовой частицы — энергия покоя — и масса  $m$  этой частицы связаны соотношением Эйнштейна:

$$E_0 = m \cdot c^2.$$

Соотношение между импульсом  $\vec{p}$  и энергией  $E$  массовой частицы, согласно Эйнштейну, имеет вид:

$$E^2 - p^2 \cdot c^2 = E_0^2$$

или

$$E^2 - p^2 \cdot c^2 = m^2 \cdot c^4.$$

Релятивистский импульс  $\vec{p}$  массовой частицы и её релятивистская энергия равны соответственно:

$$\vec{p} = \frac{m \cdot \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad E = \frac{m \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Если  $v$  частицы  $\ll c$ , то

$$E \approx m \cdot c^2 + \frac{m \cdot v^2}{2}$$

# Квантовая физика. Астрофизика

Физика изучает материю на всех уровнях её организации. Поэтому наряду с изучением макроскопических тел (от молекул до планет и звёзд) ведётся исследование микромира — атомов, их ядер, элементарных частиц и мегамира — звёздных скоплений, галактик и Вселенной в целом. Изучение этих форм современными методами было подготовлено всем предшествующим развитием науки, накоплением знаний о природе и техническим прогрессом. Потребовались экспериментальные и теоретические исследования, открытия многих законов для того, чтобы появились, например, представления, с одной стороны, о сложном строении атома, о существовании элементарных частиц, а с другой стороны, о масштабах Вселенной, о происходящих с ней изменениях. Оказалось, что ответить на возникшие вопросы о новых явлениях природы, дать объяснение полученным экспериментальным данным, используя для этого исключительно законы макромира, не удаётся. Это стало началом нового этапа в развитии физики.

Пересмотр классических представлений о пространственно-временных закономерностях привёл к созданию теории относительности. Универсальный характер теоретических положений А. Эйнштейна нашёл экспериментальное подтверждение и позволил продолжить исследования в самых разных областях физики. Созданная практически в это же время квантовая теория сделала возможным описание сложных процессов в микромире и тем самым положила начало его изучению.



# Квантовая физика. Строение атома

Конец XIX – начало XX в. ознаменовались революцией в физике. С одной стороны, создание специальной теории относительности (СТО) привело к коренному пересмотру взглядов на пространство и время. С другой стороны, выяснилось, что теория Максвелла, прекрасно объясняющая процессы излучения и распространения электромагнитных волн в радиодиапазоне, приводит к неверным результатам в тех случаях, когда с её помощью пытаются объяснить экспериментально установленные законы излучения в инфракрасном и более коротковолновых диапазонах. Кроме того, оказалось, что, рассматривая свет как электромагнитную волну, не удается объяснить законы фотоэффекта, а также целый ряд других явлений, возникающих при взаимодействии света с веществом.

## § 67

### Равновесное тепловое излучение. Гипотеза Планка

Как вы знаете, нагретые до высокой температуры твёрдые вещества светятся. Это означает, что они излучают электромагнитные волны. Установлено, что вещество излучает при любой отличной от абсолютного нуля температуре.

**Излучение вещества, происходящее за счёт его внутренней энергии, называют тепловым излучением.**

При излучении энергия излучающего вещества уменьшается. Однако если это вещество находится в изолирующей его от внешних тел оболочке, то, согласно нулевому закону термодинамики, внутри оболочки должно установиться состояние термодинамического равновесия, характеризуемое определённой температурой. Другими словами, вещество должно не только

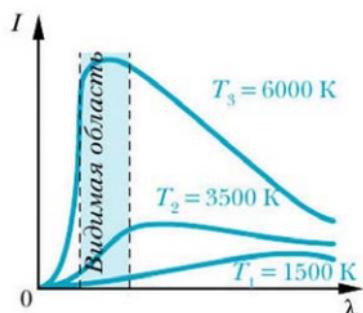


Рис. 235

вой степени. Из этого следует, что в спектре излучения нагретого вещества интенсивность  $I$  излучения должна была бы непрерывно увеличиваться с увеличением частоты  $v$  (т. е. с уменьшением длины волны  $\lambda$ ) излучения. Проведённые английским физиком Джоном Рэлеем (1842–1919) расчёты дали удовлетворительное совпадение с экспериментально наблюдавшейся зависимостью, но только для длин волн, больших определённого значения. В области же более коротких длин волн результаты эксперимента оказались прямо противоположными тем, которые предсказывает теория электродинамики Максвелла. Другими словами, экспериментально было установлено, что с ростом частоты  $v$  (уменьшением длины волны  $\lambda$ ) интенсивность излучения вначале увеличивается, достигает максимума при некотором значении частоты (длины волны), а затем уменьшается, стремясь к нулю (рис. 235). Как видно из графиков, значение  $\lambda$ , соответствующее максимуму интенсивности излучения, зависит от температуры.

Кроме того, расчёты, основанные на законах классической физики, с неизбежностью приводили к выводу, что тепловое равновесие вещества и его электромагнитного излучения возможно только при абсолютном нуле температуры. Этот вывод также противоречит тому, что наблюдается в природе.

Описанные противоречия теоретических предсказаний классической физики с результатами экспериментов получили название «ультрафиолетовая катастрофа». Причиной «ультрафиолетовой катастрофы», как показывают исследования, является ошибочное положение классической физики, согласно которому излучение происходит непрерывно. Из этого положения следует, что излучение за сколь угодно малый промежуток времени может происходить сколь угодно малой порцией. То же самое можно сказать и о поглощении излучения.

излучать энергию, но и поглощать её. При этом количество излучаемой энергии должно быть равно количеству поглощаемой энергии за то же время. В результате внутри оболочки устанавливается термодинамическое равновесие.

Согласно законам электродинамики, интенсивность излучения колеблющимися заряженными частицами вещества должна возрастать пропорционально частоте их колебаний во второй степени и, соответственно, частоте излучения во второй степени.

Таким образом, чтобы избежать «ультрафиолетовой катастрофы», необходимо считать, что *излучению, как и веществу, свойственна дискретность*. Именно это предположение сделал в 1900 г. М. Планк.



Согласно Планку, свет излучается и поглощается веществом отдельными порциями — квантами, причём энергия  $E$  кванта прямо пропорциональна частоте  $v$  излучения:

$$E = h \cdot v, \quad (1)$$

где  $h$  — коэффициент пропорциональности, получивший название *постоянная Планка*.

Созданная Планком теория теплового излучения нагретого вещества прекрасно соглашается с экспериментом. За разработку этой теории Планк в 1911 г. был удостоен Нобелевской премии по физике.

Из полученных опытным путём зависимостей энергии излучения от его частоты удалось вычислить значение постоянной Планка. Оно оказалось равным:

$$h \approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (2)$$

Гипотеза Планка оказалась предвестником создания принципиально новой теории света и вещества — квантовой механики. Кроме того, эта теория заставила учёных вспомнить о корпускулярной теории света, предлагавшейся ещё Ньютоном. На основе предположения, что свет — это поток корпускул, Эйнштейн смог объяснить открытое ранее Герцем явление фотозадействия.

В настоящее время частицу света — носитель минимальной порции световой энергии (квант света) — называют *фотоном*.

### Вопросы

- 1 Какое излучение называют тепловым?
- 2 Возможно ли термодинамическое равновесие между нагретым телом и его излучением? Если да, то при каких условиях?
- 3 Что называют «ультрафиолетовой катастрофой»?
- 4 Какое предположение было сделано Планком для преодоления «ультрафиолетовой катастрофы»?
- 5 Что называют постоянной Планка и чему она равна?
- 6 Что называют фотоном?

**Упражнения**

- 1 Определите энергию фотона, которому соответствует частота  $v = 3 \cdot 10^{14}$  Гц.
- 2 Энергия фотона равна  $E = 6 \cdot 10^{-18}$  Дж. Определите соответствующие этому фотону частоту и длину волны в вакууме.
- 3 Мощность излучения источника, генерирующего свет с длиной волны  $\lambda = 0,6$  мкм, равна  $P = 0,1$  мВт. Определите число фотонов, испускаемых этим источником за время  $t = 10$  мин.
- \*4 Измеренная в эксперименте энергия фотона оказалась равной  $E = 4 \cdot 10^{-19}$  эВ. Определите, рассчитав соответствующие этому фотону частоту и длину волны в вакууме, какому диапазону он принадлежит.

**§ 68****Фотоэффект**

В 1887 г. Г. Герц, изучая условия возникновения искрового разряда между двумя заряженными телами, установил, что если освещать эти тела ультрафиолетовым светом, то напряжение, при котором возникает искровой пробой, уменьшается. Герцу не удалось дать правильное объяснение этому явлению.

Эффект, объясняющий природу этого явления, получил название *внешний фотоэффект*. Экспериментально внешний фотоэффект был исследован в 1888 г. А. Г. Столетовым. При этом было установлено, что под действием ультрафиолетового света происходит ускоренный разряд отрицательно заряженного проводящего тела. Позднее в работах А. Ф. Иоффе, Н. И. Добронравова и других физиков было показано, что заряд уносят электроны, которые выбиваются падающим на тело светом. Поэтому такие электроны стали называть *фотоэлектронами*, а процесс их выбивания из вещества светом — *фотоэлектронной эмиссией*.

Схема установки для исследования фотоэффекта приведена на рис. 236. В кварцевый баллон, из которого откачен воздух, вставлены электроды 1 и 2, которые подключены к регулируемому источнику напряжения. Электрод 1, освещаемый светом, называют *фотокатодом*. При освещении фотокатода свет выбивает из него электроны. В результате между электродами возникает электрический ток — *фототок*. Если потенциал электрода 2 значительно больше потенциала электрода 1, то все выбитые светом электроны достигают электрода 2. Значение силы возникающего при этом фототока

ка  $i_{\text{нас}}$  называют *током насыщения*. Если же потенциал электрода 2 сделать меньше потенциала электрода 1 (изменить полярность подключения источника), то до электрода 2 будут долетать только те электроны, кинетическая энергия которых превышает работу, совершающую тормозящими силами электрического поля. Это позволяет определить значение максимально возможной кинетической энергии вылетающих электронов.

В результате проведённых экспериментов были получены следующие основные законы фотоэффекта.

**1. Сила фототока насыщения**  $i_{\text{нас}}$  при неизменной частоте падающего света прямо пропорциональна его интенсивности  $I$ .

**2. Максимальная кинетическая энергия выбитого электрона не зависит от интенсивности падающего света, а определяется частотой  $v$  (или длиной волны  $\lambda = \frac{c}{v}$ ) света, состоянием поверхности и родом вещества фотокатода.**

При этом с увеличением частоты  $v$  при неизменной интенсивности падающего света кинетическая энергия каждого выбитого носителя увеличивается.

**3. Фототок прекращается, если частота  $v$  освещдающего фотокатод света становится меньше некоторой пороговой частоты  $v_{\text{пор}}$ , зависящей от состояния поверхности и рода вещества фотокатода.**

Другими словами, если длина волны падающего на фотокатод света превышает некоторое значение  $\lambda_{\text{кр}} = \frac{c}{v_{\text{пор}}}$ , то фотоэффект не наблюдается.

Это явление получило название *красная граница фотоэффекта*.

Отметим, что первый закон фотоэффекта можно объяснить с точки зрения волновой теории света. Напротив, два других закона находятся в явном противоречии с этой теорией.

Поясним сказанное. Под действием электромагнитной волны в металле могут возникать вынужденные колебания электронов. При этом, как вы

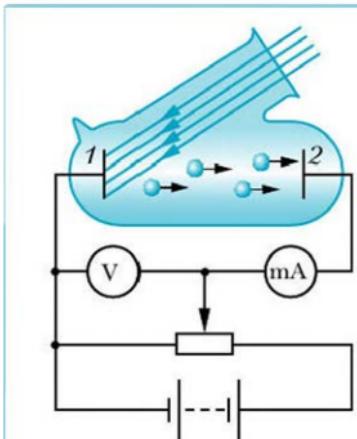


Рис. 236



Это утверждение часто называют законом Столетова для фотоэффекта.

знаете, амплитуда вынужденных колебаний пропорциональна амплитуде вынуждающей силы. В свою очередь, эта амплитуда пропорциональна амплитуде напряжённости электрического поля электромагнитной волны, т. е. квадратному корню из интенсивности падающей волны при её неизменной частоте. Следовательно, при достаточной амплитуде колебаний в падающей световой волне амплитуда вынужденных колебаний электрона может стать достаточной, чтобы он покинул фотокатод. Из сказанного следует, что максимальная кинетическая энергия вылетающего электрона, а следовательно, и модуль его максимальной скорости должны зависеть от интенсивности падающего света при его неизменной частоте. Этот вывод явно противоречит второму закону фотоэффекта.

Кроме того, вы знаете, что с увеличением частоты вынуждающей силы амплитуда установившихся колебаний, увеличиваясь вначале, после того как частота превысит некоторое (резонансное) значение, уменьшается и стремится к нулю (см. § 35). Следовательно, фотоэффект должен был бы всё меньше проявляться при увеличении частоты. Однако это противоречит третьему закону фотоэффекта.

Ещё одно противоречие заключается в том, что с точки зрения волновой теории при достаточно малой интенсивности падающего света должна существовать временная задержка от начала освещения до появления первых фотоэлектронов. Это время необходимо для «раскачивания» электрона до амплитуды, достаточной для его вылета. В эксперименте легко реализовать условия, при которых такая задержка должна была бы превышать несколько лет. Опыт же показывает, что если указанная задержка существует, то она не превышает  $10^{-9}$  с.

Объяснить законы фотоэффекта удалось лишь с позиций квантовой теории. В 1905 г. Эйнштейн, как это уже отмечалось в предыдущем параграфе, предположил, что поглощение света может происходить лишь определёнными порциями. Носителем каждой такой порции является фотон, энергия которого связана с частотой соответствующего ему света соотношением Планка:

$$E = h \cdot v. \quad (1)$$

В соответствии со сказанным интенсивность падающего на электрод света равна:

$$I = n \cdot E = n \cdot h \cdot v, \quad (2)$$

где  $n$  — число фотонов, поглощённых электродом за единицу времени.

Полагая, что фотон может быть поглощён только одним электроном, следует считать, что число выбиваемых за единицу времени электронов пропорционально  $n$ . Поэтому сила фототока насыщения  $i_{\text{нас}}$  должна быть пропорциональна  $n$ , что и наблюдается на опыте.

**!** Применяя к поглощённому фотону и выбитому им электрону закон сохранения энергии, получим:

$$\hbar \cdot v = A_{\text{вых}} + \frac{m \cdot v_{\text{max}}^2}{2}, \quad (3)$$

где  $A_{\text{вых}}$  — работа выхода электрона из электрода,  $m$  и  $v_{\text{max}}$  — соответственно масса и модуль максимальной скорости выбитого электрона.

Соотношение (3) называют *уравнением Эйнштейна для фотоэффекта*.

Поскольку кинетическая энергия фотоэлектрона не может быть отрицательной, то, согласно уравнению (3), фотоэффект должен перестать наблюдаться, если частота падающего света станет меньше пороговой:

$$v_{\text{пор}} = \frac{A_{\text{вых}}}{\hbar}. \quad (4)$$



Проверить справедливость предположения, что величина  $\hbar$ , входящая в уравнения (3) и (4), является постоянной Планка, можно несколькими способами.

Оценочные результаты можно получить, исследуя явление термоэлектронной эмиссии. При этом следует определить работу выхода электронов из металла. Затем, поделив полученное значение на измеренную пороговую частоту фотоэффекта, рассчитать значение  $\hbar$ . Однако такой метод не обеспечивает надлежащей точности по нескольким причинам. В частности, работа выхода очень сильно зависит от состояния поверхности металла.

Более точным является метод, основанный на исследовании зависимости максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты света, падающего на фотокатод. Для определения этой энергии на электрод 2 (см. рис. 236) подают отрицательное относительно фотокатода напряжение. При некотором значении разности потенциалов  $\Delta\Phi$  фототок прекращается, так как максимальной кинетической энергии выбитых из фотокатода электронов оказывается недостаточно, чтобы преодолеть тормозящее их движение электрическое поле. Следовательно,

$$\Delta\Phi = \frac{m \cdot v_{\text{max}}^2}{2e}, \quad (5)$$

где  $e$  — модуль заряда электрона.

В 1911 г. американский физик Роберт Милликен (1868–1953), построив зависимости  $\Delta\Phi(v)$ , показал, что значение величины  $h$ , входящей в уравнение Эйнштейна, действительно совпадает с постоянной Планка.

В § 14 говорилось, что при облучении светом  $p-n$ -перехода в полупроводниковом диоде наблюдается внутренний фотоэффект. В результате поглощения света в области  $p-n$ -перехода между анодом и катодом такого диода возникает определённая разность потенциалов. При подключении освещаемого диода к нагрузке возникает электрический ток. Эксперименты показывают, что сила фототока короткого замыкания прямо пропорциональна интенсивности поглощаемого  $p-n$ -переходом света. Объяснить наблюдавшиеся при внутреннем фотоэффекте явления удается только в рамках квантовой теории.



### Вопросы

- 1 В чём состоит внешний фотоэффект?
- 2 Какие электроны называют фотоэлектронами?
- 3 Что такое фототок насыщения?
- 4 Сформулируйте законы фотоэффекта.
- 5 Что такое красная граница фотоэффекта?
- 6 В чём состоят противоречия между волновой теорией света и законами фотоэффекта?



### Для углублённого уровня

- 7 Что такое внутренний фотоэффект?

### Упражнения

- 1 Определите модуль максимальной скорости фотоэлектронов, вылетающих из фотокатода при облучении его светом с длиной волны  $\lambda = 0,4$  мкм, если для материала катода работа выхода электрона  $A = 2$  эВ.
- 2 Работа выхода электрона из металла  $A = 6,4 \cdot 10^{-19}$  Дж. При освещении каким из трёх источников будет наблюдаться фотоэффект? Частоты излучения источников: а)  $v_1 = 10^{11}$  Гц; б)  $v_2 = 2 \cdot 10^{14}$  Гц; в)  $v_3 = 2 \cdot 10^{15}$  Гц.
- \*3 При каком запирающем потенциале прекратится фотоэлектронная эмиссия из катода, изготовленного из оксида бария, при его облучении красным светом с частотой  $v = 4,5 \cdot 10^{14}$  Гц, если для материала катода работа выхода электрона  $A = 1,2$  эВ?



## Для углублённого уровня



Шар радиусом  $R$  из вольфрама, покрытый тонким слоем цезия, освещают аргоновым лазером, дающим излучение с длиной волны  $\lambda_A$ . Какой заряд может приобрести шар, если красная граница фотоэффекта для цезия на вольфраме равна  $\lambda_{kp}$  ( $\lambda_{kp} > \lambda_A$ )?

## § 69

Корпускулярно-волновой дуализм.  
Давление света. Гипотеза де Бройля

Наряду с фотоэффектом при освещении вещества в нём могут возникать и различные химические превращения, обусловленные разрушением молекул и синтезом новых веществ. Эти фотохимические процессы лежат в основе фотографии и фотосинтеза (процесса, протекающего под действием солнечного света в растениях и многих микроорганизмах). В результате фотосинтеза образуются необходимые для жизни на Земле кислород и органические соединения. Под действием света появляется загар и выцветают краски. Объяснить закономерности, наблюдающиеся при фотохимических процессах, возможно только в случае предположения, что свет поглощается строго определёнными порциями.

Анализ многочисленных экспериментов доказывает, что свет при этом проявляет свойства, присущие корпускулам. В то же время явления интерференции, дифракции света не могут быть объяснены на основании того, что свет — это совокупность корпускул, или частиц, подчиняющихся законам механики Ньютона. В явлениях интерференции и дифракции свет проявляет свойства, присущие волнам.

**!** Такая двойственность свойств света получила название **корпускулярно-волновой дуализм** (от лат. *dialis* — «двойственность»).

Отметим, что существуют явления, которые одинаково хорошо объясняются как с корпускулярной, так и с волновой точки зрения. Рассмотрим одно из таких явлений — **давление света**.

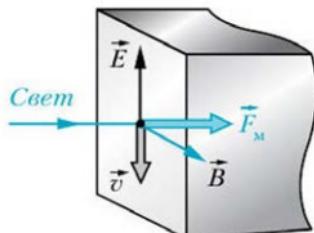


Рис. 237

Согласно теории Максвелла, под действием электрического поля световой волны, которая падает на поверхность, например, металла, свободные электроны должны начать двигаться в сторону, противоположную вектору  $\vec{E}$  световой волны (рис. 237). Действующая на движущийся электрон со стороны магнитного поля магнитная составляющая силы Лоренца  $\vec{F}_m$  направлена в сторону распространения волны. Суммарное действие таких сил на электроны передаётся кристаллической решётке. В результате и возникает *световое давление*.

Если электромагнитная волна падает перпендикулярно поверхности металла и полностью отражается от неё, то индукция магнитного поля удваивается. Поэтому давление волны должно увеличиться в 2 раза. Этот вывод подтверждается экспериментами.

Впервые давление света на твёрдые тела удалось измерить в 1899 г. профессору Московского университета Петру Николаевичу Лебедеву (1866–1912). Основная деталь прибора Лебедева представляла собой лёгкий стержень, подвешенный на тонкой стеклянной нити (рис. 238). Вся конструкция помещалась внутри прозрачного сосуда, из которого был откачен воздух. К стержню были приклесны две пары лёгких крыльышек, два из которых имели зеркальную поверхность, а два других были зачернены. Из-за разности давлений света на отражающие и поглощающие поверхности стержней поворачивался и закручивал стеклянную нить. По углу этого закручивания определялась разность давлений на зеркальные и зачернённые крыльышки. Сложность проведения эксперимента была обусловлена, во-первых, невозможностью полностью откачать воздух из сосуда, во-вторых, разным нагревом сторон крыльышек под действием света. Несмотря на все трудности, Лебедеву удалось показать, что полученные им результаты согласуются с теорией Максвелла.

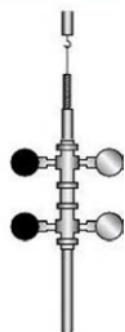
Через три года после этого Лебедев сумел измерить давление света на газы. Отметим, что модуль силы давления солнечного света в ясный день на отражающую поверхность площадью  $1 \text{ м}^2$ , расположенную на Земле, составляет всего лишь  $\sim 10^{-6} \text{ Н}$ .

Давление света может быть объяснено и с корпускулярной точки зрения. Действительно, согласно СТО, фотон, являясь безмассовой частицей, обладает энергией и импульсом. Модуль его импульса равен:

$$p = \frac{\hbar \cdot v}{c} = \frac{\hbar}{\lambda}. \quad (1)$$

Используя формулу (1), получим выражение для расчёта давления света. Пусть на площадку площадью  $S$  пер-

Рис. 238



пендикулярно её поверхности падает монохроматический свет с интенсивностью  $I = n \cdot h \cdot v$ , где  $n$  – число фотонов, падающих за единицу времени на единицу площади. Если весь свет поглощается поверхностью, то за время  $\Delta t$  он передаёт ей импульс, модуль которого равен:

$$p = \frac{n \cdot h \cdot v}{c} \cdot S \cdot \Delta t. \quad (2)$$

Следовательно, свет действует на поверхность с силой, модуль которой  $F = \frac{p}{\Delta t}$ . Поэтому давление света на поверхность равно:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{p}{S \cdot \Delta t} = n \cdot \frac{h \cdot v}{c}. \quad (3)$$

Если же 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. Расчёты давления света, проведённые с использованием уравнения (3), полностью согласуются с экспериментами. **■**

В 1924 г. французский физик Луи де Бройль (1892–1987) выдвинул показвавшуюся всем необычной гипотезу.



Согласно гипотезе де Бройля, любой частице, как и фотону, присущи волновые свойства.

При этом длина  $\lambda$  соответствующей волны связана с модулем  $p$  импульса частицы соотношением, сходным с уравнением (1):

$$p = \frac{\hbar}{\lambda}. \quad (4)$$

В 1927 г. американские физики Клинтон Дэвиссон (1881–1958) и Лестер Джермер (1896–1971), а также независимо от них английский физик Джордж Томсон (1892–1975), русский физик Пётр Саввич Тартаковский (1895–1940) обнаружили дифракцию электронов при прохождении через тонкую золотую фольгу и при отражении от поверхности монокристалла. Эти эксперименты доказали, что электроны обладают волновыми свойствами.



Отметим, что именно давлением солнечного света на мельчайшие частицы вещества комет объясняется образование кометных хвостов при прохождении кометы вблизи Солнца. Давление света обусловливает и предельные размеры звёзд. С ростом массы звезды возрастает плотность излучения и давление света в её поверхностных слоях. Масса звезды, при которой сила тяготения поверхностных слоёв к центру звезды и давление света, направленное от центра, уравновешиваются, является предельной массой звезды.

ствами. Результаты экспериментов подтвердили формулу (4), предложенную де Бройлем. Впоследствии гипотеза де Бройля получила экспериментальное подтверждение для *всех частиц*.

! В настоящее время установлено, что корпускулярно-волновой дуализм является общим свойством материи.

Другими словами, все микрочастицы (микрообъекты) проявляют, казалось бы, несовместимые свойства, т. е. свойства, присущие как корпускулам, так и волнам. Из этого следует, что такие объекты не имеют привычных нам аналогов в классической физике. Их природа настолько сложна, что *для полного описания свойств микрочастиц нельзя ограничиться использованием только корпускулярных или только волновых представлений*, разработанных в классической физике. В этом и состоит смысл корпускулярно-волнового дуализма.

! Невозможно полностью описать свойства микрообъекта, используя только корпускулярные или только волновые представления.

Преодолеть эту проблему удалось лишь после создания *квантовой механики* – современной теории, описывающей движение и взаимодействия микрочастиц.

! В основе квантовой механики лежит идея о том, что состояние микрочастицы носит вероятностный характер.

Другими словами, рассматриваемая частица при одних и тех же внешних условиях может находиться в различных состояниях с разной вероятностью. Для описания состояния частицы вводится так называемая *волновая функция  $\Psi$  (psi-функция)*. Квадрат модуля волновой функции в данной точке в данный момент времени пропорционален вероятности нахождения микрочастицы в достаточно малой области вблизи этой точки в рассматриваемый малый промежуток времени. Именно такой подход к описанию состояния микрочастиц предложил в 1926 г. немецкий физик Макс Борн (1882–1970).

Было показано, что соответствующая частице волна де Бройля представляет собой описываемую  *$\Psi$ -функцией волну вероятности – волну, квадрат амплитуды которой пропорционален вероятности обнаружения частицы в данной области пространства*. Таким образом, движение частицы представляет собой распространение волны вероятности. Поэтому при движении у частицы проявляются свойства, присущие волне. В эксперименте же по обнаружению частицы она с некоторой вероятностью как единое целое локализуется в конкретном месте пространства, т. е. проявляет свойство, присущее частице (корпускуле).

Одним из следствий квантовой механики является то, что, в отличие от классической механики, невозможно одновременно с любой наперёд заданной точностью измерить координату  $x$  частицы и проекцию  $p_x$  её импульса на ту же ось. Немецкий физик Вернер Гейзенберг (1901–1976) установил в 1927 г., что произведение неопределённостей  $\Delta x$  и  $\Delta p_x$  при измерении координаты и проекции импульса на ту же ось удовлетворяет неравенству:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h, \quad (5)$$

где  $h$  – постоянная Планка.

Для двух других пар координат и проекций импульсов справедливы аналогичные неравенства. Эти неравенства называют *соотношениями неопределённостей Гейзенberга*. Они налагают ограничения на применение к микрочастицам классических понятий скорости и координаты. То есть невозможно установить одновременно с заданной точностью, какими будут проекция координаты микрообъекта и проекция его импульса на каждую из осей. Так, при определении проекции координаты с большей точностью проекция импульса будет определена с меньшей точностью. И наоборот, более точное определение проекции импульса приводит к менее точному определению проекции координаты.

Соотношение неопределённостей Гейзенберга может быть представлено и в виде неравенства, связывающего неопределённости  $\Delta E$  энергии частицы и неопределённости  $\Delta t$  времени пребывания частицы в состоянии с данной энергией:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h. \quad (6)$$

В заключение отметим, что справедливость соотношений (5) и (6) подтверждается всеми известными экспериментами.

### Вопросы

- 1 В каких явлениях свет проявляет свойства, присущие корпускулам, а в каких – присущие волнам?
- 2 Что называют корпускулярно-волновым дуализмом?
- 3 Приведите пример явления, которое может быть объяснено с точки зрения как корпускулярной, так и волновой теории.
- 4 Чем определяется предельная масса звезды?
- 5 Кто и когда первым измерил давление света?
- 6 В чём состоит гипотеза де Броиля?

- 7 В каких экспериментах было установлено, что электроны проявляют волновые свойства?
- 8 Что с точки зрения квантовой механики представляет собой соответствующая частице волна де Броиля?
- 9 В чём заключается соотношение неопределённостей Гейзенберга?



*Для углублённого уровня*

- 10 Разъясните физический смысл величин, входящих в неравенство  $\Delta E \cdot \Delta t \geq h$ .

### Упражнения

- 1 Свет по нормали к поверхности падает: а) на поглощающую поверхность; б) отражающую поверхность. Интенсивность света равна  $I = 2 \text{ мкВт/м}^2$ . Определите давление света на эти поверхности.
- 2 Интенсивность мощного монохроматического лазерного излучения с длиной волны  $\lambda = 1 \text{ мкм}$  равна  $I = 2 \text{ Вт/см}^2$ . Пучок лазера направляют по нормали на плоскую поглощающую поверхность. Определите: а) давление света; б) число фотонов, падающих на  $S = 1 \text{ мм}^2$  поверхности за время  $t = 1 \text{ с}$ .
- 3 Определите длину волны де Броиля: а) электрона, движущегося со скоростью, модуль которой  $v = 6 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ ; б) протона, движущегося с такой же скоростью; в) пули массой 9 г, модуль скорости которой равен 800 м/с.



*Для углублённого уровня*

- ✓ 4 Сделайте сообщение на тему «Опыты Вавилова по наблюдению квантовых флуктуаций света», используя материалы интернет-ресурса <http://gotourl.ru/7130>.

§ 70

### Планетарная модель атома

По-видимому, первым указанием на то, что атом имеет сложную структуру, а не является неделимой частицей, как считалось с древнейших времён, явилось установление М. Фарадеем в 1833 г. законов электролиза. Открытие английским физиком Джозефом Джоном Томсоном (1856–1940) при изучении разрядов в газах и нагревании вещества лёгкой отрицательно

заряженной микрочастицы, названной в дальнейшем электроном, свидетельствовало о том, что эти частицы входят в состав всех атомов. В 1896 г. французский физик Анри Беккерель (1852–1908) обнаружил, что соли урана испускают невидимые лучи, способные проникать через бумагу и вызывать почернение фотопластинок.

Явление испускания некоторыми веществами невидимых лучей, способных проникать через непрозрачные предметы, получило название *радиоактивность*.

В 1896 г. английский физик Эрнест Резерфорд (1871–1937), пропуская радиоактивное излучение радия через магнитное поле, обнаружил, что оно распадается на три части (рис. 239). Одна из этих частей, названная *гамма-частицами*, не отклонялась магнитным полем. Две другие составляющие излучения отклонялись в противоположные друг другу стороны. Составляющие их частицы стали называть *альфа- и бета-частицами*. В дальнейшем было выяснено, что *бета-частицы* – это электроны, *альфа-частицы* – ядра гелия, а *гамма-частицы* – фотоны коротковолнового *электромагнитного излучения (гамма-излучения)*. Масса альфа-частицы примерно в 8000 раз больше массы электрона. Эта частица имеет положительный заряд, который в 2 раза больше элементарного. Альфа-частицы вылетают из радия с огромной скоростью, модуль которой всего лишь примерно в 15 раз меньше скорости света в вакууме.

Все перечисленные факты свидетельствовали о том, что атом – сложное образование и в его состав должны входить как отрицательно заряженные, так и положительно заряженные микрочастицы.

Одну из первых моделей строения атома в 1903 г. предложил Дж. Томсон. Согласно его модели, атом имеет форму шара, равномерно заполненного положительным зарядом, внутри которого находятся отрицательно заряженные частицы – электроны. Радиус этого шара из оценок расстояния между центрами атомов в кристаллах считали равным  $\sim 10^{-10}$  м.

В 1906 г. Резерфорд предложил проверить модель Томсона, бомбардируя атомы тяжёлых элементов альфа-частицами. Идея опытов Резерфорда состояла в том, что лёгкие электроны не могут существенно изменить характер движения налетающих на них тяжёлых быстролетящих альфа-частич. Поэтому по изменению характера движения альфа-частич в результате

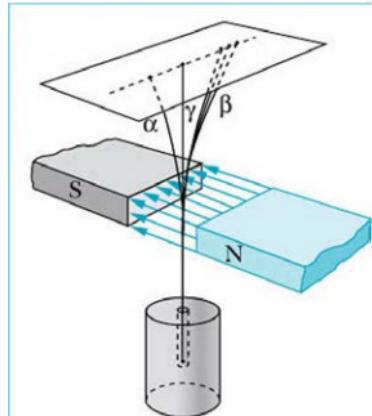


Рис. 239

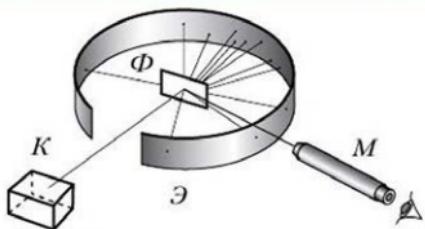


Рис. 240

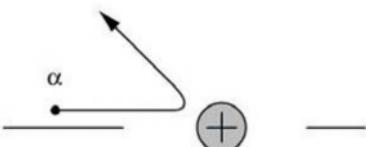


Рис. 241

их взаимодействия с атомом можно сделать вывод о размерах положительно заряженной части атома.

Схема установки Резерфорда показана на рис. 240. Из узкого длинного канала, просверленного в свинцовом контейнере  $K$ , внутри которого находился радий, альфа-частицы налетали на тонкую золотую фольгу  $\Phi$ . Вокруг фольги располагался экран  $\mathcal{E}$ , покрытый слоем сульфида цинка. При попадании альфа-частицы на экран в месте столкновения появлялась вспышка. Наблюдение этих вспышек осуществлялось с помощью микроскопа  $M$ .

Проводившие эти исследования Э. Марсден и Х. Гейгер, сотрудники Резерфорда, установили, что большинство альфа-частиц пролетало через фольгу, практически не изменяя направления своего движения, и лишь небольшая доля частиц отклонялась на углы около  $50^\circ$ . Однако наряду с этим был получен и удививший исследователей результат: лишь одна из примерно 20 000 альфа-частиц, упавших на фольгу, отклонялась на угол, близкий к  $180^\circ$ , т. е. возвращалась назад (рис. 241).

Проведя серию аналогичных экспериментов с другими веществами, Резерфорд понял, что столь малая доля возвращающихся назад альфа-частиц — закономерность. Полученный результат доказал несостоятельность модели Томсона. Объяснить это можно тем, что *массивные быстрые альфа-частицы сталкиваются в атоме с очень малым по размеру, но еще более массивным, чем они сами, положительно заряженным объектом*. В дальнейшем этот объект назвали ядром атома. По оценкам Резерфорда, размер атомного ядра равен  $\sim 10^{-15}$  м.

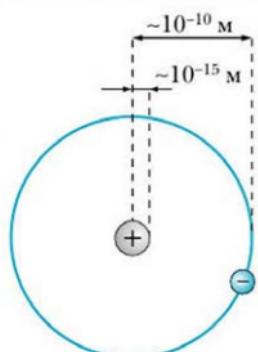


Рис. 242

Результаты экспериментов позволили Резерфорду предложить ядерную (планетарную) модель атома (рис. 242). Согласно этой модели, атом состоит из положительно заряженного ядра, вокруг которого под действием электрических сил

притяжения движутся отрицательно заряженные электроны. Ядро занимает  $\sim 10^{-12}$  долю объёма всего атома. Поэтому атом часто называют «пустым». При этом на ядро приходится 99,9 % массы атома. Заряд ядра равен модулю суммарного заряда всех движущихся вокруг него электронов.

Предложенную Резерфордом планетарную модель атома до сих пор используют при объяснении ряда явлений и свойств вещества.

### Вопросы

- 1 Какие явления и эксперименты привели к идее о сложном строении атомов?
- 2 Какое явление называют радиоактивностью?
- 3 Что представляют собой альфа-, бета- и гамма-частицы?
- 4 Какую модель атома предложил Томсон?
- 5 Опишите опыт Резерфорда по рассеянию альфа-частиц.
- 6 Какой результат опытов Резерфорда показал несостоятельность модели атома Томсона?
- 7 Опишите планетарную модель атома.

### Упражнения

- 1 Объясните показанное на рис. 239 движение альфа-, бета- и гамма-частиц в магнитном поле.
- 2 Ядро атома водорода состоит из одного протона. Считая, что электрон движется вокруг ядра по круговой орбите с радиусом  $r = 0,5 \cdot 10^{-10}$  м, определите модуль скорости его движения и частоту обращения. Считайте, что масса протона  $m_p \approx 1,7 \cdot 10^{-27}$  кг, а масса электрона  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.

§ 71

### Первый постулат Бора. Правило квантования орбит

Согласно модели атома, предложенной Резерфордом, каждый электрон в атоме движется вокруг ядра по замкнутой криволинейной траектории, т. е. имеет отличное от нуля ускорение. При движении заряда с ускорением он, согласно классическим законам электромагнетизма, должен излучать электромагнитную волну, непрерывно уносящую энергию. Поэтому в теряющем энергию атоме электрон должен был бы со временем упасть на



ядро. В результате атом прекратил бы существование. Однако экспериментально установлено, что в обычном состоянии большинство атомов не излучают и существуют сколь угодно долго. Атомы излучают электромагнитные волны только при определённых условиях, не прекращая при этом своего существования. Почему же атомы в обычном состоянии не излучают?

Ответ на этот вопрос дал в 1913 г. датский физик Нильс Бор (1885–1962). Он выдвинул предположение, что электроны, движущиеся вокруг ядра по определённым орбитам, не излучают. Такие орбиты Бор назвал *стационарными*. В настоящее время это положение называют *первым постулатом Бора*:

**!** существуют особые стационарные состояния атома, в каждом из которых электроны могут двигаться лишь по стационарным орбитам, не излучая при этом энергии.

Согласно Бору, длина  $L$  каждой стационарной орбиты равна целому числу  $n$  длин  $\lambda_{\text{б}}$  волн де Бройля (см. уравнение (4) в § 69), соответствующих движущемуся по этой орбите электрону:

$$\boxed{!} \quad L = n \cdot \lambda_{\text{б}} = n \cdot \frac{\hbar}{m_e \cdot v}, \quad (1)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$ ,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $m_e$  – масса электрона,  $v$  – модуль его скорости. Позднее уравнение (1) стали называть *правилом квантования Бора*, а  $n$  – *главным квантовым числом*.

Первый постулат и правило квантования позволили Бору построить теорию простейшего из атомов – атома водорода. Рассмотрим, следуя Бору, основные положения этой теории.

Атом водорода состоит из ядра, представляющего собой один протон, и одного электрона, движущегося вокруг этого ядра по круговой орбите. Пусть радиус орбиты равен  $r$ , а модуль скорости электрона равен  $v$ . Тогда модуль центростремительного ускорения электрона равен  $\frac{v^2}{r}$ , а модуль создающей это ускорение кулоновской силы притяжения со стороны ядра  $F_{\text{пр}} = \frac{k \cdot e^2}{r^2}$ , где  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$ .

Согласно второму закону Ньютона:

$$m_e \cdot \frac{v^2}{r} = k \cdot \frac{e^2}{r^2}. \quad (2)$$

Поскольку длина круговой орбиты  $L = 2\pi \cdot r$ , правило квантования (1) принимает вид:

$$2\pi \cdot r = n \cdot \frac{\hbar}{m_e \cdot v}. \quad (3)$$

Из системы уравнений (2) и (3) получаем, что радиус  $r_n$  стационарной орбиты, соответствующей главному квантовому числу  $n$ , определяется выражением:

$$r_n = \frac{\hbar^2}{4\pi^2 \cdot k \cdot m_e \cdot e^2} \cdot n^2. \quad (4)$$

Таким образом,

**!** радиусы стационарных орбит имеют дискретные значения, пропорциональные квадрату главного квантового числа.

В качестве примера на рис. 243 показаны первые пять стационарных орбит электрона в атоме водорода.

Если задано главное квантовое число  $n$ , то, используя формулу (4), можно вычислить радиус соответствующей стационарной орбиты, а затем, используя формулу (3), и модуль скорости движения электрона по этой орбите. Это позволит определить как кинетическую энергию  $K_n$  электрона, так и потенциальную энергию  $\Pi_n$  электрического взаимодействия электрона с ядром атома. При этом считают, что потенциальная энергия взаимодействия электрона с ядром равна нулю, когда электрон находится вне атома, т. е. удалён от ядра на достаточно большое расстояние. Сумму  $E_n$  кинетической  $K_n$  и потенциальной  $\Pi_n$  энергий называют *энергией  $n$ -го энергетического уровня*. Из сказанного следует, что для электрона в атоме водорода

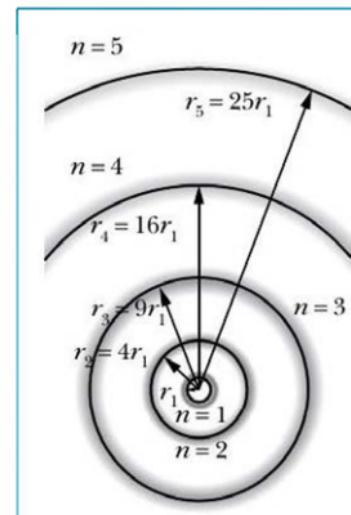
$$E_n = K_n + \Pi_n = \frac{m_e \cdot v_n^2}{2} - \frac{k \cdot e^2}{r_n} = -\frac{2\pi^2 \cdot k^2 \cdot m_e \cdot e^4}{\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}. \quad (5)$$

Об электроне, который движется по орбите вокруг ядра, т. е. связан с атомом, говорят, что он находится в *связанном состоянии*.

Из выражения (5) следует, что

**!** связанным состояниям электрона соответствует дискретный набор отрицательных значений энергии  $E_n$ .

Для наглядного представления энергетических уровней атома используют *энергетическую диаграмму*. На этой диаграмме каждый энергетиче-



**Рис. 243** Стационарные орбиты электрона в атоме водорода

ский уровень изображают в виде горизонтальной линии, перпендикулярной оси, на которой указывают энергию данного уровня. В качестве примера на рис. 244 приведена энергетическая диаграмма атома водорода.

**!** Электрон в атоме может находиться бесконечно долго только на стационарном уровне с минимальной энергией, т. е. на уровне, соответствующем  $n = 1$ . Такое состояние атома называют *основным* или *нормальным состоянием*. Все остальные стационарные состояния называют *воздушными*.

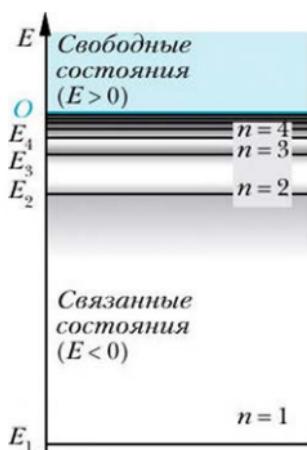


Рис. 244

В большинстве возбуждённых состояний атом может находиться в течение времени, не превышающего  $10^{-8}$  с. Исключение составляют лишь так называемые *метастабильные возбуждённые состояния*. Время пребывания в этих состояниях также ограничено и не превышает дольек секунды.

Из формулы (4) следует, что при  $n \rightarrow \infty$  электрон удаляется от ядра на бесконечно большое расстояние. При этом энергия его связи с ядром стремится к нулю, т. е. электрон становится свободным. В свободном состоянии кинетическая энергия электрона может принимать любые значения. Поэтому на рис. 244 часть энергетической диаграммы, соответствующая свободным состояниям электрона, изображена в виде сплошной области.

### Вопросы

- Почему планетарная модель атома Резерфорда противоречит классической теории электромагнетизма?
- Какие орбиты называют стационарными?
- Сформулируйте: а) первый постулат Бора; б) правило квантования Бора.
- Что называют главным квантовым числом?
- Как зависит радиус стационарной орбиты от главного квантового числа?
- Что называют энергией  $n$ -го энергетического уровня?

- 7 — Что представляет собой энергетическая диаграмма атома?
- 8 — Какое состояние атома называют: а) основным; б) возбуждённым?

### Упражнения

- 1 — Вычислите радиус орбиты электрона атома водорода, находящегося в основном состоянии. (Этот радиус часто называют радиусом атома водорода, находящегося в основном состоянии.) Определите длину  $\lambda_l$ , волны де Броиля, соответствующую движущемуся по этой орбите электрону.
- 2 — Определите модуль скорости движения электрона из упражнения 1.
- 3 — Определите энергию основного состояния электрона в атоме водорода.



### Для углублённого уровня

- ✓ 4 — Выведите формулу для расчёта потенциальной энергии  $P_n$  электрического взаимодействия электрона с ядром атома водорода. Докажите, что модуль этой энергии в 2 раза превышает кинетическую энергию  $K_n$  этого электрона.

## § 72

### Второй постулат Бора.

### Спектры испускания и поглощения

*Второй постулат Бора* гласит:

! атом излучает фотоны только при переходе из стационарного состояния с большей энергией  $E_k$  в стационарное состояние с меньшей энергией  $E_m$ . При этом энергия излучённого фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$h \cdot v_{km} = E_k - E_m. \quad (1)$$

Соотношение (1) позволяет рассчитать частоту  $v_{km}$  излучения, соответствующего фотону, который образуется при переходе электрона с орбиты, соответствующей главному квантовому числу  $k$ , на орбиту, соответствующую меньшему главному квантовому числу  $m$ :

$$v_{km} = \frac{E_k - E_m}{h}. \quad (2)$$

Для атома водорода с учётом уравнения (5) из § 71 получаем формулу:

$$v_{km} = \frac{2\pi^2 \cdot k^2 \cdot m_e \cdot e^4}{h^3} \cdot \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (3)$$

которая полностью согласуется с ранее установленными закономерностями в спектре водорода.

Атом химического элемента имеет свой уникальный набор стационарных орбит, отличающий данный элемент от других химических элементов. Поэтому атом данного химического элемента может излучать фотоны, имеющие строго определённые энергии, т. е. электромагнитные волны строго определённых частот.

**Набор частот электромагнитных волн (фотонов), излучаемых атомом данного химического элемента, называют спектром излучения этого элемента.**

Спектр излучения уединённого (не взаимодействующего с окружением) атома представляет собой на шкале электромагнитных волн определённый набор линий. Поэтому такие спектры называют *линейчатыми*. Примеры

таких спектров для атомов водорода и гелия приведены на цветной вклейке, рис. VIII.

На рис. 245 представлена энергетическая диаграмма атома водорода, на которой отмечены первые шесть стационарных уровней. Стрелками показаны переходы с верхних энергетических уровней на нижние, соответствующие излучениям атома. Эти переходы разделены на серии, каждой серии присвоена фамилия учёного, впервые описавшего её. Рядом указано название диапазона частот, к которому относится серия (ИК – инфракрасное излучение, УФ – ультрафиолетовое), и год открытия серии.

Атом может не только излучать, но и поглощать энергию электромагнитного излучения. Согласно теории Бора, поглощая фотон, атом переходит из стационарного состояния с меньшей энер-

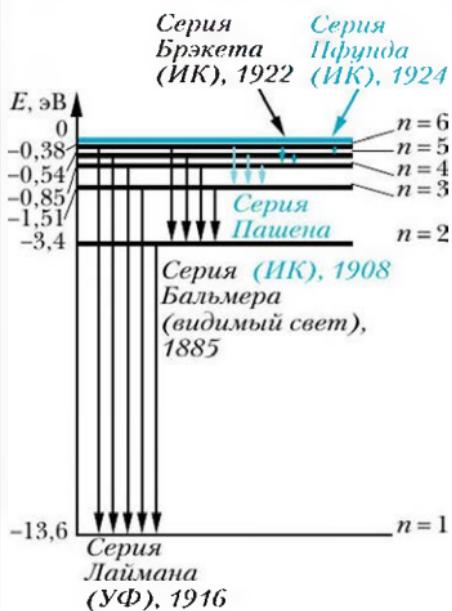


Рис. 245

гий  $E_m$  в стационарное состояние с большей энергией  $E_k$ . При этом частота  $v_{km}$  поглощённого фотона удовлетворяет соотношению, аналогичному (1):

$$\hbar \cdot v_{km} = E_k - E_m. \quad (4)$$

Из соотношений (1) и (4) следует, что частоты электромагнитных волн (фотонов), которые атом может поглощать, совпадают с частотами волн (фотонов), которые атом может излучать.

**Набор частот электромагнитных волн (фотонов), поглощаемых атомом данного химического элемента, называют спектром поглощения этого элемента.**

Из сказанного следует, что линии в спектрах поглощения и излучения уединённого атома данного элемента совпадают. В этом можно убедиться, сопоставив такие спектры (см. цветную вклейку, рис. VIII).

Отметим, что переход атома из одного стационарного состояния в другое стационарное состояние с большей энергией может происходить не только в результате поглощения фотона, но и в результате взаимодействия с другими атомами или элементарными частицами. Если атом, находившийся в основном стационарном состоянии, поглотит энергию, превышающую  $|E_1|$ , то его электрон перейдёт из основного состояния в свободное. Поэтому энергию, равную  $|E_1|$ , называют *энергией ионизации*.

Движение и взаимодействие атомов друг с другом в веществе приводят к изменению спектров как излучения, так и поглощения. Наблюдавшиеся в спектре уединённого атома линии становятся шире (уширяются). Это связано с тем, что каждый атом движется и взаимодействует со своими соседями по-разному. Поэтому разность энергий  $E_k - E_m$  для каждого из атомов данного химического элемента несколько различается. Результатом этого будет наблюдаемое уширение спектральных линий от набора атомов данного химического элемента.

При больших скоростях движений атомов и молекул и сильном взаимодействии их друг с другом уширенные линии в спектре сливаются и спектр становится сплошным.

Различие в спектрах излучения и поглощения разных атомов и молекул позволяет не только обнаружить наличие атомов того или иного химического элемента, но и исследовать особенности их взаимодействия (как между собой, так и с окружением). Раздел физики, изучающий спектры излучения и поглощения разных объектов, называют *спектроскопией*.

В заключение отметим, что модель атома Резерфорда — Бора, позволившая объяснить наблюдаемые в эксперименте спектры атома водорода, оказалась неприменимой для описания более сложных атомов. Искусствен-

ное соединение законов Ньютона и Кулона из классической физики с идеей Планка о квантовании энергии привело к противоречию с результатами экспериментов. Однако модель Резерфорда – Бора послужила одним из толчков для создания современной квантовой теории. Было установлено, что гениально угаданные Бором постулаты являются следствиями основных положений этой теории.

### Вопросы

- 1 Сформулируйте второй постулат Бора.
- 2 Что называют: а) спектром излучения; б) спектром поглощения?
- 3 Что называют энергией ионизации?
- 4 Почему спектры уединённого атома являются линейчатыми?
- 5 Как соотносятся спектры поглощения и излучения уединённого атома?
- 6 Перечислите серии переходов в атоме водорода. К каким диапазонам электромагнитного излучения относятся эти серии?
- 7 При каких условиях получается сплошной спектр?
- 8 Что можно определить, зная спектр излучения (поглощения) вещества?

### Упражнения

- 1 Определите, как изменится энергия атома в результате излучения фотона, которому соответствует электромагнитное излучение с длиной волны 0,5 мкм.
- 2 Определите энергию фотона, соответствующего излучению атома водорода с наибольшей длиной волны: а) в серии Лаймана; б) серии Бальмера.
- 3 Определите энергию ионизации атома водорода.



### § 73

### Лазеры

Вы уже знаете, что атом, находящийся в возбуждённом состоянии с энергией  $E_b$ , с течением времени самопроизвольно переходит в стационарное состояние с меньшей энергией  $E_m$ . Сопровождающее такие переходы излучение атома обусловлено внутренними процессами в этом ато-

ме и имеет вероятностный характер. Поэтому самопроизвольное излучение обычно называют *спонтанным*. Таким образом, спонтанные излучения разных атомов не согласованы друг с другом.

В 1917 г. Эйнштейн высказал предположение, что возбуждённый атом может излучать не только самопроизвольно (спонтанно), но и в результате действия падающего на него света. Если энергия падающего фотона равна энергии перехода  $E_k - E_m$ , то под действием этого фотона происходит переход, сопровождающийся излучением ещё одного фотона. Такой переход называли индуцированным (или вынужденным) переходом, а сопровождающее его излучение – *индуцированным (или вынужденным) излучением*.

Вынужденное излучение принципиально отличается от спонтанного. Это обусловлено тем, что *индуцированный фотон по своим свойствам не отличается от фотона, вызвавшего излучение*.



Вынужденное излучение и вызвавшее его излучение имеют одинаковые фазы, поляризации и направления распространения.

Можно сказать, что индуцированный фотон и фотон, вызвавший его излучение, являются «близнецами». Эти два фотона-близнеца, в свою очередь, встретившись с парой возбуждённых соответствующим образом атомов, могут индуцировать появление следующих «близнецов» и т. д. В результате нарастающего лавинообразного процесса может быть получено мощное когерентное (самосогласованное) излучение, состоящее из фотонов-близнецов.

Для создания интенсивного вынужденного излучения необходимо, чтобы в среде имелось достаточно много атомов, находящихся в соответствующем возбуждённом состоянии. Такую среду называют *активной средой*. В качестве активной среды обычно используют вещества, атомы которых могут находиться в метастабильном состоянии (см. § 71).

Возможность усиления электромагнитной волны, которое обусловлено вынужденным излучением, предсказал в 1939 г. российский физик Валентин Александрович Фабрикант (1907–1991). В 1954 г. российские учёные Николай Геннадьевич Басов (1922–2001), Александр Михайлович Прохоров (1916–2002) и американский физик Чарльз Таунс (1915–2015), используя явление вынужденного излучения, создали генератор когерентных радиоволн с длиной волны  $\lambda = 1,27$  см. В 1964 г. эти учёные были удостоены Нобелевской премии. В 1960 г. американский физик Теодор Майман (1927–2007) сконструировал первый лазер, работающий в видимом диапазоне длин волн.

В настоящее время созданы различные типы лазеров. (Это слово образовано из первых букв выражения *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, означающего «усиление света с помощью вынужденного излучения».) В зависимости от агрегатного состояния активной среды ла-

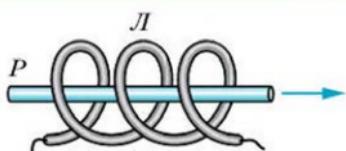


Рис. 246

Основные элементы твёрдотельного лазера: ксеноновая лампа  $L$ , работающая в импульсном режиме, и кристалл рубина  $P$  цилиндрической формы

мы длиной примерно 20 см и диаметром до 2 см. Кристалл окружён ксеноновой лампой ( $L$ ), имеющей вид спирали. Параллельные друг другу торцы рубинового стержня тщательно отшлифованы. Один из них делают зеркальным, а другой частично прозрачным.

При подключении заряженного конденсатора к электродам ксеноновой лампы в ней возникает газовый разряд. В результате лампа испускает импульс света длительностью  $\sim 10^{-3}$  с. Мощность такого импульса может достигать  $10^7$  Вт. В результате поглощения фотонов электроны атомов хрома переходят с основного энергетического уровня  $E_1$  на уровень  $E_2$  (рис. 247). Этот процесс часто называют *оптической накачкой* среды.

Вероятность перехода электронов атомов хрома с уровня  $E_2$  на уровень  $E_1$  примерно в 100 раз больше, чем на основной уровень  $E_1$ . Поэтому большинство возбуждённых электронов через время  $\tau_3 = 10^{-8}$  с переходят с уровня  $E_2$  на уровень  $E_1$ . При этом излучения не происходит, а соответствующий избыток энергии передаётся кристаллической решётке рубина.

Уровень  $E_2$  является метастабильным. Время жизни электронов на этом уровне  $\tau_2 = 10^{-3}$  с. Поэтому за время оптической накачки в кристалле рубина образуется достаточно большое число возбуждённых атомов хрома. Другими словами, кристалл становится активной средой.

Каждый из спонтанно излучённых фотонов, образующихся при переходе электронов в атомах хрома с уровня  $E_2$  на уровень  $E_1$ , может индуцировать появление «близнец». Фотоны, имеющие составляющую скорости, перпендикулярную оси рубинового стержня,

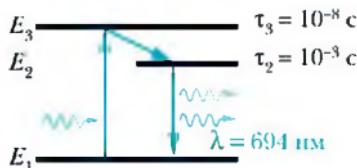


Рис. 247

покидают кристалл через его боковые стенки (рис. 248). Напротив, спонтанно излучённый фотон, движущийся вдоль оси стержня, вызывает лавину «близнецов». Эта лавина многократно усиливается, проходя вдоль стержня и отражаясь от его торцов. Она выходит через частично прозрачный торец кристалла в виде кратковременного импульса красного цвета. Выходящее излучение называют *лазерным излучением*.

Мы рассмотрели принцип действия лазера, работающего в импульсном режиме. Созданы лазеры, работающие в непрерывном режиме. В газовых и полупроводниковых лазерах среда становится активной за счёт протекания через неё электрического тока. Существуют лазеры, в которых в энергию светового излучения преобразуются химическая и тепловая энергии.

Лазеры способны создавать когерентные почти параллельные пучки света. Достигший Луны лазерный пучок света, посланный с Земли, создал на её поверхности пятно диаметром около 3 км, что позволило определить расстояние между лазером и местом отражения на поверхности Луны с точностью примерно 0,5 м.

Лазеры являются самыми мощными источниками света. Созданы лазеры, способные за время  $\sim 10^{-13}$  с излучать мощность  $\sim 10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup> в очень узком спектральном интервале. При этом напряжённость электрического поля в световой волне лазера превышает напряжённость электрического поля внутри атома. Указанными особенностями лазерного излучения и определяется необычайно широкий диапазон его применения.

Лазерные лучи применяют при обработке металлов, в медицине, физических, химических и биологических исследованиях. В медицине лазерный луч используют в качестве скальпеля, которым выполняют почти бескровные разрезы и одновременно прижигают кровеносные сосуды. С помощью маломощных лазерных диодов считывают информацию с DVD-дисков. Лазерные диоды используют в записывающих головках лазерных принтеров, цифровых печатных машинах, а также для создания голограмм и 3D-изображений. Уже появились телевизоры и проекторы на основе лазерных излучателей. Такие приборы отличаются сверхвысоким качеством изображе-

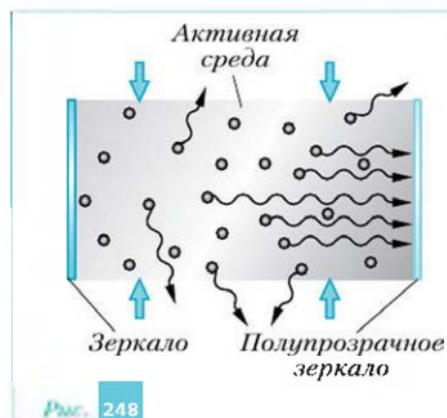


Рис. 248

ния. Одним из перспективных применений лазеров является их использование для осуществления передачи информации. Так, по одному лазерному лучу можно осуществить одновременную передачу более 100 телевизионных программ. С помощью сверхмощных лазеров в настоящее время проводят опыты, целью которых является осуществление управляемой термоядерной реакции.

### Вопросы

- 1 Какой источник излучения называют лазером?
- 2 Какое излучение атома называют: а) спонтанным; б) вынужденным?
- 3 Являются ли спонтанные излучения разных атомов согласованными?
- 4 При каких условиях может возникнуть вынужденное излучение?
- 5 Почему индуцированный фотон и фотон, вызвавший его, называют «близнецами»?
- 6 Какую среду называют активной? Какими способами можно создать такую среду?
- 7 Расскажите об устройстве и принципе действия рубинового лазера.
- 8 Опишите основные особенности лазерного излучения.
- 9 Приведите примеры использования лазеров.

### Упражнение



Подготовьте реферат об использовании лазеров в современной науке, технике, бытовых приборах и устройствах, используя материалы интернет-ресурса <http://gotourl.ru/7131>.

# КВАНТОВАЯ ФИЗИКА. СТРОЕНИЕ АТОМА

Согласно Планку, электромагнитное излучение испускается и поглощается отдельными порциями — **квантами**.

Энергия кванта прямо пропорциональна частоте  $\nu$  излучения:  
 $E = h \cdot \nu$ , где  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж · с — постоянная Планка

**Фотоэлектронной эмиссией (внешним фотоэффектом)** называют процесс испускания электронов веществом под действием электромагнитного излучения

## Основные законы внешнего фотоэффекта

1. **Закон Столетова.** Сила фототока насыщения  $I_{\text{нас}}$  при неизменной частоте падающего света прямо пропорциональна его интенсивности  $I$ .

2. Максимальная кинетическая энергия выбитого электрона не зависит от интенсивности падающего света, а определяется частотой  $\nu$  света и работой выхода  $A_{\text{вых}}$  электрона из фотокатода (**уравнение Эйнштейна для фотоэффекта**):

$$h \cdot \nu = A_{\text{вых}} + \frac{m \cdot v_{\text{max}}^2}{2},$$

где  $m$  и  $v_{\text{max}}$  — масса и модуль максимальной скорости выбитого электрона.

3. Фототок прекращается, если частота  $\nu$  освещдающего фотокатод света становится меньше некоторой пороговой частоты  $\nu_{\text{пор}}$ , зависящей от состояния поверхности и рода вещества фотокатода

Свет проявляет свойства, присущие как корпускулам, так и волнам

## Корпускулярно-волновой дуализм является общим свойством материи.

Согласно де Броилю, если модуль импульса объекта равен  $p$ , то ему соответствует волна, длина которой  $\lambda = \frac{h}{p}$

## Соотношения неопределённостей Гейзенberга

Произведение неопределённостей  $\Delta x$  и  $\Delta p_x$  при измерении координаты частицы и проекции её импульса на ту же ось удовлетворяют неравенству  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h$ , а произведение неопределённостей  $\Delta t$  и  $\Delta E$  при измерении времени  $t$  пребывания частицы в состоянии с энергией  $E$  — неравенству  $\Delta E \cdot \Delta t \geq h$ .

Невозможно установить одновременно точные значения координаты микрообъекта и проекции его импульса на ту же координатную ось. (Более точное определение координаты приводит к менее точному определению проекции импульса.)

### **Планетарная модель Резерфорда**

Атом состоит из положительно заряженного ядра, вокруг которого под действием электрических сил притяжения движутся отрицательно заряженные электроны. Ядро занимает  $10^{-15}$  часть объёма всего атома. На ядро приходится ~99,9 % массы атома

### **Постулаты Бора**

1. Существуют особые стационарные состояния атома, в каждом из которых электроны могут двигаться лишь по определённым стационарным орбитам, не излучая при этом энергии.

2. Атом излучает фотоны только при переходе из стационарного состояния с большей энергией  $E_k$  в стационарное состояние с меньшей энергией  $E_m$ . При этом энергия излучённого фотона равна разности энергий стационарных состояний:  $h \cdot v_{km} = E_k - E_m$

### **Правило квантования Бора**

Длина  $L$  каждой стационарной орбиты равна целому числу  $n$  длин волн де Бройля  $\lambda_B$ :

$$L = n \cdot \lambda_B, \text{ где } n = 1, 2, 3, \dots \text{ — главное квантовое число}$$

**Набор частот электромагнитных волн (фотонов), излучаемых атомом данного химического элемента, называют спектром излучения этого элемента, а поглощаемых — его спектром поглощения.**

Для данного уединённого атома линии в спектрах излучения и поглощения совпадают

# Атомное ядро. Элементарные частицы

Вам уже известно, что ядро атома состоит из положительно заряженных протонов и не имеющих заряда нейтронов. Установить это удалось лишь в 20-х гг. прошлого столетия. В этой главе вам предстоит познакомиться с относительно молодыми разделами физики: физикой атомного ядра и элементарных частиц. Этим разделам физической науки менее сотни лет, и в то же время их достижения во многом определяют наш быт. В частности, мы потребляем энергию, вырабатываемую на атомных электростанциях. Рентгеновское и гамма-излучения, радиоактивные изотопы находят широкое применение в медицине и технике.

До 30-х гг. прошлого века строение вещества казалось сравнительно простым. Представлялось, что всё окружающее нас вещество состоит из частиц трёх видов: электронов, протонов и нейтронов. Эти частицы называли **элементарными**. К элементарным отнесли и ещё одну частицу — фотон. Однако вскоре выяснилось, что не всё так просто: **число элементарных частиц много больше четырёх!**

Физика атомного ядра и элементарных частиц весьма сложна, так как базируется на законах квантовой механики, создание которой нельзя считать законченным и в наши дни. Поэтому мы вынуждены ограничиться лишь качественным описанием современных представлений о строении атомного ядра и свойствах элементарных частиц. Мы даже не станем перечислять все характеристики этих частиц, которые сейчас используют специалисты в этой области. Вместе с тем представляется целесообразным напомнить некоторые факты, с которыми вы познакомились ранее.

**§ 74****Состав ядра**

После открытия радиоактивности, основываясь на планетарной модели атома, Резерфорд предположил, что атомное ядро имеет сложную структуру. С помощью масс-спектрографа (см. § 20) было доказано, что массы атомов всех химических элементов приблизительно кратны массе атома водорода. Поэтому Резерфорд пришёл к выводу, что в состав атомного ядра любого химического элемента входят ядра атома водорода.

Чтобы проверить это, Резерфорд применил испытанный метод — бомбардировку атомов разных элементов летящими с огромной скоростью альфа-частицами, образующимися при радиоактивном распаде радия.

В 1919 г. Резерфорд обнаружил, что при взаимодействии альфа-частиц с атомами азота появляются какие-то новые заряженные частицы. Исследуя действие на эти частицы электрических и магнитных полей, удалось установить, что эти частицы имеют положительный заряд, равный элементарному, а их масса равна массе самого лёгкого изотона водорода — протия. Эти частицы назвали *протонами* (от греч. πρῶτος — «первый»). Появление протонов было обнаружено при бомбардировке альфа-частицами и других элементов (бора, фтора, натрия, фосфора, алюминия и т. д.). На основании этих опытов было сделано заключение, что **ядра всех элементов содержат протоны.**

**Количество протонов в атомном ядре называют зарядовым числом этого ядра.**

Зарядовое число обозначают буквой  $Z$ . Например, зарядовое число ядра атома водорода равно 1, зарядовое число ядра атома гелия равно 2, а зарядовое число ядра атома урана равно 92.



**Зарядовое число ядра атома равно порядковому номеру соответствующего этому атому химического элемента в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева.**

Если предположить, что ядро любого атома состоит только из протонов, то масса ядра должна быть близка к  $m = Z \cdot m_p$ . Однако, обратившись к Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева, легко увидеть, что атомные массы элементов отличаются от суммарной массы протонов, содер-



Согласно современным данным, масса протона  $m_p = 1,6726231 \cdot 10^{-27}$  кг, а модуль его заряда  $e = 1,60217733 \cdot 10^{-19}$  Кл.

жащихся в их ядрах (за исключением протия: его ядро содержит 1 протон, и его атомная масса примерно равна 1 а. е. м.). Ядро второго элемента — гелия — содержит 2 протона, а его атомная масса равна 4 а. е. м. Ядро атома урана содержит 92 протона, а его атомная масса равна 238 а. е. м.

На основании этого Резерфорд в 1920 г. предположил, что в состав ядра входят и незаряженные частицы с массой, близкой к массе протона. Такие частицы Резерфорд назвал *нейтронами* (от лат. neuter — «ни тот, ни другой, или нейтральный»). Однако Резерфорду так и не удалось обнаружить эти частицы.

Открыть нейтрон удалось в 1932 г. английскому физику Джеймсу Чедвику (1891–1974). Облучая бериллий альфа-частицами, он обнаружил частицы с массой, близкой к массе протона. При этом на характер движения этих частиц не влияли ни электрическое, ни магнитное поля. На основании этого был сделан вывод, что эти частицы не имеют электрического заряда и являются предсказанными Резерфордом нейтронами.

Согласно современным данным, масса нейтрона  $m_n = 1,6749286 \cdot 10^{-27}$  кг = 1,008664902 а. е. м., что всего лишь примерно на две массы электрона превышает массу протона. Одной из загадок нейтронов было то, что их не удавалось обнаружить в значительном количестве в свободном состоянии — вне атомного ядра. В дальнейшем установили, что это связано с нестабильностью нейтрона: в свободном состоянии он довольно быстро (примерно за 15 мин) самопроизвольно превращается в протон, электрон и так называемое электронное антинейтрино.

Зная об обнаружении нейтрона, независимо друг от друга наш соотечественник Дмитрий Дмитриевич Иваненко (1904–1994) и немецкий физик Вернер Гейзенберг предложили модель ядра, состоящего из протонов и нейтронов. В дальнейшем выяснилось, что протоны и нейтроны, находящиеся в ядре, непрерывно превращаются друг в друга. Поэтому эти частицы, когда они находятся в ядре, называют *нуклонами*.

### Общее число нуклонов в ядре называют массовым числом.

Массовое число обозначают буквой  $A$ . Из сказанного следует, что массовое число атомного ядра равно сумме его зарядового числа  $Z$  и числа  $N$  нейтронов в этом ядре:

$$A = Z + N. \quad (1)$$



Напомним, что атомная единица массы (а. е. м.) равна 1/12 массы изотопа углерода. В этих единицах масса протона, согласно современным данным, равна  $m_p = 1,007276470$  а. е. м. Массу атомов в атомных единицах массы обычно указывают с точностью до целой единицы. Этого правила будем обычно придерживаться и мы.

Напомним, что в природе встречаются атомы, ядра которых содержат одинаковое число протонов, но разное число нейтронов. Их называют **изотопами**.

**!** Изотопы одного химического элемента обладают разной массой, но проявляют одинаковые химические свойства.

Изотоп обозначают символом элемента с двумя индексами. Верхний индекс показывает общее число нуклонов в ядре, нижний — число протонов в ядре.

Например, изотоп углерода, с помощью которого определяется атомная единица массы, обозначают  $^{12}_{\text{6}}\text{C}$ .

Ядра атома водорода представлены в природе тремя изотопами: протием ( $^1_1\text{H}$ ), дейтерием ( $^2_1\text{H}$ ) и тритием ( $^3_1\text{H}$ ). Как видно из обозначения этих изотопов, протий содержит в себе только один протон, дейтерий — один протон и один нейtron, тритий — один протон и два нейтрана. В ядре изотопа урана  $^{238}_{\text{92}}\text{U}$  содержится  $Z = 92$  протона и  $N = A - Z = 238 - 92 = 146$  нейтронов.

В соответствии с введёнными обозначениями реакцию, происходящую при взаимодействии ядра азота с альфа-частицей (в результате которой Резерфорд обнаружил протон  ${}_1^1p$ ), записывают следующим образом:



Реакция, в которой Чедвик обнаружил нейтрон  ${}_0^1n$ , может быть записана в виде:



### Вопросы

1. Почему Резерфорд пришёл к выводу, что ядро атома является сложным?
2. В результате какого процесса был обнаружен протон? Какие характеристики протона вы знаете?
3. Кем был обнаружен нейтрон? В результате какого процесса?
4. Почему в природе не встречаются в свободном состоянии значительные количества нейтронов?
5. В чём состоит протон-нейтронная модель ядра атома? Кем она была предложена?
6. Что называют нуклонами?

7. Что называют: а) массовым; б) зарядовым числом?
8. Что называют изотопами химического элемента? С помощью какого устройства обнаружили существование изотопов?

**Для углублённого уровня**

9. Почему массы химических элементов, приведённые в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева, не являются целыми числами?

**Упражнения**

- Запишите символы известных вам изотопов водорода. Укажите число нейтронов, содержащихся в ядре каждого из этих изотопов.
- Чем различаются ядра изотопов  ${}^3_1Y$  и  ${}^3_2X$ ? К каким химическим элементам они относятся?
- Чем различаются ядра изотопов радия:  ${}^{210}_{88}Ra$ ,  ${}^{224}_{88}Ra$  и  ${}^{229}_{88}Ra$ ?
- Определите зарядовые и массовые числа элементов и частиц, которые участвуют в реакциях, описываемых уравнениями (2) и (3) этого параграфа. Сравните суммы зарядовых и массовых чисел элементов до и после реакции.

**§ 75****Ядерные силы. Энергия связи атомного ядра**

Факт существования устойчивых атомных ядер свидетельствует о том, что между нуклонами в ядре действуют очень большие силы взаимного притяжения. Эти силы не только компенсируют действие кулоновских сил отталкивания между протонами ядра, но и обеспечивают его устойчивость. Легко убедиться, что в качестве таких сил не могут выступать силы гравитационного взаимодействия, так как кулоновские силы, действующие между двумя протонами, по модулю примерно в  $10^{36}$  раз больше сил их гравитационного взаимодействия.

**Силы, обеспечивающие удержание нуклонов в ядре атома, называют ядерными силами.**

Это самые мощные силы из всех существующих в природе. Поэтому взаимодействие нуклонов ядерными силами часто называют *сильным взаимодействием*.

Ядерные силы являются одним из проявлений сильного взаимодействия.

К настоящему времени установлено следующее.

1. Силы ядерного взаимодействия проявляются не только между нуклонами. Это особый тип взаимодействия, существующий между большинством элементарных частиц наряду с электромагнитным и гравитационным взаимодействиями.

2. Ядерные силы между нуклонами становятся существенными (в 100 и более раз превышающими силы электростатического отталкивания между протонами), если нуклоны находятся друг от друга на расстоянии примерно  $10^{-15}$  м. Если же это расстояние увеличивается до  $10^{-14}$ – $10^{-13}$  м, то ядерные силы уменьшаются настолько, что ими можно пренебречь по сравнению с силами Кулона. По этой причине ядерные силы, в отличие от гравитационных и электромагнитных сил, называют *короткодействующими*. 

3. Силы ядерного взаимодействия между нуклонами *не зависят от электрического заряда взаимодействующих нуклонов*, т. е. эти силы одинаковы для любой пары нуклонов (протон – протон, нейтрон – нейтрон и протон – нейтрон). Это свойство ядерных сил называют *зарядовой независимостью*.

4. Ядерные силы обладают *свойством насыщения*. Это означает, что каждый нуклон в ядре взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов того же ядра.

Все перечисленные свойства ядерных сил, как показал японский физик Хидэки Юкава (1907–1981) в 1935 г., можно объяснить, если предположить, что нуклоны обмениваются между собой особыми частицами. В 1947 г. такие частицы были обнаружены экспериментально. Их назвали *пионами* или  *$\pi$ -мезонами*. Оказалось, что существуют пионы, которые не имеют электрического заряда. Их масса  $m_{\pi^0} = 264m_e$ . Пионы, имеющие заряд, обладают несколько большей массой:  $m_{\pi^+} = m_{\pi^-} = 274m_e$ . Заряд пиона может быть равен положительному или отрицательному элементарному заряду. В свободном состоянии пионы живут примерно две стомиллионные доли секунды. Следует отметить, что пионы не являются составными частями протонов или нейтронов. Они испускаются и поглощаются подобно тому, как атом испускает или поглощает фотоны. Поэтому говорят, что *пионы являются квантами поля сильного взаимодействия*.



Процессы обмена пионами между соседними нуклонами обеспечивают устойчивость атомного ядра.



Напомним, что электромагнитные и гравитационные силы называют *дальнодействующими*.

Эти процессы можно описать следующими формулами:

$$p \rightleftharpoons p + \pi^0, \quad p \rightleftharpoons n + \pi^+, \quad n \rightleftharpoons p + \pi^-, \quad n \rightleftharpoons n + \pi^0. \quad (1)$$

Как вы уже знаете, при бомбардировании вещества альфа-частицами из атомных ядер выбиваются отдельные протоны и нейтроны. А можно ли разделить атомное ядро на составляющие его части и получить набор отдельных протонов и нейтронов? Оказывается, можно. Для этого надо совершить работу против ядерных сил, являющихся силами притяжения. Другими словами, надо передать атомному ядру определённую энергию.

**Минимальную энергию, необходимую для разделения ядра на отдельные нуклоны, называют энергией связи атомного ядра.**

Как можно рассчитать энергию связи атомного ядра?

Точные измерения массы атомных ядер с помощью масс-спектрографов показывают, что *масса ядра  $m_a$  всегда меньше суммы масс всех составляющих его протонов и нейтронов*:

$$m_a < Z \cdot m_p + N \cdot m_n. \quad (2)$$

! Величину  $\Delta m = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - m_a$  называют *дефектом масс атомного ядра*.

Дефект масс для всех атомных ядер положителен. Так, например, для атома гелия масса его ядра на 0,75 % меньше суммы масс составляющих его двух протонов и двух нейтронов.

Рассчитать энергию связи атомного ядра можно, используя предложенное А. Эйнштейном соотношение между массой системы и её энергией покоя:

$$E_0 = m \cdot c^2, \quad (3)$$

где  $c$  – скорость распространения света в вакууме.

Напомним, что энергия покоя  $E_0$  системы называют энергией, которой обладает *вся материя системы* в такой ИСО, в которой центр масс этой системы покойится.

! Чтобы найти энергию связи атомного ядра, необходимо умножить дефект масс на квадрат скорости света в вакууме:

$$E = \Delta m \cdot c^2. \quad (4)$$

Почему же имеет место дефект масс и каков физический смысл энергии связи? Предположим, что у нас есть набор отдельных протонов и нейтронов и мы хотим из этого набора сделать атомное ядро. Для этого нам при-

дётся сблизить протоны и нейтроны до очень малого расстояния так, чтобы начали действовать ядерные силы. Как только действие ядерных сил станет больше действия сил кулоновского отталкивания между протонами, протоны устремятся друг к другу. Движение протонов будет ускоренным. При ускоренном движении заряженных частиц происходит излучение электромагнитных волн (фотонов). Они и уносят от формирующегося ядра энергию, равную энергии связи. В результате масса атомного ядра уменьшается на величину, равную дефекту масс:

$$\Delta m = \frac{E_{\text{св}}}{c^2}. \quad (5)$$

Для характеристики атомного ядра используют и другую физическую величину – *удельную энергию связи* нуклонов в ядре.

**Удельной энергией связи нуклонов в ядре называют отношение энергии связи нуклонов в ядре к числу нуклонов в нём:**

$$E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}. \quad (6)$$

Таким образом, удельная энергия связи равна энергии связи, приходящейся в среднем на один нуклон ядра.

**!** Другими словами, удельная энергия связи равна той энергии, которую надо сообщить каждому нуклону атомного ядра, чтобы ядро распалось на отдельные нуклоны.

Энергию связи нуклонов в ядре в ядерной физике измеряют в МэВ, удельную энергию связи – в МэВ/нуклон.

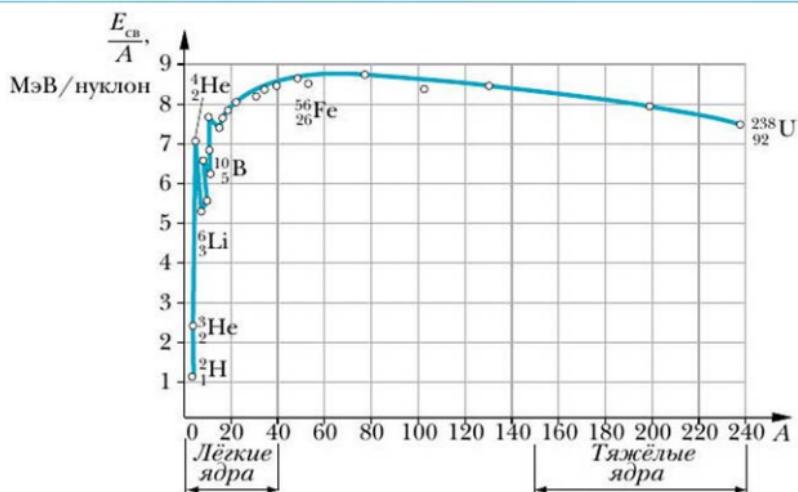
Если измерять массу в атомных единицах массы и использовать соотношение Эйнштейна  $E = m \cdot c^2$ , то формула для расчёта удельной энергии связи в МэВ/нуклон принимает вид:

$$E_{\text{уд}} = \frac{931,5(Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_{\text{яд}})}{A}. \quad (7)$$

Энергия связи нуклонов в атомном ядре и удельная энергия связи различны для разных ядер. На рис. 249 приведён график зависимости удельной энергии связи атомного ядра от числа нуклонов в нём. Из этого графика видно, что удельная энергия связи лёгких и тяжёлых ядер меньше, чем



Напомним, что 1 МэВ – это работа, которую совершают электростатические силы над электроном при прохождении им разности потенциалов 1 МВ. Поэтому  $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ} \approx 1,60218 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$ .



*Рис.* 249 Удельная энергия связи ядер различных элементов

удельная энергия связи ядер средней массы. Следовательно, с энергетической точки зрения наиболее легко осуществить два процесса преобразования ядер: деление массивных ядер на несколько более лёгких и слияние нескольких лёгких ядер в одно более тяжёлое ядро. Ядра же средней массы (с массовыми числами 40–80 а. с. м.) являются наиболее стабильными. Из всех известных изотопов максимальной удельной энергией связи (8,795 МэВ/нуклон) обладает изотоп никеля  $^{58}_{28}Ni$ . Минимальной удельной энергией связи нуклонов в ядре (~1,1 МэВ/нуклон) обладает дейтерий – изотоп водорода, состоящий всего из двух нуклонов.



Открытие сложной структуры атомного ядра и различия в энергиях связи нуклонов в разных ядрах поставило перед учёными целый ряд новых вопросов. Например, может ли ядро изменять своё состояние при взаимодействии с другими частицами, не распадаясь при этом на составные части? Как при этом происходит изменение энергии ядра: дискретно (подобно тому, как изменяется энергия атома за счёт перехода его электронов с одних энергетических уровней на другие) или непрерывно?

Чтобы ответить на эти вопросы, физики исследовали столкновения пучков протонов, имеющих разную энергию, с ядрами атомов. Оказалось, что пока энергия налетающего протона меньше некоторой строго определённой величины

личины, характерной для ядра каждого изотопа, столкновение протона и ядра является упругим. В этом случае энергия налетающего протона перераспределяется между ним и ядром как целой частицей. При увеличении же энергии протона до следующего определённого значения сумма кинетических энергий протона и ядра после столкновения оказывается меньше, чем она была до столкновения. Следовательно, часть кинетической энергии протона превращается во внутреннюю энергию ядра. При дальнейшем увеличении энергии протона характер столкновения вновь становится упругим, а потом, при достижении нового определённого значения, опять происходит превращение части кинетической энергии протона во внутреннюю энергию ядра. Эти эксперименты доказывают, что ядро атома имеет определённый дискретный набор значений внутренней энергии. Следовательно, ядра обладают дискретными спектрами возможных энергетических состояний.



Квантование энергии — важнейшая характеристика ядра каждого изотопа. По аналогии с атомом состояние ядра атома с минимальной энергией называют *нормальным* или *основным*. Если же ядро имеет большую энергию, то состояние ядра называют *возбуждённым*.

На рис. 250 показана энергетическая диаграмма ряда уровней ядра изотопа железа  $^{58}_{26}\text{Fe}$ . Горизонтальной линией с нулевой отметкой обозначен основной энергетический уровень ядра этого изотопа. Видно, что приведённая энергетическая диаграмма напоминает энергетические диаграммы атомов. Однако бросается в глаза тот факт, что если на энергетической диаграмме атома различие в энергиях соседних разрешённых уровней измерялось в электрон-вольтах, то на энергетической диаграмме ядра это различие приблизительно в миллион раз больше.

Следует также отметить, что если атом после перехода в возбуждённое состояние возвращается в основное состояние через время  $\sim 10^{-8}$  с, то переход ядра из возбуждённого состояния в основное происходит несравненно быстрее. Обычно эти промежутки времени составляют от  $10^{-17}$  до  $10^{-13}$  с. Кроме того, если переходы электронов в атоме на основной уровень сопровождаются излучением фотонов, которым соответствуют электромагнитные волны в

$E$ , МэВ



Рис. 250

диапазонах от инфракрасного до рентгеновского, то переход ядра из возбуждённого состояния в основное сопровождается гамма-излучением.

В заключение отметим, что сложность описания ядер, состоящих из нескольких нуклонов, связана с тем, что и нуклоны, как показали дальнейшие исследования, являются сложными системами. В настоящее время имеется несколько моделей строения атомного ядра. Каждая из этих моделей позволяет объяснить отдельные экспериментальные факты. Однако ни одна из них не является универсальной, с помощью которой можно было бы объяснить всю совокупность накопленного экспериментального материала.



### Вопросы

- 1** Какие силы называют ядерными силами?
- 2** Почему взаимодействие нуклонов называют сильным взаимодействием?
- 3** Почему сильное взаимодействие называют короткодействующим?
- 4** Что называют зарядовой независимостью?
- 5** Какое свойство ядерных сил называют свойством насыщения?
- 6** Какими частицами обмениваются нуклоны в ядре?
- 7** Чему может быть равен заряд пиона?
- 8** Что называют: а) энергией связи; б) дефектом масс атомного ядра?
- 9** Каков физический смысл энергии связи?
- 10** Что называют удельной энергией связи нуклонов в ядре?
- 11** Ядра с какими массовыми числами являются наиболее стабильными?



### Для увлечённого уровня

- 12** Как происходит изменение энергии ядра: дискретно или непрерывно? Какие эксперименты позволяют ответить на этот вопрос?

### Упражнения

- 1** Оцените модули сил кулоновского и гравитационного взаимодействий двух протонов, находящихся на расстоянии  $10^{-15}$  м. Считайте протоны материальными точками.
- 2** Массы атомов (с учётом суммарной массы электронов) изотопов  $^4_2\text{He}$  и  $^6_3\text{Li}$  соответственно равны 4,0026 а. е. м. и 6,01513 а. е. м.

- Определите дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядер этих изотопов.
3. Энергия связи ядра трития  ${}^3_1\text{H}$  равна 8,5 МэВ. Определите: а) дефект массы этого ядра; б) массу ядра.
4. Определите энергию связи нейтрона в ядре изотопа  ${}^{14}_7\text{Ne}$ , если энергии связи ядер изотопов  ${}^{14}_7\text{Ne}$  и  ${}^{13}_7\text{Ne}$  равны соответственно 104,66 МэВ и 94,10 МэВ.

**§ 76**

## Радиоактивность. Закон радиоактивного распада

Известно, что ядра большинства встречающихся в природе изотопов нестабильны, с течением времени они самопроизвольно (спонтанно) превращаются в ядра других элементов с одновременным испусканием различных частиц. Напомним, что такое превращение называют радиоактивностью.

**Радиоактивностью называют самопроизвольное (спонтанное) превращение атомных ядер, которое сопровождается испусканием различных частиц (например, альфа-частиц, электронов, протонов, фотонов и др.).**

На практике к радиоактивным относят ядра, время жизни которых, с одной стороны, не превышает  $10^{22}$  лет, а с другой — существенно больше характерного ядерного времени  $\sim 10^{-24}$  с — времени пролёта световым квантом ядра атома.

Как показывают наблюдения, *радиоактивность — процесс вероятностный*. Среднее время жизни ядер определённого изотопа, вычисленное по наблюдению за очень большим числом распадающихся ядер, не зависит от способа получения ядер этого изотопа, температуры, давления и агрегатного состояния вещества, в котором находятся изотопы.



При исследовании явления радиоактивности было установлено, что для каждого радиоактивного вещества существует определённый промежуток времени, по истечении которого распадается половина от начального (достаточно большого) числа ядер.

Этот промежуток времени называют *периодом полураспада*  $T$ .

За время полураспада интенсивность радиоактивных излучений часто также уменьшается в 2 раза. Если же в результате радиоактивного превра-

щения образуются новые способные к распаду ядра, то интенсивность излучения может даже увеличиваться с течением времени.

Получим закон, по которому убывает число радиоактивных ядер данного изотона.

Пусть в начальный момент времени  $t_0 = 0$  имеется в наличии  $N_0$  радиоактивных ядер некоторого изотона. Через промежуток времени  $t_1 - t_0 = T$  число радиоактивных ядер этого изотона уменьшится вдвое, т. е. станет равным  $N_1 = \frac{N_0}{2}$ . Спустя ещё такой же промежуток времени к моменту  $t_2 = 2T$  число радиоактивных ядер вновь уменьшится вдвое и станет равным  $N_2 = \frac{N_1}{2} = \frac{N_0}{4}$ . Таким образом, к моменту времени  $t = n \cdot T$  число радиоактивных ядер окажется равным  $N = \frac{N_0}{2^n} = N_0 \cdot 2^{-n}$ . Так как  $n = \frac{t}{T}$ , то

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}, \quad (1)$$

где  $T$  – период полураспада.

Полученная формула представляет собой **закон радиоактивного распада**. Она позволяет определить, сколько радиоактивных ядер данного изотона останется к моменту времени  $t$ , если в начальный момент времени ( $t_0 = 0$ ) их число было равно  $N_0$ .



**Закон радиоактивного распада:**

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}},$$

где  $N_0$  – число радиоактивных ядер в начальный момент времени,  $T$  – период полураспада.

График зависимости  $N(t)$  приведён на рис. 251. Из формулы, описывающей закон радиоактивного распада, и графика  $N(t)$  видно, что для распада абсолютно всех радиоактивных ядер данного изотона необходимо бесконечно большое время.

В заключение отметим, что, кроме нестабильных изотопов, существуют и стабильные, превращения которых возможны только в результате внешних воздействий.

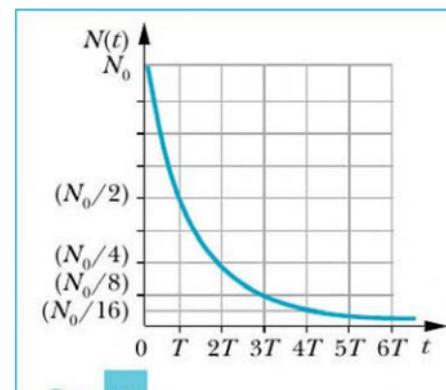


Рис. 251

Закон радиоактивного распада



Иногда закон радиоактивного распада записывают в несколько ином виде, используя понятие *постоянная распада* – вероятность распада одного ядра за одну секунду. Постоянную распада обозначают через  $\lambda$ . Можно показать, что постоянная распада  $\lambda$  и период полураспада  $T$  связаны соотношением:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} \approx \frac{0.693}{T}. \quad (2)$$

С учётом выражения (2) закон радиоактивного распада (1) может быть записан в виде:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}. \quad (3)$$

Модуль производной числа  $N(t)$  радиоактивных ядер в образце по времени  $t$  называют *активностью*  $A$  этого образца. Из выражения (3) следует, что активность образца с течением времени уменьшается по закону:

$$A(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = \lambda \cdot N(t). \quad (4)$$

Единица активности в СИ – *беккерель* (Бк). На практике часто используют единицу активности *киори* (Ки); 1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк.



### Вопросы

1. Какие ядра изотопов называют: а) стабильными; б) нестабильными?
2. Что называют: а) радиоактивностью; б) периодом полураспада?
3. Запишите закон радиоактивного распада.
4. Зависит ли период полураспада от способа получения ядер данного изотопа и внешних условий?



### Для углублённого уровня

5. Что называют постоянной распада  $\lambda$ ?
6. Что называют активностью образца? В чём состоит физический смысл этой величины?

### Упражнения

1. Определите период полураспада радиоактивного изотопа, если количество ядер этого изотопа за 5 мин уменьшается: а) в 32 раза; б) в 1024 раза.

- 2** Период полураспада изотопа стронция  $^{81}_{38}\text{Sr}$  равен 30 мин. В некоторый момент времени имелось 10 г этого изотопа. Определите массу этого изотопа через 3 ч.
- 3** Период полураспада изотопа бария  $^{127}_{56}\text{Ba}$  равен 10 мин. Определите, сколько процентов ядер этого изотопа распадётся за время одного урока физики.



### Для углублённого уровня

- 4** Определите постоянные распада изотопов стронция и бария из упражнений 2 и 3.

## § 77

### Причины радиоактивности. Альфа- и бета-распады. Правила смещения

В чём же причина нестабильности тех или иных ядер? Ответ на этот вопрос может быть получен из следующих соображений.

Атомное ядро, как и любая система, стремится перейти в состояние с меньшей энергией. Из этого следует, что радиоактивные превращения могут происходить лишь тогда, когда энергия распадающегося ядра больше суммы энергий продуктов распада. Именно поэтому радиоактивные превращения всегда сопровождаются выделением энергии. Например, при распаде 1 г радия за час выделяется около 580 Дж энергии.

Энергия взаимодействия нуклонов в ядре обусловлена наличием двух «конкурирующих» сил: кулоновских сил взаимного отталкивания между одновременно заряженными протонами и ядерных сил притяжения между всеми нуклонами. Среди ядер с заданным массовым числом самыми стабильными будут те, энергия которых минимальна. Это условие выполняется при определённом соотношении между зарядовым числом и числом нейтронов. Если это соотношение нарушено из-за превышения числа протонов, то силы их взаимного отталкивания уже не могут быть скомпенсированы силами ядерного притяжения, поскольку имеющихся нейтронов для этого недостаточно. В результате такие ядра обладают избытком энергии и являются менее устойчивыми. Менее устойчивыми являются и ядра с избытком нейтронов. Это обусловлено тем, что масса нейтрона больше массы протона, а увеличение массы ядра приводит к увеличению его энергии.

Ядра, имеющие избыточную энергию, могут «избавиться» от неё двумя способами. Во-первых, в результате деления ядра на более устойчивые части. Во-вторых, за счёт изменения соотношения протонов и нейтронов в яд-

ре, т. е. за счёт изменения заряда ядра на единицу в результате превращения протона в нейтрон или нейтрона в протон. Рассмотрим эти процессы.

К самопроизвольному (спонтанному) делению ядер относится *альфа-распад*.

**Альфа-распадом** атомного ядра с зарядовым числом  $Z$  и массовым числом  $A$  называют его самопроизвольное деление на альфа-частицу (ядро атома гелия  ${}^4_2\text{He}$ ) и ядро с зарядовым числом  $Z - 2$  и массовым числом  $A - 4$ .

Такое ядерное превращение можно записать следующим образом:



где символом X обозначено исходное радиоактивное ядро, а символом Y — новое ядро, получившееся после вылета альфа-частицы из ядра X.

Распадающееся ядро называют *материнским*, а новое ядро, получившееся после вылета альфа-частицы, — *дочерним*.

**!** При альфа-распаде исходного изотопа образуются альфа-частица и изотоп, массовое число которого на четыре, а зарядовое число на два меньше, чем у исходного изотопа.

Образующийся при альфа-распаде изотоп расположен в таблице Д. И. Менделеева на две клетки ближе к её началу, чем исходный.

Это правило называют *правилом смещения при альфа-распаде*.



Перечислим установленные эмпирическим (опытным) путём особенности альфа-распада.

Почти все склонные к альфа-распаду ядра имеют зарядовое число  $Z > 83$ . (Правда, существует небольшая группа альфа-активных ядер редкоземельных элементов с массовыми числами от 140 до 160 и числом нейтронов, равным и несколько большим 84.) Время жизни альфа-активных ядер варьируется в очень широких пределах. Так, период полураспада изотопа свинца  ${}^{204}_{82}\text{Pb}$  равен  $1,4 \cdot 10^{17}$  лет, а период полураспада изотопа радона  ${}^{215}_{86}\text{Rn}$  составляет всего лишь  $10^{-6}$  с. Кинетическая энергия альфа-частиц, вылетающих из тяжёлых ядер, лежит в пределах 4–9 МэВ, для редкоземельных элементов эта энергия находится в пределах 2–4,5 МэВ. Самым ярким и удивительным свойством альфа-распада является очень сильная зависимость времени жизни ядер от энергии вылетающих из них частиц: уменьшение энергии на 1 % может увеличить это время в 10 раз, а уменьшение её на 10 % увеличивает это время в 100–1000 раз. Данную особен-

ность удаётся объяснить в рамках одной из так называемых *оболочечных моделей ядра*.

Отметим, что альфа-распад часто сопровождается гамма-излучением. Это обусловлено тем, что получающееся в результате альфа-распада ядро часто оказывается в возбуждённом состоянии. В основное состояние ядро возвращается либо сразу, либо переходя вначале на более низкий возбуждённый уровень, а затем уже на основной. Другая причина возникновения гамма-излучения — это ускоренное движение заряженных альфа-частиц.

У изотопов с массовым числом 232 и более наряду с альфа-распадом наблюдается *спонтанное деление ядер*. Его открыли в 1940 г. советские физики Константин Антонович Петржак (1907–1998) и Георгий Николаевич Флёрнов (1913–1990). Обычно в результате этого процесса из ядра образуются два сравнимых по массам осколка.

Установлено, что у изотопов с увеличением массового числа резко уменьшается разница в периодах полураспада за счёт спонтанного деления ( $T_{\text{сп}}$ ) и альфа-распада ( $T_\alpha$ ). Так, легчайшее из известных спонтанно делящихся ядер изотопа урана  $^{232}_{92}\text{U}$  имеет  $T_{\text{сп}} = 8 \cdot 10^{13}$  лет, а  $T_\alpha = 72$  года. У изотопа калифорния  $^{252}_{98}\text{Cf}$  эти периоды равны соответственно 66 лет и 2,6 года. Именно спонтанное деление ограничивает возможность получения изотопов со всей большими зарядовыми  $Z$  и массовыми  $A$  числами.

Ко второму способу радиоактивного распада относятся *бета-распады двух типов*.

**!** При электронном распаде, или  $\beta^-$ -распаде, атомное ядро  $^A_X$  самопроизвольно испускает электрон  $e^-$  и электрически нейтральную очень лёгкую частицу  $\bar{\nu}_e$ , получившую название *электронное антинейтрино*. Распадающееся ядро превращается при этом в ядро с тем же массовым числом  $A$ , но с большим на единицу зарядовым числом  $Z + 1$ :



При позитронном распаде, или  $\beta^+$ -распаде, атомное ядро  $^A_X$  самопроизвольно испускает позитрон  $e^+$  (частицу с характеристиками электрона, но положительным зарядом, равным по модулю заряду электрона) и электрически нейтральную очень лёгкую частицу  $\nu_e$ , получившую название *электронное нейтрино*. Распадающееся ядро превращается при этом в ядро с тем же массовым числом  $A$ , но с меньшим на единицу зарядовым числом  $Z - 1$ :



Соотношения (2) и (3) называют *правилами смещения при бета-распаде*.

Главной особенностью бета-распада является то, что он обусловлен не сильным и не электромагнитным взаимодействиями, а ещё одним из типов фундаментальных взаимодействий в природе — *слабым взаимодействием*.

За счёт того, что интенсивность слабых взаимодействий на 24 порядка (в  $10^{24}$  раз) меньше ядерных, периоды полураспадов бета-активных ядер в среднем имеют порядок минут и часов.

**!** Бета-распад — процесс не внутриядерный, а внутринуклонный. Этот процесс, в отличие от альфа-распада, наблюдается при всех значениях массового числа изотопа.

Выделяющаяся при одном бета-распаде энергия у различных изотопов варьируется от  $\sim 20$  кэВ до  $\sim 14$  МэВ.

При электронном бета-распаде нейтрон превращается в протон, электрон и электронное антинейтрино:



Масса протона меньше массы нейтрона. Поэтому свободный протон не может превратиться в нейтрон. Распады свободных протонов на какие-либо частицы до сих пор не наблюдались.

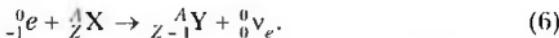
Позитронный бета-распад для свободного протона невозможен. Однако такой распад возможен в ядре, если это ядро обладает избытком энергии. Уравнение такого процесса имеет вид:



В заключение отметим, что при бета-распаде энергетические спектры вылетающих электронов и позитронов непрерывны (иначе говоря, энергия этих частиц может принимать произвольные значения). Именно это обстоятельство позволило в 1930 г. австрийскому физику Вольфгангу Паули (1900–1958) предсказать свойства нейтрино и антинейтрино, которые экспериментально удалось обнаружить лишь через 25 лет.

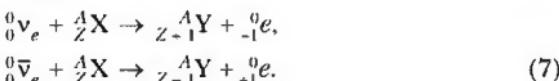
К изменению заряда ядра без изменения его массового числа также приводят так называемый *K-захват* и *процессы взаимодействия нейтрино и антинейтрино с ядром*.

При *K-захвате* ядро поглощает электрон с ближайшей к нему электронной оболочки. По-видимому, такое название процесса связано с тем, что ближайшую к ядру оболочку называют *K-оболочкой*. При этом процессе один из протонов ядра превращается в нейтрон:



На освободившееся место в  $K$ -оболочке переходит один из электронов атома. В результате указанный процесс сопровождается не только вылетом нейтрино, но и жёстким рентгеновским излучением.

Процессы взаимодействия нейтрино и антинейтрино с ядром, приводящие к рождению электрона или позитрона, соответственно, могут быть записаны в виде:



### Вопросы

- 1 В чём причина нестабильности радиоактивных ядер?
- 2 Действием каких сил обусловлена энергия взаимодействия нуклонов в ядре?
- 3 Какими способами ядра «избавляются» от избыточной энергии?
- 4 Что называют альфа-распадом?
- 5 Какие виды бета-распада вам известны?
- 6 Сформулируйте правило смещения: а) при альфа-распаде; б) бета-распаде.



### Для углублённого уровня

- 7 Почему альфа-распад часто сопровождается гамма-излучением?
- 8 При каких значениях массового числа наблюдается: а) альфа-распад; б) спонтанное деление ядер; в) бета-распад?
- 9 Запишите реакцию превращения при бета-распаде: а) нейтрона в протон; б) протона в нейtron.
- 10 Какие известные вам процессы приводят к изменению заряда ядра без изменения его массового числа?

### Упражнения

- 1 Изотопы самария  $^{146}_{62}\text{Sm}$  и иридия  $^{172}_{77}\text{Ir}$  испытывают альфа-распад. Определите образующиеся при этом изотопы.
- 2 Какие изотопы в результате альфа-распадов могут образовать изотопы: а) тория  $^{231}_{90}\text{Th}$ ; б) актиния  $^{229}_{89}\text{Ac}$ ?
- 3 Какой изотоп образуется в результате электронного бета-распада изотопа: а) меди  $^{66}_{29}\text{Cu}$ ; б) платины  $^{199}_{78}\text{Pt}$ ?

- 4 | В результате позитронного бета-распада образуется изотоп углерода  $^{13}_6\text{C}$ . Определите исходный изотоп.



### Для углублённого уровня

- ✓ 5 | Распад изотопа тория  $^{230}_{90}\text{Tl}$  происходит из основного состояния и сопровождается испусканием альфа-частиц с кинетическими энергиями 6,33; 6,23; 6,10 и 6,03 МэВ. Постройте схему энергетических уровней дочернего ядра.

## § 78

### Ядерные реакции

Наряду с рассмотренными в предыдущем параграфе самопроизвольными превращениями одних изотопов в другие, существуют и превращения, вызванные внешними воздействиями. Например, в 1919 г. Резерфорд наблюдал преобразование ядер азота в ядра кислорода под действием налетающих на них ядер гелия (см. § 74, уравнение (2)). Подобные превращения атомных ядер называют **ядерными реакциями**.

**Ядерными реакциями называют превращения атомных ядер, вызванные их взаимодействием друг с другом или с налетающими на них частицами.**

Для осуществления ядерной реакции необходимо сблизить взаимодействующие частицы (два ядра, ядро и нуклон и т. п.) на очень малые расстояния ( $\sim 10^{-15}$  м). Как правило, ядерные реакции осуществляют бомбардировкой ядер пучками предварительно ускоренных с помощью различных ускорителей протонов или ионов тех или иных изотопов.

Поясним сказанное на конкретном примере. Рассмотрим, что может произойти с ядрами атомов лития, если их бомбардировать протонами. Результат бомбардировки зависит от того, какой энергией обладают налетающие протоны. При подлёте к ядру протон будет отталкиваться от него. Поэтому, чтобы сблизиться с ядром на необходимое расстояние, протон должен совершить работу против сил кулоновского отталкивания со стороны протонов ядра. Для этого он должен обладать достаточной кинетической энергией. Таким образом, **для осуществления ядерной реакции с участием протонов необходимо предварительно разгонять их до очень больших скоростей**.

Символические записи двух возможных в рассматриваемом случае ядерных реакций имеют вид:



! При ядерных реакциях выполняются законы сохранения электрического заряда, энергии и импульса.

**При любой ядерной реакции сохраняется суммарное массовое число: сумма чисел протонов и нейтронов до реакции равна сумме чисел протонов и нейтронов после реакции.**

Данное утверждение обычно называют **законом сохранения массового числа**.

Выделяющаяся в ядерных реакциях энергия может не только быть сопоставима с энергетическими затратами на получение частиц с большой кинетической энергией, но и существенно превосходить эти затраты. Энергию, выделяющуюся при ядерной реакции, называют **выходом ядерной реакции**. Её можно найти по разности масс частиц, вступающих в реакцию и получающихся в результате. Выход ядерной реакции обычно составляет не менее нескольких мегаэлектронвольт, т. е. в миллионы раз превосходит выход энергии при химических реакциях.

В качестве примера определим выход  $\Delta E$  ядерной реакции получения изотопа гелия из ядер дейтерия и трития:



Согласно формуле (2), дефект масс при этой реакции

$$\Delta m = m_{^2_1\text{H}} + m_{^3_1\text{H}} - m_{^4_2\text{He}} - m_{^1_0\text{n}}. \quad (3)$$

Подставляя в это уравнение значения масс участвующих в реакции ядер и массу нейтрона, выраженные в атомных единицах массы, получаем:

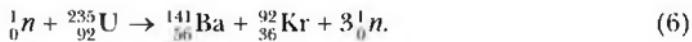
$$\Delta m = 2,01355 + 3,01550 - 4,00151 - 1,00866 = 0,01888 \text{ (а. е. м.)}. \quad (4)$$

Учитывая, что  $(1 \text{ а. е. м.}) \cdot c^2 = 931,5 \text{ МэВ}$ , получаем:

$$\Delta m \cdot c^2 \approx 0,01888 \cdot 931,5 \approx 17,6 \text{ (МэВ)}. \quad (5)$$

Чаще всего ядерные реакции, сопровождаемые выделением энергии, проходят с участием нейтронов, так как из-за отсутствия кулоновских сил отталкивания нейтроны могут попасть внутрь атомного ядра, практически не обладая кинетической энергией. Примером такой реакции является деление ядра изотопа урана  $^{235}_{92}\text{U}$  при поглощении им нейтрона. При этом чем медленнее движется нейтрон, тем больше вероятность реакции. В результате захвата нейтрона ядро изотопа  $^{235}_{92}\text{U}$  распадается на два осколка

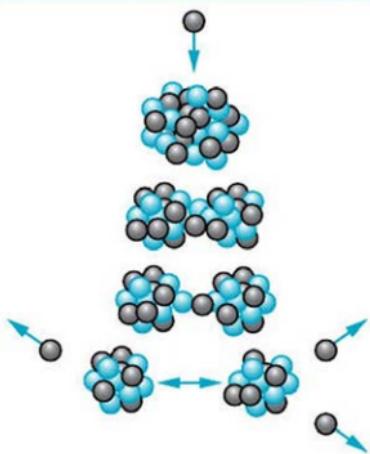
(например, ядра изотопов бария и криптона) с образованием трёх свободных нейтронов:



Вылетевшие нейтроны могут вызвать распад других ядер урана. В результате число распадов с течением времени может нарастать. Если это происходит, то такой процесс называют *цепной ядерной реакцией*.

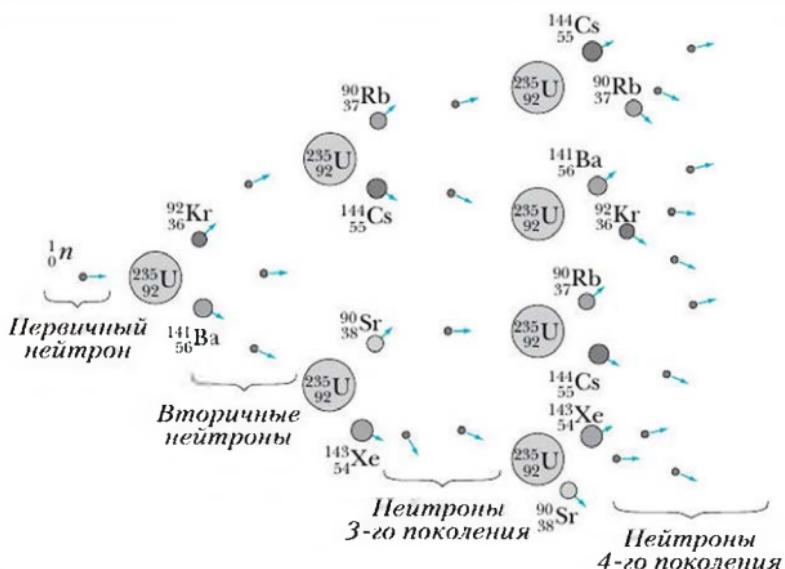
Объяснить деление атомного ядра, захватившего нейtron, удается с помощью *капельной модели ядра*. Согласно этой модели, ядро рассматривают как каплю заряженной жидкости, в которой наряду с короткодействующими ядерными силами притяжения действуют кулоновские силы отталкивания. В исходном состоянии ядро урана имеет сферическую форму. После поглощения нейтрона в ядре возникают деформации, в результате которых ядро становится похожим на гантель (рис. 252). Раастяжение происходит до тех пор, пока силы отталкивания между частями ядра не превысят силы притяжения, действующие в середине «гантели». После этого ядро разрывается на два осколка. При этом каждый из осколков оказывается перегруженным нейтронами. В результате при таком распаде наблюдается вылет нескольких нейтронов (рис. 253).

Особый интерес с энергетической точки зрения представляют реакции *синтеза* — слияния лёгких ядер в более тяжёлые, например синтез изотопа гелия из ядер дейтерия и трития. Это обусловлено тем, что удельная энергия связи в ядрах тяжёлого изотопа может значительно превышать удельную энергию связи в более лёгких ядрах. Например, на рис. 249 (см. § 75) видно, что удельная энергия связи в изотопе  ${}_2^4\text{He}$  существенно превышает удельную энергию связи в изотопе водорода  ${}_1^2\text{H}$ . Поэтому в результате реакции синтеза можно получить значительно большую энергию (см. уравнение (5)), чем при реакциях деления ядер тяжёлых элементов.



*Рис. 252* Схема деления атомного ядра на основании капельной модели

Для осуществления реакции синтеза необходимо сблизить ядра изотопов водорода на расстояния, при которых станут значительными ядерные силы. Для этого сближающиеся ядра должны обладать очень большой кинетической



*Рис. 253 Схема развития цепной реакции*

энергией. Такие реакции могут протекать только при очень высоких температурах — более  $10^8$  К. Поэтому эти реакции называют *термоядерными*.

**Термоядерные реакции — это реакции слияния (синтеза) лёгких ядер в более тяжёлые, происходящие при очень высоких температурах.**

В качестве примера приведём ещё одну из возможных реакций синтеза — слияние ядер дейтерия с образованием ядра гелия:



Энергия, выделяющаяся при этой реакции, в расчёте на один нуклон примерно в 4 раза больше выхода при делении ядра урана.

### Вопросы

- Что называют ядерными реакциями?
- Почему для осуществления ядерной реакции необходимо сблизить взаимодействующие частицы на очень малые расстояния?

- 3 Почему в реакциях, проходящих с участием нейтронов, они могут попасть внутрь атомного ядра, практически не обладая кинетической энергией?
- 4 Каким известным вам законам сохранения подчиняются ядерные реакции?
- 5 Сформулируйте закон сохранения массового числа.
- 6 Какой процесс называют цепной ядерной реакцией? Приведите пример такой реакции.
- 7 Какие реакции называют термоядерными? Почему их так называют?

### Упражнения

- 1 Используя законы сохранения, определите неизвестные изотопы X и Y в следующих реакциях:  
а)  $_{7}^{14}\text{N} + _2^4\text{He} \rightarrow \text{X} + _1^1\text{H}$ ; б)  $_{3}^{6}\text{Li} + \text{Y} \rightarrow _2^4\text{He} + _2^3\text{He}$ .
- 2 Оцените выход ядерной реакции  $_{1}^2\text{H} + _2^3\text{H} \rightarrow _2^4\text{He}$ .
- 3 Оцените выход ядерной реакции  $_{7}^{14}\text{N} + _2^4\text{He} \rightarrow _8^{17}\text{O} + _1^1\text{p}$ , зная, что масса ядра данного изотопа азота равна 13,99923 а. е. м., а масса ядра изотопа кислорода — 16,99473 а. е. м.



## § 79 Ядерная энергетика

Деление ядер урана используют для получения энергии в ядерных реакторах (рис. 254). Первый ядерный реактор был запущен в 1942 г. в США под руководством итальянского физика Энрико Ферми (1901–1954). Через четыре года под руководством Игоря Васильевича Курчатова (1903–1960) в СССР был построен первый в Европе атомный реактор. Первая в мире атомная электростанция была построена в 1954 г. в городе Обнинске (Калужская область). В реакторе этой электростанции мощностью 5 МВт находилось около 550 кг урана, содержащего около 5 % изотопа  $_{92}^{235}\text{U}$ . Современные отечественные атомные реакторы имеют мощность до 1000 МВт.

В настоящее время управляемая цепная реакция деления осуществлена только на изотопах урана  $_{92}^{235}\text{U}$  и  $_{92}^{238}\text{U}$ , а также на изотопе плутония  $_{94}^{239}\text{Pu}$ . Первый из этих изотопов в количестве ~0,7 % имеется в природном уране, который содержит 99,3 % изотопа  $_{92}^{238}\text{U}$ .

Осуществить цепную реакцию в природном уране не удается. Это объясняется тем, что подавляющая часть нейтронов, выплетающих при распаде

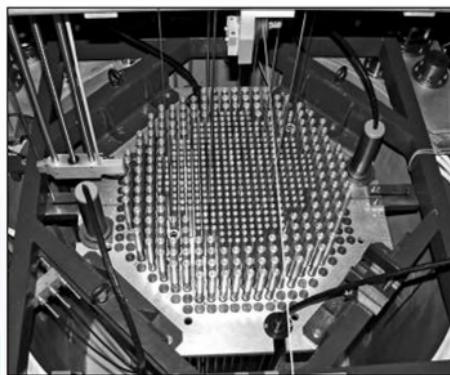
ядер изотопа  $^{235}_{92}\text{U}$ , поглощается ядрами изотопа  $^{238}_{92}\text{U}$  без последующего испускания нейтронов. Поэтому в целях получения ядерного топлива для реакторов из природного урана частично извлекают изотоп  $^{238}_{92}\text{U}$ . В результате процентное содержание изотопа  $^{235}_{92}\text{U}$  увеличивается до необходимой величины. Этот процесс называют *обогащением урана*.

Обогащённую смесь изотопов урана помещают в герметичные цилиндры из специальных сортов нержавеющей стали, слабо поглощающей нейтроны. Эти цилиндры являются *тепловыделяющими элементами* атомных реакторов.

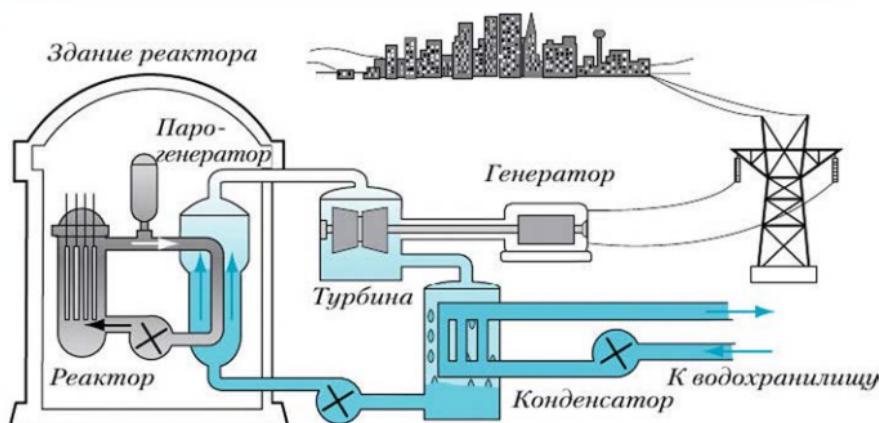
Чтобы сделать цепную реакцию управляемой, необходимо контролировать (поддерживать неизменным) число нейтронов, вызывающих деление ядер изотопа  $^{235}_{92}\text{U}$ . Это означает, что число нейтронов каждого следующего поколения при распаде должно быть равно числу нейтронов предыдущего поколения. С этой целью в реакторе используют специальные *регулирующие стержни*, которые поглощают избыток образующихся нейтронов. Эти стержни изготавливают из кадмия и бора — веществ, хорошо поглощающих нейтроны. В случае уменьшения числа изотопов  $^{235}_{92}\text{U}$  и увеличения числа ядер продуктов распада, которые поглощают часть выплетающих нейтронов, для увеличения числа свободных нейтронов регулирующие стержни извлекают из активной зоны реактора.

Чтобы увеличивать число распадающихся ядер изотопа  $^{235}_{92}\text{U}$  — при неизменном числе образующихся при распаде вторичных нейтронов, — необходимо уменьшать скорость нейтронов. Это связано с тем, что образующиеся при распаде вторичные нейтроны обладают энергией порядка 1 МэВ, тогда как для эффективного взаимодействия ядер изотопа  $^{235}_{92}\text{U}$  с нейtronами необходимы нейтроны с энергией меньше 0,5 эВ — *медленные нейтроны*. Для уменьшения кинетической энергии вторичных нейтронов используют специальные вещества, которые называют *замедлителями*. В качестве замедлителей применяют графит, обычную воду и тяжёлую воду (молекулы которой представляют собой соединение атома кислорода и двух атомов дейтерия).

Рассматриваемый реактор называют *реактором на медленных нейтронах*.



*Рис. 254* Атомный реактор



*Рис.* 255 Схема двухконтурной АЭС

Отметим, что для протекания цепной реакции требуется достаточно большое количество изотопа урана, способного поддерживать эту реакцию. Это связано с тем, что при малых размерах образца вероятность попадания вылетающих из ядер нейтронов в другие ядра весьма мала. Минимальную массу урана, при которой возможна цепная реакция, называют *критической массой*.

Применение замедлителей и оболочки, отражающей нейтроны, позволяет уменьшить значение критической массы для изотопа  $^{235}_{92}\text{U}$  с 50 до 0,25 кг. Заметим, что масса ядерного топлива в каждом тепловыделяющем элементе реактора существенно меньше критической, так как в противном случае цепная реакция стала бы неуправляемой. Суммарная же масса топлива в реакторе несколько больше критической.

Охлаждающая реактор водя, находящаяся под высоким давлением, через теплообменник (рис. 255) нагревает воду так называемого второго контура. Вода второго контура доводится до кипения. Образующийся водяной пар направляют на лопати турбины, которая вращает электрогенератор.



При увеличении содержания в ядерном топливе изотопа  $^{235}_{92}\text{U}$  реактор может работать без замедлителей. Так работают *реакторы на быстрых нейтронах*. При этом быстрые (с кинетической энергией более 10 кэВ) нейтроны, образующиеся при делении ядер изотопа  $^{235}_{92}\text{U}$ , поглощаются

ядрами изотопа  $^{238}_{92}\text{U}$ . В результате получаются ядра изотопа  $^{239}_{92}\text{U}$ , которые бета-радиоактивны (период их полураспада равен 23 мин). После их распада образуются ядра нептуния, которые также бета-радиоактивны. Период их полураспада — 2,3 дня. Символические записи этих реакций имеют вид:



В результате двух последовательных электронных бета-распадов образуется изотоп плутония  $^{239}_{94}\text{Pu}$  (период его полураспада —  $2,4 \cdot 10^4$  лет).

При поглощении медленных нейтронов изотоп  $^{239}_{94}\text{Pu}$ , подобно изотопу  $^{235}_{92}\text{U}$ , распадается на осколки и испускает три нейтрона. Поэтому с этим изотопом возможна цепная реакция и его можно использовать в качестве ядерного топлива.

Для получения ядерного топлива на основе изотопа  $^{233}_{92}\text{U}$  в ядерных реакторах быстрыми нейтронами облучают изотоны тория  $^{232}_{90}\text{Th}$ . Новые изотоны тория, получающиеся в результате поглощения нейтронов, после двух последовательных электронных бета-распадов превращаются в изотопы урана  $^{233}_{92}\text{U}$ .

В настоящее время ядерная энергетика составляет значительную долю в энергообеспечении человеческой цивилизации. В развитых странах доля энергии,рабатываемой на атомных электростанциях, с каждым годом увеличивается. Это обусловлено не только истощением источников углеводородного сырья, но и тем, что топливо для работы атомных станций имеет значительно меньшие массу и объём. Это делаетрабатываемую на АЭС электроэнергию более дешёвой. Альтернативные способы получения электроэнергии либо весьма дороги, либо малоэффективны, либо сопряжены с серьёзным вмешательством в окружающую среду. Кроме того, запасов урана и тория, даже по скромным оценкам, должно хватить на несколько столетий.

Следует также отметить, что при нормальной работе АЭС отсутствует выброс радиоактивных веществ в атмосферу. Напротив, при сжигании на тепловых электростанциях газа (и особенно угля) содержащиеся в них примеси радиоактивных веществ выбрасываются в окружающую среду. Кроме того, при работе ТЭЦ в атмосферу выбрасывается большое количество парниковых газов, нарушающих экологическое равновесие в природе.



В земной коре тория содержится в несколько раз больше, чем урана.

В настоящее время разработаны высокоэффективные методы экологически безопасной работы атомных электростанций. Они, в частности, включают в себя способы обеспечения безаварийной эксплуатации ядерных объектов и надёжной утилизации радиоактивных отходов.

Следует отметить следующую проблему, связанную с развитием атомной промышленности и распространением ядерных технологий. Она заключается в предотвращении создания и распространения ядерного оружия, так как некоторые его компоненты (в частности, высокообогащенный уран  $^{235}_{92}\text{U}$  и плутоний  $^{239}_{94}\text{Pu}$ ) могут быть получены на объектах атомной энергетики (АЭС). Большой вклад в решение этой проблемы вносит Международное агентство по атомной энергии при ООН (МАГАТЭ).

Одним из перспективных направлений развития ядерной энергетики является создание технологий использования энергии, выделяющейся при проведении термоядерных реакций в земных условиях. Выделение большой энергии при таких реакциях обуславливает их важность не только для энергетики, но и для прикладной ядерной физики и астрофизики. В природных условиях термоядерные реакции протекают лишь в недрах звёзд и являются источником их энергии.

К сожалению, термоядерную реакцию, при которой выделившаяся энергия превосходит затраченную, удалось осуществить только в результате взрыва так называемой водородной (термоядерной) бомбы. Задача же создания промышленного управляемого термоядерного реактора до сих пор не решена.

### Вопросы

- 1 На каких изотопах осуществлены управляемые цепные ядерные реакции?
- 2 Почему не удается осуществить цепную реакцию в природном уране?
- 3 Какой процесс называют обогащением урана?
- 4 Что представляют собой тепловыделяющие элементы атомного реактора?
- 5 Какую роль выполняют регулирующие стержни?
- 6 Что такое замедлители и какова их роль?
- 7 Что называют критической массой?
- 8 В чём преимущества АЭС по сравнению с другими видами электростанций?



## Упражнение

Запишите символически реакции в ядерных реакторах на быстрых нейтронах, в результате которых получается ядерное топливо на основе изотопа  $^{233}_{92}\text{U}$  из изотопа тория  $^{232}_{90}\text{Th}$ .

**§ 80**

## Методы регистрации ионизирующих радиоактивных ядерных излучений

Любое устройство для регистрации радиоактивных излучений основано, как правило, на ионизирующем характере этих излучений, проходящих через определённое вещество. Поэтому регистрирующее устройство (детектор) должно содержать среду, способную зафиксировать ионизацию вещества.

Для регистрации ионизирующих излучений используют ионизационные калориметры, счётчики и трековые детекторы. Первые позволяют измерять энергию частиц.

*Счётчики позволяют регистрировать число прошедших через них частиц.* С одним из способов регистрации частиц — по вспышкам на экране, покрытом слоем сульфида цинка, вы уже знакомы. Этот метод использовал Резерфорд в своих экспериментах по исследованию строения атомного ядра.

В настоящее время вместо покрытых сульфидом цинка экранов обычно используют *сцинтилляторы* — прозрачные полимерные материалы с внедрёнными в них молекулами веществ, которые испускают фотоны света под действием ионизирующих излучений.

Подсчёт вспышек в сцинтилляторе ведётся быстродействующим фотоприёмником, например полупроводниковым фотодиодом. Сигналы с этих фотоприёмников поступают в специальные системы, осуществляющие подсчёт поступивших электрических импульсов.

Существует другой вид счётчика — это *счётчик Гейгера*. Он представляет собой стеклянную трубку с двумя электродами внутри. Трубка заполнена газом под давлением  $\sim 10^4$  Па (рис. 256). Катод счётчика представляет собой металлический цилиндр, а анод — тонкую натянутую внутри цилиндра проволоку. Её подключают к положительному полюсу источника, а цилиндр через резистор с большим сопротивлением — к отрицательному полюсу. Пока газ в трубке (между катодом и анодом) не ионизирован, ток в цепи отсутствует и напряжение на резисторе равно нулю. При пролёте частицы происходит ионизация газа. В результате в трубке возникает электрический разряд. Это приводит к появлению импульса напряжения на резисторе.

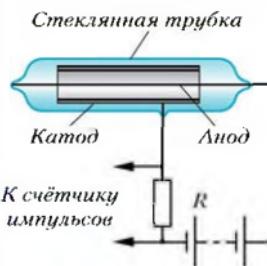


Рис. 256

Подобные счётчики используют для регистрации быстрых заряженных частиц и гамма-квантов. Существуют и другие виды счётчиков, в том числе счётчики, позволяющие регистрировать потоки нейтронов.

Понятно, что счётчики не дают информации о характере движения частиц: виде траектории, их длине. Наблюдать траектории движения частиц — *треки* — позволяют трековые детекторы. Известно несколько видов трековых детекторов. В качестве примеров рассмотрим два таких детектора: *камеру Вильсона* и *пузырьковую камеру*.

Камера Вильсона была создана ещё в 1912 г. В настоящее время она не применяется. Камера Вильсона представляет собой герметичный стеклянный сосуд, объём которого равен нескольким кубическим сантиметрам. Сосуд заполняют парами воды (или спирта), давление которых немного меньше давления насыщенных паров. В сосуде имеется поршень; при его резком перемещении объём камеры адиабатически увеличивается. В результате температура пара уменьшается, и он становится перенасыщенным. При пролёте через такой пар заряженной частицы происходит конденсация пара вдоль траектории. Совокупность образующихся капелек называют треком. Эти треки фотографируют, освещая камеру кратковременной вспышкой света. По длине трека можно определить энергию частицы, а по толщине (числу капелек на единицу длины трека) — её скорость. Если поместить камеру Вильсона в однородное магнитное поле, то, зная индукцию магнитного поля и измеряя кривизну трека, можно определить удельный заряд частицы (отношение заряда к массе) и тем самым определить тип частицы.

В пузырьковой камере используют перегретую жидкость. При пролёте частицы через перегретую жидкость вдоль её траектории образуются мельчайшие пузырьки пара.

Пузырьковые камеры по сравнению с камерами Вильсона обладают рядом преимуществ. Например, их размеры (до нескольких кубических мет-



Этот метод был разработан советскими физиками Петром Леонидовичем Кашицей (1894–1984) и Дмитрием Владимировичем Скobelцыным (1892–1990).



Напомним, что перегретой называют жидкость, температура которой больше её температуры кипения при данных условиях. Такая жидкость при отсутствии центров парообразования может находиться в метастабильном состоянии. Обычно в качестве таких жидкостей в пузырьковых камерах используют жидкий водород или гелий.



ров) могут во много раз превышать размеры камер Вильсона. Это повышает вероятность обнаружения частиц. Кроме того, эта вероятность увеличивается и потому, что в пузырьковых камерах плотность вещества существенно больше, чем в камерах Вильсона. Ещё одним преимуществом пузырьковых камер является то, что при использовании в них жидкого водорода или гелия за счёт уменьшения конвекционных потоков удается получить более чёткие снимки треков.

В заключение отметим, что для регистрации треков частиц наряду с рассмотренными камерами используют и толстослойные фотоэмulsionии. Напомним, что именно с помощью фотопластинок французский физик А. Беккерель открыл в 1896 г. радиоактивность. Преимущество фотоэмulsionий обусловлено двумя обстоятельствами: существенно большей, чем у жидкостей, плотностью и тем, что время экспозиции может быть достаточно большим. Последнее обстоятельство позволяет регистрировать редкие события.

### Вопросы

- 1 Какие типы детекторов радиоактивных излучений вы знаете?
- 2 Как устроен счётчик Гейгера? На чём основан принцип его действия?
- 3 Что представляет собой: а) камера Вильсона; б) пузырьковая камера?
- 4 В чём преимущества пузырьковой камеры по сравнению с камерой Вильсона?
- 5 Зачем трековые детекторы помещают в магнитное поле?
- 6 Какие характеристики частиц можно определить, исследуя их треки?
- 7 Какие преимущества имеет метод регистрации частиц с помощью толстослойных фотоэмulsionий перед методами регистрации с помощью трековых камер?

### § 81

## Биологическое действие радиоактивных излучений. Дозиметрия

С давних времён радиоактивные излучения, обусловленные естественным фоном Земли и приходящими извне космическими лучами, окружают человека и всё живое. Существуют исследования, показывающие

положительное влияние на организм незначительной радиации. Вместе с тем необходимо знать, что радиоактивные излучения представляют опасность. Дело в том, что ядерное излучение, проходя через вещество, ионизирует его. В результате нарушаются биохимические процессы в клетках живого организма. Степень отрицательного воздействия радиации зависит от вида частиц и их энергии. Чем большей энергией обладают частицы, тем более серьёзные нарушения в организме они вызывают.

**Энергию ионизирующего излучения, поглощённую веществом и рассчитанную на единицу массы этого вещества, называют поглощённой дозой излучения.**

! Следовательно, поглощённая доза излучения равна отношению поглощённой телом энергии  $E$  к массе  $m$  этого тела:

$$D = \frac{E}{m}. \quad (1)$$

Единица поглощённой дозы в СИ — *грей* (Гр); 1 Гр = 1 Дж/кг.

Раньше поглощённую дозу измеряли в *рентгенах* (Р); 1 Р ≈ 8,4 · 10<sup>-3</sup> Гр. Приближённо можно считать, что 1 Р равен 1/100 (или 10<sup>-2</sup>) Гр.

Существенным фактором является и время, за которое организм получает ту или иную дозу излучения. Чем меньше этот промежуток времени (при неизменной дозе), тем большую опасность представляет для организма поглощённое излучение. Отношение поглощённой дозы к времени облучения называют *мощностью поглощённой дозы*:

$$P = \frac{D}{t}. \quad (2)$$

Единица мощности поглощённой дозы в СИ — *грей в секунду* (Гр/с).

В результате воздействия естественного фона (космическое излучение, радиоактивное излучение Земли и др.) организм человека за год поглощает дозу ~2 · 10<sup>-3</sup> Гр. Такая доза не представляет опасности для здоровья.

! Предельно допустимая доза (ПДД) поглощённого за год излучения для любого человека равна 5 · 10<sup>-3</sup> Гр, а для людей, работающих с источниками излучения, она в 10 раз больше — 5 · 10<sup>-2</sup> Гр.

Биологическое действие различных видов излучения при одинаковой поглощённой дозе зависит от типа излучения. Для того чтобы учесть тип излучения, вводят *коэффициент биологической активности*  $k$ . Этот коэффициент равен отношению дозы полученного организмом излучения к дозе гамма-лучей, которые производят такой же биологический эффект.

фект. Для рентгеновского излучения и электронов  $k = 1$ , для тепловых нейтронов  $k = 3$ , для быстрых нейтронов ( $E \geq 5$  МэВ)  $k = 7$ , для протонов  $k = 10$ . Для альфа-частиц коэффициент биологической активности может достигать 20.

**Поглощённую дозу  $D$ , умноженную на коэффициент биологической активности  $k$ , называют эквивалентной дозой  $H$ :**

$$H = D \cdot k. \quad (3)$$

В СИ единица эквивалентной дозы — зиверт (Зв).

Наряду с этой единицей часто используют так называемый биологический эквивалент рентгена (бэр); 1 бэр =  $1/100$  Зв, так как  $1 \text{ Р} \approx 1/100 \text{ Гр}$ .

1 Зв — эквивалентная доза, при которой поглощённая доза гамма-излучения равна 1 Гр. С учётом коэффициента биологической активности поглощённая доза, например, для альфа-частиц при этом будет равна  $1/20$  Гр, а для протонов —  $1/10$  Гр.

В качестве примера в табл. 3 приведены средние годовые дозы  $H$ , получаемые взрослым человеком в промышленно развитых странах. Обратим внимание на то, что существенную долю облучения составляет радоновая доза. Напомним, что радон — короткоживущий радиоактивный продукт распада урана. Основная доля радона содержится в воздухе, попадая в него из грунта и строительных минеральных материалов. Именно поэтому рекомендуется чаще проветривать жилые помещения.

Таблица 3

Источник облучения	Доза $H$ , мЗв	Вклад (доля), %
Естественный фон	0,825	22,9
Радон и продукты его распада	1,55	43,1
Ионизирующие излучения в медицине	1,2	33,3
Космические лучи	0,002	0,06
Радиолюминесцентные товары	0,002	0,06
Промышленные выбросы	0,02	0,55
Предприятия атомной энергетики	0,001	0,03
Всего	3,6	100

Следует знать, что первые признаки общего острого поражения организма (кроветворной системы) взрослого человека возникают примерно с эквивалентной дозы от 0,5 до 1,0 Зв (или 50–100 бэр). При разовых эквивалентных дозах 10–50 Зв смерть наступает примерно через 1–2 недели. Здесь же отметим, что годовая доза внешнего фонового облучения, обусловленного космическим излучением и излучением от земной коры, в среднем составляет 0,35 мЗв.

*Ещё раз отметим, что предельно допустимая доза (ПДД) для лиц, работающих с источниками излучения, равна 50 мЗв (или 5 бэр) за год. При разовом аварийном облучении ПДД равна 250 мЗв (или 25 бэр).*

Основной метод защиты от радиоактивного излучения связан с использованием изолирующих материалов. Легче всего защититься от внешнего альфа-излучения. Оно практически полностью задерживается листом обычной бумаги. Поэтому такие частицы не преодолевают одежду и кожу человека. Однако, попадая в организм человека (с воздухом, пищей, через открытые раны), альфа-частицы представляют серьёзную опасность.

Бета-излучение способно проникать в ткани организма на глубину 1–2 см. От него можно защититься, например, листом алюминия толщиной в несколько сантиметров.

Гамма-излучение обладает большой проникающей способностью. Его можно задержать лишь толстым слоем бетона или свинца.

### Вопросы

- 1\_ Что называют: а) поглощённой дозой излучения; б) мощностью поглощённой дозы? В каких единицах измеряют эти величины в СИ?
- 2\_ Влияет ли время получения дозы излучения на степень повреждения организма? Чему равна ПДД поглощённого за год излучения для человека?
- 3\_ Что называют: а) коэффициентом биологической активности; б) эквивалентной дозой; в) биологическим эквивалентом рентгена?
- 4\_ При какой эквивалентной дозе проявляются первые признаки общего острого поражения организма? Чему равна ПДД при разовом аварийном облучении?
- 5\_ Какие методы защиты от разных видов радиоактивного излучения вам известны?

**Упражнения**

- 1** Используя данные параграфа, определите энергию ионизирующего излучения, поглощаемую человеком массой  $M = 70$  кг за год при медицинских исследованиях.
- 2** Определите эквивалентную ПДД за год, получаемую человеком, работающим с радиоактивными веществами, при его облучении:  
а) рентгеновскими лучами; б) нейtronами; в) альфа-частицами. Во сколько раз эти эквивалентные дозы отличаются от ПДД при разовом аварийном облучении?

**§ 82****Элементарные частицы.  
Фундаментальные взаимодействия**

До 30-х гг. XX столетия были известны всего четыре, как их тогда называли, элементарные частицы: электрон, протон, нейtron и фотон. Считалось, что именно эти частицы и есть простейшие неделимые составляющие всего окружающего нас мира. Однако ситуация изменилась после создания ускорителей, позволяющих получать «ядерные снаряды» со всей большей и большей энергией. Выяснилось, что *при столкновениях элементарные частицы с большой энергией, «не раскальваваясь» на более простые, порождают новые, в том числе неизвестные ранее, частицы*. При этом во многих случаях массы порождённых частиц превышают массы сталкивающихся. Подобные же результаты были получены и при исследовании взаимодействия космических лучей высоких энергий с атмосферой.

Чтобы различать эти новые частицы, их пришлось характеризовать не только массой и электрическим зарядом, но и другими величинами, смысл которых достаточно сложен. Многие из этих характеристик имеют довольно экзотические названия. например «очарование», «странный» и др.



В современной физике под термином «элементарная частица» обычно подразумевают мельчайшую частицу материи, которая не является атомом или его ядром.

Иключение составляет, пожалуй, только протон. По образному выражению Э. Ферми, термин «элементарная» скорее относится к уровню наших знаний о частице, чем к её природе.

Теоретически было предсказано, а потом и экспериментально обнаружено, что почти у каждой частицы существует, причём только одна, *античастица*. При столкновении частицы со своей античастицей они *аннигилируют*, т. е. исчезают. При этом появляются совершенно другие частицы, например фотоны.

Примерами пары частицы и её античастицы являются электрон ( $e^-$ ) и позитрон ( $e^+$ ), протон ( $p$ ) и антипротон ( $\bar{p}$ ). В приведённых парах частицы отличаются друг от друга только знаком электрического заряда. *В общем случае частица отличается от своей античастицы только одной из многих характеризующих их величин.*

Частицу, которая не имеет античастицы, называют *истинно нейтральной*. Примерами таких частиц являются фотон и  $\pi^0$ -мезон. Установлено, что истинно нейтральная частица, имеющая достаточную энергию, при определённых условиях может одновременно порождать частицу и её античастицу. Так, если энергия гамма-кванта больше  $2 \cdot m_e \cdot c^2$ , где  $m_e$  — масса электрона, а  $c$  — модуль скорости света в вакууме, то при пролёте гамма-кванта вблизи ядра X атома могут родиться электрон и позитрон:

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+. \quad (1)$$

К настоящему времени известно уже более 350 элементарных частиц. Некоторые из этих частиц имеют массу, превышающую массу протона. Среди них есть частицы, электрический заряд которых по модулю в два и даже в три раза превышает элементарный заряд. Время жизни некоторых из вновь открытых частиц оказалось меньшим  $10^{-22}$  с, т. е. сравнимым со временем пролёта фотоном ядра атома. Такие частицы стали называть *резонансами*.



В результате многочисленных экспериментов было установлено, что все элементарные частицы могут превращаться друг в друга, и эти взаимные превращения — главная особенность их существования.

В табл. 4 приведены характеристики фотона и лептонов, а в табл. 5 — характеристики некоторых частиц, состоящих из нескольких夸克ов. В настоящее время все элементарные частицы распределяют по трём группам.

В первую группу входит только одна частица — *фотон*. Это истинно нейтральная частица, не имеющая ни массы, ни электрического заряда. Фотоны являются носителями электромагнитного взаимодействия.

Таблица 4

Наименование частицы	Обозначение и электрический заряд частицы и её античастицы		Масса (в массах электрона)	Время жизни (с) или стабильны ( $\tau > 10^{22}$ с)
<b>Фотон</b>				
Фотон	$\gamma$ , 0		0	Стабилен
<b>Лептоны</b>				
Электронное нейтрино	$\nu_e$ , 0	$\bar{\nu}_e$ , 0	$4 \cdot 10^{-12}$	Способны взаимно превращаться
Мюонное нейтрино	$\nu_\mu$ , 0	$\bar{\nu}_\mu$ , 0	$3 \cdot 10^{-7}$	
Таонное нейтрино	$\nu_\tau$ , 0	$\bar{\nu}_\tau$ , 0	$3 \cdot 10^{-5}$	
Электрон	$e^-$ , -1	$e^+$ , 1	1	Стабильны
Мюон	$\mu^-$ , -1	$\mu^+$ , 1	207	$2,2 \cdot 10^{-6}$
Таон	$\tau^-$ , -1	$\tau^+$ , 1	3492	$3,5 \cdot 10^{-12}$

Таблица 5

Наименование частицы	Обозначение и электрический заряд частицы и её античастицы		Масса (в массах электрона)	Время жизни (с) или стабильны ( $\tau > 10^{22}$ с)		
<b>Адроны</b>						
<i>Мезоны</i> (2 кварка: кварк и антакварк)						
Пионы	$\pi^0$ , 0		264	$0,8 \cdot 10^{-18}$		
	$\pi^+$ , 1	$\pi^-$ , -1	273	$2,6 \cdot 10^{-8}$		
Каоны	$K^+$ , 1	$K^-$ , -1	966	$1,2 \cdot 10^{-8}$		
	$K^0$ , 0		974	$5 \cdot 10^{-8}$ или $9 \cdot 10^{-11}$		
Эта-ноль-мезон	$\eta^0$ , 0		1074	$\sim 10^{-17}$		
<i>Барионы</i> (3 кварка)						
Нуклоны	Протон	$p$ , 1	$\bar{p}$ , -1	1836		
	Нейтрон	$n$ , 0	$\bar{n}$ , 0	$1839$		
Гипероны	Лямбда-гиперон (1s-кварк)	$\Lambda^0$ , 0	$\bar{\Lambda}^0$ , 0	$2183$		
	Сигма-гипероны (1s-кварк)	$\Sigma^+$ , 1	$\bar{\Sigma}^+$ , -1	$2328$		

Наименование частицы		Обозначение и электрический заряд частицы и её античастицы		Масса (в массах электрона)	Время жизни (с) или стабильны ( $\tau > 10^{22}$ с)
Гипероны	Сигма-гипероны (1s-кварк)	$\Sigma^0, 0$	$\bar{\Sigma}^0, 0$	2334	$10^{-14}$
		$\Sigma^-, -1$	$\bar{\Sigma}^-, 1$	2343	$1,5 \cdot 10^{-10}$
	Кси-гипероны (2s-кварка)	$\Xi^0, 0$	$\bar{\Xi}^0, 0$	2573	$3 \cdot 10^{-10}$
		$\Xi^-, -1$	$\bar{\Xi}^-, 1$	2586	$1,7 \cdot 10^{-10}$
	Омега-минус-гиперон (3s-кварка)	$\Omega^-, -1$	$\bar{\Omega}^-, 1$	3273	$0,8 \cdot 10^{-11}$

Вторую группу образуют частицы, которые, как и фотон, не участвуют в сильном взаимодействии. Эта группа состоит из шести частиц и их античастиц. Массы этих частиц малы (кроме таона). Поэтому частицы второй группы назвали *лектонами* (от греч. λεπτός – «лёгкий»).

Третью группу составляют частицы, участвующие в сильном взаимодействии. Поэтому их называли *адронами* (от греч. ὀδρός – «крупный», «сильный»). В эту группу входит огромное число частиц, из них только некоторые приведены в табл. 5.

В 1964 г. американские физики Марри Гелл-Манн (р. 1929) и Джордж Цвейг (р. 1937) для объяснения свойств адронов предложили (независимо друг от друга) модель, согласно которой все адроны построены из более «простых», или «первичных», частиц – *кварков*.

В настоящее время считают, что существует 18 кварков и столько же антикварков. Особенность кварков состоит в том, что они *имеют электрические заряды*, равные  $+\frac{2}{3}e$  или  $-\frac{1}{3}e$ , где  $e$  – модуль элементарного заряда. Антикварки имеют электрические заряды противоположного знака. Другая особенность кварков состоит в том, что *сила их взаимного притяжения по мере увеличения расстояния между ними быстро возрастает* (подобно тому, как растёт сила упругости пружины по мере её растяжения). Этим объясняют тот факт, что при бомбардировке вещества частицами, получаемыми с помощью мощнейших ускорителей, не удается наблюдать отдельные кварки. При соударении ядер, имеющих достаточно большую энергию, могут возникать новые пары кварк – антикварк, которые сразу объединяются в новые адроны.

В зависимости от количества кварков, образующих адрон, последний является либо *мезоном*, либо *барионом* (см. табл. 5). Мезон (от греч. μέσος –

«средний») состоит из двух夸克ов. Барион (от греч. βαρύς — «тяжёлый») состоит из трёх夸克ов. К барионам относятся нуклоны: протон инейтрон. Протон состоит из двух положительных и одного отрицательного夸кса, анейтрон — из двух отрицательных и одного положительного夸кса.

**!** Таким образом, согласно современным представлениям, фундаментальными (не состоящими из других) частицами являются лептоны и夸克сы.

К истинно элементарным относят также частицы — переносчики различных видов взаимодействий.

В связи с этим рассмотрим основные особенности фундаментальных взаимодействий, представленные в табл. 6.

Таблица 6

Фундаментальные взаимодействия	Сильное	Электромагнитное	Слабое	Гравитационное
Взаимодействующие частицы	Кварки Нуклоны	Частицы с электрическими зарядами	Кварки Лейтоны	Все частицы
Радиус действия сил, м	$10^{-15}$	$\infty$	$10^{-17}$	$\infty$
Относительная сила взаимодействия	1	$10^{-2}$	$10^{-6}$	$10^{-38}$
Носители взаимодействия	Глюоны	Фотоны	Промежуточные бозоны	(Гравитоны)

Наиболее слабым является *гравитационное взаимодействие*. В нём участвуют все без исключения частицы, в том числе переносчики взаимодействий. По существующим представлениям, гравитационное взаимодействие осуществляется за счёт обмена гипотетическими частицами — *гравитонами*. Эти частицы до сих пор не удалось зарегистрировать, по-видимому, из-за очень малых сил гравитационного взаимодействия. Однако именно благодаря гравитационному взаимодействию происходит объединение планет и звёзд в галактики. Под действием сил гравитационного взаимодействия огромные массы вещества сжимаются, образуя звёзды. В результате этого сжатия температура вещества поднимается до десятков миллионов градусов и возникают термоядерные реакции.

Следующим (по интенсивности действующих сил) является так называемое *слабое взаимодействие*. Оно примерно в  $10^{32}$  раз интенсивнее гравитационного, если расстояние между взаимодействующими частицами не превы-

шает  $10^{-17}$  м. Поэтому силы такого взаимодействия называют короткодействующими. Слабое взаимодействие существует между кварками и лептонами, а также между лептонами. Этим взаимодействием обусловлены уже упоминавшиеся процессы распада нейтрона на протон, электрон и антинейтрino. Переносчиками слабого взаимодействия являются открытые в конце XX в. частицы, массы которых почти в 100 раз превышают массу нуклонов. Эти частицы называют *промежуточными векторными бозонами*. Характерное время протекания реакций, вызванных слабым взаимодействием, составляет  $\sim 10^{-10}$  с.

*Электромагнитное взаимодействие* примерно в  $10^4$  раз интенсивнее слабого взаимодействия. Как и гравитационное, электромагнитное взаимодействие является дальнодействующим. Это взаимодействие осуществляется между электрически заряженными частицами за счёт обмена фотонами. Именно благодаря этому взаимодействию электроны удерживаются в атоме, атомы объединяются в молекулы, а молекулы — в жидкые и твёрдые тела. Процессы в ядре, обусловленные этим видом взаимодействия, осуществляются за промежутки времени  $\sim 10^{-21}$  с.

*Ядерное (или сильное) взаимодействие*, как уже отмечалось, возникает только между адронами. Оно примерно в 100 раз интенсивнее электромагнитного, если расстояние между адронами не превышает  $\sim 10^{-15}$  м. Поэтому силы этого взаимодействия называют короткодействующими. Время протекания процессов, обусловленных ядерными силами, близко к  $10^{-24}$  с. Как уже говорилось в § 75, ядерные силы между нуклонами в ядре атома возникают за счёт обмена нуклонов пионами. В адронах силы взаимодействия между кварками возникают за счёт обмена *глюонами*. Благодаря сильному взаимодействию протоны и нейтроны удерживаются в ядрах.

### Вопросы

- 1 Что в современной физике понимают под термином «элементарная частица»? В чём состоит главная особенность существования элементарных частиц?
- 2 Что называют античастицей для данной частицы? Приведите примеры пар частица — античастица.
- 3 Какую частицу называют истинно нейтральной?
- 4 На чём основан принцип разделения элементарных частиц на группы?
- 5 Что такое кварки? Почему не удается наблюдать отдельные кварки?
- 6 Каковы электрические заряды кварков, образующих: а) протон; б) нейtron?
- 7 Опишите фундаментальные взаимодействия.

## АТОМНОЕ ЯДРО. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Ядро атома состоит из нуклонов — положительно заряженных протонов и незаряженных нейтронов. Количество протонов в атомном ядре — *зарядовое число*  $Z$  — равно порядковому номеру соответствующего этому атому химического элемента в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева.

**Атомы, ядра которых содержат одинаковое число  $Z$  протонов, но разное число  $N$  нейтронов, называют изотопами.**

**Общее число  $A$  нуклонов в ядре называют массовым числом**

$$\text{Массовое число изотопа } A = Z + N$$

Масса ядра  $m_A$  всегда меньше суммы масс всех составляющих его протонов и нейтронов. Величину  $\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_A$  называют *дефектом масс* атомного ядра.

**Силы, обеспечивающие удержание нуклонов в ядре атома, называют ядерными силами.**

Взаимодействие нуклонов ядерными силами часто называют сильным взаимодействием

**Минимальную энергию, необходимую для разделения ядра на отдельные нуклоны, называют энергией связи атомного ядра.**

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2, \text{ где } \Delta m \text{ — дефект масс}$$

Удельная энергия связи нуклонов в ядре равна  $E_{\text{св}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}$ .

Если массу измерять в а. с. м., то

$$E_{\text{св}} = \frac{931.5(Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_A)}{A} \text{ (МэВ/нуклон)}$$

**Радиоактивность — самопроизвольное (спонтанное) превращение атомных ядер, сопровождаемое испусканием различных частиц (например, альфа-частиц, электронов, протонов, фотонов и т. п.).**

Радиоактивность — процесс вероятностный

**Закон радиоактивного распада**

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-T}$$

где  $N(t)$  — число радиоактивных ядер данного изотопа, оставшихся к моменту времени  $t$ ,  $N_0$  — число радиоактивных ядер в начальный момент времени,  $T$  — период полураспада, промежуток времени, по истечении которого распадается половина от начального (достаточно большого) числа ядер данного изотопа

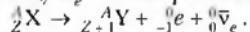
**Альфа-распад** — самопроизвольное деление материинского ядра  ${}_Z^A X$  на альфа-частицу  ${}_2^4 \text{He}$  и дочернее ядро  ${}_{Z-2}^{A-4} Y$ .

Правило смещения при альфа-распаде:

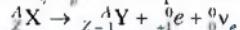
Массовое число дочернего ( $Y$ ) ядра меньше на четыре, а зарядовое число меньше на два, чем соответствующие массовое и зарядовое числа материинского ( $X$ ) ядра:  ${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4} Y + {}_2^4 \text{He}$

**Бета-распад** — не внутриядерный, а внутринуклонный процесс.

При электронном распаде ( $\beta^-$ -распаде) атомное ядро  ${}_Z^A X$  самопроизвольно испускает электрон  $e^-$  и электрически нейтральную лёгкую частицу  $\bar{\nu}_e$  — электронное антинейтрино:



При позитронном распаде ( $\beta^+$ -распаде) атомное ядро  ${}_Z^A X$  самопроизвольно испускает позитрон  $e^+$  и электрически нейтральную лёгкую частицу  $\nu_e$  — электронное нейтрино:



**Ядерными реакциями** называют превращения атомных ядер, вызванные их взаимодействием друг с другом или с налетающими на них частицами.

При ядерных реакциях выполняются законы сохранения электрического заряда, энергии и импульса.

**Закон сохранения массового числа**

При любой ядерной реакции сохраняется суммарное массовое число: сумма чисел протонов и нейтронов до реакции равна сумме чисел протонов и нейтронов после реакции

**Термоядерные реакции** — это реакции слияния (синтеза) лёгких ядер в более тяжёлые, происходящие при очень высоких температурах. Стационарные термоядерные реакции протекают в недрах звёзд и являются основным источником излучаемой ими энергии

Зарождение астрономии — науки о Вселенной — относится ко 2-му тыс. до н. э. Слово *астрономия* образовано от двух греческих слов: ἀστρον — «звезда» и νόμος — «закон». Астрономия изучает движение небесных тел, их природу, происхождение и эволюцию. Таким образом, астрономия не только исследует настоящее окружающего нас мира, но и позволяет узнать его прошлое, предвидеть будущее.

Жизнь современного человека трудно себе представить без использования искусственных космических объектов — спутников связи и навигации, без космических методов исследования полезных ископаемых, предсказания погоды и т. п. Кроме того, влияние происходящих на Солнце процессов на нашу планету огромно. Поэтому изучение Солнца и других звёзд, открытие законов эволюции этих космических тел, кроме научных целей, также представляет собой важную практическую задачу.

**§ 83****Основные методы исследования в астрономии**

До 60-х гг. прошлого века единственным источником знаний о небесных телах были наблюдения за этими телами с поверхности Земли. Ещё вавилонские жрецы на основе систематических наблюдений за движением Солнца, Луны и планет на фоне звёздного неба установили периодичность лунных и солнечных затмений. Однако только изобретение Галилеем телескопа в XVII в. позволило обнаружить горы на Луне, спутники планет и увидеть гораздо большее число небесных тел. В настоящее время в наблюдательной астрономии применяют оптические телескопы, диаметр зеркал которых достигает 8–10 м. Эти телескопы позволяют не только регистрировать небесные объекты, расположенные от нас на расстоянии ~10 млрд св. лет, но и обнаружить наличие планет у звёзд, находящихся в других галактиках. Результаты наблюдений через оптические телескопы обрабатывают сейчас в современных

компьютерных системах, что позволяет не только ускорить получение результатов, но и корректировать погрешности, обусловленные, например, влиянием атмосферы.

Одним из ведущих разделов современной астрономии является *астрофизика* – наука о природе небесных тел. Ещё в XIX в. учёные догадались, что, исследуя спектр света, пришедшего от небесного тела, можно определить его температуру, химический состав и скорость движения. В XX в. появились радиотелескопы, стала развиваться радиоастрономия. Во второй половине XX в. начались интенсивные исследования спектров излучения небесных тел в инфракрасном диапазоне.

После успешных запусков спутников, создания орбитальных и межпланетных станций с размещёнными на них телескопами стали возможны исследования во всём диапазоне электромагнитного излучения, включая ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучения, которые значительно ослабляются, проходя земную атмосферу.

С развитием космической техники появилась возможность проведения исследований вблизи или непосредственно на поверхности небесных тел. В 1966 г. впервые в истории человечества была осуществлена мягкая посадка советской автоматической межпланетной станции «Луна-13» на поверхность Луны. Были исследованы свойства лунного грунта. Результаты этих исследований были переданы на Землю. 20 июля 1969 г. американские астронавты высадились на поверхность Луны. В 1970 и 1973 гг. советские автоматические аппараты «Луноход-1» и «Луноход-2» прошли 17 км по поверхности Луны, передавая телевизионное изображение на Землю.

В 1971 г. автоматический аппарат космической станции «Марс-3» совершил посадку на поверхность Марса и передал на Землю фотографии поверхности этой планеты. В последующие годы с использованием космических аппаратов были проведены исследования и получены изображения поверхности всех остальных планет Солнечной системы.

Исследования планет Солнечной системы не только подтвердили справедливость сделанных до этого выводов на основе наблюдений с поверхности Земли, но и позволили получить новые ценные результаты.

### Вопросы

- 1 Что изучает астрономия?
- 2 Перечислите основные методы исследования Вселенной.
- 3 Какие исследования позволяют определить температуру и химический состав звёзд?

- 4 | Почему исследование в коротковолновом диапазоне электромагнитного излучения стало возможным только после вывода исследовательских систем за пределы земной атмосферы?

§ 84

## Определение расстояний до небесных тел

Расстояния до небесных тел (ближайших звёзд) определяют по методу параллакса.

Рассмотрим треугольник  $ABC$  (рис. 257). Пусть известно расстояние между двумя точками  $A$  и  $B$ . Назовём это расстояние *базисом*. Если известны прилежащие к базису углы —  $\angle BAC$  и  $\angle ABC$ , то не составляет труда определить остальные элементы треугольника. Решение этой геометрической задачи и лежит в основе определения расстояний до небесных тел.

Для определения расстояний до небесных тел в пределах Солнечной системы в качестве базиса используют радиус Земли, т. е. расстояние между центром  $A$  Земли и точкой  $B$  на её поверхности (рис. 258). Если  $\angle BAC = \frac{\pi}{2}$ , то искомое расстояние

$$BC = \frac{AB}{\sin p}, \quad (1)$$

где  $p$  — угол, под которым виден базис  $AB$  из точки  $C$ . Этот угол называют *параллаксом* точки  $C$ .

При определении расстояний до ближайших звёзд в качестве базиса используют средний радиус  $R$  земной орбиты. Напомним, что среднее расстояние от Земли до Солнца имеет специальное название — *астрономическое*.

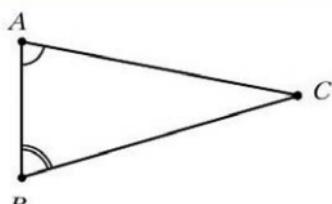


Рис. 257

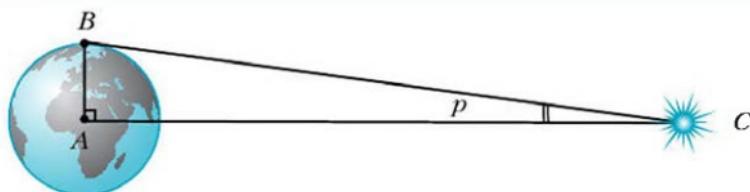


Рис. 258

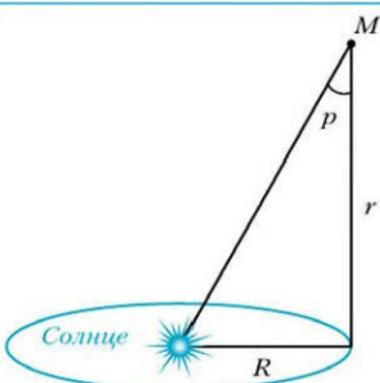


Рис. 259

ская единица (1 а. с. = 149 600 000 км ≈  $\approx 1,5 \cdot 10^{11}$  м).

Угол  $p$ , под которым со звезды был виден средний радиус  $R$  земной орбиты, расположенный перпендикулярно направлению на звезду, называют *годичным параллаксом звезды* (рис. 259). Годичные параллаксы всех звёзд составляют доли угловых секунд. Поэтому если  $p$  измерен в радианах, то расстояние  $r$  до звезды может быть рассчитано по формуле:

$$r = \frac{R}{p}. \quad (2)$$

**Расстояние до звезды, годичный параллакс которой равен одной угловой секунде, называют парсеком (пк).**

Поскольку 1 рад = 206 265", то из формулы (2) следует, что

$$1 \text{ парсек} = 206 265 \text{ а. с.} \approx 3,08 \cdot 10^{13} \text{ км} \approx 3,26 \text{ светового года.} \quad (3)$$

**Световой год — расстояние, на которое свет распространяется в вакууме за один земной год.**

Из формул (2) и (3) следует, что *если годичный параллакс измерен в угловых секундах, то расстояние до звезды в парсеках вычисляется по формуле:*

$$r = p^{-1}. \quad (4)$$

В настоящее время расстояния до различных объектов в Солнечной системе определяют радиолокационными методами, измеряя время прохождения радиоимпульса до объекта и обратно.

### Вопросы

1. Что называют: а) базисом; б) параллаксом?
2. Что называют астрономической единицей?
3. Что такое: а) годичный параллакс звезды; б) парсек; в) световой год?
4. Какие методы измерения расстояний до небесных тел вам известны?

**Упражнения**

- Используя рис. 258, определите параллакс  $p$  Луны. Считайте, что базис равен экваториальному радиусу Земли ( $R_{\text{З}} = 6378 \text{ км}$ ). Расстояние от Земли до Луны равно  $384,4 \cdot 10^3 \text{ км}$ .
- Годичный параллакс звезды Сириус  $p = 0,375''$ . Определите расстояние до этой звезды.
- В тот момент времени, когда расстояние между Землёй и Марсом оказалось равным  $0,3 \cdot 10^9 \text{ км}$ , с Земли был послан радиосигнал на автоматическую станцию, находящуюся на поверхности Марса. Оцените время, через которое станция получит этот сигнал.

**§ 85****Солнце**

Особое значение для Земли имеет Солнце — ближайшая к нам звезда. По своим размерам ( $R_{\odot} = 696 \cdot 10^3 \text{ км}$ ), возрасту, температуре и массе ( $\sim 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$ ) Солнце является звездой средней величины (см. § 87). Масса Солнца составляет примерно 99 % массы всей Солнечной системы. Средняя излучаемая Солнцем мощность — *светимость*  $L$  — близка к  $4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$ . Исследование спектра излучения Солнца позволило установить, что водород составляет  $\sim 73\%$  его массы, гелий  $\sim 25\%$ , а остальные элементы  $\sim 2\%$ .

Солнце состоит из ядра радиусом  $\sim 1,4 \cdot 10^5 \text{ км}$  и окружающих его слоёв (см. цветную вклейку, рис. IX). Температура ядра близка к 14 млн градусов. Давление в ядре достигает 100 млрд атм. Плотность вещества в ядре  $\sim 0,15 \text{ кг}/\text{см}^3$ .

 В ядре Солнца протекают термоядерные реакции, обеспечивающие образование огромных количеств энергии.

Цепочка термоядерных реакций в недрах Солнца, в результате которых получается 86 % энергии, имеет вид:



Эту цепочку с превращением четырёх протонов в одно ядро гелия называют *протон-протонным* (или *водородным*) циклом.

 Превращение четырёх протонов в гелий в этом основном цикле сопровождается выделением 26,2 МэВ энергии. Наряду с основным циклом син-

тез водорода в гелий происходит и по так называемому углерод-азотному циклу с энерговыделением  $-25$  МэВ. Поэтому в среднем при слиянии четырёх протонов в ядро гелия выделяется  $-26$  МэВ, т. е. по  $6,5$  МэВ на каждое «горевшее» ядро водорода. Следовательно, в результате этих реакций изменение массы в расчёте на один протон равно:

$$\Delta m = \frac{6,5}{931,5} \approx 0,007 \text{ а. с. м.} \quad (1)$$

Полученная величина в 7 раз больше, чем при делении ядра урана. В одном грамме водорода содержится  $6,02 \cdot 10^{23}$  ядер. Следовательно, при их «сгорании» должно выделяться  $6,17 \cdot 10^{11}$  Дж. Поэтому для обеспечения наблюдаемой светимости Солнца в его недрах ежесекундно должно «сторать» примерно  $650$  млн т водорода. Следовательно, масса Солнца ежесекундно уменьшается на  $650 \cdot 0,007 \approx 4,5$  млн т. При таком темпе «горения» запаса водорода хватит на поддержание термоядерной реакции в течение

$$\frac{2 \cdot 10^{30} \cdot 0,73}{650 \cdot 10^9} \text{ с} \approx 2,2 \cdot 10^{18} \text{ с} \approx 0,7 \cdot 10^{11} \text{ лет.}$$

Эта оценка (70 млрд лет) получена в предположении неизменного темпа «горения». На самом деле при устойчивом «горении» потеря массы не должна превышать 10 %. Поэтому Солнце реально должно ещё неизменно светить примерно 6 млрд лет. Отметим, что Солнце «горит» очень экономично: при массе  $2 \cdot 10^{30}$  кг оно излучает  $4 \cdot 10^{26}$  Вт, т. е. его удельная мощность составляет  $2 \cdot 10^{-4}$  Вт/кг. Это примерно в 50 раз меньше удельной мощности излучения горящей спички.



Энергия, генерируемая в ядре Солнца, выходит на его поверхность очень медленно. Для этого требуется в среднем  $\sim 10$  млн лет. Дело в том, что ядро окружено так называемой зоной радиации, в которой не протекают ядерные реакции, а перенос энергии осуществляется в основном за счёт излучения. Эта зона окружена зоной конвекции. Количество теплоты, получаемое конвективной зоной от зоны радиации, столь велико, что оно не может быть передано следующему слою — фотосфере — только за счёт излучения и теплопроводности. Поэтому в этой зоне возникают конвекционные потоки, обеспечивающие дополнительный перенос энергии. Поднимающееся к внешней границе конвективной зоны разогретое вещество охлаждается, а затем опускается внутрь. Этот процесс напоминает процесс, происходящий в кипящем чайнике, у которого нагревают дно.

Толщина фотосферы не превышает 400 км. Именно фотосфера видна с Земли. Наружную границу фотосферы называют *поверхностью Солнца*. Плотность фотосферы в сотни раз меньше плотности атмосферы вблизи

поверхности Земли. Фотосфера имеет ячеистую структуру, т. е. состоит из гранул (рис. 260). Средние размеры гранул близки к нескольким тысячам километров. Гранула существует примерно 15 мин и движется со скоростью ~1 км/с.

На поверхности Солнца часто видны тёмные *солнечные пятна*. Обычно пятна возникают в экваториальной части Солнца, а затем сдвигаются по его поверхности. Температура внутри пятен на 1000–2000 градусов меньше температуры соседних частей фотосферы (равной ~6000 градусов). Понижение температуры внутри пятен, вероятно, связано с мощными магнитными полями, которые подавляют конвекцию. Каждое пятно обычно существует несколько месяцев.

Фотосферу окружает *хромосфера*. Её толщина равна ~ $10^4$  км, а температура достигает  $2 \cdot 10^4$  градусов. Над хромосферой находится сильно разреженная газовая оболочка — *солнечная корона*. Температура в короне может быть более 1,5 млн градусов. Разогрев хромосферы и солнечной короны происходит за счёт процессов, идущих в более глубоких областях Солнца.

Следует отметить, что хромосфера и корона в обычных условиях не видны, так как их излучение в видимом диапазоне много слабее излучения фотосферы. Эти области Солнца удаётся наблюдать лишь во время солнечных затмений (см. цветную вклейку, рис. X), когда диск Солнца закрывает Луну. При этом видны *протуберанцы* — огромные выбросы водорода, достигающие в длину сотен тысяч километров. Некоторые из протуберанцев имеют вид арок, соответствующих линиям магнитного поля (рис. 261). Отметим, что в рентгеновском диапазоне мощность излучения короны превышает мощность излучения остальных частей Солнца. Эти данные были получены с помощью рентгеновских телескопов, установленных на космических аппаратах.

С внешней поверхности короны непрерывно вылетают протоны, электроны и другие частицы, в том числе раз-

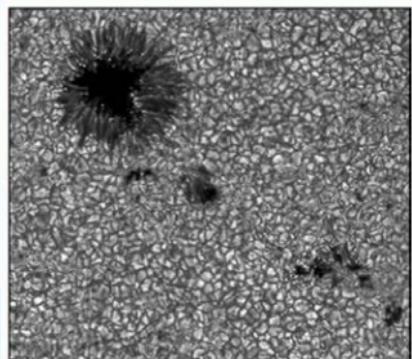


Рис.

260

Картина ячеистой структуры фотосферы

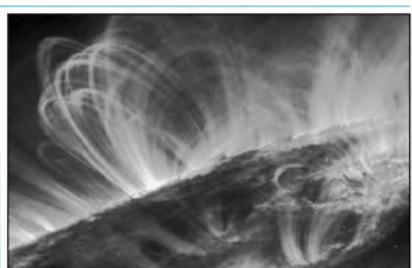


Рис.

261

личные виды нейтрино. Этот поток частиц называют *солнечным ветром*. У поверхности Земли модуль скорости солнечного ветра достигает 500 км/с при средней плотности ~10 частиц на кубический сантиметр.



Когда на Солнце образуются в большом количестве пятна, или протуберанцы, либо увеличивается яркость фотосферы, говорят о повышении *активности* Солнца. Если же число подобных явлений мало, то Солнце считают спокойным – *неактивным*. Ещё в XVIII в. было установлено, что активность Солнца изменяется циклически. На рис. 262 представлена циклограмма появления солнечных пятен за 300 лет наблюдений. Средняя длительность цикла составляет примерно 11 лет. Когда активность Солнца максимальна, на нём происходят мощные вспышки, сопровождаемые резким увеличением ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучения. Кроме того, в космическое пространство выбрасывается огромное число частиц, скорость которых по модулю достигает  $10^5$  км/с. В результате в течение нескольких минут выделяется огромная энергия (до  $10^{25}$  Дж). Всё это оказывает существенное влияние на различные процессы на нашей планете, вызывая, в частности, нарушения в работе электронных приборов и ухудшение самочувствия у людей.

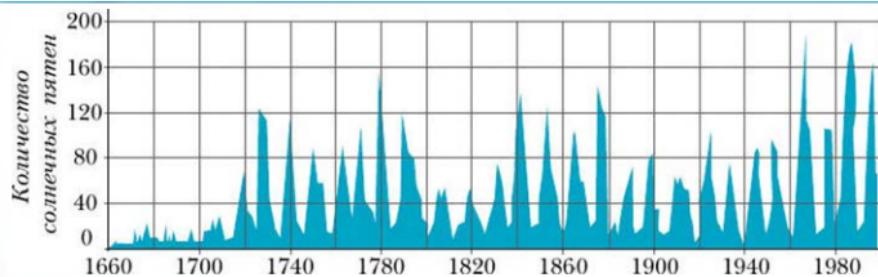


Рис.

262

Пики солнечной активности за последние 300 лет

**Вопросы**

- 1 Перечислите известные вам физические параметры Солнца.
- 2 Опишите структуру Солнца и физические процессы, происходящие в различных его частях.
- 3 Что называют поверхностью Солнца?



- 4** Что называют солнечной короной? Когда её можно наблюдать?
- 5** Что представляет собой солнечный ветер?
- \*6** Какое Солнце считают: а) активным; б) неактивным? Опишите проявления солнечной активности.

### Упражнения

- 1** Определите, используя данные из § 83 и 84, видимый с поверхности Земли угловой размер Солнца — угол между направлениями на диаметрально противоположные точки солнечного диска.
- 2** Оцените среднюю плотность Солнца.
-  **Для углублённого уровня**
- ✓3** Используя данные этого параграфа, оцените, какой была масса Солнца 1 млрд лет назад.

### § 86 Солнечная система

Движение небесных тел, входящих в Солнечную систему, удобно рассматривать в гелиоцентрической системе отсчёта. Начало отсчёта этой системы совпадает с центром Солнца, а координатные оси направлены на удалённые звёзды. В такой системе отсчёта Солнце вращается вокруг собственной оси, а каждая из восьми планет совершает движение, которое можно представить в виде суммы движений: вращения вокруг собственной оси и движения по эллиптической орбите, в одном из фокусов которой находится Солнце. 

Плоскости, в которых расположены орбиты семи из восьми планет, практически совпадают друг с другом. Отметим, что направления

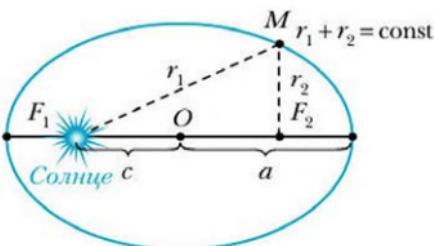


Рис. 263

-  Напомним, что эллипсом называют геометрическое место точек  $M$  плоскости, сумма расстояний от каждой из которых до двух точек этой плоскости (фокусов эллипса) постоянна (рис. 263).

вращения планет вокруг Солнца совпадают с направлением вращения Солнца вокруг собственной оси.

Основные характеристики планет Солнечной системы приведены в табл. 7.

Орбиты всех планет близки к окружностям (эксцентриситеты орбит примерно равны нулю). Направления вращения планет вокруг собственных осей совпадают с направлением вращения Солнца (за исключением Венеры и Урана).

В настоящее время все планеты Солнечной системы по физическим свойствам принято делить на две группы: *планеты земной группы* и *планеты-гиганты*.

В первую группу входят ближайшие к Солнцу планеты: Меркурий, Венера, Земля и Марс. Эти планеты имеют твёрдую поверхность — литосферу — и состоят в основном из тяжёлых химических элементов.

Период вращения **Меркурия** вокруг собственной оси примерно в 1,5 раза меньше периода его обращения вокруг Солнца. В результате длительности дня и ночи на Меркурии примерно равны целому меркурианскому году. Это приводит к тому, что обращённая к Солнцу поверхность Меркурия прогревается до 430 °С. При таких температурах модуль скорости молекул газа, соответствующий средней кинетической энергии их хаотического движения, соопоставим со второй космической скоростью для Меркурия. Поэтому неудивительно, что Меркурий не имеет атмосферы. Большая длительность ночи и отсутствие атмосферы объясняют то, что начальная температура поверхности Меркурия опускается до –180 °С. Изображение поверхности Меркурия, полученное с помощью космического аппарата «Маринер-10», приведено на цветной вклейке, рис. XI.

В отличие от Меркурия, **Венера** обладает плотной атмосферой, состоящей в основном из углекислого газа (96 %), азота (3,2 %), небольшого количества кислорода и других элементов. В 1970 г. на поверхность Венеры совершила мягкую посадку советская межпланетная станция «Венера-7». При этом были определены температура (475 °С) и давление (~90 атм) вблизи поверхности. Первые передачи телевизионных изображений поверхности Венеры были осуществлены станциями «Венера-9» и «Венера-10» в 1975 г.

Эксцентриситетом характеризуют степень отличия эллипса от окружности. Эксцентриситет  $e = \frac{c}{a}$ , где  $c$  — отношение расстояния от центра эллипса до его фокусов,  $a$  — длина большой полуоси (см. рис. 263). Если  $e = 0$ , т. е. фокусы эллипса совпадают, то эллипс превращается в окружность, радиус которой равен  $a$ .

Таблица 7

Название планеты	Среднее расстояние от Солнца, а. е.	Период обращения вокруг Солнца, земных лет	Экспентризитет орбиты	Модуль орбитальной скорости, км/с	Средний радиус, км	Наклон оси к плоскости орбиты, градусы	Период вращения вокруг собственной оси, земных суток, ч, мин. с	Средняя плотность вещества, $10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$	Ускорение свободного падения вблизи поверхности, $\text{м}/\text{с}^2$	Вторая космическая скорость, км/с	Масса, на массах Земли ( $M_3 = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ )	Число естественных спутников
Меркурий	0,39	0,24	0,206	47,9	2439	89	58,7 суток	5,4	3,7	4,2	0,055	—
Венера	0,72	0,61	0,007	35,0	6050	-86,6	243,1 суток	5,3	8,9	10,4	0,815	—
Земля	1,00	1,00	0,017	29,8	6371	66,5	23 ч 56 мин 4 с	5,5	9,8	11,2	1,00	1
Марс	1,52	1,88	0,093	24,1	3397	65,5	24 ч 37 мин 22 с	3,9	3,7	5,0	0,108	2
Юпитер	5,20	11,86	0,048	13,1	69 900	87	9 ч 50 мин	1,3	25,8	60,4	317,9	16*
Сатурн	9,54	29,46	0,054	9,6	58 000	63,5	10 ч 14 мин	0,7	11,3	36,2	95,18	18
Уран	19,19	84,02	0,046	6,8	25 000	-8	10 ч 49 мин	1,6	9,0	21,4	14,53	20**
Нептун	30,07	164,78	0,008	5,4	24 300	61	15 ч 48 мин	2,3	11,6	23,8	17,14	8

\* Указано число крупных спутников. Вместе с малыми спутниками общее число известных спутников Юпитера больше 60.

\*\* Вместе со спутниками 1986U8 и 1986U7.



Рис. 264

На цветной вклейке, рис. XII, приведена фотография Венеры, сделанная из космоса. Видно, что окутывающие Венеру облака полностью закрывают её поверхность и выглядят как система полос. Установлено, что на планете происходят сильные грозы и идут кислотные дожди. Из-за большого содержания углекислого газа, не пропускающего инфракрасное излучение от разогретой поверхности планеты, в атмосфере Венеры наблюдается парниковый эффект.

Отметим, что парниковый эффект имеет место и на Земле. Однако в атмосфере Земли много кислорода, появившегося в ре-

зультате фотосинтеза. Озоновый слой Земли защищает её поверхность от губительного для жизни ультрафиолетового излучения. Другой особенностью нашей планеты является то, что большая её часть покрыта водой. Фотография нашей планеты из космоса приведена на цветной вклейке, рис. XIII.

Вокруг Земли почти по круговой орбите движется её единственный естественный спутник — Луна, ближайшее к нам небесное тело (Меркурий и Венера спутников не имеют). Радиус Луны почти в 4 раза меньше радиуса Земли. Масса Луны примерно в 81 раз меньше массы Земли. Период вращения Луны вокруг собственной оси (~27,3 суток) равен периоду её обращения вокруг Земли. Поэтому Луна всё время обращена к Земле одной стороной. Видимая с Земли сторона Луны показана на рис. 264.

Из-за своей небольшой массы Луна не может удерживать атмосферу. Отсутствие атмосферы и большая длительность солнечных суток приводят к тому, что дневная температура поверхности Луны достигает 120 °С, а ночная падает до −150 °С.

Возможно, что Земля и Луна образовались одновременно. (Химический состав лунных пород примерно такой же, как и земных, но процентное содержание химических элементов разное.) Существует гипотеза, что Луна отделилась от Земли в результате удара о Землю достаточно крупного космического тела. Не исключается и версия, согласно которой Земля захватила пролетавшую мимо «готовую» Луну.

**Марс** — наиболее удалённая от Солнца планета земной группы. Диаметр Марса примерно вдвое меньше земного. Атмосфера планеты разрежена, её давление вблизи поверхности примерно равно 1/150 атм. Поэтому поверхность планеты относительно хорошо просматривается из космоса. Фотография поверхности Марса приведена на цветной вклейке, рис. XIV. Атмосфе-

ра планеты состоит из углекислого газа (96 %), азота (2,7 %), аргона (1,6 %), следов кислорода (0,13 %), водяного пара (0,03 %) и др. Температура поверхности изменяется от  $-14^{\circ}\text{C}$  летом до  $-120^{\circ}\text{C}$  зимой. У Марса имеются два небольших по размерам спутника неправильной формы, похожих на астероиды.

**!** В группу планет-гигантов входят четыре планеты: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Все эти планеты представляют собой огромные газовые шары, имеющие небольшое твёрдое ядро, окружённое веществом в жидким состоянии и атмосферой.

Например, ядро Юпитера каменистое и составляет 4 % массы всей планеты. Ядро окружает слой водорода в металлическом состоянии. Следующий слой состоит из жидкой смеси гелия и молекулярного водорода. В состав атмосферы Юпитера входят: водород (86 %), гелий (14 %) и следы других химических элементов. Подобную по составу атмосферу (водород, гелий, метан и следы других элементов) имеют и остальные планеты-гиганты.

*Характерной особенностью планет-гигантов является наличие у них спутников и так называемых колец.* Эти кольца состоят из мелких каменистых тел неправильной формы, кусков льда и пыли. 

Фотографии планет-гигантов приведены на цветной вклейке, рис. XV–XVIII.

За орбитой Нептуна вокруг Солнца вращаются несколько так называемых малых планет, одну из которых (Плутон) до недавнего времени причисляли к планетам Солнечной системы. Однако из-за относительно малой массы ( $\sim 0,002M_{\oplus}$ ) его гравитационного притяжения недостаточно, чтобы расчистить окрестности своей орбиты от других объектов. Поэтому Плутон в настящее время стали считать карликовой планетой.

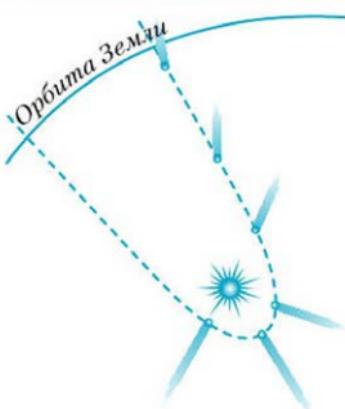
Помимо восьми планет, вокруг Солнца вращается огромное число малых небесных тел неправильной формы, имеющих твёрдую каменистую структуру. Это *астероиды*. Орбиты основной массы астероидов расположены между орбитами Марса и Юпитера на расстоянии  $\sim 2,5$  а. е. от Солнца. Эту зону называют *поясом астероидов*. Её ширина колеблется от 100 млн до 300 млн км. Размеры самого большого из астероидов (Паллады) примерно равен 532 км.

Кроме Солнца, планет, их спутников и астероидов, в Солнечную систему входят кометы — «хвостатые звёзды». Под действием гравитационных сил

**!** Наиболее сложную систему колец имеет Сатурн. В ней выделяют четыре больших и три малых кольца с разделителями (щелями). Все кольца очень тонкие, при диаметре 275 000 км их толщина не более 1 км. Кольцевая система Юпитера состоит из трёх частей: тороидальной части (гало), главного кольца и внешнего тонкого кольца. В систему колец Урана входит 13 тонких колец, самое заметное из которых имеет толщину 150 м.



*Рис.* 265 Фотография ядра кометы Галлея, полученная с помощью космического зонда «Джотто» в 1986 г.



*Рис.* 266



*Рис.* 267

со стороны Солнца они движутся по очень вытянутым эллиптическим орбитам, пересекающим плоскости планетарных орбит. Кометы состоят из льда, застывших газов и мелких частиц. По мере приближения к Солнцу лёд начинает испаряться, образуя вокруг ядра кометы протяжённую газовую оболочку — кому (рис. 265). В результате давления солнечного света и действия летящих от Солнца частиц (солнечного ветра) часть комы отталкивается в сторону, противоположную Солнцу (рис. 266). Так образуется хвост кометы.

По современным оценкам, в Солнечной системе существует не менее 100 млрд сильно различающихся по массе кометных ядер.

В межпланетном пространстве Солнечной системы движется множество твёрдых тел — метеороидов, которые образовались, вероятно, из распадающихся комет, а могли быть первичными объектами. Большинство метеороидов, влетающих в атмосферу планет, нагреваются из-за трения и сгорают, не достигая поверхности. Крупные метеороиды (*метеориты*) достигают поверхности планеты. В результате ударов метеоритов образуются так называемые метеоритные кратеры. Такие кратеры встречаются в разных местах на поверхности Земли. На рис. 267 приведена фотография метеоритного кратера в Аризоне.

В заключение рассмотрим принятую на сегодняшний день гипотезу происхождения Солнечной системы. Согласно этой гипотезе, Солнце и связанные с ним планеты образовались примерно 4,6 млрд лет назад из холодной

газонылевой туманности, которая состояла в основном из водорода и гелия с небольшой примесью других веществ (см. цветную вклейку, рис. XIX (1)). За счёт действия гравитационных сил к центру этого облака стягивались всё большие и большие массы туманности, формируя протозвезду. По мере возрастания плотности гравитационные силы, с одной стороны, всё больше влияли на процесс расслоения туманности, а с другой — вызывали всё больший разогрев формирующейся протозвезды. Сопровождающее перераспределение вещества медленное вращение туманности придало ей форму диска, разделяющегося на отдельные кольца (см. цветную вклейку, рис. XIX (2)). Этим объясняется то, что плоскости всех орбит планет в Солнечной системе практически совпадают.

Наконец, за счёт увеличения массы прообраза будущего Солнца температура и давление в его центральной части стали такими, что там начались термоядерные реакции синтеза гелия, сопровождаемые выделением огромного количества теплоты. Масса формирующегося Солнца, по-видимому, превышала массу современного Солнца примерно в три раза. Поэтому интенсивность термоядерных реакций была значительно больше, чем в настоящее время. Под действием потоков частиц и мощного светового излучения формирующегося Солнца лёгкие атомы водорода и гелия отбрасывались за орбиту Марса. Это и обусловило разный химический состав планет земной группы и планет-гигантов.

Постепенно вещество в кольцах группировалось в прообразы будущих планет и их спутников (см. цветную вклейку, рис. XIX (3 и 4)). Формирующиеся Юпитер и Сатурн находились в области солнечной туманности с высокой плотностью. В результате эти планеты приобрели каменистые ядра, окружённые очень толстыми слоями водорода и гелия. Будущие Уран и Нептун находились в менее плотных частях туманности и набрали газ в значительно меньших объёмах.

### Вопросы

- 1 В какой системе отсчёта удобно рассматривать движение небесных тел Солнечной системы?
- 2 Перечислите планеты Солнечной системы. На какие группы их разделяют?
- 3 Что представляют собой траектории движения планет в гелиоцентрической системе отсчёта?
- 4 Чем обусловлено большое различие дневной и ночной температур поверхности: а) Меркурия; б) Луны?

5. Почему Меркурий не имеет атмосферы?
6. Какое явление называют парниковым эффектом? На каких планетах это явление имеет место?
7. Почему Луна всё время обращена к Земле одной стороной?
8. Что представляет собой атмосфера: а) Венеры; б) Марса; в) планет-гигантов?
9. Что называют: а) астероидами; б) кометами; в) метеорами; г) метеоритами?
10. Опишите принятую на сегодняшний день гипотезу происхождения Солнечной системы.

### Упражнения

1. Угловой размер Луны равен  $33'40''$ . Определите диаметр Луны, используя данные из упражнения 1 в § 84.
2. Оцените среднеквадратичную скорость хаотического движения молекул водорода вблизи дневной поверхности Меркурия. Сравните полученное значение со второй космической скоростью для этой планеты.

§ 87

## Физические характеристики звёзд

Используя современные телескопы и методы, основанные на явлении интерференции, удалось измерить угловые размеры и годичные параллаксы некоторых ближайших к Земле звёзд. Это, в свою очередь, позволило определить расстояния до этих звёзд и их диаметры.

К настоящему времени разработаны методы определения температуры звезды по спектру её излучения. Это, вместе с измерением светимости  $L$  (мощности светового излучения звезды), позволяет оценить размер звезды.

Согласно полученным данным, среди звёзд встречаются такие гиганты, как звезда Бетельгейзе в созвездии Ориона, диаметр которой больше диаметра орбиты Марса ( $\sim 3$  а. с.). Большинство же звёзд имеют размеры, сопоставимые с размерами Солнца ( $R_\odot = 696 \cdot 10^3$  км). Вместе с тем встречаются звёзды-карлики. Самые маленькие из обычных звёзд имеют радиус, сравнимый с радиусом Земли ( $R_3 = 6,37 \cdot 10^3$  км). Нейтронные же звёзды могут иметь диаметр около 20 км.

Расстояния до звёзд варьируются в очень широких пределах. В значительно меньших пределах варьируются массы звёзд. Расчёты и косвенные методы определения масс звёзд приводят к удивительному результату: при различии по объёму в миллиарды миллиардов раз массы  $M$  звёзд удовлетворяют следующему неравенству:

$$0,01M_{\odot} < M < 100M_{\odot}, \quad (1)$$

где  $M_{\odot}$  — масса Солнца. При этом средняя плотность вещества звёзд варьируется в очень широких пределах. Например, у звёзд-гигантов  $\rho < 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>, а у нейтронных звёзд плотность достигает значения  $10^{18}$  кг/м<sup>3</sup>.

Нижняя граница в неравенстве (1) обусловлена тем, что при меньшей общей массе гравитационные силы не могут вызвать за счёт сжатия газо-пылевого облака нагрев его центральной части, достаточный для начала термоядерных реакций. Поэтому объекты с массой, меньшей сотой доли массы Солнца, оказываются (подобно Юпитеру) несамосветящимися телами.

По мере увеличения массы формирующейся звезды под действием гравитационных сил увеличивается её плотность и происходит разогрев центральной части. В результате при достаточной массе в её недрах начинаются термоядерные реакции. Гравитационное сжатие прекращается, как только выделяющаяся при этих реакциях энергия становится равной потерям на излучение. После этого звезда переходит в стационарное состояние, в котором она может пребывать длительное время. Установлено, что светимость  $L$  большинства звёзд пропорциональна кубу их массы  $M$ :

$$L \sim M^3. \quad (2)$$

Следовательно, светимость звезды, масса которой, например, в 50 раз больше массы Солнца, должна быть больше светимости Солнца в 125 000 раз. При столь интенсивном выделении энергии действие сжимающих вещества гравитационных сил ещё может уравновесить действие сил светового давления, стремящихся разрушить звезду. При массе же звезды, превышающей массу Солнца более чем в 100 раз, она разрушается.

Спектры излучения звёзд, как и спектр излучения Солнца, являются сплошными, но содержат тёмные линии поглощения. Положения максимумов в спектрах излучения, соответствующие температуре и цвету поверхности звёзд, изменяются в достаточно широких пределах. Большинство звёзд по виду их спектра можно отнести к одному из семи спектральных классов. В табл. 8 приведены обозначения спектральных классов, темпера-

туры и цвет поверхностей звёзд каждого из классов, а также примеры относящихся к этим классам звёзд.

Таблица 8

Спектральный класс	Температура поверхности, К	Цвет поверхности	Пример звезды, в скобках указано созвездие
O	26 000–35 000	Голубой	Беллатрикс (Орион)
B	12 000–25 000	Бело-голубой	Регул (Лев)
A	8000–11 000	Белый	Сириус (Б. Пёс)
F	6200–7900	Жёлто-белый	Альтаир (Орёл)
G	5000–6100	Жёлтый	Солнце
K	3500–4900	Оранжевый	Альдебаран (Телец)
M	2600–3400	Красный	Бетельгейзе (Орион)

Видно, что Солнце, являющееся жёлтой звездой, не попадает ни в класс самых горячих, ни в класс самых холодных звёзд.

В начале XX в. датский астроном Эйнар Герцшprung (1873–1967) и американский астроном Генри Расселл (1877–1957) независимо друг от друга установили, что если построить зависимость светимости  $L$  звёзд от принадлежности к спектральному классу (или от температур их поверхностей), то все звёзды можно разделить на четыре группы: *сверхгиганты*, *гиганты*, *белые карлики*, а также наиболее многочисленная группа, которую назвали *главной последовательностью*. Звёзды этой группы располагаются на диаграмме Герцшрунга – Расселла вдоль довольно узкой полосы (рис. 268). Средняя плотность у всех звёзд этой группы сопоставима со средней плотностью Солнца. Именно для звёзд этой группы справедливо соотношение (2). Поэтому находящиеся в стационарном состоянии звёзды *главной последовательности* с большей массой имеют одновременно и большую светимость, и большую температуру. Это связано с тем, что в более массивных звёздах главной последовательности термоядерные реакции синтеза гелия из водорода протекают более интенсивно. Например, у голубых и белых звёзд главной последовательности водород «гораст» в тысячи раз быстрее, чем у Солнца.

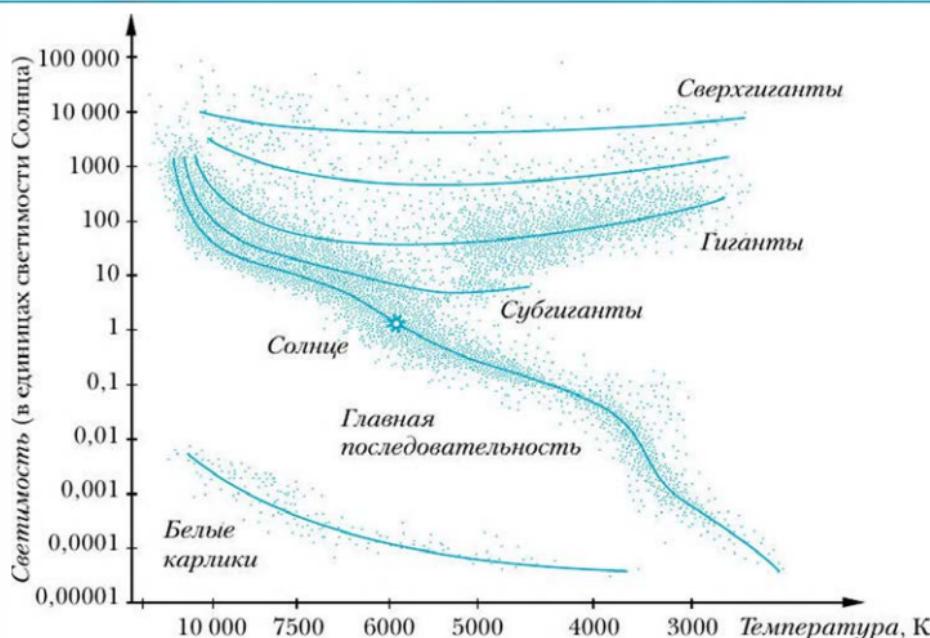


Рис. 268 Диаграмма Герцшпрунга – Расселла

Расчёты показывают, что звёзды, имеющие массу в десятки раз больше массы Солнца, расходуют свой водород «очень быстро» – всего за несколько миллионов лет. Красным же звёздам-карликам водорода должно хватить на десятки миллиардов лет.

### Вопросы

- 1 В каких пределах варьируются: а) расстояния до звёзд; б) размеры звёзд; в) их массы; г) плотности?
- 2 Какие спектральные классы звёзд вам известны? Приведите примеры звёзд, принадлежащих к этим классам.
- 3 На какие четыре группы можно разделить все звёзды?
- 4 Что называют главной последовательностью?
- 5 Как зависит светимость и температура звёзд главной последовательности от их массы? Объясните ответ.

§ 88 Эволюция звёзд

Звёзды образуются из газонылевых облаков в результате гравитационного сжатия и длительное время после этого пребывают в стабильном состоянии. Таковы звёзды главной последовательности. По прошествии достаточно длительного промежутка времени (для звёзд, сопоставимых с Солнцем, этот промежуток равен ~10 млрд лет) в центральной части звезды водорода остаётся не более 1 %. После этого термоядерные реакции синтеза прекращаются. Центральная часть звезды сжимается в небольшое плотное ядро, состоящее практически из одного гелия. Плотность ядра достигает  $3,5 \cdot 10^8 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Вокруг ядра образуется тонкий слой, в котором происходят термоядерные реакции при температуре 25–40 млн градусов. Всё остальное вещество выше этого слоя только передаёт наружу выделяющуюся энергию. По мере расходования водорода и уменьшения радиуса ядра (при одновременном увеличении его массы) радиус звезды увеличивается, а её средняя плотность и температура поверхности уменьшаются. Звезда превращается в красного гиганта.

Световое давление на внешние слои у достаточно массивной звезды, в ядре которой не осталось водорода, уменьшается. Поэтому внешние слои под действием гравитационных сил устремляются к центру. В результате новой стадии сжатия температура повышается настолько, что становится возможным процесс синтеза углерода из гелия:



После образования углерода в гелиевом ядре начинается образование других элементов: кислорода, неона и магния. Вскоре после этого из-за недостатка гелия дальнейшие ядерные реакции становятся невозможными, если не происходит нового сжатия звезды и вызванного этим повышения температуры. Если это сжатие и вызванный им разогрев происходят, то синтез продолжается вплоть до элементов группы железа. Прекращение синтеза на этих элементах обусловлено тем, что удельная энергия связи в ядрах этих элементов максимальна (см. § 75, рис. 249). Синтез же следующих элементов возможен только при поглощении энергии.

Звезда, израсходовавшая все элементы, необходимые для термоядерного горения, обречена либо на медленное угасание, либо на взрыв и гибель, либо на превращение в так называемую чёрную дыру. Её дальнейшая судьба зависит от массы ядра звезды.

Если масса ядра звезды не превышает 1,4 массы Солнца (предел, который установлен индийским физиком Субраманьяном Чандraseкаром (1910–

1995) и в честь него названный *пределом Чандraseкара*), то она сжимается до тех пор, пока плотность вещества в ней не достигнет  $\sim 10^9$  кг/м<sup>3</sup>. Получившуюся звезду называют *белым карликом*. Его размеры примерно в 100 раз меньше размеров Солнца (сравнимы с размерами Земли), а светимость в тысячу раз меньше светимости Солнца. В таком состоянии белый карлик будет медленно остыять многие миллиарды лет. Сброшенная с него газовая оболочка превращается в планетарную туманность (рис. 269). Белые карлики составляют примерно десятую часть всех звёзд.

Если масса ядра звезды *близка к 1,4 массы Солнца*, то случайное возрастание температуры в какой-либо его области может привести к росту температуры в других областях и, как следствие, к термоядерному взрыву. Астрономы называют это явление *вспышкой сверхновой звезды первого типа*. В её спектре нет линий поглощения водорода, а есть только линии гелия, углерода, кислорода и других сравнительно тяжёлых элементов.

Если масса ядра звезды *находится в интервале от 1,4 до 3 масс Солнца*, то в результате её сжатия электроны плазмы приобретают столь большую энергию, что «вдавливаются» в протоны, образуя нейтроны. Другими словами, становится возможной реакция:



Этот процесс носит взрывной характер и происходит за доли секунды. При этом внешняя водородная оболочка сбрасывается под действием вылетающих нейтрино, что наблюдается в виде вспышки *сверхновой звезды второго типа*. В её спектре наблюдаются мощные линии поглощения водорода, который образуется у поверхности звезды из-за распада других элементов. В результате гравитационного коллапса в центре звезды образуется ядро, состоящее из нейтронов и окружённое твёрдой оболочкой. Поэтому такие звёзды называют *нейтронными*. Радиус ядра нейтронной звезды близок к 10 км, а плотность вещества чрезвычайно велика:  $\sim 10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>. Нейтронные звёзды, как правило, имеют магнитное поле в миллиарды раз более интенсивное, чем магнитное поле Земли.

На возможность образования нейтронных звёзд в 1932 г. впервые указал лауреат Нобелевской премии советский физик Лев Давидович Ландау (1908–1968). Такие звёзды были открыты в 1967 г. с помощью радиотелескопов. При этом было установлено, что излучение от таких звёзд прихо-

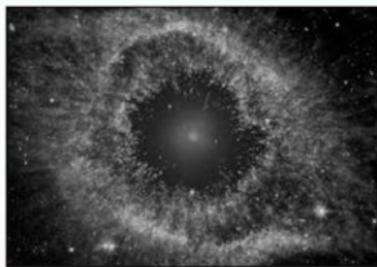


Рис. 269

Туманность NGC 7293  
в созвездии Водолея



Рис. 270

дит с периодами от единиц до сотых долей секунды. Поэтому их стали называть *пульсарами*. Интересно, что из-за чрезвычайно высокой стабильности периода следования импульсов от данного пульсара (это было определено с помощью точнейших атомных часов) астрономы вначале предположили, что эти сигналы посылают внеземные цивилизации. В дальнейшем было установлено, что периодичность регистрируемых сигналов обусловлена вращением нейтронной звезды вокруг своей оси, которая не совпадает с направлением наиболее интенсивного излучения (рис. 270). Поэтому период следования регистрируемых сигналов равен периоду вращения нейтронной звезды (пульсара). В настоящее время открыто более 400 пульсаров.

Если масса ядра *превышает 3 массы Солнца*, то ничто не может удержать звезду от сжатия под действием гравитационных сил. Гравитационный коллапс приводит к образованию во многом ещё загадочных объектов — *чёрных дыр*. Этот термин сделал общепринятым американский астрофизик Джон Уилер (1911–2008). Особенность чёрной дыры состоит в том, что любой приблизившийся к ней объект, в том числе излучение, под действием мощных гравитационных сил попадает «в плен» и навсегда пропадает в чёрной дыре. Поэтому о чёрной дыре непосредственно невозможно получить никакой информации.

Проблема чёрных дыр, как и проблема поиска внеземных цивилизаций, к настоящему времени не решена. Если и астрономы, и физики уверены, что внеземные цивилизации могут существовать, то в отношении чёрных дыр их мнения расходятся. Астрономы почти уверены, что эти объекты уже открыты: на их роль, по разным данным, претендуют около 200 массивных и чрезвычайно компактных объектов, оказывающих мощное гравитационное воздействие на некоторые звёздные системы. Некоторые же физики сомневаются в существовании чёрных дыр. Более того, в некоторых вариантах теории гравитации возможность существования чёрных дыр отвергается.

### Вопросы

- Что является причиной прекращения термоядерных реакций синтеза гелия в звёздах главной последовательности?

- 2 Какова судьба звезды после её ухода с главной последовательности? Чем это определяется?
- 3 Какие объекты называют белыми карликами? Опишите их.
- 4 Опишите свойства нейтронных звёзд.
- 5 Какие объекты принято называть чёрными дырами?

§ 89

## Вселенная

С первых исследований Галилеем Млечного Пути (1610 г.) до начала XX в., когда удалось получить изображения других галактик с большим разрешением (до отдельных звёзд), становилось всё более очевидным, что Солнечная система, к которой принадлежит наша Земля, является частью огромной звёздной системы — Галактики. 

Астрономы выделяют в Галактике три главных структурных элемента: диск, сферическую подсистему и гало (рис. 271). Диск содержит около 100 млрд звёзд, в том числе Солнце. Эти звёзды движутся по почти круговым орбитам вокруг центра Галактики — её ядра. На рис. 272, а показано, как предположительно выглядит Галактика, если смотреть со стороны на плоскость галактического диска. В диске различают центральное уплотнение — балдж (от англ. bulge — «вздутие») и отходящие от него спиральные ветви. Солнце находится от центра Галактики на расстоянии  $\sim 3 \cdot 10^4$  световых лет в одной из спиральных ветвей.

Галактика равномерно вращается вокруг своего центра, где расположена сверхмассивная чёрная дыра, как и в центрах многих других галактик. Поэтому Солнечная система совершает один оборот вокруг центра Галактики примерно за 200 млн лет. Она движется при этом со скоростью, модуль которой примерно равен 220 км/с. В сферической подсистеме Галактики (см. рис. 271) насчитывают также около 100 млрд звёзд. Многие из них образуют шаровые скопления звёзд. Подоб-



Рис. 271

Структура Галактики



Слово «галактика» происходит от греческого названия нашей Галактики *Млечный Путь* (κύκλος γαλαξίας — «молочное кольцо»).

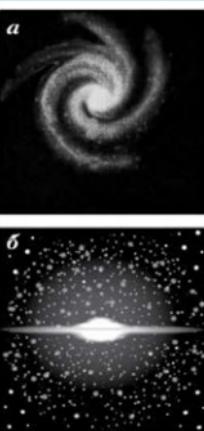


Рис. 272

шлого века. Поэтому неудивительно, что вопрос о физической природе тёмной материи ещё далёк от разрешения и ждёт своих исследователей.

Видимую с поверхности Земли совокупность звёзд диска Галактики называют *Млечным Путём*. Фотография участка Млечного Пути, опоясывающего небо, показана на цветной вклейке, рис. XXI. Тёмные разрывы вдоль всего Млечного Пути, делающие его похожим на струйки молока, объясняются наличием в диске Галактики газопылевых туманностей, поглощающих свет. (Помимо тёмных туманностей, на небе можно наблюдать и светлые газопылевые туманности, которые светят отражённым светом.)

В 1924 г. американский астроном Эдвин Хаббл (1889–1953) доказал, что находящаяся вне нашей Галактики туманность M31 в созвездии Андромеды представляет собой гигантскую систему звёзд, размеры которой примерно в 1,5 раза больше нашей Галактики. За несколько лет наблюдений он установил физическую природу ещё более 20 внегалактических туманностей, которые также стали называть галактиками. Таким образом, стало ясно, что Вселенная – это совокупность огромного числа галактик.

Галактики объединяют в *группы галактик*, а эти группы – в *скопления галактик*.

Наша Галактика вместе с тремя десятками других входит в устойчивую систему, которую называют *Местной группой*. Самая крупная галактика





Рис. 273

Местной группы — спиральная галактика М31 в созвездии Андромеды. Она состоит примерно из 200 млрд звёзд и находится от нас на расстоянии  $7,5 \cdot 10^4$  св. лет. В то же время Местная группа является небольшим уплотнением почти на краю *Местного сверхскопления* галактик. Диаметр последнего составляет примерно 100 млн св. лет.

По внешнему виду различают в основном три вида галактик: *спиральные* (рис. 273, а), к которым принадлежит и наша Галактика; *эллиптические* (рис. 273, б) и *неправильные* (рис. 273, в). Было установлено, что в ветвях спиральных галактик много «молодых» звёзд. В ветвях идёт процесс образования новых звёзд из газопылевого материала. Подобные процессы идут и в неправильных галактиках. Напротив, в эллиптических галактиках практически нет материала для образования новых звёзд. Эти галактики состоят в основном из «старых» звёзд.

Примерно в середине XX в. астрономы обнаружили чрезвычайно мощные источники излучения, находящиеся на расстояниях порядка миллиардов световых лет. Их размеры оказались близки размерам Солнечной системы. Эти образования назвали *квазарами* (иначе — звёздоподобными). Первоначально считалось, что они находятся сравнительно близко. Однако последующие исследования показали, что это не так. Кроме того, анализ показал, что излучаемая квазарами энергия не может быть обеспечена только термоядерными реакциями синтеза. В настоящее время предполагают, что эта энергия обусловлена гравитационными силами со стороны чёрной дыры, расположенной в центре квазара, которая ежесекундно поглощает миллионы звёзд.

Из многих тысяч фрагментов Вселенной, полученных с помощью современных телескопов, была составлена карта распределения галактик во Вселенной. Оказалось, что такое распределение имеет ячеистую структуру. Подсчёты показывают, что если разбить объём Вселенной на кубы с размером стороны  $\sim 200$  Мпк, то в таких масштабах распределение материи ока-

зываются изотропным и однородным. Этот факт в настоящее время называют **космологическим принципом**:

**! крупномасштабное распределение материи во Вселенной однородно и изотропно.**

В 1922 г. советский учёный Александр Александрович Фридман (1888–1925), анализируя уравнения общей теории относительности, пришёл к выводу, что Вселенная не может оставаться стационарной: она должна либо сжиматься, либо расширяться. Фридман выбрал последний вариант. В 1929 г. Э. Хаббл, изучая спектры излучения галактик, обнаружил, что эти спектры смещены в длинноволновую область («красное смещение»). Это доказывает, что **галактики удаляются друг от друга**. Причём это происходит тем быстрее, чем дальше друг от друга они находятся. Это утверждение называется **законом Хаббла** и записывают в виде:

$$v = H \cdot r, \quad (1)$$

где  $v$  — модуль скорости удаления галактики,  $r$  — радиус её удаления,  $H$  — постоянная Хаббла. В настоящее время считают, что  $H = (13 \text{ млрд лет})^{-1}$ .

Следует отметить, что наблюдателю, находящемуся в любой галактике, будет казаться, что разбегание галактик происходит именно от него.

**! Разбегание галактик означает, что наша Вселенная расширяется.**

Из модели Фридмана и закона Хаббла следует, что Вселенная зародилась 13 млрд лет назад ( $T = \frac{1}{H}$ ). Именно тогда вся материя начала стремительно раздвигаться из «одной точки». Ученник Фридмана русский физик Георгий Антонович Гамов (1904–1968) в 1946 г. выдвинул гипотезу возникновения Вселенной в результате так называемого **Большого взрыва**.

Согласно гипотезе Гамова, в начальный момент радиус Вселенной составлял  $\sim 10^{-35} \text{ м}$ , а её температура была  $\sim 10^{33} \text{ К}$ . За время от  $10^{-30}$  до  $10^{-10} \text{ с}$  от возникновения начала образовываться плотная смесь из лептонов,夸克ов и их античастиц. Через  $10^{-6} \text{ с}$  началось образование протонов, нейтронов и их античастиц. Одновременно пошли процессы аннигиляции частиц и их античастиц. Плотность излучения в это время в миллиард раз превышала плотность вещества. К концу первой секунды температура упала до  $10^{10} \text{ К}$ , а средняя плотность вещества стала меньше плотности ядер ( $< 10^7 \text{ кг}/\text{м}^3$ ). К этому моменту радиус Вселенной достиг  $10^{15} \text{ м}$ . Примерно через  $10^6$  лет

средняя плотность вещества во Вселенной уменьшилась до  $10^{-19}$  кг/м<sup>3</sup>, а её радиус достиг  $10^{24}$  м. При этом температура понизилась до 3000 К. На этом этапе началось образование атомов водорода и гелия.

Согласно гипотезе Гамова, должен существовать ещё один «продукт» остыивания Вселенной — фотоны (кванты электромагнитного излучения), равномерно заполняющие всё пространство. Эти фотоны назвали *реликтовым излучением*. К настоящему времени температура реликтового излучения должна уменьшиться до ~3 К.

В 1965 г. американские радиоастрономы А. Пензиас и Р. Вилсон обнаружили, что на Землю со всех сторон и в любое время суток приходит очень слабое микроволновое излучение, спектр которого соответствует температуре, несколько меньшей 3 К. С использованием космических аппаратов позже было установлено, что степень однородности и изотропии этого излучения исключительно высока — относительные отклонения не превышают сотых долей процента.

**!** Однородность, изотропность и постоянство во времени реликтового излучения позволяют связать с ним систему отсчёта, относительно которой удобно описывать движение различных небесных тел.

В этой системе отсчёта центр нашей Галактики движется со скоростью, модуль которой близок к 500 км/с, а Земля движется в направлении созвездия Льва со скоростью, модуль которой равен ~300 км/с.

В заключение отметим, что существуют и другие теории возникновения Вселенной, однако они менее разработаны.

### Вопросы

- Из каких структурных элементов состоит наша Галактика? Каковы их размеры и форма?
- Сколько примерно звёзд в Галактике? Как они распределены?
- Что такое Млечный Путь?
- Что называют Местной группой и Местным сверхскоплением?
- Опишите крупномасштабную структуру Вселенной.
- Сформулируйте космологический принцип.



### Для углублённого уровня

- Сформулируйте закон Хаббла и оцените возраст Вселенной.
- Опишите эволюцию Вселенной согласно гипотезе Большого взрыва.
- Что такое реликтовое излучение? Опишите его свойства.

## СТРОЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

Солнечная система образовалась ~5 млрд лет назад из холодной газонылевой туманности, состоявшей из водорода и гелия с небольшой примесью других веществ.

Масса Солнца ( $\approx 2 \cdot 10^{30}$  кг) составляет примерно 99 % массы всей Солнечной системы. В настоящее время массы водорода и гелия на Солнце составляют соответственно ~71 и ~27 % его массы. Температура, давление и плотность вещества в ядре Солнца близки соответственно к 14 млн К, 100 млрд атм и 0,1 кг/см<sup>3</sup>. В ядре Солнца протекают термоядерные реакции, обеспечивающие излучаемую Солнцем мощность (светимость)  $\sim 4 \cdot 10^{26}$  Вт.

В гелиоцентрической системе отсчёта Солнце вращается вокруг собственной оси, а каждая из восьми планет, вращаясь вокруг собственной оси, движется по эллиптической орбите, в одном из фокусов которой находится Солнце.

Все планеты Солнечной системы по физическим свойствам делят на две группы: планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля и Марс) и планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун)

Солнечная система является частью огромной звёздной системы — Галактики, в которой выделяют три главных структурных элемента: диск, сферическую подсистему и гало.

Диск Галактики содержит около 100 млрд звёзд, в том числе Солнце. Эти звёзды движутся по почти круговым орбитам вокруг центра Галактики. Солнце находится от этого центра на расстоянии  $\sim 3 \cdot 10^4$  св. лет. Оно совершает один оборот примерно за 200 млн лет.

В сферической подсистеме Галактики насчитывают также примерно 100 млрд звёзд. Большинство этих звёзд движется по сильно вытянутым орбитам, плоскости которых распределены примерно равномерно.

В гало предположительно содержится так называемая тёмная материя, проявляющаяся в гравитационном взаимодействии с другими объектами. Размер гало в ~10 раз превышает размеры диска, а его масса в ~10 раз больше массы всех звёзд Галактики.

Наша Галактика вместе с тремя десятками других входит в устойчивую систему — **Местную группу**. Местная группа является небольшим уплотнением почти на краю Местного сверхскопления галактик. Диаметр последнего составляет примерно 100 млн св. лет

Согласно **закону Хаббла**, галактики удаляются друг от друга тем быстрее, чем дальше они друг от друга находятся ( $v = H \cdot r$ , где  $v$  — модуль скорости удаления галактики,  $r$  — радиус её удаления,  $H = (13 \text{ млрд лет})^{-1}$  — **постоянная Хаббла**). Разбегание галактик означает, что Вселенная расширяется. Из модели расширяющейся Вселенной следует, что Вселенная зародилась ~13 млрд лет назад в результате **Большого взрыва**.

## Заключение

Вы заканчиваете изучение школьного курса физики — науки, которая познакомила вас с наиболее общими законами природы. Эти законы описывают явления и процессы, не только наблюдаемые в повседневной жизни, но и происходящие в наномире атомов, их ядер и элементарных частиц, а также в мегамире звёзд, галактик и всей Вселенной в целом. Символично, что школьный курс физики заканчивается астрофизикой. Ведь именно из астрономических наблюдений, позволивших установить закономерности движения планет и звёзд, возникла физика как экспериментальная наука.

На начальном этапе своего развития физика «произрастала» из наблюдений. В результате обобщения наблюдений возникали научные гипотезы. В дальнейшем для выявления закономерностей учёные начали ставить специально подготовленные опыты — эксперименты, во время которых явление воспроизводилось в строго определённых условиях заранее продуманным образом. Это существенно ускорило получение новых знаний. Родоначальником экспериментальной физики был Г. Галилей. Познание и осмысление результатов всех новых и новых экспериментов позволило сформулировать основные физические понятия и постулаты, конкретизировать определения физических величин, количественно характеризующих свойства изучаемых объектов и явлений, и, наконец, установить физические законы, описывающие количественные соотношения в природе.

Вы уже знаете, что любая физическая теория является лишь некоторым приближением к реальности. Это обусловлено, в частности, тем, что изучение любого природного объекта или явления в полном объёме почти всегда невозможно и требует упрощающих предположений. Другими словами, при рассмотрении реального объекта или явления мы всегда заменяем его более простым, пренебрегая несущественными, с нашей точки зрения, деталями и стремясь сохранить при этом его главные черты. Вам известно, что такую замену называют *моделированием*. Результатом моделирования является то, что каждая построенная теория имеет вполне определённые

границы применимости. Процесс выбора адекватной модели и определение границ её применимости представляют собой, как правило, весьма сложную интеллектуальную задачу. При этом *критериями правомерности выбранной модели всегда являются эксперимент и наблюдение*, которые могут либо подтвердить, либо опровергнуть построенную научную теорию. Изучив свойства простейшей модели, строят более близкую к реальности модель и т. д.

Развитие экспериментальной базы создавало возможность проведения всё более сложных и точных опытов. Это, в свою очередь, позволяло создавать всё более совершенные теории. При этом появление новой теории не отменяло ранее созданной, которая правильно объясняла данные предыдущих экспериментов. Каждая новая теория включала в себя предшествующую как частный предельный случай, соответствующий ранее выбранной модели. В науке этот факт получил специальное название – *принцип соответствия*.

В истории развития физики можно выделить несколько крупных этапов.

К концу первого этапа все явления представлялись возможным объяснить в рамках созданной Ньютоном классической механики. По образному выражению французского учёного Лагранжа, Ньютону «удалось построить картину мира». Согласно Ньютону, весь мир состоит «из твёрдых, весомых, непроницаемых, неделимых, подвижных частиц». Эти частицы отличаются друг от друга в основном своими массами, а их движение подчиняется законам классической механики. Триумфом механики Ньютона стало теоретическое предсказание существования и определение места нахождения Нептуна – одной из планет Солнечной системы. Казалось, что созданная Ньютоном *механическая картина мира* является всеобъемлющей и окончательной.

Однако электромагнитные явления, активные исследования которых начались к концу XVIII в., не удалось объяснить на основе механики. После введения Фарадеем понятия силового поля в противоположность теории дальнодействия вновь возродилась теория близкодействия. Максвелл облёк идею Фарадея в строгие математические соотношения. Вместо механической картины мира начала создаваться *единая электромагнитная картина мира*. При этом выяснилось, что существует предельная скорость передачи информации, равная скорости света в вакууме. Была построена специальная теория относительности, доказавшая, что уравнения движения Ньютона являются частным предельным случаем этой теории. Были предприняты попытки представить частицы вещества как сгустки электромагнитного поля.

К началу XX в. стало понятно, что многие явления (например, корпускулярные свойства света, волновые свойства элементарных частиц, законы гравитации) не могут быть объяснены на основе уравнений Максвелла. В это время Эйнштейн закладывает основы общей теории относительности, зарождается квантовая механика. Одновременно теоретически было предсказано, а к середине XX в. и открыто множество элементарных частиц, в том числе электрически нейтральных. Была определена структура атомов и молекул; установлено, что наряду с электромагнитными и гравитационными взаимодействиями существуют ещё и сильные (ядерные) и слабые взаимодействия. К настоящему времени учёным удалось объединить электромагнитные и слабые взаимодействия. Установлено, что звёзды, да и все другие тела, включая живые организмы, состоят из одних и тех же структурных элементов, что все элементарные частицы могут превращаться друг в друга. Таким образом, можно считать, что к настоящему времени установлено *единство строения материи Вселенной*.

Следует отметить, что целый ряд вопросов, таких как зарождение и развитие Вселенной, природа тёмной материи, особенности взаимодействия элементарных частиц, и многие другие не получили своего окончательного решения. Остаются актуальными слова, сказанные три с лишним столетия назад Галилеем: «Здесь скрыты столь глубокие тайны и столь возвышенные мысли, что, несмотря на старания сотен остроумнейших мыслителей, трудившихся в течение тысяч лет, ещё не удалось проникнуть в них, и радость творческих исканий и открытий всё ещё продолжает существовать».

Дорогие выпускники, мы верим, что многие из вас примут участие в разрешении загадок природы и внесут свой вклад в развитие человеческой цивилизации.

# **Задания по проектной и исследовательской деятельности**

## **Задания к главе 1 «Постоянный электрический ток»**

**1.** Подготовьте реферат по теме «Электроизмерительные приборы». Используйте при подготовке энциклопедии, справочники, материалы интернет-ресурса <http://gotourl.ru/7132>.

**2.** Определите мощность всех потребителей электроэнергии в вашей квартире, для чего воспользуйтесь сведениями о потребляемой мощности, указанными на устройствах. Соберите сведения о длительности работы этих устройств за сутки, за неделю и рассчитайте работу электрического тока за это время (в кВт · ч). Предложите меры по рациональному использованию электроэнергии с целью её экономии.

**3.** Познакомьтесь с историей развития представлений об электрической проводимости на основе интернет-ресурсов <http://gotourl.ru/7133> и <http://gotourl.ru/7134>. Подготовьте реферат на эту тему.

**4.** Изучите принципы работы люминесцентных и энергосберегающих ламп. Проведите сравнение этих устройств с лампами накаливания, в том числе по потребляемой мощности.

**5.** Подготовьте реферат об истории открытия и исследований явления сверхпроводимости и сверхпроводящих материалов, перспективах использования сверхпроводников.

## **Задания к главе 2 «Магнитное поле»**

**1.** Подготовьте реферат о принципах магнитной томографии и о её применении в медицине. Используйте материалы интернет-ресурса <http://gotourl.ru/7135>.

**2.** Подготовьте реферат о магнитном поле Земли, его значении для жизни на планете.

**3.** Предложите способ измерения индукции магнитного поля Земли.

**Задания к главе 4 «Механические колебания»**

1. Существует версия, что человек меньше устает при ходьбе, если его конечности движутся с таким периодом, с каким они бы совершили свободные колебания. Оцените период свободных колебаний ваших ног. Оцените, с какой скоростью вы должны были бы двигаться, чтобы ваши ноги двигались с периодом, равным периоду их свободных колебаний. Сравните полученные значения для разных участников.

2. Пронаблюдайте в автобусе явление резонанса – зависимость вибрации стекла в раме от частоты вращения двигателя автобуса. Сделайте описание наблюдений.

**Задания к главе 5 «Электромагнитные колебания»**

1. Исследуйте экспериментально затухающие электрические колебания в колебательном контуре. Выясните, как зависит период колебаний в контуре от ёмкости конденсатора и индуктивности катушки. Обсудите, какие преобразования энергии происходят при электромагнитных колебаниях в контуре.

2. Подготовьте реферат о производстве электрической энергии и её передаче на большие расстояния.

**Задания к главе 6 «Механические и электромагнитные волны»**

1. Подготовьте реферат на тему «Влияние волн звукового диапазона на организм человека. Защита от шумов».

2. Подготовьте реферат на тему «Влияние естественных и искусственных ионизирующих электромагнитных излучений на здоровье человека».

**Задания к главе 7 «Геометрическая оптика»**

1. Запланируйте и проведите экспериментальное исследование преломления пучка белого света в стеклянной призме. Подготовьте сообщение по результатам эксперимента.

2. Подготовьте реферат на тему «Использование явления полного внутреннего отражения в технике и быту».

3. Соберите несколько линз (выпуклых, плосковыпуклых, вогнутых и т. п.). Используйте очки для близоруких и дальтонистов людей. Определите экспериментально, какие из линз собирающие, какие – рассеивающие.

4. Подготовьте реферат на тему «Свойства человеческого зрения. Зрительные иллюзии».

**■ Задания по проектной и исследовательской деятельности**

**Задание к главе 8 «Свойства волн»**

1. По материалам интернет-ресурса <http://gotourl.ru/7136> изучите интерференцию прямой и отражённой волн. Сделайте сообщение на тему «Упругие стоячие волны в резонаторах».

**Задание к главе 9 «Элементы теории относительности»**

По материалам интернет-ресурса <http://gotourl.ru/7137> сделайте сообщение про «парадокс близнецсов» в СТО.

**Задания к главе 10 «Квантовая физика. Строение атома»**

1. Подготовьте реферат на тему «Развитие представлений об излучении света», используя материалы интернет-ресурса <http://gotourl.ru/7138>.

2. Подготовьте реферат на тему «Использование лазеров в современной науке, технике, бытовых приборах и устройствах».

**Задания к главе 11 «Атомное ядро. Элементарные частицы»**

1. Изучите материалы о термоядерном синтезе, используя интернет-ресурс [gotourl.ru/7140](http://gotourl.ru/7140). Сделайте сообщение о возможностях, открываемых термоядерной энергетикой.

2. Изучите материалы интернет-ресурса <http://gotourl.ru/7139>. Сделайте сообщение о том, какими методами физики исследуют элементарные частицы.

3. По материалам интернет-ресурсов <http://gotourl.ru/7141> и <http://gotourl.ru/7142> изучите устройство и принцип работы Большого адронного коллайдера. Сделайте сообщение.

4. Подготовьте исследовательскую работу на тему «Современная физика элементарных частиц». В работе приведите современную классификацию элементарных частиц в рамках Стандартной модели, расскажите о методах изучения элементарных частиц.

**Задание к главе 12 «Строение Вселенной»**

Подготовьте реферат на тему «Методы исследования материи в масштабах Вселенной», используя материалы интернет-ресурса <http://gotourl.ru/7143>.

# Лабораторные работы

## Лабораторная работа № 1

### Измерение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока

*Цель работы:* научиться вычислять ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока на основании экспериментальных данных — измеренных значений тока и напряжения в цепи.

*Средства измерения и материалы:* источник тока, реостат, амперметр, вольтметр, ключ, соединительные провода.

#### Подготовка к выполнению работы

*Решите задачу.* Один и тот же источник тока сначала подключают к одному резистору, а затем к другому. В первом случае напряжение между клеммами источника равно  $U_1$ , а сила тока в цепи равна  $I_1$ , во втором случае напряжение и сила тока равны  $U_2$  и  $I_2$  соответственно. Определите внутреннее сопротивление и ЭДС источника.

#### Порядок выполнения работы

- Соберите электрическую цепь согласно схеме, изображённой на рис. 274.

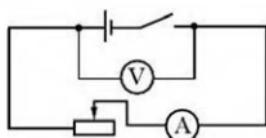


Рис. 274

Номер эксперимента	$I$ , мА	$U$ , В
1		
2		
3		
4		

## Лабораторные работы

- После замыкания ключа при четырёх положениях ползунка реостата измерьте напряжение  $U$  между клеммами источника и силу тока  $I$  в цепи. Результаты измерений занесите в таблицу. После этого разомкните ключ.
- Оцените максимальные абсолютные погрешности измерения  $I$  и  $U$  с учётом класса точности приборов (амперметра и вольтметра).
- Постройте график зависимости  $I$  от  $U$ .
- Вычислите по формулам, полученным при подготовке к выполнению работы, ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока.
- Вычислите максимальную относительную и максимальную абсолютную погрешности ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока.
- С помощью вольтметра измерьте ЭДС источника. Сравните полученное значение ЭДС с ранее вычисленным.
- Сделайте выводы по полученным результатам.

### Лабораторная работа № 2

#### Определение элементарного заряда при электролизе

*Цели работы:* 1) изучить явление электролиза; 2) определить модуль элементарного заряда на основании закона электролиза.

*Средства измерения и материалы:* сосуд с раствором медного купороса, медный и угольный электроды, рычажные весы, разновес, амперметр, реостат, источник постоянного напряжения, часы, ключ, электрическая плитка, соединительные провода.

#### Подготовка к выполнению работы

*Решите задачу.* При протекании через раствор медного купороса тока  $I$  за время  $\Delta t$  на катоде выделилось  $m$  граммов меди. Молярная масса меди  $M = 64$  г/моль, валентность меди  $z = 2$ . Получите выражение для расчёта по этим данным элементарного заряда.

#### Порядок выполнения работы

- Измерьте массу  $m_1$  медного электрода до его погружения в электролитическую ванну.
- Соберите электрическую цепь, схема которой показана на рис. 275.

3. Включите источник и установите в цепи силу тока 1 А. Одновременно начните отсчёт времени. В течение 20 мин поддерживайте неизменной силу тока в цепи, перемещая ползунок реостата.

4. После окончания указанного времени разомкните ключ, извлеките из ванны катод и просушите его над электрической плиткой. Затем измерьте его массу  $m_2$ .

5. Результаты измерений занесите в таблицу.

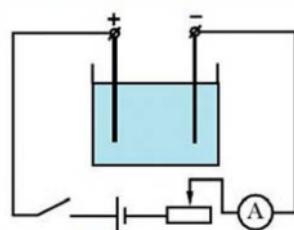


Рис. 275

$m_1, \text{ г}$	$m_2, \text{ г}$	$m = m_2 - m_1, \text{ г}$	$t, \text{ с}$	$I, \text{ А}$

6. Воспользовавшись полученной при подготовке к лабораторной работе формулой, определите элементарный заряд.  
 7. Сделайте выводы по полученным результатам.

### Лабораторная работа № 3

#### Изучение явления электромагнитной индукции

*Цель работы:* изучить явление электромагнитной индукции.

*Средства измерения и материалы:* миллиамперметр с нулём в середине шкалы, источник тока, две катушки с сердечниками, подковообразный магнит, ключ (или кнопочный выключатель), магнитная стрелка, соединительные провода, реостат.

#### Подготовка к выполнению работы

Изобразите подковообразный магнит и линии индукции его магнитного поля. Изобразите схематически катушку, по обмотке которой течёт ток. Укажите на рисунке направление тока и изобразите линии индукции магнитного поля катушки.

Сформулируйте закон электромагнитной индукции и правило Ленца.

### Порядок выполнения работы

#### *Исследование магнитного поля катушки с током*

1. Вставьте в одну из катушек сердечник, закрепив его гайкой.
2. Подключите соединённые последовательно катушку с сердечником, реостат и разомкнутый ключ к источнику тока.
3. Замкните ключ. Исследуйте с помощью магнитной стрелки магнитное поле, создаваемое катушкой с током, и определите положение её магнитных полюсов.
4. Изменяя положение ползунка реостата, исследуйте, как изменяется действие магнитного поля на магнитную стрелку (по скорости вращения стрелки).
5. Разомкните ключ.

#### *Исследование явления электромагнитной индукции и правила Ленца*

1. Вставьте сердечник во вторую катушку, закрепив его гайкой. Подключите миллиамперметр к клеммам этой катушки.
2. Придвиньте один из полюсов подковообразного магнита к сердечнику катушки, удерживая её неподвижной. Одновременно наблюдайте за стрелкой миллиамперметра.
3. Отодвигайте магнит от сердечника удерживаемой катушки. Одновременно наблюдайте за стрелкой миллиамперметра.
4. Повторите эксперименты, описанные в п. 2 и 3, с другим полюсом подковообразного магнита.
5. Объясните результаты проведённых экспериментов.
6. Расположите обе катушки так, чтобы их оси совпали. Замкните ключ, соединив первую катушку с источником тока. Замыкая и размыкая ключ, наблюдайте за отклонением стрелки миллиамперметра в цепи второй катушки.
7. Замкнув ключ, наблюдайте за изменением отклонения стрелки миллиамперметра при перемещении ползунка реостата в цепи первой катушки.
8. На основании проведённых экспериментов сделайте заключение о выполнимости закона электромагнитной индукции и правила Ленца.
9. Зарисуйте в тетради схематически установки для всех проведённых экспериментов.
10. Сформулируйте выводы по работе.

**Лабораторная работа № 4****Определение показателя преломления стекла**

**Цели работы:** 1) изучить закон преломления света на границе двух сред; 2) определить показатель преломления стекла на основании закона преломления.

**Средства измерения и материалы:** стеклянная плоскопараллельная пластинка (или трапецидальная призма), лист бумаги, картон, булавки, угольник, транспортир.

**Подготовка к выполнению работы**

**Решите задачу.** Луч света проходит через расположенную в воздухе плоскопараллельную пластинку так, как показано на рис. 276. Определите показатель преломления стекла, из которого изготовлена эта пластинка. Считайте углы  $\alpha$  и  $\beta$  известными. Докажите, что луч, падающий на пластинку, и луч, выходящий из неё, параллельны друг другу.

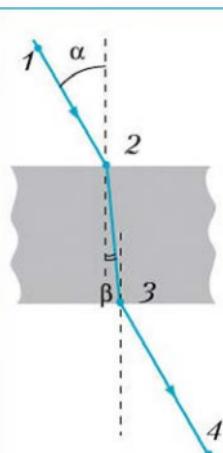


Рис. 276

**Порядок выполнения работы**

1. Положите под тетрадный лист картон, а на лист — стеклянную плоскопараллельную пластинку. Обведите её контуры карандашом.
2. Расположите с одной стороны пластиинки пару булавок 1 и 2 так, как показано на рис. 277. Смотрите с противоположной стороны пластиинки сквозь неё под таким углом, чтобы установленные булавки казались находящимися на одной линии.
3. Установите с противоположной стороны булавки 3 и 4 так, чтобы все четыре булавки казались находящимися на одной линии.
4. Снимите с тетрадного листа пластиинку и булавки. Проведите с помощью линейки три отрезка, соединяющих соответственно пары дырок от булавок 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4. В точках 2 и 3 восстановите перпендикуляры к контурам параллельных сторон пластиинки.

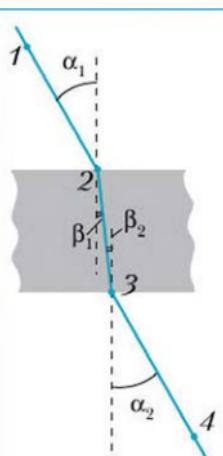


Рис. 277

## Лабораторные работы

- Определите с помощью транспортира углы падения ( $\alpha_1$  и  $\beta_1$ ) и преломления ( $\beta_2$  и  $\alpha_2$ ). Результаты запишите в таблицу.
- Вычислите по этим данным показатель преломления призмы и оцените погрешность результата.
- Повторите п. 1–6, изменив положения булавок 1–4.
- Сравните вновь полученное значение показателя преломления с ранее полученным.
- Сформулируйте выводы по работе.

### Лабораторная работа № 5

#### Оценка длины волны света разного цвета

*Цель работы:* оценить длину световой волны с помощью дифракционной решётки.

*Средства измерения и материалы:* прибор для определения длины волны видимого света (с дифракционной решёткой), лампа накаливания, штатив с муфтой.

#### Подготовка к выполнению работы

*Решите задачу.* Используя обозначения на рис. 278, докажите, что максимум  $n$ -го порядка в спектре дифракционной решётки с периодом  $d$  будет находиться на расстоянии  $a$ , если на решётку нормально падает свет с длиной волны  $\lambda = \frac{a \cdot d}{n \cdot l}$ . Щель в экране считайте очень узкой.

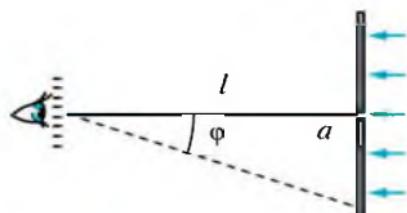


Рис. 278

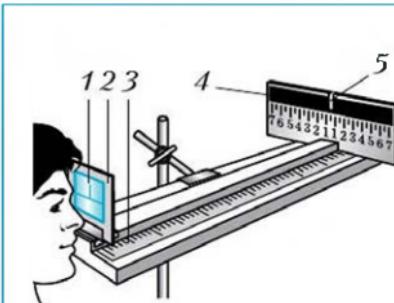


Рис. 279

**Порядок выполнения работы**

- Рассмотрите прибор для определения длины волны света (рис. 279). Используя линейку 3, установите экран 4 с щелью 5 на расстоянии  $l = 50$  см от закреплённой в держателе 2 дифракционной решётки 1.
- Посмотрите сквозь решётку и щель на источник света. Дифракционные спектры каких порядков вам удалось увидеть? Каков порядок чередования цветов в спектре в пределах спектра одного порядка?
- Измерьте координаты максимумов, соответствующих синей, зелёной и красной частям спектра в  $\pm 1$ -м и  $\pm 2$ -м порядках дифракционных спектров. Результаты измерений занесите в таблицу.
- Вычислите длины волн, соответствующие свету синего, зелёного и красного цветов. Оцените погрешность определения длин волн.
- Сделайте вывод по результатам работы.

Цвет максимума	Порядок	Координата, мм	$\lambda$ , нм	$\lambda_{\text{ср}}$ , нм
Синий	-2 -1 +1 +2			
Зелёный	-2 -1 +1 +2			
Красный	-2 -1 +1 +2			

**Лабораторная работа № 6****Определение удельного заряда частицы по её треку в камере Вильсона**

*Цель работы:* определить удельный заряд частицы по её треку.

*Средства измерения и материалы:* фотография треков заряженных частиц, полученная в камере Вильсона, линейка, калька.

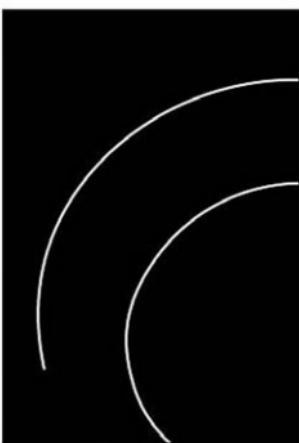


Рис. 280

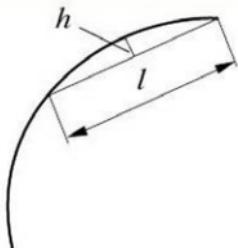


Рис. 281

## Подготовка к выполнению работы

**Решите задачу.** В однородное магнитное поле с одинаковой по модулю скоростью в одном и том же направлении влетают две заряженные частицы. Векторы скоростей частиц направлены перпендикулярно вектору индукции магнитного поля. Определите отношение удельных зарядов этих частиц, если радиусы кривизны их траекторий равны  $R_1$  и  $R_2$ .

### Порядок выполнения работы

- Переведите на кальку изображение треков заряженных частиц (рис. 280).
- Проведите к начальным участкам треков хорды, как показано на рис. 281. Измерьте высоту  $h$  и длину  $l$  этих хорд. Результаты запишите в виде таблицы.
- Определите радиусы кривизны треков по формуле  $R = \frac{l^2 + 4h^2}{8h}$ .
- \* Предложите другой способ определения радиуса кривизны трека.
- Зная, что трек 1 принадлежит протону, определите удельный заряд неизвестной частицы, которой принадлежит трек 2. Определите тип неизвестной частицы.
- Сделайте выводы по результатам работы.

# Ответы

§ 1. 2. а)  $\frac{2N_a \cdot e}{\Delta t}$ ; б)  $\frac{-N_\beta \cdot e}{\Delta t}$ ; в)  $\frac{(2N_a - N_\beta) \cdot e}{\Delta t}$ . 3. 0,8 мкА. 4. 0. 5. 417 с.

§ 2. 2. 0,35 А. 3. 1,8 кКл. 4. 300 А. 5.  $18 \cdot 10^{28}$  м<sup>-3</sup>. 6. 0,035 мм/с.

§ 3. 1. 50 мА. 2. 200 В. 3. Можно; нельзя. 4. 50 Ом, 100 Ом, 300 Ом. 5. 5,57 Ом. 6. 80 витков. 7\*. 0,35 мОм.

§ 4. 1. 170 Ом. 2. 2 В, 5 В, 10 В. 3. 0,8 В; 4 В. 4. 12,5 Ом. 5. 50 мА, 20 мА.

6.  $2,75R$ . 7.  $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$ . 8.  $\frac{R}{3}$ .

§ 5. 1. 0,66 МДж. 2. 220 Вт. 3. 0,25 А. 4. 86,4 МДж. 5. 240 Ом.

6. а)  $\frac{t_1 + t_2}{t_1 + t_2}$ ; б)  $t_1 + t_2$ . 7. В  $k^2$  раз.

§ 6. 1. 0,1 А. 2. 4,5 Ом. 3.  $U = \frac{\mathcal{E} \cdot r}{r + R}$ .

§ 7. 1. 0,2 мс. 3. Источник с внутренним сопротивлением 25 Ом, 20,8 Вт,

60 %, 50 %, 43 %. 4.  $\frac{2\mathcal{E}^2}{9R}$ .

§ 8. 1. 40 В, 5 А. 2. 0. 3.  $I = \frac{\frac{2\mathcal{E}}{R_1 + R_2}}{R + \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2}}$ ,  $V = I \cdot R$ . 4\*. 3,43 мКл.

5\*.  $q_1 = \frac{|\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2| \cdot (R_1 + R_3) \cdot C_1}{R_1 + R_3 + R_4}$ ,  $q_2 = \frac{|\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2| \cdot R_3 \cdot C_2}{R_1 + R_3 + R_4}$ .

§ 10. 1. 25 кВт·ч. 2.  $m_{1\text{Fc}} = 27,9$  кг,  $m_{2\text{Fc}} = 18,6$  кг,  $m_{1\text{2Cl}} = 35,5$  кг. 3. 57,6 мкм.

4. а)  $\frac{I}{z_+}$ ; б)  $\frac{I}{z_-}$ ; в)  $n_- = \frac{I}{2z_-}$ ,  $n_+ = \frac{I}{2z_+}$ .

§ 13. 1.  $1,25 \cdot 10^{17}$ . 2.  $8,4 \cdot 10^6$  м/с. 3. 4 Вт.

§ 16. 1. 80 мкДж. 2.  $4,5\mathcal{E}^2 \cdot C$ .

§ 18. 2.  $1,6 \cdot 10^{-15}$  Н. 3\*.  $\frac{m \cdot a}{e \cdot v}$ .

§ 19. 1. 80 мкТл. 2. 0,25 мТл.

§ 20. 2. 8 пДж. 3.  $\frac{T_1}{T_2} = n$ . 4.  $m_1 : m_2 : m_3 = 1 : 1,78 : 2,16$ . 5. 1,44 м, 0,2 мкс.

§ 21. 2. 0,13 Тл.

§ 22. 1,6 Н.

**§ 23.** 1.  $F_a = I \cdot a \cdot B$ ,  $F_b = 0$ . 2. Провода испытывают: а) растягивающее усилие; б) сжимающее усилие, причём  $T_a = 0,5I \cdot b \cdot B$ ,  $T_b = 0,5I \cdot a \cdot B$ .  
 3.  $\varphi = \frac{\alpha \cdot B \cdot I \cdot n^2 \cdot a^2}{M}$ . 4.  $2\pi \cdot r \cdot I \cdot B \cdot \sin \alpha$ .

**§ 26.** 1. 0,33 В. 2. 0 В, 0 А. 3. 0,75 мА, 56 мкН. 4\*. 0,375 мА, 14 мкН.

**§ 27.** 1. а) 0,5 мВб, 0,1 мВб; б) 0,2 мВ; в) 0,2 мкА. 3. 5 мкКл.

**§ 28.** 5,1 мкДж.

**§ 29.** 1. 1 Вб. 2. 0,25 Гн.

**§ 30.** 1. Увеличилась в 3 раза. 2. 1 Дж. 4. 99,5 мкДж.

**§ 32.** 2.  $x = \frac{-a_m \cdot \sin(\omega \cdot t)}{\omega^2}$ ,  $v_x = \frac{-a_m \cdot \cos(\omega \cdot t)}{\omega}$ . 3.  $0,75T$ .

**§ 33.** 2. 31,6 Н/м. 3. 0,16 Дж. 4. 0,5.

**§ 34.** 2. 1,58 см. 3. 302. 5. 1,48 с.

**§ 36.** 2.  $3 \text{ c}^{-1}$ ,  $4 \text{ c}^{-1}$ . 3. 0,05 Н,  $0^\circ$ .

**§ 38.** 1. Увеличится в 2 раза. 2. Уменьшится в 2 раза. 3. а)  $0,5q_0$ , 0,  $-0,5q_0$ ,  $-q_0$ ;

$$6. \frac{-\sqrt{3}\pi \cdot q_0}{T}, \frac{-2\pi \cdot q_0}{T}, \frac{-\sqrt{3}\pi \cdot q_0}{T}, 0.$$

**§ 39.** 2.  $\sqrt{q^2 + L \cdot C \cdot I^2}$ ,  $\sqrt{\frac{q^2}{L \cdot C} + I^2}$ . 3.  $\frac{2\pi \cdot C \cdot \Delta\varphi}{T}$ .

**§ 40.** 1. 0,13 В. 2. 3,18 Гц.

**§ 41.** 1. а)  $\sqrt{2}$  А; б) 20 В,  $10\sqrt{2}$  В; в) 20 Вт. 2. 1,21 кОм.

**§ 42.** 2. 15,9 Ом. 3. 0,6 А. 4. а) 2 Дж; б) 0.

**§ 43.** 2.  $10\pi$  Ом. 3. 60 А. 4. а)  $-80$  мДж; б) 0.

**§ 44.** 1.  $U_R = 20$  В,  $U_C = 6,4$  В,  $U_L = 10\pi$  В. 2. 0;  $0,5\pi$ ;  $-0,5\pi$ . 3.  $-0,5\pi$ ;  $-\pi$ .

**§ 45.** 2. А) 36,06 Ом, 0,277 А. Б)  $10^3 \text{ c}^{-1}$ , 10 В, 10 В, 10 В, 0. В)  $707 \text{ c}^{-1}$ ,  $U_R = 8,16$  В,  $U_L = 5,77$  В,  $U_C = 28,85$  В,  $69,5^\circ$ .

**§ 46.** 1. а) 0,577; б) 0,732. 2. 154 Вт.

**§ 47.** 1. 1 об/с. 2. 54,5. 3. 26 А.

**§ 48.** 1. 50 мс. 2.  $\pi$ ;  $\frac{\pi}{2}$ ;  $\frac{\pi}{4}$ ;  $\frac{\pi}{3}$ .

**§ 49.** 1. 0,34 м, 5,5 м, 2,4 м. 2. 3,3 км. 3.  $\pi$ . 4.  $\Delta v = 0$ ,  $\frac{\lambda_{\text{воды}}}{\lambda_{\text{воздуха}}} = 4,5$ .

**§ 50.** 1.  $9,46 \cdot 10^{12}$  км. 2. 3 м, 600 м. 3.  $4 \cdot 10^{-19}$  Дж = 2,5 эВ. 4. 1,2 км. 5.  $\frac{2\pi}{3}$ .

**§ 52.** 1. а)  $60^\circ$ ; б)  $60^\circ$ . 2.  $40^\circ$ . 4. 0,9 м.

**§ 53.** 1. 0,38; 0,5. 2.  $h = \frac{D \cdot (\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \cos \alpha) \cdot \sin \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}$ .

$$4. 24,4^\circ; 48,6^\circ. 5. D = \frac{2h}{\sqrt{n^2 - 1}}.$$

**§ 54.** 1. а) 2 дptr; б) -5 дptr.

**§ 55.** 2. 0,75 м; 0,5 м. 5. -0,375; 0,25.

**§ 56.** 1. 20 дptr. 2. 667; 3 см. 4. ≈50. 5. 2,08 дptr, 50 см.

**§ 57.** 1. а)  $1,95 \cdot 10^8$  м/c, 383 нм; б)  $2,26 \cdot 10^8$  м/c, 444 нм; в)  $1,24 \cdot 10^8$  м/c, 244 нм.

**§ 59.** 1. а) 0; б) 1/3. 2. 0; 2,25.

**§ 60.** 1.  $89,3(2k+1)$  нм, где  $k = 0, 1, 2, \dots, 3$ . 2 м.

**§ 61.** 1. Уменьшить в 16,2 раза. 2. а) 7,9 см; б) 25/9.

**§ 62.** 1.  $5,7^\circ, 8,6^\circ$ . 2. 2,57 см. 3. ≈3,6''.

**§ 63.** а)  $c$ , во всех системах; б)  $c - v$ ; в)  $c + v$ .

**§ 64.** 1. 5,3 ч. 2. 0,87 м. 3. а) Да; б) да; в) нет. 4. 14,2 мкс, 4,22 км.

**§ 65.** 1.  $\frac{5c}{7}$ . 2.  $v'_x = \frac{v_x - V_y}{1 - v_x \cdot \frac{V_x}{c^2}}$ . 3. Да, нет.

**§ 66.** 2.  $6,62 \cdot 10^{-19}$  кг · м/c ( $5,35 \cdot 10^{-19}$  кг · м/c);  $2,51 \cdot 10^{-10}$  Дж ( $4,82 \cdot 10^{-10}$  Дж).

**§ 67.** 1.  $1,99 \cdot 10^{-19}$  Дж. 2.  $0,905 \cdot 10^{16}$  Гц, 33 нм. 3.  $1,81 \cdot 10^{17}$ . 4\*.  $0,965 \cdot 10^{19}$  Гц, 31,1 пм.

**§ 68.** 1.  $6,24 \cdot 10^5$  м/c. 2. Третьим. 3\*. 0,665 В. 4.  $q = \frac{R \cdot h \cdot c}{e \cdot k} \cdot \left( \frac{1}{\lambda_A} - \frac{1}{\lambda_{kp}} \right)$ .

**§ 70.** 2.  $2,25 \cdot 10^6$  м/c;  $7,16 \cdot 10^{15}$  Гц.

**§ 71.** 1. 0,53 пм; 0,33 нм. 2.  $2,32 \cdot 10^6$  м/c. 3.  $-2,17 \cdot 10^{-18}$  Дж.

$$4. \frac{-e^4 \cdot m_e}{4\hbar^2 \cdot \epsilon_0^2} \cdot$$

**§ 72.** 1. Уменьшится на 2,5 эВ. 2. а) 10,2 эВ; б) 1,9 эВ. 3. 13,6 эВ.

**§ 74.** 1.  ${}_1^1\text{H}, 0; {}_2^3\text{H}, 1; {}_1^3\text{H}, 2$ . 2. Числом протонов и нейтронов,  ${}^3_1\text{H}, {}^3_2\text{He}$  (водород, гелий). 3. Числом нейтронов: 131, 136, 141.

**§ 75.** 1.  $\approx 2 \cdot 10^{-34}$  Н, 230 Н. 2.  ${}^4_2\text{He}$ :  $\approx 0,03$  а. е. м.,  $\approx 27$  МэВ,  $\approx 6,8$  МэВ/нуклон;  ${}^6_3\text{Li}$ :  $\approx 0,033$  а. е. м.,  $\approx 30$  МэВ,  $\approx 5$  МэВ/нуклон. 3. а)  $\approx 0,009$  а. е. м.; б)  $\approx 3,02$  а. е. м. 4. 10,56 МэВ.

**§ 76.** 1. а) 1 мин; б) 30 с. 2. 0,156 г. 3. 95,5 %. 4.  $\lambda_{\text{Sr}} = 3,85 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ;  $\lambda_{\text{Ba}} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

**§ 77.** 1.  ${}^{142}_{60}\text{Nd}, {}^{168}_{75}\text{Re}$ . 2.  ${}^{227}_{92}\text{U}, {}^{226}_{91}\text{Ra}$ . 3.  ${}^{66}_{30}\text{Zn}, {}^{199}_{79}\text{Au}$ . 4.  ${}^{13}_7\text{N}$ .

**§ 78.** 1. а)  ${}^{17}_8\text{O}$ ; б)  ${}^1_1\text{H}$ . 2. 23,83 МэВ. 3. -1,174 МэВ.

**§ 81.** 1. 84 Дж. 2. а) 50 мЗв — 0,2 ПДД; б) 150 мЗв — 0,6 ПДД; в) 1 Зв — 4 ПДД.

**§ 84.** 2. 2,69 пк. 3. 16 мин 40 с.

**§ 85.** 2.  $\approx 1,4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. 3.  $\approx 2,1423 \cdot 10^{30}$  кг.

**§ 86.** 1.  $\approx 3480$  км. 2.  $\approx 3$  км/c,  $v_{||} = 4,2$  км/c.

## Алфавитно-предметный указатель

- Аберрация сферическая 266  
— хроматическая 267
- Автоколебания 186
- Адрон 406
- Аккомодация 276
- Активность образца 382
- Альфа-распад 384
- Альфа-частицы 353
- Амплитудно-частотная характеристика 177
- Аннигиляция 404
- Античастица 404
- Астероид 423
- Астрономическая единица (а. е.) 414
- Атом 352
- Атомная единица массы (а. е. м.) 371  
— энергетика 392
- Барионы 406
- Бета-распад 385
- Бета-частицы 353
- Близорукость 277
- Большой адронный коллайдер 332
- Вебер (единица магнитного потока) 134
- Взаимодействие гравитационное 407  
— сильное 373, 408  
— слабое 407  
— электромагнитное 84, 407
- Волна бегущая 231  
— де Броиля 349  
— звуковая 235  
— поперечная 232  
— продольная 232
- Волновая поверхность 285
- Волны механические 229  
— электромагнитные 240
- Высота тона 238
- Галактика 433  
— неправильная 435
- спиральная 435  
— эллиптическая 435
- Гамма-частицы (гамма-кванты) 353
- Генератор переменного тока 221
- Генри (единица индуктивности) 143
- Герц (единица частоты) 152
- Гистерезис 120
- Грей (единица поглощённой дозы излучения) 400
- Громкость 236
- Давление света 348
- Дальнозоркость 277
- Действующее значение напряжения 203  
— силы тока 203
- Дефект масс 375
- Диамагнетик 118, 119
- Диод вакумный 61  
— полупроводниковый 70
- Диоптрия 266
- Дисперсия 257
- Диссоциация электролитическая 47
- Дифракционная решётка 313
- Дифракция волн 305  
— света 306
- Диэлектрик 9
- Длина волны 231
- Доза излучения поглощённая 400  
— предельно допустимая 400  
— эквивалентная 401
- Дозиметрия 399
- Закон Ампера 107  
— Джоуля — Ленца 27  
— независимости световых пучков 251  
— Ома для участка цепи 14  
— для переменного тока 216  
— для полной цепи 33  
— для участка цепи с источником тока 40

- отражения света 251
- преломления света 255
- прямолинейного распространения света 250
- радиоактивного распада 381
- сложения скоростей (релятивистский) 331
- сохранения массового числа 389
- Фарадея (для электролиза) 50
- фотоэффекта 343
- Хаббла 436
- электромагнитной индукции 137
- Зеркало 251
- Зиверт (биологический эквивалент рентгена) 401
- Излучение индуцированное** 363
  - реликтовое 437
  - тепловое 339
- Изображение действительное** 253
  - мнимое 252
- Изотоны** 372
- Индуктивность контура** 143
- Индукция магнитного поля** 89
  - электромагнитная 128
- Интерференция волн** 294
  - света 298
- Источники когерентные** 296
  - света 250
  - точечный 250
  - тока 31, 198
- Камера Вильсона** 398
  - пузырьковая 398
- Квазар** 435
- Квант** 341
- Кварк** 406
- Колебания** 152
  - вынужденные 176
  - гармонические 156
  - затухающие 175
  - звуковые 235
- свободные 152
- электромагнитные 190
- Колебательный контур** 191
- Кольца Ньютона** 302
- Комета** 423
- Корпускулярно-волновой дуализм** 347
- Коэффициент биологической активности** 400
  - мощности 220
  - полезного действия (КПД) источника тока 37
- Лазеры** 362
- Лептоны** 406
- Линза** 261
  - рассеивающая 262
  - собирающая 262
  - тонкая 263
- Линии магнитной индукции** 92
- Магнит** 85
- Магнитная проницаемость** 119
- Магнитное взаимодействие** 84, 86
- Магнитный поток** 134
- Масс-спектрограф** 100
- Магнитик математический** 171
  - пружинный 159
  - физический 170
- Мезоны** 406
- Метеорит** 424
- Метеороид** 424
- Млечный Путь** 434
- Мощность тока** 27
  - полезная 36
  - полная 36
- Нейтринно** 385
- Нейтрон** 371
- Нуклон** 371
- Оптическая сила линзы** 266
- Относительность одновременности событий** 324
  - пространственных промежутков 328
  - течения времени 326

## ■ Алфавитно-предметный указатель

- Парамагнетик 118, 119  
Период колебаний 152
  - полураспада 380
  - решётки 313

Плазма 55  
Планетарная модель атома 353  
Планеты 419
  - гиганты 423
  - земной группы 420

Плоскость поляризации 292  
Показатель преломления  
абсолютный 255
  - относительный 255

Поле магнитное 88
  - электрическое 10
  - вихревое 140
  - электромагнитное 240

Полупроводник *n*-типа 67
  - *p*-типа 67

Поляризация 290  
Постоянная распада 382  
Постулаты Бора 356, 359
  - специальной теории относительности 321

Правила Кирхгофа 42, 43
  - смещения 384, 385

Правило буравчика 93
  - левой руки 91, 107
  - Ленца 136
  - правой руки 94

Принцип Гюйгенса 286
  - Гюйгенса — Френеля 306
  - суперпозиции 94

Проводимость дырочная 67
  - примесная 67
  - собственная 67

Проводник 9  
Протон 370  
Работа выхода 60, 345
  - постоянного тока 26

Радиоактивность 380  
Разряд газовый 53
  - несамостоятельный 54
  - самостоятельный 55
  - дуговой 58
  - искровой 56
  - коронный 57
  - тлеющий 58

Резерфорда опыты 354  
Резонанс 178
  - напряжения 218
  - скорости 183
  - смещения 181
  - тока 217

Рентген (единица поглощённой дозы излучения) 400

Самоиндукция 144  
Сверхновые звёзды 431  
Сверхпроводники 16  
Светимость звёзд 426  
Световод 258  
Свободные носители заряда 9  
Сила Ампера 106
  - Лоренца 90
  - сторонняя 31
  - тока 7, 109

Система автоколебательная 186
  - колебательная 153

Скорость волны 231
  - дрейфа 10
  - электромагнитных волн 240

Солнечная активность 418
  - корона 417
  - система 419

Соотношения неопределённостей Гейзенберга 351  
Сопротивление (электрическое) 14
  - активное 204
  - ёмкостное 207
  - индуктивное 210
  - удельное электрическое 15

Спектр 257
  - излучения 360
  - поглощения 361

Счётчик Гейгера 397

Тембр звука 238  
 Термоядерные реакции 391  
 Ток индукционный 128  
     — переменный 198  
     — постоянный 11  
 Транзистор 72, 73  
 Трансформатор 223  
 Трек 398  
 Трубка электронно-лучевая 63  
 Уравнение Эйнштейна (для фотоэффекта) 345  
 Фаза колебаний 156  
 Феррит 118, 120  
 Ферромагнетик 118, 122  
 Фокусное расстояние линзы 264  
 Формула тонкой линзы 273  
     — Томсона 193  
     — Эйнштейна (для энергии покоя) 334  
 Фотон 243, 341, 404  
 Фотоэффект 342  
     — внешний 342  
     — внутренний 72  
 Фундаментальные взаимодействия 407  
     — частицы 407  
 Циклотрон 99

Частота колебаний 152  
     — несущая 245  
     — переменного тока 201  
     — резонансная 179, 213  
     — собственная круговая (циклическая) 157  
 Число зарядовое 370  
     — массовое 371  
 Электрический ток 4  
     — в вакууме 59  
     — в газах 52  
     — в полупроводниках 65  
 Электродвигатель 114  
 Электродвижущая сила 32  
     — индукции 130  
     — самоиндукции 144  
 Электролиз 49  
 Элементарные частицы 403  
 Эмиссия термоэлектронная 60  
 Энергия магнитного поля тока 146  
     — связи 375  
     — — удельная 376  
 Ядерные реакции 388  
     — — цепные 390  
 Ядерные силы 373  
 Ядерный реактор 392  
 Ядро (атомное) 338

# Оглавление

<b>ЭЛЕКТРОДИНАМИКА (продолжение)</b>	3
<b>Глава 1. Постоянный электрический ток</b>	4
§ 1. Условия возникновения и существования электрического тока.	
Направление и сила тока	4
§ 2. Свободные носители заряда.	
Электрический ток в проводниках	9
§ 3. Вольтамперная характеристика проводника. Закон Ома для участка цепи. Сопротивление проводника	
для участка цепи. Сопротивление проводника	13
§ 4. Расчёт сопротивления системы, состоящей из нескольких проводников, соединённых между собой.	
Измерение силы тока и напряжения	19
§ 5. Работа и мощность постоянного тока. Закон Джоуля – Ленца	26
§ 6. Источник тока. Электродвижущая сила.	
Замкнутая электрическая цепь. Закон Ома для полной цепи	30
§ 7. <b>Полезная и полная мощность тока в замкнутой цепи.</b>	
Как передаётся электрическая энергия	36
§ 8. Закон Ома для участка цепи с источником тока.	
Правила Кирхгофа	39
§ 9. Экспериментальные обоснования электронной проводимости металлов и сплавов	
45	
§ 10. Электрический ток в электролитах.	
Электролиз и его применение	47
§ 11. Электрический ток в газах. Плазма	
§ 12. <b>Электрический ток в газах. Газовые разряды</b>	52
§ 13. Электрический ток в вакууме	56
§ 14. Электрический ток в полупроводниках	
§ 15. Полупроводниковые приборы	59
§ 16. Перезарядка конденсатора	
65	
69	
75	
<b>Глава 2. Магнитное поле</b>	84
§ 17. Магнитное взаимодействие	
84	
§ 18. Магнитное поле. Индукция магнитного поля. Сила Лоренца	
88	
§ 19. Линии магнитной индукции. Картинны магнитных полей	
92	
§ 20. Движение заряженных частиц в магнитном поле	
98	
§ 21. Действие магнитного поля на проводник с током.	
Сила Ампера	
106	
§ 22. Магнитное взаимодействие проводников с токами.	
Единица силы тока – ампер	
108	
§ 23. Действие магнитного поля на рамку с током.	
Электромотор постоянного тока. Гальванометр. Динамик	
111	
§ 24. Магнитные свойства вещества	
118	

<b>Глава 3. Электромагнитная индукция</b>	126
§ 25. Опыты Фарадея. Открытие электромагнитной индукции	126
§ 26. ЭДС индукции в движущемся проводнике	129
§ 27. Магнитный поток. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца	133
§ 28. Вихревое электрическое поле	139
§ 29. Индуктивность. Самоиндукция	143
§ 30. Энергия магнитного поля тока	146
<b>КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ</b>	150
<b>Глава 4. Механические колебания</b>	151
§ 31. Механические колебания. Условия возникновения свободных колебаний	151
§ 32. Кинематика колебательного движения	154
§ 33. Динамика колебательного движения	162
§ 34. Преобразование энергии при механических колебаниях. Математический маятник	169
§ 35. Затухающие и вынужденные колебания. Резонанс	175
§ 36. Метод векторных диаграмм	181
§ 37. Автоколебания	186
<b>Глава 5. Электромагнитные колебания</b>	190
§ 38. Свободные электромагнитные колебания	190
§ 39. Процессы при гармонических колебаниях в контуре	195
§ 40. Переменный ток. Источник переменного тока	198
§ 41. Активное сопротивление в цепи переменного тока	201
§ 42. Конденсатор в цепи переменного тока	205
§ 43. Катушка индуктивности в цепи переменного тока	208
§ 44. Вынужденные электромагнитные колебания. Резонанс	211
§ 45. Закон Ома для электрической цепи переменного тока	214
§ 46. Мощность в цепи переменного тока	220
§ 47. Производство, передача и потребление электрической энергии. Трансформатор	221
<b>Глава 6. Механические и электромагнитные волны</b>	229
§ 48. Механические волны	229
§ 49. Звук	235
§ 50. Электромагнитные волны	240
§ 51. Принципы радиосвязи и телевидения	245
<b>Глава 7. Геометрическая оптика</b>	250
§ 52. Законы отражения света. Построение изображения в зеркалах	251
§ 53. Закон преломления света на границе раздела двух изотропных однородных прозрачных сред. Явление полного внутреннего отражения	254

## ■ Оглавление

§ 54. Линзы . . . . .	261
§ 55. Построение изображений, создаваемых тонкими линзами . . . . .	269
§ 56. Глаз и зрение. Оптические приборы . . . . .	275
<b>Глава 8. Свойства волн . . . . .</b>	285
§ 57. Волновой фронт. Принцип Гюйгенса . . . . .	285
§ 58. Поляризация волн . . . . .	290
§ 59. Интерференция волн . . . . .	293
§ 60. Интерференция света . . . . .	298
§ 61. Дифракция света . . . . .	305
§ 62. Дифракционная решётка . . . . .	313
<b>Глава 9. Элементы теории относительности . . . . .</b>	319
§ 63. Постулаты специальной теории относительности . . . . .	320
§ 64. Относительность одновременности событий. Замедление времени и сокращение длины . . . . .	324
§ 65. Закон сложения скоростей в СТО . . . . .	330
§ 66. Масса, импульс и энергия в СТО . . . . .	333
<b>КВАНТОВАЯ ФИЗИКА. АСТРОФИЗИКА . . . . .</b>	338
<b>Глава 10. Квантовая физика. Строение атома . . . . .</b>	339
§ 67. Равновесное тепловое излучение. Гипотеза Планка . . . . .	339
§ 68. Фотоэффект . . . . .	342
§ 69. Корpusкулярно-волновой дуализм. Давление света. Гипотеза де Броиля . . . . .	347
§ 70. Планетарная модель атома . . . . .	352
§ 71. Первый постулат Бора. Правило квантования орбит . . . . .	355
§ 72. Второй постулат Бора. Спектры испускания и поглощения . . . . .	359
§ 73. Лазеры . . . . .	362
<b>Глава 11. Атомное ядро. Элементарные частицы . . . . .</b>	369
§ 74. Состав ядра . . . . .	370
§ 75. Ядерные силы. Энергия связи атомного ядра . . . . .	373
§ 76. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада . . . . .	380
§ 77. Причины радиоактивности. Альфа- и бета-распады. Правила смещения . . . . .	383
§ 78. Ядерные реакции . . . . .	388
§ 79. Ядерная энергетика . . . . .	392
§ 80. Методы регистрации ионизирующих радиоактивных ядерных излучений . . . . .	397
§ 81. Биологическое действие радиоактивных излучений. Дозиметрия . . . . .	399
§ 82. Элементарные частицы. Фундаментальные взаимодействия . . . . .	403

<b>Глава 12. Строение Вселенной</b>	411
§ 83. Основные методы исследования в астрономии	411
§ 84. Определение расстояний до небесных тел	413
§ 85. Солнце	415
§ 86. Солнечная система	419
§ 87. Физические характеристики звёзд	426
§ 88. Эволюция звёзд	430
§ 89. Вселенная	433
 Заключение	439
Задания по проектной и исследовательской деятельности	442
Лабораторные работы	445
Ответы	453
Алфавитно-предметный указатель	456

Гравитационная постоянная – $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$
Модуль ускорения свободного падения близко к поверхности Земли – $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$
Масса электрона – $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Заряд электрона – $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса протона – $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Заряд протона – $q_p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса нейтрона – $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Постоянная Ампера – $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$
Постоянная Фарда – $F = 96,5 \text{ кКл}/\text{моль}$
Постоянная Планка – $\hbar = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Скорость света в вакууме – $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м}/\text{с}$

#### Физические величины

Наименование величины	Обозначение	Наименование единицы в СИ	Единица измерения
Время	$t$	секунда	с
Длина	$l$	метр	м
Масса	$m$	килограмм	кг
Скорость	$v$	метр в секунду	$\text{м}/\text{с}$
Условая скорость	$\omega$	радиан в секунду	$\text{рад}/\text{с}$
Частота вращения	$\nu$	секунда в минуту первой степени	$\text{с}^{-1}$
Ускорение	$a$	метр на секунду в квадрате	$\text{м}/\text{с}^2$
Сила	$F$	ньютон	Н
Плотность	$\rho$	килограмм на кубический метр	$\text{кг}/\text{м}^3$

Наименование величины	Обозначение	Наименование единицы в СИ	Единица измерения
Работа	$A$	дюйль	Дж
Количество теплоты	$Q$	дюйль	Дж
Мощность	$N$	ватт	Вт
Количество вещества	$v$	моль	моль
Молярная масса	$M$	грамм на моль	$\text{г}/\text{моль}$
Температура	$K$	kelвин	К
Электрический заряд	$q$	кулон	Кл
Разность потенциалов	$U$	вольт	В
Напряженность электрического поля	$E$	вольт на метр	$\text{В}/\text{м}$
Электрическая сила	$C$	фарад	Ф
Сила тока	$I$	ампер	А
Сопротивление проводника	$R$	ом	Ом
Магнитная индукция	$B$	тесла	Тл
Магнитный поток	$\Phi$	вебер	Вб
Индуктивность	$L$	генри	Ги
Частота колебаний	$v$	герц	Гц
Период колебаний	$T$	секунда	с
Длина волны	$\lambda$	метр	м
Оптическая сила	$D$	диоптрия	дptr
Поглощаемая доза излучения	$D$	грей	Гр
Эквивалентная доза излучения	$H$	зиверт	Зв

Закон равномерного движения	$x(t) = x_0 + v_x \cdot t$ , где $v_x = \text{const}$	
Закон равнускоренного движения	$x(t) = x_0 + v_{x_0} \cdot t + \frac{a_x \cdot t^2}{2}$ , где $a_x = \text{const}$	
Зависимость скорости от времени при равнускоренном движении	$v_x(t) = v_{x_0} + a_x \cdot t$	
Закон равномерного движения по окружности	$\varphi(t) = \varphi_0 + \omega \cdot t$ , где $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \text{const}$	
Законы движения при гармонических колебаниях حول оси X	$x(t) = x_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$ $a_x(t) = -x_m \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2})$	
Период колебаний математического маятника	$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$	
Период колебаний пружинного маятника	$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$	
Закон Ома для участка цепи	$U = I \cdot R$	
Сопротивление проводника цилиндрической формы из однородного вещества	$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$	
Работа постоянного тока в проводнике	$A = U \cdot I \cdot \Delta t$	
Закон Джоуля – Ленца	$Q = P \cdot R \cdot \Delta t$	
Электродвижущая сила	$E = \frac{A_{\text{нек}}}{q}$	
Закон Ома для полной замкнутой цепи	$I = \frac{E}{R+r}$	
Закон Фарделя для электролиза	$m = \frac{M \cdot \Delta q}{F \cdot z}$	
Модуль магнитной индукции в данной точке магнитного поля	$B = \frac{F_{\text{маг}}}{m \cdot v}$	
Закон Ампера	$F_A = I \cdot l \cdot B \cdot \sin\alpha$	
Вращающий момент, действующий на раму с током I в однородном магнитном поле с модулем индукции B	$M = I \cdot S \cdot B$	
Поток вектора магнитной индукции	$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha$	
Закон электромагнитной индукции Фарделя – Максвелла	$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$	
Индуктивность контура	$L = \frac{\Phi}{I}$	
Энергия магнитного поля, созданного контуром с индуктивностью L при силе тока I		
Энергия электромагнитной колебательной системы – колебательного контура		
Период собственных гармонических колебаний в колебательном контуре		
Действующие (амплитудные) значения переменного тока и напряжения		
Средняя мощность цепи переменного тока за период при сдвиге фаз $\varphi$ между напряжением и силой тока		
Длина волны		
$\lambda = c \cdot T$		
Оптическая сила линзы		
$D = \frac{1}{f} = \left( n_{\text{лин}} - 1 \right) \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$		
Формула тонкой линзы		
$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ , где a и b – соответственно расстояние от источника и изображения до главной плоскости линзы с учетом правила знаков		
Энергия покоя массовой частицы		
$E_0 = m \cdot c^2$		
Соотношение между импульсом и энергией массовой частицы		
$E^2 = p^2 \cdot c^2 + m^2 \cdot c^4$		
Энергия кванта излучения		
$E = h \cdot \nu$ , где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка		
Уравнение Эйнштейна для фотопроекта		
$h \cdot \nu = A_{\text{сп}} + \frac{m \cdot c^2}{2}$		
Соотношения неопределенностей Гейнсбергера		
Энергия излученного фотона при переходе состояния $E_2$ в состояние $E_1$ ( $E_2 > E_1$ )		
$h \cdot v_{\text{из}} = E_2 - E_1$		
Общее число нуклонов в ядре изотопа		
$A = Z + N$		
Дефект масс для атомного ядра		
$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_a$		
Энергия связи атомного ядра		
$E_s = \Delta m \cdot c^2$		
Закон радиоактивного распада		
$N(t) = N_0 \cdot 2^{t/T}$		
Правило смены при альфа-распаде		
$\frac{2}{3}\text{X} \rightarrow \frac{1}{3}\text{Y} + \frac{1}{3}\text{He}$		
Правило смены при электронном и позитронном бета-распадах соответственно		
$\frac{2}{3}\text{X} \rightarrow \frac{1}{3}\text{Y} + \frac{1}{3}\text{e} + \frac{1}{3}\bar{\nu}_e$		
$\frac{2}{3}\text{X} \rightarrow \frac{1}{3}\text{Y} + \frac{1}{3}\text{e} + \frac{1}{3}\nu_e$		

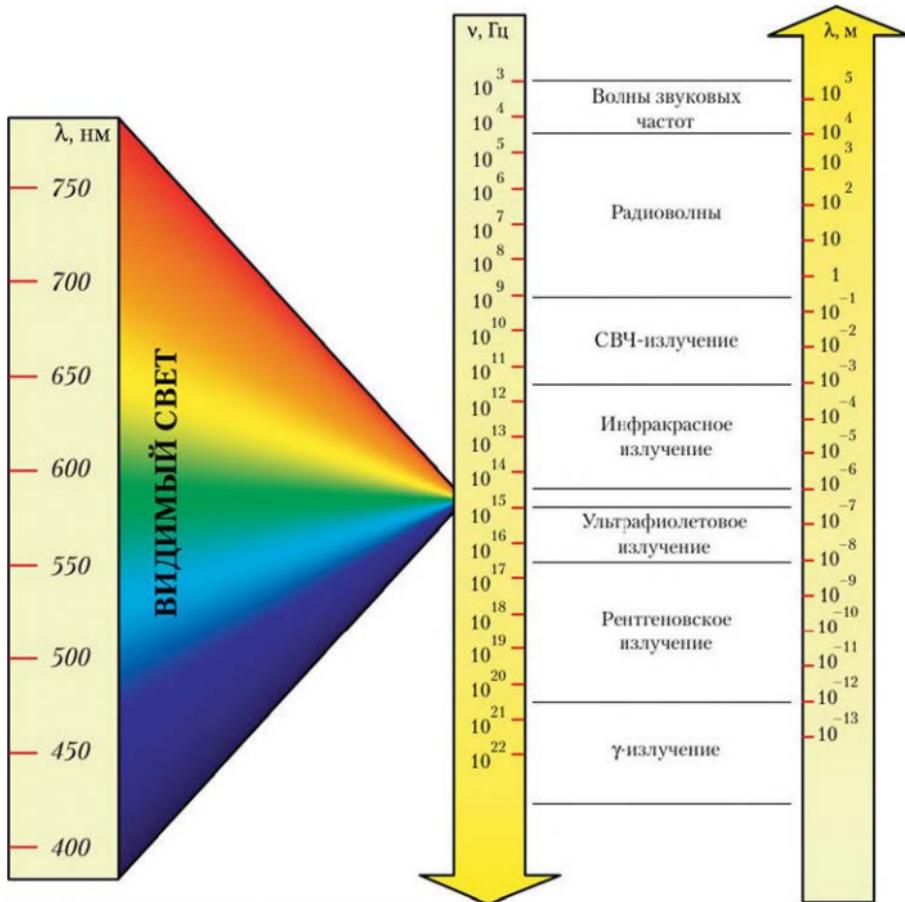


Рис. I. Спектр электромагнитных волн

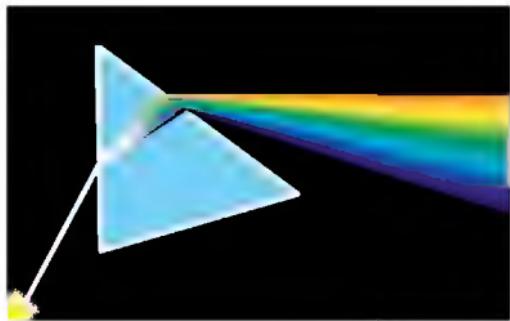


Рис. II. Разложение белого света в непрерывный спектр

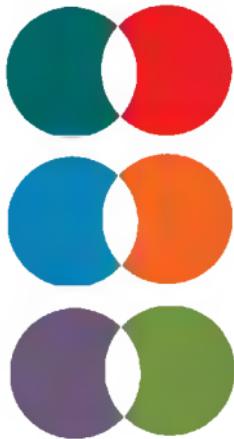


Рис. III. Дополнительные цвета



Рис. IV. Интерференция белого света



Рис. V. Интерференция на тонких пленках

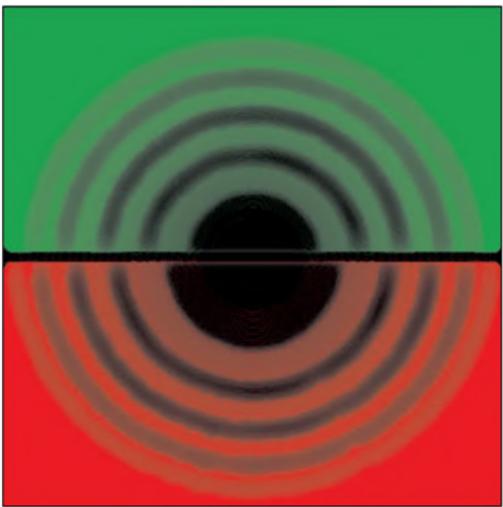


Рис. VI. Кольца Ньютона (сверху – в зелёном свете, снизу – в красном свете)

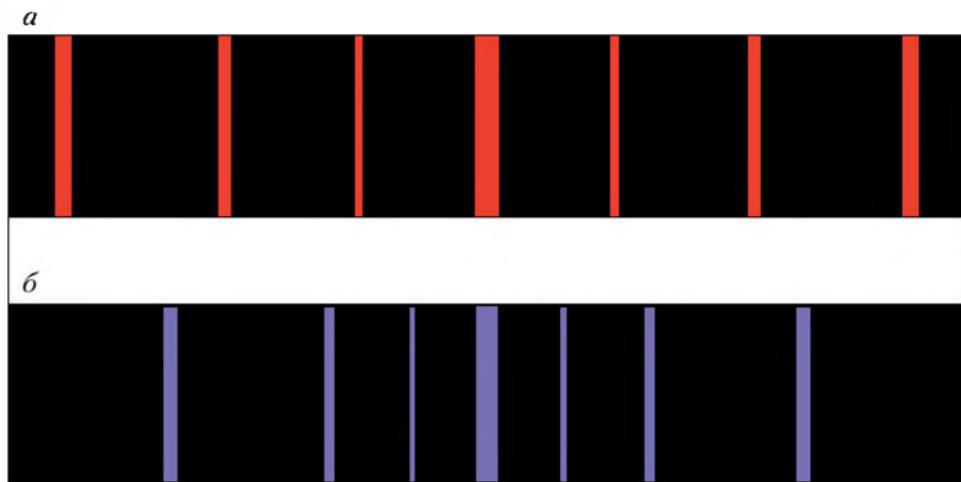


Рис. VII. Интерференционные максимумы на дифракционной решётке

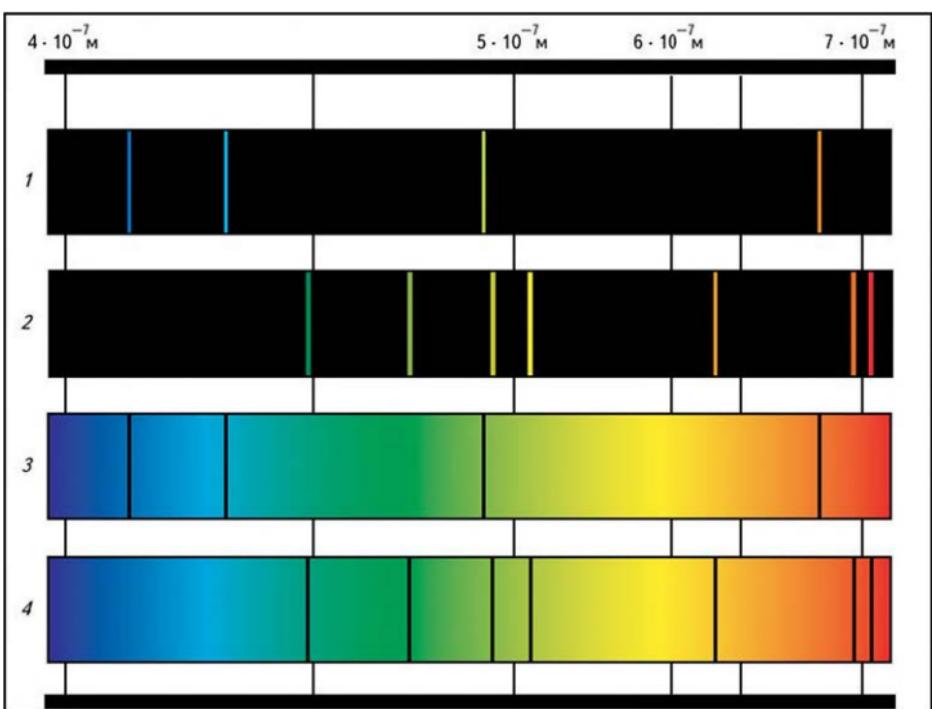


Рис. VIII. Спектры излучения (1, 2) и поглощения (3, 4) водорода (1, 3) и гелия (2, 4)

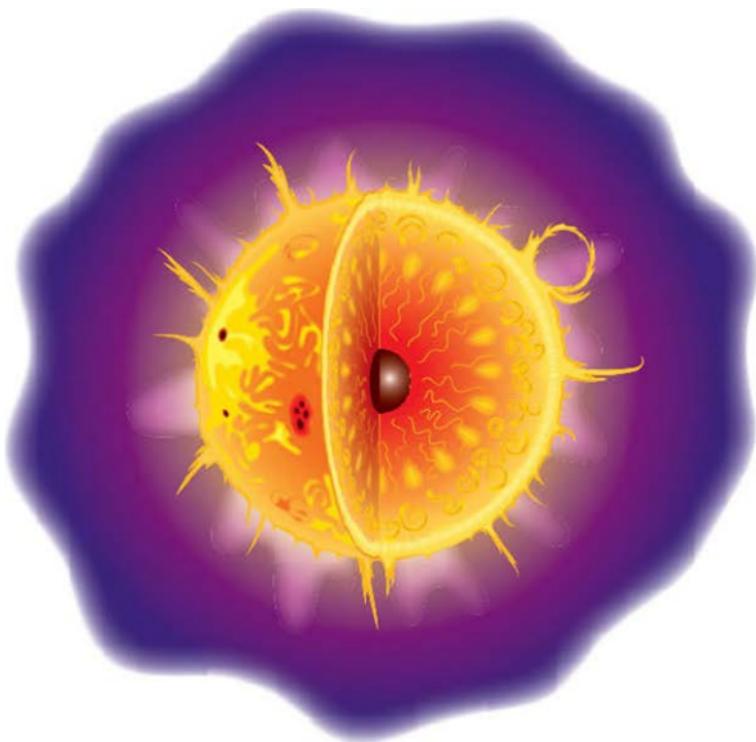


Рис. IX. Строение Солнца



Рис. X. Солнечная корона



Рис. XI. Меркурий



Рис. XII. Венера



Рис. XIII. Земля



Рис. XIV. Марс

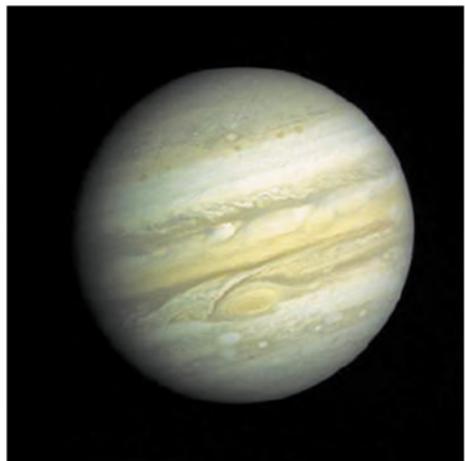


Рис. XV. Юпитер

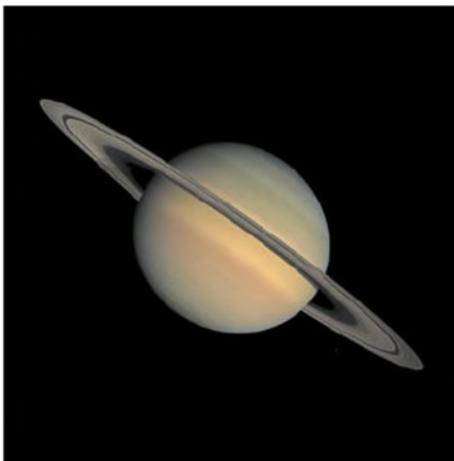


Рис. XVI. Сатурн



Рис. XVII. Уран

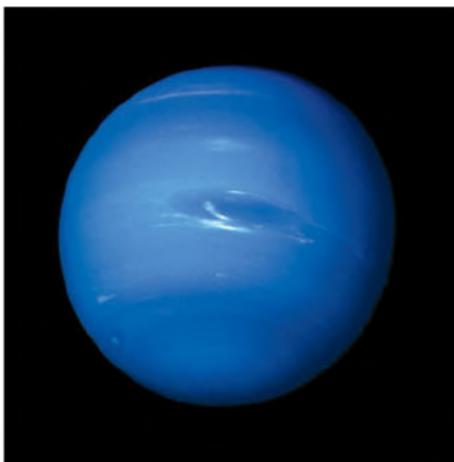


Рис. XVIII. Нептун

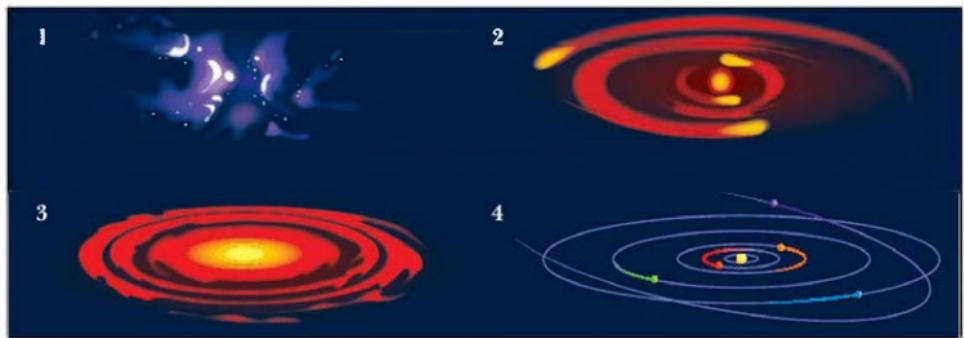


Рис. XIX. Образование Солнечной системы

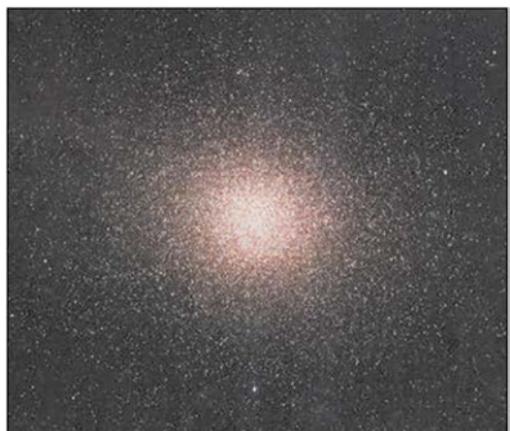


Рис. XX. Шаровое звёздное скопление



Рис. XXI. Млечный Путь